

DİELEKTRİK SIVISINA METAL TOZU KATKILI ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

Orhan Gülcan

TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi AŞ.,
Ankara
ogulcan@tai.com.tr

ÖZET

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme, elektriksel kıvılcımların malzeme aşındırılmasında kullanıldığı klasik elektro erozyon ile işlemenin özel bir türüdür. Toz katkılı elektro erozyon ile işleme, işlem performansını arttırmak için dielektrik sıvısına iletken metal tozu ilave edilmesi esasına dayanır. Bir karıştırıcıyla sürekli olarak karıştırılan dielektrik sıvısında, iş parçası ile elektrot arasındaki çalışma boşluğunda hareket eden iletken metal tozları, akımın elektrottan iş parçasına iletilmesinde kullanılırlar. Bu metal tozları sayesinde daha hızlı kıvılcımlama, daha yüksek iş parçası aşındırma oranı ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilir. Bu çalışmada, bu yöntem hakkında literatürde yapılan çalışmalar sunulacak ve bundan sonra yapılabilecek muhtemel uygulamalardan bahsedilecektir.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyon, metal tozu, dielektrik sıvısı

Electrode Discharge Machining By Adding Metal Powder to Dielectric Fluid

ABSTRACT

Powder mixed electrode discharge machining is a special type of classical electrode discharge machining in which electrical sparks are used for material removal. Powder mixed electrode discharge machining is based on the idea of adding conductive metal powders to dielectric fluid for enhancing process performance. In a continuously stirred dielectric fluid by a stirrer, conductive metal powders that move in the working gap between electrode and work piece are used for transferring current from electrode to work piece. Due to these metal powders, faster sparking, more material removal rate and better surface finish can be obtained. In this paper, a review of research work is presented and possible future implementation of this process is given.

Keywords: Electrode discharge, metal powder, dielectric fluid

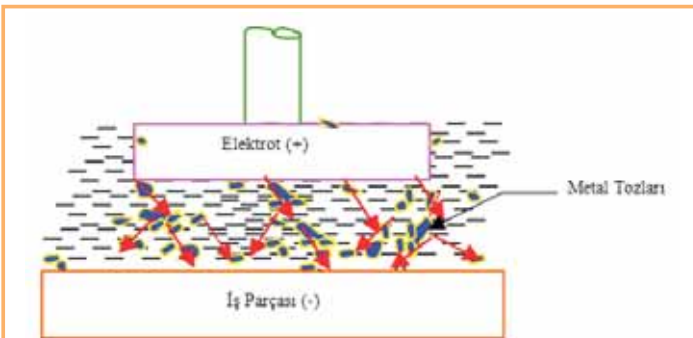
Geliş tarihi : 30.09.2011
Kabul tarihi : 23.12.2011

1. GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme alışılmamış imal usulleri arasında en popüler olan yöntemdir. Bu yöntemle elektrik iletken olan her malzeme şekli, direnci ve sertliğinden bağımsız olarak işlenebilir. Bu yöntemde iş parçası ve elektrot birbirine temas etmediği için işleme sırasında mekanik gerilim, titreşim vb. problemler görülmez [1]. İlk elektro erozyon ile işleme çalışmaları İkinci Dünya Savaşı sırasında Technical Institute of Moscow'da B.R. ve N.I. Lazarenko tarafından yapılmıştır [2]. Lazarenkolar tarafından RC güç kaynağı kullanılarak geliştirilen EEİ sisteminde metalin yüzeyinde buharlaşan malzeme ile zor işlenen metallerin kontrollü işleme yöntemi başarılı bir şekilde denenmiştir. Yapılan bu çalışma daha sonra B.R. Lazarenko tarafından 1943 yılında "To invert the effect of wear on electric power contacts" isimli makalede açıklanmıştır [3]. Fakat elektro erozyon ile işleme mantığı 1770'lere götürülebilir. Bu yıllarda elektriksel kıvılcımların aşındırma etkisi olduğu İngiliz kimyacı Joseph Priestly tarafından keşfedilmiştir. 1950'lere kadar fazla bilgi sahibi olunamayan bu teknoloji ABD'de bu yıllardan itibaren önem kazanmaya başlamıştır. 1960'ların sonunda elektronik kontrol sistemlerinin gelişmesiyle bu yöntem güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak kabul edilmiş ve EEİ tezgâhları üretilmeye başlanmıştır. 1968 yılında ise Mukoyama, uygulanan enerji ile iş parçası yüzeyinde oluşan çukurların şekli arasındaki ilişkiyi analiz etmek için bir ısı iletim modeli kullanmıştır [4]. 1980'li yıllarda ise CNC EEİ tezgâhı Amerika'da tasarlanarak tanıtılmıştır. Bu tarihten itibaren yapılan çalışmalar hız kazanmış ve günümüzde özellikle kalıp üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [5, 6].

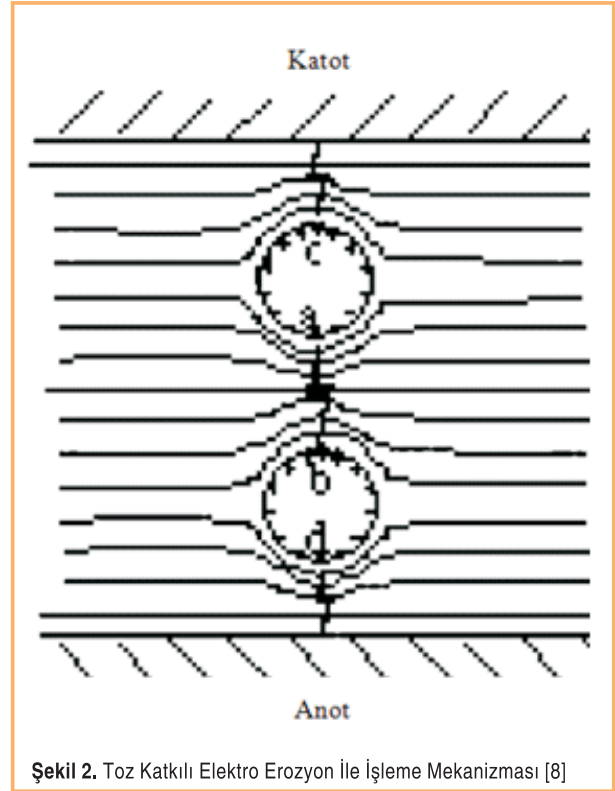
2. TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME

Elektro erozyon ile işlemenin 1940'lı yıllarda kullanılmaya başlanmasından bu yana işleme performansını arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunlardan biri dielektrik sıvısına metal tozu eklenmesidir. Bu işleme toz katkılı elektro erozyon ile işleme denilmektedir. Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede metal tozlarının dielektrik sıvısına katılmasıyla

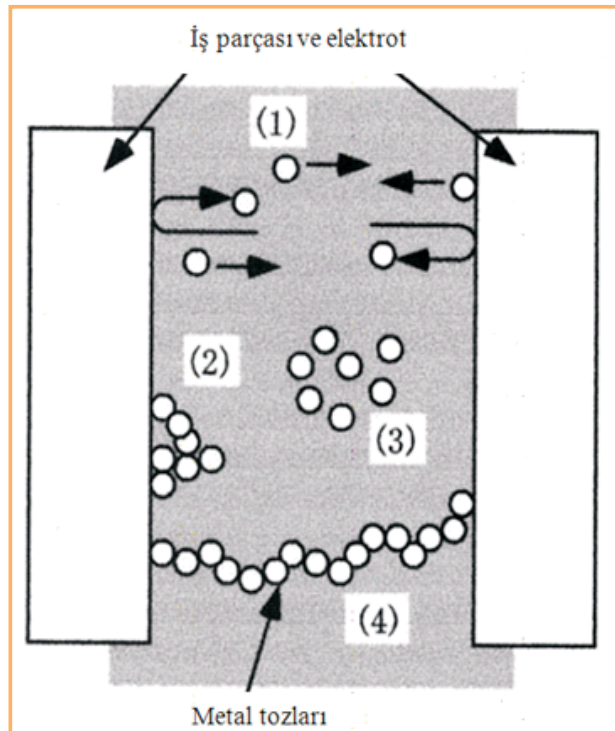


Şekil 1. Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşlemede Metal Tozlarının Hareketi [1]

dielektrik sıvısının yalıtkanlık direnci düşer, iş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcım boşluğu artar. Bu sayede işleme



