

Biyomedikal Uygulamalar için Magnezyum-Kalsiyum (Mg-0.8Ca) Alaşımının Dalma Elektro Erozyon ile İşlenmesi

Yakup YILDIZ

Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Dumlupınar Üniversitesi,
Kütahya, Türkiye

(Alınış / Received: 27.01.2017, Kabul / Accepted: 16.02.2018,
Online Yayınlanma / Published Online: 15.05.2018)

Anahtar Kelimeler
Dalma erozyon
ile işleme,
magnezyum-
kalsiyum
alaşımı,
biyomedikal

Özet: Bu deneysel çalışma, alışılmamış bir malzeme olan Dalma erozyon ile işleme performansına çalışma akımının ve vurum süresinin etkisini incelemektedir. Dalma elektro erozyon ile işleme performansı talaş kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı, elektrot şekil değişimi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) sonuçları ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçların analitik olarak açıklanması için varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi gibi istatistiksel metotlar kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, magnezyum-kalsiyum alaşımlarının elektro erozyon ile işlenmesinde çok iyi talaş kaldırma oranı ve elektrot aşınma sonuçları elde edilmiştir. Ancak, bu malzemelerin elektro erozyon ile işleme sonrasında yüzey pürüzlülüğü sonuçları tercih edilebilir değildir.

Die-sinking Electrical Discharge Machining of Magnesium-Calcium (Mg-0.8Ca) Alloy for Biomedical Applications

Keywords
Die-sinking
Electrical
Discharge
Machining,
Magnesium-
Calcium Alloy,
biomedical

Abstract: This experimental study explores the effect of working current and pulse time on the performance of magnesium-calcium (Mg-0.8Ca) alloy, an unusual material, in die-sinking electrical discharge machining (EDM). The EDM performance was investigated by results of material removal rate (MRR), electrode wear ratio (EWR), electrode shape deformation and average surface roughness (R_a). Statistical methods, analysis of variance (ANOVA) and regression analysis were used for analytical explanation of the experimental results. It has been found that superior MRR and EWR results can be obtained in machining of magnesium-calcium alloys by EDM. However, surface roughness results of the alloy are not preferable after EDM.

*Sorumlu yazar: yakup.yildiz@live.com

1. Giriş

Magnezyum alaşımları özellikle tıp endüstrisinde çok ilgi uyandıran ve çok yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, bazı mekanik ve biyoyumlu özelliklerinden dolayı ameliyat sonrası kemik vidası veya protez gibi bazı tıbbi fonksiyonlar için emilebilir implant olarak kullanılmaktadırlar. Magnezyum iyonları insan vücudunda büyük miktarda bulunmakta ve birçok metabolik reaksiyonda ve biyolojik mekanizmada yer almaktadır. Bundan dolayı, magnezyum, insan vücudunda metalik ayrıştırılabilir malzeme olarak hizmet edebilir ve yavaş yavaş çözülebilir, tüketilebilir veya emilebilir. Çelik ve titanyum gibi geleneksel metal implantlar sertliklerinden dolayı medikal olarak maliyetli olabilirler. Kemik ile geleneksel bir metal malzemenin elastikiyet modülü arasındaki farklılık gerilme farklılıklarından dolayı kırık veya çatlamış bir kemiğin iyileşmesini olumsuz olarak etkileyebilir. Dolayısıyla, metal esaslı implantmalzemelerin ilk operasyondan 1 veya 2 yıl sonra ikinci bir ameliyat ile çıkarılması gerekmektedir. Ayrıca magnezyum alaşımları seramik biyo-malzemeler ile karşılaştırıldığında daha büyük kırılma tokluğuna, biyolojik olarak ayrıştırılabilir olan plastik malzemelerden ise daha yüksek mukavemete sahiptir [1-3].

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunluklarından dolayı otomobil ve uçak endüstrisi için de önemli bir yapısal gereç olmaya başlamıştır. Ancak bu malzemelerin kullanımı yüksek etkileşim ve düşük korozyon dirençlerinden dolayı sınırlıdır [4]. Magnezyum alaşımları aynı zamanda kolay kesilebilir metal olarak da bilinmektedir. Ancak, bu malzemenin işlenmesi alev almasının önüne geçmek için bazı güvenlik önlemlerinin alınmasını da gerektirmektedir. Çünkü,

ergime noktası (650°C) aşıldığında magnezyum ateş alabilmektedir. Diğer taraftan ise, magnezyumun herhangi bir kesme sıvısı kullanmadan işlenmesi tavsiye edilmektedir. Bunun sebebi ise suyun, potansiyel patlayıcı ve yanıcı olan hidrojeni meydana getirmek için magnezyum ile tepkimeye girmesi ve kuru ve temiz olan talaşların yoğunlaşması ve yeniden ergimesinin kolay olmasıdır [5].

Literatürde Mg-Ca alaşımlarının işlenmesi üzerine sınırlı sayıda çalışma vardır. Denkena ve Lucas [2] ağırlıkça %3 kalsiyum içeren Mg-Ca alaşımını (Mg-3Ca), tornalama yöntemi ile işlemişlerdir. Malzemenin yüzey altı özelliklerini belirlemek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeleri ölçmüşlerdir. Çalışmada aynı zamanda işlenmiş malzemelerin korozyon davranışları da incelenmiştir. Guo ve Salahshoor [6] yüzey tamlığı açısından Mg-0.8Ca alaşımlarının yüksek hızlı kuru frezeleme performansını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, 0.05 mm/dev ilerleme ve 2800 m/dk kesme hızları ile birlikte 0.3 mm kesme derinliklerinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Bununla birlikte neredeyse tüm kesme şartlarında yüksek basma kalıntı gerilmeleri, düşük kesme hızlarında (1600 m/dk) ise daha küçük tane boyutları ile artırılmış mikro sertlik sayesinde ortalamanın üzerinde bir yüzey tamlığı sağlamışlardır.