Şekil 2. Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşleme Mekanizması [8]



Şekil 3. Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşlemede Metal Tozlarının Hareketleri [9]

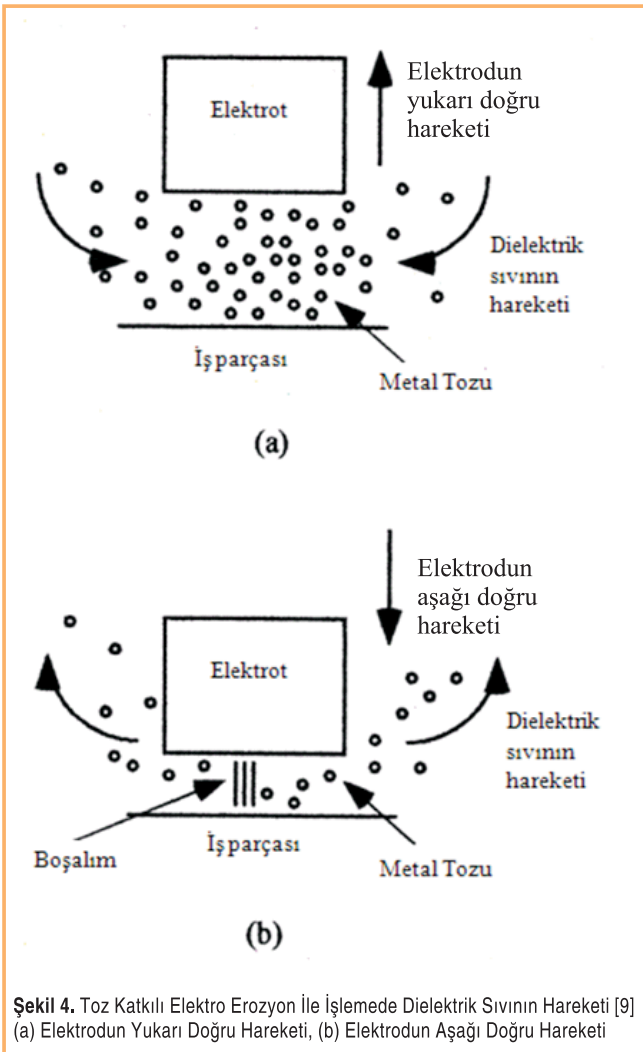
daha düzenli bir hâl alır ve sonuçta daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir. Yapılan araştırmalar dielektrik sıvısına metal tozu karıştırılmasının malzeme aşındırma oranını arttırdığını, yüzey pürüzlülüğünü azalttığını, paslanma ve aşınma direncini arttırdığını göstermiştir [1, 7].

2.1 Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşleme Mekanizması

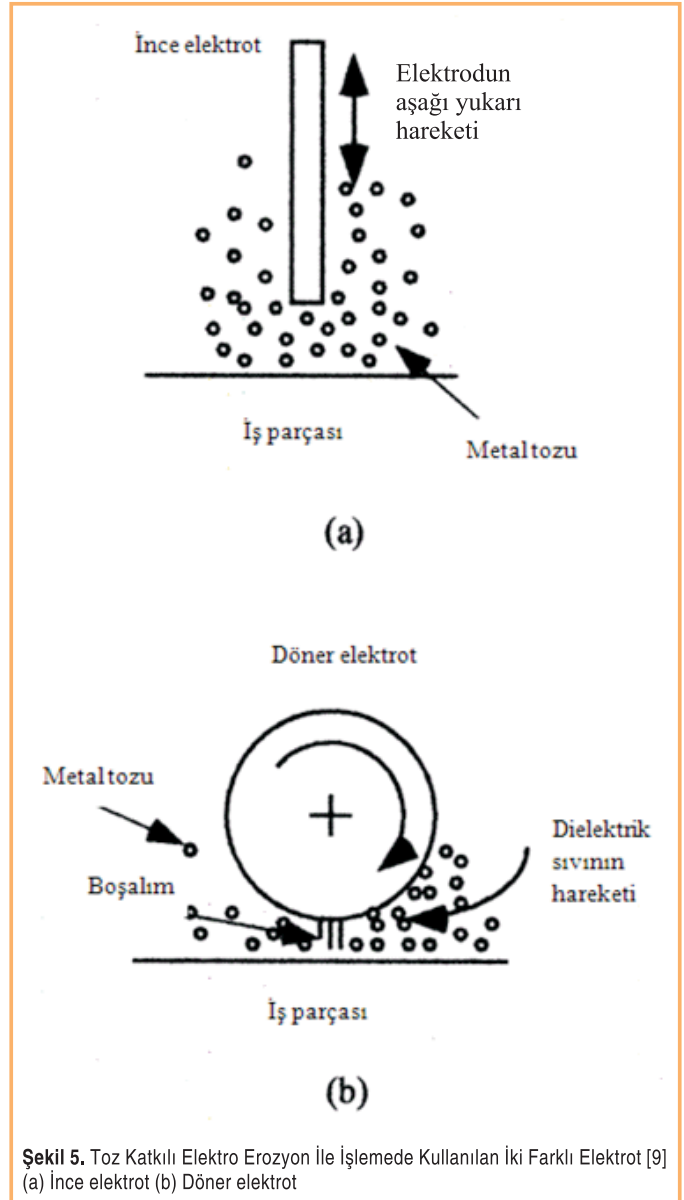
Toz katkılı elektro erozyon ile işleme sırasında uygun bir metal tozu dielektrik sıvısına ya aynı tankta, ya da ayrı bir tankta ilave edilir. Toz katkılı dielektrik sıvının daha iyi dolaşımı için pervane ve pompadan oluşan bir sistem dielektrik sıvısını sürekli karıştırır. Elektrot ile iş parçası arasında 80-320 V değerinde voltaj uygulandığı zaman ara boşlukta bulunan metal tozları enerji yüklenir ve zikzaklar çizerek hareket eder (Şekil 1). Birbirlerine yaklaşan metal tozları bir süre sonra zincir şeklinde hareket etmeye başlarlar ve elektrot ile iş parçası arasında akımın iletilmesinde aktif görev alırlar. Bu sayede daha hızlı kıvılcımlama meydana gelir ve malzeme aşındırma oranı artar. Aynı zamanda bu metal tozları iş parçası ile elektrot arasında oluşan plazma

kanalının da büyümesine ve genişlemesine sebep olurlar. Yine metal tozları kıvılcım yoğunluğunun düşmesine sebep olurlar ve bu sayede daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilmektedir [1].

Detaylı bir şekilde açıklayacak olursak; boşalım boşluğunda bir sürü elektrik iletken metal tozunun varlığı burada meydana gelen elektriksel alanların sapsmasına yol açar. Bir süre sonra uygulanan voltajın etkisiyle metal tozlarının üst ve altında pozitif ve negatif yükler oluşur. Elektrot veya iş parçasına yakın olan tozlar diğerlerine göre daha fazla elektriksel yük yoğunluğuna sahiptir. Daha sonra Şekil 2'de görüldüğü gibi birbirine yakın olan iki metal tozunun a ve b gibi aralarındaki elektriksel alan yoğunluğu en yüksek olan kısımda meydana gelen etkileşim sonucunda kısa devre oluşur ve elektriksel alan dağılımı değişir. Bunun sonucunda c ve d noktalarında



Şekil 4. Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşlemede Dielektrik Sıvının Hareketi [9] (a) Elektrodun Yukarı Doğru Hareketi, (b) Elektrodun Aşağı Doğru Hareketi



Şekil 5. Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşlemede Kullanılan İki Farklı Elektrot [9] (a) İnce elektrot (b) Döner elektrot

daha fazla metal tozu toplanmaya başlar ve bu metal tozlarıyla diğerleri arasındaki etkileşim sonucunda sürekli bir boşalım akımı geçişi oluşur. İş parçası ile elektrot arasındaki yüzlerce metal tozu bu sayede iş parçasından malzeme aşındırmaya sebep olacak boşalım akımını meydana getirir. Daha genişlemiş boşalım boşluğu da bu sayede oluşur [8].

Toz katkılı elektro erozyonla işlemede iş parçası ile elektrot arasındaki tozların dört farklı hareketi vardır. Bunlar: karşılıklı hareket (1), iş parçası veya elektroda yapışma (2), salkım şeklinde hareketsiz durma (3), zincir şeklinde hareketsiz durma (4). Şekil 3'te bu hareketler gösterilmiştir [9].

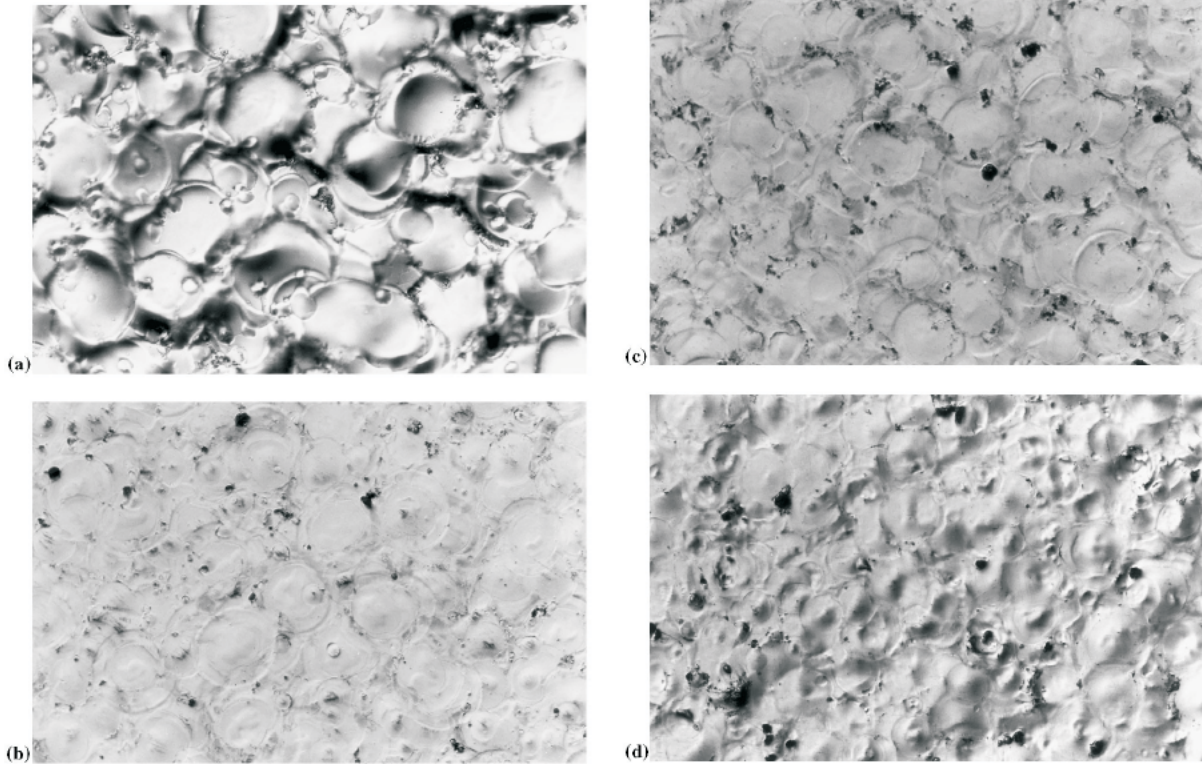
Şekil 4'te gösterildiği gibi işleme sırasında elektrot yukarı doğru hareket edince, elektrot ile iş parçası arasındaki boşluğa dielektrik sıvı ve metal tozları dolar. Fakat aradaki boşluk fazla olduğu için boşalım nadiren görülür. Elektrot aşağı doğru hareket edince ise boşalım aralığı azaldığı için boşalım daha fazla olur; ama dielektrik sıvı ile birlikte metal tozları da aradaki boşluktan uzaklaşır. İyi bir boşalım ve malzeme aşındırma için iş parçası ile elektrot arasındaki boşluktaki metal tozu yoğunluğu mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. Bunu sağlamanın birçok yönteminden ikisi (ince elektrot ve döner elektrot kullanımı) Şekil 5'te gösterilmiştir [9].

2.2 Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşlemede Kullanılan Tozlar

Literatürde toz katkılı elektro erozyon ile işlemede dielektrik sıvısına eklenen metal tozlarından bazıları şunlardır: Alüminyum, grafit, krom, silikon, bakır, silikon karbür, molibden sülfat [5].

Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede kullanılan metal tozların çapları, tipi ve konsantrasyonu işleme performansını etkileyen ana etkenlerdir. Metal tozu çapı 15 µm'den az olmalıdır. Daha büyük çaptaki metal tozlarının kullanımı boşalım boşluğunu artırmakla birlikte, malzeme aşındırma oranını düşürür ve yüzey kalitesini azaltır. Çoğu durumda 30 g/l metal tozu konsantrasyonu verimli bir işleme için yeterlidir. Alüminyum tozları yüksek malzeme aşındırma oranına, silikon ve grafit tozları ise yüzeyde daha az derin çukurlar oluşmasına ve dolayısıyla daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesine yol açar [10].

Şekil 6'da farklı metal tozlarının dielektrik sıvısına katılmasıyla yapılan elektro erozyon işleminde elde edilen yüzey profilleri görülmektedir. Buna göre normal elektro erozyon ile işlemede elde edilen yüzeylerdeki çukurlar dalgalı bir yapıya sahiptir ve bu yüzden yüzey mat bir görünüm arz eder. Silikon tozu katkılı işlemede elde edilen yüzeyler, grafit tozu katkılı işlemede elde



Şekil 6. Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşlemede Elde Edilen Yüzeyler; (a) Metal Tozu Katkısız, (b) Grafit Tozu Katkılı, (c) Silikon Tozu Katkılı, (d) Molibden Sülfat Tozu Katkılı [11]

edilen yüzeylere göre daha geniş çukurlara sahiptir. Ama bu çukurların derinlikleri metal tozu katkısız işlemlerde elde edilen yüzeylere göre daha azdır. Molibden sülfat tozu katkılı işlemlerde ise yüzeylerde oluşan çukurlar, dalgalı bir yapıya sahiptir ve bu yüzden yüzey donuk görünür [11].

3. TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

İletken toz metallerin dielektrik sıvısına katılmasıyla daha iyi işleme performansı ve yüzey kalitesi elde etmek için çalışmalar yapılmıştır.

Erden ve Bilgin (1980) pirinç çelik ve bakır çelik çiftlerinin elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına farklı tozların (bakır, alüminyum, demir ve karbon) karıştırılmasının işlem performansına etkilerini incelemişlerdir. Bu tozların konsantrasyonu arttıkça malzeme aşınma oranının arttığını, fakat belli bir konsantrasyondan sonra, elektrot ile iş parçası arasındaki boşlukta fazla miktarda toz birikmesinin kısa devre oluşumuna yol açmasından dolayı işleminin düzensiz olduğunu belirtmişlerdir [12].

Jeswani (1981), dielektrik sıvısına grafit tozu eklenmesinin malzeme aşındırma oranını % 60 oranında arttırdığını, elektrot aşınma oranını ise % 15 oranında azalttığını belirtmiştir [13].

1983 yılında Koshy ve ark. dielektrik sıvısına katılan farklı tozların, işlem sırasında hidrokarbon bazlı dielektrik sıvısından ayrılan karbon atomları ile birleşerek iş parçası yüzeyinde metal karbür bir tabaka oluşturduğunu incelemişlerdir [14].

Narumiya ve ark. (1989), uygun işleme koşullarında dielektrik sıvısına alüminyum ve grafit tozu eklenmesiyle elde edilen yüzey pürüzlülüğünün, silikon tozu eklenmesiyle elde edilene göre çok düşük olduğunu belirtmişlerdir [15].

Mohri ve ark. (1991) H-13 kalıp çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına silikon tozu eklenmesinin işlem performansı üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında, 2µm yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzey elde etmişlerdir [16].

Yan ve Chen (1994), SKD11 ve Ti-6Al-4V alaşımli iş parçalarının elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına alüminyum ve silikon karbür tozu ilave edilmesinin etkisini inceledikleri çalışmalarında, malzeme aşındırma oranında ciddi bir artış sağlamışlardır. Ama toz ilavesiz işleme göre daha kötü yüzeyler elde etmişlerdir [17, 18].

Rajurkar ve Nooka (1994) dielektrik sıvısına metal tozu ilave edilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, metal tozu ilavesinin boşalım boşluğunu azalttığını belirtmişlerdir [19].

Ming ve ark. (1995), dielektrik sıvısına iletken, inorganik

oksit tanecikleri karıştırılmasıyla daha iyi yüzey pürüzlülüğü, daha düşük elektrot aşınma oranı ve daha yüksek malzeme aşındırma oranı elde etmişlerdir [20].

Yu ve ark. (1996), tungsten karbürün elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına alüminyum tozu ilavesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında, metal tozu ilavesiz işleme göre daha geniş boşalım boşluğu ve daha yüksek malzeme aşındırma oranı tespit etmişlerdir [21].

Okada ve ark. (2000), dielektrik sıvısına karbon tozu katılmasının iş parçası yüzeyinde karbür tabaka oluşturduğunu incelemiştir [22].

Chow ve ark. (2000), Ti-6Al-4V iş parçasının bakır elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına alüminyum ve silikon karbür tozu ilave edilmesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında, dielektrik sıvısı olarak saf gaz yağı kullanıldığı duruma göre metal tozu ilave edilmiş işlemlerde malzeme aşındırma oranı ve elektrot aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. SiC tozu ilavesi Al tozu ilavesine göre malzeme aşındırma oranı ve elektrot aşınma oranını daha fazla arttırmıştır. Dielektrik sıvısına metal tozu ilavesi iş parçası ile elektrot arasındaki boşluğu arttırmış ve boşalım enerjisinin yayılmasını sağlayarak daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesini sağlamıştır. Al tozu ilave edilmiş işlemlerde en iyi yüzey kalitesi sağlanmıştır [23].

Uno ve ark. (2001) dielektrik sıvısına nikel ve grafit tozu katılmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında, iki farklı deney yapmışlardır. Öncelikle alüminyum bronz iş parçasının 15 mm çapında bakır elektrotlarla işlenmesinde gaz yağına 0-40 g/l arası yoğunluklarda 5 µm'den küçük çaplarda nikel tozu karıştırmışlardır. Deney sonucunda yüzeyde nikel tabakasının oluştuğunu ve bu tabakanın kalınlığının nikel tozu konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Metal tozu katkısız işlemeye göre daha sert ve daha iyi yüzey kalitesine sahip yüzey elde edilmiştir. Daha sonra SKD61 kalıp çeliğinin 15 mm çapında titanyum elektrotlarla işlenmesinde dielektrik sıvısına 0-15 g/l arasında değişen yoğunluklarda 30 µm'den küçük çaplarda karbon tozu ilave etmişlerdir. Bu sefer yüzeyde sert bir titanyum karbür tabakası oluşmuştur ve yüzey kalitesi metal tozu ilavesiz işleme göre daha iyidir. Araştırmacılar her iki durumda da kullanılacak olan kalıbın paslanmaya karşı direncini arttırmak ve sertleştirmek için dielektrik sıvısına metal tozu ilave edilmesinin uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [24].

Tzeng ve Lee (2001) yaptıkları çalışmada, dielektrik sıvısı olarak su ve metal tozu karışımı kullanıldığı zaman elektrot aşınma oranının ciddi oranda düştüğünü belirtmişlerdir [25].

Furutani ve ark. (2001), AISI 1049 iş parçasının elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına titanyum tozları katılmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında, iş parçası yüzeyinde TiC tabaka elde etmişlerdir [9].

Tani ve ark. (2001), yalıtkan seramiklerin elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına farklı metal tozlarının ilave edilmesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında, her ne kadar malzeme aşındırma oranında ciddi bir artış tespit etseler de yüzey pürüzlülüğünü fazla değiştirememişlerdir [26].

Rozenek ve ark. (2001), elektro erozyon ile işlemede dielektrik sıvısı olarak gazyağı ve farklı konsantrasyonlarda metal tozu ilaveli iyonlaşmamış suyun kullanımının farklarını inceledikleri çalışmalarında, metal tozu ilaveli işlemlerde hem malzeme aşındırma oranının hem de elektrot aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir [27].

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme çok iyi yüzey kalitesine yol açtığı için daha çok son işlemede kullanılmaktadır. Zhao ve ark. (2002) yaptıkları deneylerde; boşalım boşluğunda çok fazla boşalım enerjisinin yok olmasının ve iş parçası üzerinde eriyen malzemenin süpürülmesi için gerekli olan kuvvetin daha düşük olmasının kaba işlemede düşük verimliliğe yol açtığını göstermişlerdir [8].

Furutani ve Shimizu (2003) dielektrik sıvısına molibden sülfat tozu ilave edilmesiyle iş parçası yüzeyinde oluşan tabaka sayesinde, uzay ortamında yüksek vakum uygulamalarında kullanılabilir parçalar üretmişlerdir [28].

Kozak ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada; dielektrik sıvısına metal tozu ilavesinin elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğünü ciddi oranda azalttığını belirtmişlerdir [29].

Peças ve Henriques (2003), AISI H13 iş parçasının elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına 2 g/l silikon tozları katılmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında; silikon tozu ilavesinin yüzey pürüzlülüğünü ciddi oranda azalttığını belirtmişlerdir [30].

Yan ve Chen (2003), dielektrik sıvısına alüminyum tozu katılmasının etkisini inceledikleri çalışmalarında, malzeme aşındırma oranının arttığını; fakat daha kötü yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir [31].

Dewes ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada, yarı sinterlenmiş toz metal elektrotlar kullanarak veya dielektrik sıvısına metal tozu ekleyerek iş parçası yüzeyinde istenilen malzemede bir tabaka oluşturulabileceğini belirtmişlerdir. Elde edilen tabakanın, iş parçasının sertliğinden daha yüksek bir sertlik değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir [32].

Klocke ve ark. (2004), Inconel 718 iş parçasının elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına alüminyum ve silikon tozları katılmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında; alüminyum tozu ilaveli işlemlerde en yüksek malzeme aşındırma oranı elde etmişlerdir. Silikon tozu ilaveli işlemlerde; iş parçası üzerinde oluşan beyaz tabakanın altında gri bir tabaka gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak silikonun yüksek yayılma ısısı gösterilmiştir [33].

Özerkan ve Çoğun (2005)'un, SAE 1040 çeliğinin bakır

elektrotlar kullanılarak elektro erozyon ile işlenmesinde, gazyağı dielektrik sıvısına 5,10 ve 15 g/l grafit ve borik asit (H3BO3) tozu ilavesinin işlem performansına etkilerini inceledikleri çalışmalarında; en iyi yüzey pürüzlülüğü değeri grafit tozu ilavesiyle elde edilmiştir. Bunun sebebi grafit tozlu işlemlerde; işleme aralığında oluşan toz köprülerinin boşalım süresince daha fazla sayıda boşalım kanalı oluşturarak, H3BO3 tozlu ve tozsuz dielektrik sıvıya göre aynı boşalım enerjisini birim işleme alanına daha düşük yoğunlukta iletmesidir. Grafit tozlu deneylerde toz konsantrasyonun ve vurum süresinin artmasıyla saf gazyağı ve H3BO3 tozlu deneylere nazaran çok daha yüksek işleme hızı değerlerine ulaşılmıştır. Grafit tozu karışımı deneylerde artan toz konsantrasyonu ve düşük vurum süresinde saf gazyağı ve H3BO3 tozu ile yapılan deneylere göre yüksek elektrot aşınma hızı elde edilmiştir. Grafit tozlu deneylerde vurum süresinin artışıyla saf gazyağı ve H3BO3 tozlu deneylere göre bağlı aşınma değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür. Grafit tozunun kullanıldığı deneylerde H3BO3 tozuna göre daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Bu sonuç karbonun yüzey tabakasında martenzit oluşumunu artırmasından dolayıdır [34].

Rival (2005), titanyum alaşımlarının tungsten elektrotlar kullanılarak elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına SiC tozu katılmasının etkisini incelediği çalışmada, 2 g/l'ye kadar olan konsantrasyonlarda iyi yüzey kalitesi elde edildiğini, ama özellikle 6 g/l'den yüksek konsantrasyonlarda yüzey kalitesinin bozulduğunu belirtmiştir. Toz konsantrasyonu arttıkça yüzeyde görülen mikro çatlakların ciddi oranda azaldığını ifade etmiştir [35].

Yih-fong ve Fu-chen (2005), SKD-11 iş parçasının bakır elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına alüminyum, krom, bakır ve silikon karbür tozu ilave edilmesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında şu sonuçlara ulaşılmıştır: Yüzey pürüzlülüğü ve işleme sonrasında yüzeyde oluşan tabakaya en çok etki eden metal tozu özellikleri tane boyutu, tane konsantrasyonu, tane yoğunluğu, elektriksel direnç ve termal iletkenliktir. Alüminyum tozları en iyi yüzey kalitesine yol açmıştır, daha sonra sırasıyla krom, silikon karbür ve bakır tozları gelmektedir. Metal tozları eklendikçe işleme sonrasında yüzeyde oluşan tabaka kalınlığı azalmaktadır. Alüminyum tozları tabaka kalınlığını en fazla azaltmaktadır, daha sonra sırasıyla krom, silikon karbür ve bakır tozları gelmektedir [36].

Kansal ve ark. (2005), EN-31 iş çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına farklı yoğunluklarda 20-30 µm silikon tozu ilave edilmesinin etkisini inceledikleri çalışmalarında, Si tozu yoğunluğunun artmasıyla malzeme aşındırma oranının arttığını belirtmişlerdir. Regresyon analizi ile farklı parametrelerin toz katkılı elektro erozyon ile işleme olan etkilerini formüle etmişlerdir [37].

Kansal ve ark. (2007), ise silikon tozlarını dielektrik sıvısına ekleyerek yaptıkları deneylerde; silikon tozlarının dielektrik sıvısının yalıtkan direncini azalttığını ve elektrot ile iş parçası arasındaki kıvılcım mesafesini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu sayede iş parçasından malzeme kaldırma oranının ciddi oranda arttığı görülmüştür [38].

Kolahan ve Bironro (2008) genetik algoritma kullanarak toz katkılı elektro erozyon ile işleme mekanizmasını optimize etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla işlem değişkenleri olarak dielektrik sıvısına kattıkları alüminyum tozlarının çaplarını, karıştırma konsantrasyonunu, boşalım akımını ve vuruş süresini almışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarını ikinci derece regresyon analizi kullanarak formülleştirmiş, daha sonra bu formülleri/denklemleri ve işlem değişkenlerini kullanarak, genetik algoritma operatörleri (seçme, çaprazlama, mutasyon vs.) yardımıyla malzeme aşınma oranı ve elektrot aşınma oranını minimize edecek işlem parametrelerini optimize etmişlerdir. İşlem sonucunda birçok parametrenin %1 hata ile tahmin edilebileceğini göstermişlerdir [39].

Peças ve Henriques (2008) dielektrik sıvısına 2 g/l silikon tozu katarak yaptıkları deneylerde, metal tozu katılarak yapılan işlemlerde, metal tozsuz işlemlere göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü, daha az derin ve daha düşük çapta yüzey çukurları ve daha az derin beyaz katman elde edildiğini belirtmişlerdir [10].

Chow ve ark. (2008) titanyum alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde saf su ve saf su + metal tozunun dielektrik sıvısı olarak kullanıldığı durumları karşılaştırmışlardır. Dielektrik sıvısı olarak saf su kullanıldığında daha yüksek malzeme aşınma oranı ve daha az elektrot aşınma oranı elde edilmiştir. Saf su ve metal tozunun dielektrik sıvısı olarak kullanıldığı deneylerde ise daha az çapak oluşumu gözlemlenmiştir [7].

Kansal ve ark. (2008) toz katkılı elektro erozyon ile işlemeyi sonlu elemanlar analizi yöntemiyle termal olarak modellemişlerdir. Elde ettikleri modeli deneysel sonuçlarla karşılaştırıp deney sonuçlarıyla teorik sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Deneylerde iş parçası olarak AISID2 iş çeliğini, elektrot olarak 15 mm çapında bakır elektrotları, dielektrik sıvısı olarak içerisine 30 µm boyutunda, 2 g/l yoğunlukta grafit tozu ilaveli gaz yağı kullanmışlardır [40].

Singh ve ark. (2008) 6061 Al/Al2O3P/20p iş parçasının bakır elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesinde işlem parametrelerinin etkisini inceledikleri çalışmalarında, dielektrik sıvısına silikon karbür tozları ilave etmişlerdir. Tanecik boyutu, tanecik yoğunluğu ve boşalım akımının yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametreler olduğunu belirtmişlerdir [41].

Mahdi ve ark. (2009) borosilikat camın çelik elektrotlar

kullanılarak elektro erozyon ile işlenebilirliğini inceledikleri çalışmalarında, musluk suyuna 40 g/l grafit tozu eklemişlerdir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (0.003-0.012µm), daha önceden yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, yazarlar dielektrik sıvısına grafit tozu katılmasının, alüminyum veya silisyum tozu katılmasıyla edilen yüzey kalitesinden daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir [42].

Prabhu ve Vinayagam (2009) AISI-D2 takım çeliğinin grafit elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesini inceledikleri çalışmalarında, dielektrik sıvısına karbon nanotüplerini ilave etmişlerdir. Karbon nanotüplü dielektrik sıvısı kullanıldığında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, dielektrik sıvısı olarak saf gaz yağı kullanılarak elde edilen değerlerden en az %50 az olduğunu göstermişlerdir [43].

Furutani ve ark. (2009) dielektrik sıvısına titanyum tozu ilave edilmesinin işlem performansı üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında, işlem sırasında dielektrik sıvısından ayrılan karbon atomları ile titanyum tozlarının birleştiğini ve iş parçası yüzeyinde titanyum karbür tabakası oluşturduğunu belirtmişlerdir [44].

Prihandana ve ark. (2009) elektro erozyon ile işlemede dielektrik sıvısına bakır, silikon karbür ve molibden sülfat tozları eklenmesinin işlem performansına etkilerini inceledikleri çalışmalarında, bakır tozu eklenmesiyle en çok malzeme aşınma oranı elde edildiğini, daha sonra sırasıyla silikon karbür ve molibden sülfatın geldiğini belirtmişlerdir. Bunun sebebi bakırın diğer ikisine göre daha yüksek yoğunluğa ve elektriksel iletkenliğe sahip olmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü açısından ise, en iyi yüzey kalitesi molibden sülfat tozu eklenmesiyle elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla bakır ve silikon karbür tozları gelmektedir. Bunun sebebi molibden sülfat tozunun boyutunun diğer ikisine göre daha küçük olmasıdır. Dolayısıyla tanecik büyüklüğü arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [45].

Prihandana ve ark. (2009) bakır, bakır tungsten ve gümüş tungsten iş parçalarının elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına molibden sülfat tozu katılmasının ve dielektrik sıvı tankının titreştirilmesinin ortaklaşa etkisini inceledikleri çalışmalarında, molibden sülfat (sırasıyla 2 ve 5 g/l) katkısının boşalım frekansını ve dolayısıyla malzeme aşındırma oranını arttırdığını belirtmişlerdir. Yine molibden sülfat katkısı akım yollarının yüzeyin tamamına yayılmasına yardımcı olmuştur. Bu sayede daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir [46].

Wu ve ark. (2009) SKD 61 çeliğinin 8 mm çapında bakır elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesinde gaz yağı olarak kullanılan dielektrik sıvısına Span 20 ve Span 80 adlarında 10-100 g/l aralığında değişen yoğunluklarda yüzey etkin madde (surfactant) ilave etmişlerdir. Span 20'den 30 g/l ilave edilince malzeme aşındırma oranının %40 arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel parametreler uygun bir şekilde seçildiğinde

malzeme aşındırma oranının %85'e varan oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Malzeme aşındırma oranının yüksek olduğu durumlarda bile yüzey pürüzlülüğünün kötü olmadığı, dengesiz boşalım durumlarıyla çok fazla karşılaşmadığı ve bundan dolayı yüzeyde oluşan tabaka kalınlığının saf gazyağı kullanıldığında elde edilen tabaka kalınlığından az olduğu belirtilmiştir. Elektriksel iletkenliği arttırmak için yüzey etkin maddenin kullanılabilmesi belirtilmiştir [47].

Chen ve Lin (2009) Al-Zn-Mg iş parçasının bakır elektrotlarla elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına 60 g/l yoğunlukta TiC ilave edilmesinin etkisini inceledikleri çalışmalarında, iş parçası, yüzeyinde TiC tabaka elde etmişlerdir. Boşalım akımı ve vuruş süresi arttıkça malzeme aşındırma oranı ve elektrot aşınma oranının arttığını; fakat yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini belirtmişlerdir [48].

Paramjit Singh ve ark. (2010) Hastelloy'un elektro erozyon ile işlenmesinde elektriksel parametrelerin işlem performansına etkilerini inceledikleri çalışmalarında, dielektrik sıvısına 30g/5l oranında alüminyum tozu ilave etmişlerdir. Yapılan çalışmaya göre boşalım akımı ve voltaj arttıkça malzeme aşınma oranı artmakta ama daha kötü yüzeyler elde edilmekte, vuruş süresi arttıkça malzeme aşınma oranı düşmekte ama daha iyi yüzeyler elde edilmektedir [49].

Kumar ve ark. (2010) Inconel 718'in bakır elektrotlar kullanılarak elektro erozyon ile işlenmesinde gaz yağna grafit tozu eklenmesinin işleme performansını % 26.85 oranında arttırdığını, 12 g/l grafit tozu eklenmesinin ise işleme performansına yol açtığını belirtmişlerdir [50].

Garg ve Ojha (2011) AISI-4140 çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde dielektrik sıvısına nikel tozu ilave edilmesinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında, toz konsantrasyonu, kullanılan üçgen elektrodun açısı, boşalım akımı ve iş çevrimini tasarım değişkenleri olarak, malzeme aşındırma oranı ve elektrot aşınma oranını optimize edilecek parametreler olarak alıp optimizasyon yapmışlardır [51].

4. SONUÇ

Bu çalışmada elektro erozyon ile işlemede işleme performansını arttırmak için dielektrik sıvısına metal tozlarının karıştırılması konusunda yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Her ne kadar birçok araştırmacı toz katkılı elektro erozyon ile işlemin malzeme aşındırma oranını ve yüzey kalitesini arttırdığını deneylerle ispat etse de, günümüzde bu teknoloji endüstride yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunun bir sebebi, bu teknolojinin işleme mekanizmasının hâlâ tam olarak anlaşılabilmiş olmasıdır. Diğer bir sebebi ise yüksek miktarda metal tozu kullanımı yüzünden başlangıç maliyetinin yüksek olmasıdır [1].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki konuların eksik olduğu ve bu konular üzerinde çalışmaların yapılabileceği düşünülmüştür:

- Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede elektriksel parametreler olarak boşalım akımı ve vuruş süresinin etkileri çalışılmış olmakla beraber vuruş süresinin etkisi incelenmemiştir [52].
- Toz katkılı elektro erozyon ile işlemin malzeme aşındırma oranı, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi birçok çalışmada incelenmiş ama yüzeyde meydana getirdiği değişiklikler üzerinde çok az çalışma yapılmıştır [52].
- Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede metal tozu olarak Ni, Co, Fe, Al, Cu, Ti, C, Si, SiC kullanılmış olmasına rağmen mangan, molibden, vanadyum ve krom gibi alaşım elementlerinin kullanımının etkisi şu ana kadar incelenmemiştir [52].
- Metal tozu-dielektrik sıvısı konsantrasyonu, iş parçası yüzeyinde oluşan çukurlardan metal tozlarının süzülmesi, metal tozu boyutu, şekli, tipi vs. gibi parametrelerin optimizasyonu, metal tozu-dielektrik sıvısı sirkülasyonu gibi konular detaylı araştırma beklemektedir [1].
- Elektro erozyon ile işlemede yüzeyde meydana gelen malzeme tabakası hem toz katkılı elektro erozyon ile işlemede hem de tam preslenmemiş ve sinterlenmemiş toz metal elektrot kullanımında ortaya çıkan bir durumdur. Her iki işlem türünde iş parçası yüzeyinde meydana gelen malzeme tabakasının konsantrasyonu, kalınlığı, mekanik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmış olmasına rağmen [53, 54, 55, 56, 57], iki işlem türünü karşılaştıracak çalışma henüz yapılmamıştır [58].
- Klasik elektro erozyon ile işlemin matematiksel, ısıl ve fiziksel modellenmesine ait çalışmalar literatürde mevcut olmasına rağmen [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67], toz katkılı elektro erozyon ile işlemin modellenmesine ait çalışmalar araştırılmayı beklemektedir.
- Literatür incelendiğinde toz katkılı elektro erozyon ile işlemede her seferinde tek türde toz kullanıldığı görülmüştür. Farklı iki veya daha fazla türde tozun dielektrik sıvısına katılmasının etkileri araştırılmayı beklemektedir.
- Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede tozların dielektrik sıvısı içerisindeki hareketleri malzeme aşınması, elektrot aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından önemlidir. Bunun için dielektrik sıvı tankının karıştırılması yanı sıra dielektrik sıvı tankının, iş parçasının veya elektrodun titreşimi denenebilir. Klasik elektro erozyon ile işlemede titreşimin etkileri incelenmiş olmasına rağmen [68, 69, 70, 71, 72, 73], toz katkılı elektro erozyon ile işlemedeki etkileri tek bir çalışma hariç [46] yeteri kadar incelenmemiştir.

KAYNAKÇA

1. Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. 2007. "Technology and Research Developments in Powder Mixed Electric

- Discharge Machining (PMEDM),” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.184, no.1-3, p.32-41.
2. **Ho, K. H., Newman, S. T.** 2003. “State of the Art Electrical discharge machining,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.37, no.11, p.1287–1300.
 3. **Kunieda, M., Lauwers, B., Rajurkar, K.P., Schumacher, B.M.** 2005. “Advancing EDM Through Fundamental Insight Into The Process,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol.54, no.2, p.64-87.
 4. **Hocheng, H., Lei, W. T., Hsu, H. S.** 1997. “Preliminary Study of Material Removal in Electrical-Discharge Machining of SiC/Al,” *Journal of Materials Processing Technology*, no.63, p.813-818.
 5. **Abbas, N. M., Solomon, D. G., Bahari, M. F.** 2007. “A Review on Current Research Trends in Electrical Discharge Machining (EDM),” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.47, no.7-8, p.1214-1228.
 6. **Ojha, K., Garg, R. K., Singh, K. K.** 2010. “MRR Improvement in Sinking Electrical Discharge Machining: a Review,” *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol.9, no.8, p.709-739.
 7. **Chow, H. M., Yang, L.D., Lin, C. T., Chen, C.F.** 2008. “The Use of SiC Powder in Water as Dielectric For Micro-Slit EDM Machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.195, no.1-3, p.160-170.
 8. **Zhao, W. S., Meng, Q. G., Wang, Z. L.** 2002. “The Application of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.129, no.1-3, p.30-33.
 9. **Furutani, K., Saneto, A., Takezawa, H., Mohri, N., Miyake, H.** 2001. “Accretion of Titanium Carbide by Electrical Discharge Machining With Powder Suspended in Working Fluid,” *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, no.25, p.138-144.
 10. **Peças, P., Henriques, E.** 2008. “Electrical Discharge Machining Using Simple and Powder-Mixed Dielectric: The Effect of the Electrode Area in the Surface Roughness and Topography,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.200, no.1-3, p. 250-258.
 11. **Wong, Y. S., Lim, L. C., Rahuman, I., Tee, W. M.** 1998. “Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric,” *Journal of Materials Processing Technology*, no.79, p.30-40.
 12. **Erden, A., Bilgin, S.** 1980. “Role of Impurities In Electric Discharge Machining,” *Proceedings of the 21th. International Machine Tool Design and Research Conference*, Macmillan, London, p.345-350.
 13. **Jeswani, M. L.** 1981. “Effects of the Addition of Graphite Powder to Kerosene Used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining,” *Wear*, no.70, p.133–139.
 14. **Koshy, G., Philip, P.K., Geddam, A.** 1983. “Hardening of Surface Layers Using Electric Discharge Techniques,” *Proceedings of the 11th AIMTDR Conference*, IIT, Madras, p.315–319.
 15. **Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Otake, H., Tsnekawa, Y., Takawashi, T., Kobayashi, K.** 1989. “EDM by powder Suspended Working Fluid,” *Proceedings of 9th ISEM*, p.5-8.
 16. **Mohri, N., Saito, N., Higashi, M.A.** 1991. “A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Methods,” *Annals of the CIRP*, no.40, p.207-210.
 17. **Yan, B.H., Chen, S.L.** 1994. “Characteristics of SKD11 by Complex Process of Electric Discharge Machining Using Liquid Suspended With Aluminum Powder,” *Japan Institute of Light Metals*, vol.58, no.9, p.1067–1072.
 18. **Yan, B.H., Chen, S.L.** 1994. “Effect of Ultrasonic Vibration On Electrical Discharge Machining Characteristics Of Ti–6Al–4V Alloy,” *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol.44, no.5, p.281–285.
 19. **Rajurkar, K.P., Nooka, S.R.** 1994. “Surface Finish of Electro Discharge Machined Components,” *Proceedings of the International Conference on Advance Manufacturing Technology*, Johor, p.33-145.
 20. **Ming, Q.Y., He, L.H.** 1995. “Powder-Suspension Dielectric Fluid for EDM,” *Journal of Materials Processing Technology*, no.52, p.44-54.
 21. **Yu, C.P., Chen, W.C., Chang, S.W., Chang, C.C.** 1996. “Effects of the Concentration of Suspended Aluminum Powder in Dielectric Fluid on EDM of Carbide of Tungsten's,” *Proceedings of the 13th Conference of Chinese Society of Mechanical Engineers*, Taiwan, p.445–450.
 22. **Okada, A., Uno, Y., Hirao, K.** 2000. “Formation of Hard Layer by EDM With Carbon Powder Mixed Fluid Using Titanium Electrode,” *Proceedings of the International Conference on Progress of Machining Technology*, p.464–469.
 23. **Chow, H. M., Yan, B. W., Huang, F. Y., Hung, J. C.** 2000. “Study of Added Powder in Kerosene For the Micro-Slit Machining of Titanium Alloy Using Electro-discharge Machining,” *Journal of Materials Processing Technology*, no.101, p.95-103.
 24. **Uno, Y., Okada, A., Çetin, S.** 2001. “Surface Modification of EDMed Surface with Powder Mixed Fluid,” *2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds*.
 25. **Tzeng, Y.F., Lee, C.Y.** 2001. “Effect of Powder Characteristics On Electro Discharge Machining Efficiency,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.17, no.8, p.586–592.
 26. **Tani, T., Fukazawa, F., Mohri, N., Okada, M.** 2001. “Machining Phenomena in EDM of Insulating Ceramics Using Powder Suspended Working oil,” *12th ISEM Bilbao*, p.388–392.

27. **Rozenek, M., Kozak, J., Dabrowski, L.** 2001. "Study of Electrical Discharge Machining Using Powder Suspended Working Media," 12th ISEM Bilbao, p.351–357.
28. **Furutani, K., Shimizu, Y.** 2003. "Experimental Analysis of Deposition Process Of Lubricant Surface by EDM With Molybdenum Disulphide Powder Suspended In Working Oil," Proceedings of the American Society for Precision Engineering, no.30, p.547–550.
29. **Kozak, J., Rozenek, M., Dabrowski, L.** 2003. "Study of Electrical Discharge Machining Using Powder-suspended Working Media," Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Instrumental Mechanic Engineers, no.217, p.1597–1602.
30. **Peças, P., Henriques, E.** 2003. "Influence of Silicon Powder-mixed Dielectric On Conventionalelectrical Discharge Machining," International Journal of Machine Tools & Manufacture, no.43, p.1465-1471.
31. **Yan, B.H., Chen, S.L.** 2003. "Effects of Dielectric With Suspended Aluminum Powder on EDM," Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers, vol.14, no.3, p.307–312.
32. **Dewes, R., Aspinwall, D., Simao, J., Lee, H.G.** 2003. "Electrical Machining and Surface Alloying – The Process, Parameters and State Of Play," Material World, vol.11, no.5, p.16-18.
33. **Klocke, F., Lung, D., Antonoglou, G., Thomaidis, D.** 2004. "The Effects of Powder Suspended Dielectrics on The Thermal Influenced Zone by Electrodischarge Machining With Small Discharge Energies," Journal of Materials Processing Technology, no.149, p.191-197.
34. **Özerman, B., Çoğun, C.** 2005. "Effect of Powder Mixed Dielectric on Machining Performance in Electric Discharge Machining (EDM)," G.U. Journal of Science, vol.18, no.2, p.211-228.
35. **Rival, R.** 2005. "Electrical Discharge Machining Of Titanium Alloy Using Copper Tungsten Electrode With SiC Powder Suspension Dielectric Fluid," Masters Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Mechanical Engineering, p.16-24.
36. **Yih-fong, T., Fu-chen, C.** 2005. "Investigation into Some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-suspension Dielectric Oil," Journal of Materials Processing Technology, no.170, p.385-391.
37. **Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P.** 2005. "Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining By Response Surface Methodology," Journal of Materials Processing Technology, no.169, p.427-436.
38. **Kansal, H. K., Sehijpal, S., Pradeep, K.** 2007. "Effect of Silicon Powder Mixed EDM on Machining Rate of AISI D2 Die Steel," Journal of Manufacturing Processes, vol.9, no.1, p.13-22.
39. **Kolahan, F., Bironro, M.** 2008. "Modeling and Optimization of Process Parameters in PMEDM by Genetic Algorithm," World Academy of Science, Engineering and Technology, no.48, p.480-484.
40. **Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P.** 2008. "Numerical Simulation of Powder Mixed Electric Discharge Machining (PMEDM) Using Finite Element Method," Mathematical and Computer Modelling, no.47, p.1217-1237.
41. **Singh, S., Maheshwari S., Panday P.C.** 2008. "Effect of SiC Powder-suspended Dielectric Fluids On The Surface Finish of 6061 Al/Al₂O₃P/20p Composites During Electric Discharge Machining," International Journal of Machining and Machinability of Materials, vol.4, no.2-3, p.252-274.
42. **Mahdi, W. I., Tawfiq, M. A., Aghdeab, S. H.** 2009. "Effect of Current on Average Surface rRoughness of Borosilicate Glass at EDM Machining and Comparison With Numerical Programs," Eng.& Tech. Journal, vol.27, no.6, p.1026-1038.
43. **Prabhu, S., Vinayagam, B. K.** 2009. "Effect of Graphite Electrode Material on EDM of AISI D2 Tool Steel With Multiwall Carbon Nanotube Using Regression Analysis", International Journal of Engineering Studies, vol.1, no.2, p.93-104.
44. **Furutani, K., Saito, H., Suzuki, M.** 2009. "Influence of Electrical Conditions on Performance of Electrical Discharge Machining With Powder Suspended In Working Oil For Titanium Carbide Deposition Process," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.40, no.11-12, p.1093-1101.
45. **Prihandana, G. S., Mahardika, M., Hamdi, M., Mitsui, K.** 2009. "The Current Methods For Improving Electrical Discharge Machining Processes," Recent Patents on Mechanical Engineering, no.2, p.61-68.
46. **Prihandana, G. S., Mahardika, M., Hamdi, M., Wong, Y. S., Mitsui, K.** 2009. "Effect of Micro-Powder Suspension and Ultrasonic Vibration of Dielectric Fluid in Micro-EDM Processes—Taguchi approach," International Journal of Machine Tools & Manufacture, no.49, p.1035-1041.
47. **Wu, K. L., Yan, B. W., Lee, J. W., Ding, C. G.** 2009. "Study on the Characteristics of Electrical Discharge Machining Using Dielectric With Surfactant," Journal of Materials Processing Technology, no.209, p.3783-3789.
48. **Chen, Y. F., Lin, Y. C.** 2009. "Surface Modifications of Al–Zn–Mg Alloy Using Combined EDM With Ultrasonic Machining and Addition of TiC Particles into the Dielectric," Journal of Materials Processing Technology, no.209, p.4343-4350.
49. **Paramjit, S., Anil, K., Naveen, B., Vijay, K.** 2010. "Influence of Electrical Parameters in Powder Mixed Electric Discharge Machining (PMEDM) of Hastelloy," Journal of Engineering Research and Studies, vol.1, no.2, p.93-105.

50. **Kumar, A., Maheshwari, S., Sharma, C., Beri, N.** 2010. "Realizing Potential of Graphite Powder in Enhancing Machining Rate in AEDM of Nickel Based Super Alloy 718," Proc. of Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering, p.50-53.
51. **Garg, R. K., Ojha, K.** 2011. "Parametric optimization of PMEDM Process With Nickel Micro Powder Suspended Dielektrik and Varying Triangular Shapes Electrodes on EN-19 Steel," Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.6, no.2, p.152-156.
52. **Singh, S., Bhardwaj, A.** 2011. "Review to EDM by Using Water and Powder-mixed Dielectric Fluid," Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, vol.10, no.2, p.199-230.
53. **Simao, J., Lee, H. G., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Aspinwall, E. M.** 2003. "Workpiece Surface Modification Using Electrical Discharge Machining," International Journal of Machine Tools and Manufacture, no. 43, p.121-128.
54. **Simao, J., Aspinwall, D., El-Menshawyb, F., Meadows, K.** 2002. "Surface Alloying Using PM Composite Electrode Materials When Electrical Discharge Texturing Hardened AISI D2," Journal of Materials Processing Technology, no.127, p.211-216.
55. **Lee, H. G., Simao, J., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Voice, W.** 2004. "Electrical Discharge Surface Alloying," Journal of Materials Processing Technology, no.149, p.334-340.
56. **Marafona, J.** 2007. "Black Layer Characterisation and Electrode Wear Ratio in Electrical Discharge Machining (EDM)," Journal of Materials Processing Technology, no.184, p.27-31.
57. **Wang, Z. L., Fang, Y., Wu, P. N., Zhao, W. S., Cheng, K.** 2002. "Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with A Ti Powder Green Compact Electrode," Journal of Material Processing Technology, vol.129, no.1-3, p.139-142.
58. **Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., Sethi, B. L.** 2009. "Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Review," Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, no.8, p.3675-3687.
59. **Tsai, K. M., Wang, P. J.** 2001. "Comparisons of Neural Network Models on Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining," Journal of Materials Processing Technology, no.117, p.111-124.
60. **Wang, P. J., Tsai, K. M.** 2001. "Semi-Emprical Model on Work Removal and Tool Wear In Electrical Discharge Machining," Journal of Materials Processing Technology, no.114, p.1-17.
61. **Sharakovsky, L. I., Marotta, A., Essiptchouk, A. M.** 2006. "Model of Workpiece Erosion For Electrical Discharge Machining Process," Applied Surface Science, no.253, p.797-804.
62. **Dhar, S., Purohit, R., Saini, N., Sharma, A., Kumar, G. H.** 2007. "Mathematical Modelling of Electric Discharge Machining of Cast Al-4Cu-6Si Alloy-10 wt. % SiCp Composite," Journal of Material Processing Technology, no.194, p.24-29.
63. **Salman, Ö., Kayacan, M. C.** 2008. "Evolutionary Programming Method for Modeling the EDM Parameters for Roughness," Journal of Material Processing Technology, no.200, p.347-355.
64. **Izquierdo, B., Sanchez, J. A., Plaza, S., Pombo, I., Ortega, N.** 2009. "A Numerical Model of the EDM Process Considering The Effect Of Multiple Discharges," International Journal of Machine Tools & Manufacture, no.49, p.220-229.
65. **Rahman, M. M., Khan, A. R., Kadirgama, K., Noor, M. M., Bakar, A.** 2010. "Modeling of Material Removal on Machining of Ti-6Al-4V Through EDM Using Copper Tungsten Electrode And Positive Polarity," World Academy of Science, Engineering and Technology, no.71, p.576-581.
66. **Joshi, S.N., Pande, S.S.** 2010. "Thermo-Physical Modeling of Die-Sinking EDM Process," Journal of Manufacturing Processes, no.12, p.45-56.
67. **Joshi, S. N., Pande, S. S.** 2011. "Intelligent Process Modelling and Optimization of Die-sinking Electric Discharge Machining," Applied Soft Computing, no.11, p.2743-2755.
68. **Chern, G. L., Chuang, Y.** 2006. "Study on Vibration-EDM and Mass Punching of Micro-Holes," Journal of Materials Processing Technology, no.180, p.151-160.
69. **Chern, G. L., Wu, Y. E., Liu, S. F.** 2006. "Development of a Micro-punching Machine and Study on the Influence of Vibration Machining in Micro-EDM," Journal of Materials Processing Technology, no.180, p.102-109.
70. **Tong, H., Li, Y., Wang, Y.** 2008. "Experimental Research on Vibration Assisted EDM of Micro-Structures With Non-Circular Cross-Section," Journal of Material Processing Technology, no.208, p.289-298.
71. **Endo, T., Tsujimoto, T., Mitsui, K.** 2008. "Study of Vibration-Assisted Micro-EDM—The Effect of Vibration on Machining Time and Stability of Discharge," Precision Engineering, no.32, p.269-277.
72. **Xua, M.G., Zhang, J.H., Li, Y., Zhang, Q.H., Ren, S.F.** 2009. "Material Removal Mechanisms of Cemented Carbides Machined By Ultrasonic Vibration Assisted EDM in Gas Medium," Journal of Materials Processing Technology, no.209, p.1742-1746.
73. **Garn, R., Schubert, A., Zeidler, H.** 2011. "Analysis of the Effect of Vibrations on the Micro-EDM Process at the Workpiece Surface," Precision Engineering, no.35, p.364-368.