Ancak, tüm bu sonuçlara ek olarak Mg-Ca alaşımlarının geleneksel/alışılmış imalat yöntemleri ile işlenmesinde bazı işlenebilirlik problemleri rapor edilmiştir. Tomac ve Tonnessen [5] bir magnezyum alaşımı (Mg-Al-Zn) için tornalama işleminde kesici takım yan kenarında meydana gelen yığıntı talaş oluşumunu incelemişlerdir. Araştırmacıların bulguları aşağıdadır:

- Kesme hızının artması ile ilişkili olarak yan kenar yığıntı oluşumu işlemede önemli bir sınırlamaya sebep olmaktadır.
- Yığıntı oluşumu aynı zamanda kesme kuvvetlerinin artmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına sebebiyet vermektedir.
- İşleme esnasında ortaya çıkan kesici yan kenar yığıntı oluşumu titreşim ve parça toleransları ile ilişkili işleme problemlerine sebebiyet verebilir.
- Yan kenar yığıntı oluşumu su esaslı kesme sıvısı kullanımı ile elimine edilebilir. Ancak, bu malzemelerin işlenmesinde soğutmanın yüzey pürüzlülüğünün bozulması ve takım aşınmasının artışı üzerine olan olumsuz etkileri ayrıca rapor edilmiştir.

Tüm bu sebeplerden dolayı, Mg-Ca alaşımlarının alışılmamış/geleneksel olmayan imalat yöntemleri ile işleme performansının incelenmesi daha tercihli hale gelmektedir. Bu çalışmada, Mg-0.8Ca alaşımının elektro erozyonla işleme (EDM) yöntemi ile işlenebilirliği araştırılmıştır. Mg-Ca alaşımlarının mikroyapı, mekanik ve korozyon karakteristikleri üzerine yapılan bir çalışma [7], ağırlıkça %0.6 kalsiyum içerikli magnezyum alaşımının, diğerlerine nazaran (Mg-1.2Ca, Mg-1.6Ca ve Mg-2.0Ca) daha iyi bir korozyon direnci ve mukavemet sağladığını göstermiştir. Mg-0.6Ca alaşımının elastikiyet modülü (46.5GPa) bu çalışmada kullanılan iş parçasının elastikiyet modülüne (Mg-0.8Ca, 44.9 GPa) çok yakındır. Bu değerler aynı zamanda insan kortikal kemiğinin değerlerine de oldukça yakındır [7]. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan iş parçasının biyomedikal uygulamalar için potansiyel bir malzeme olduğu sonucuna varılabilir. Elektro erozyonla işleme teknolojisi alışılmamış imalat yöntemlerinden birisidir. Tornalama, frezeleme, delik delme ve taşlama gibi

geleneksel imalat yöntemleri kesici takım ve iş parçası arasındaki direk temas ile gerçekleştirilmektedirler. Bu gereksinimler, bu süreçleri sınırlar ve geleneksel imalat yöntemleri iş parçasının özelliklerinde kalıntı, mekanik ve termal gerilmeler gibi istenilmeyen değişikliklere sebebiyet verebilir. Ancak elektro erozyonla işleme yönteminde takım ve iş parçası arasında herhangi bir fiziksel temas yoktur. Elektro erozyonla işleme termo-elektrik bir süreçtir ve iş parçasından malzeme, bir dielektrik/yalıtkan sıvı ortamına daldırılmış elektrot ve iş parçası çifti arasında tekrarlanan elektriksel kıvılcımların meydana gelmesiyle ergitilmektedir. Bu elektriksel boşalmalar iş parçasından mikroskobik miktarda malzemeyi ergitir ve/veya buharlaştırır [8].

Bu çalışmanın deneysel sonuçları varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir.

2. Deneysel ve Analitik Detaylar

İş parçası malzemesi (Mg-0.8Ca) Alabama Üniversitesi tarafından üretilmiş ve elektro erozyon testleri Nebraska-Lincoln Üniversitesi bünyesinde bulunan Alışılmamış İmalat Araştırmaları Merkezindeki (CNMR) bir ZNC/50A elektro erozyonla delik delme tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrot olarak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş bakır alaşımı (C-122) olan 3 mm dış çaplı ve web tipli çok kanallı rotari takımlar kullanılmıştır. Dielektrik sıvısı olarak iyondan arındırılmış su kullanılmıştır. Elektrot ve iş parçası malzemelerinin ve dielektrik sıvısının bazı kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'de sırasıyla verilmiştir.

Tablo 1 C-122 bakırelektrotlarınbazıkimyasal, fizikselvemekaniközellikleri

Kimyasal bileşim (% ağırlık olarak)	Bakır (Cu)	Fosfor (P)	
	99.90	0.015-0.04	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	8940.609	220.632	68.947

Tablo 2 Mg-Ca alaşımı iş parçasının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri [9]

Kimyasal bileşim (% ağırlık olarak)	Mg	Ca			
	99.2	0.8			
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastikiyet Modülü (N/mm ²)	Isıl Genleşme Katsayısı (µm/mK, 20°C ve 100°C)	Termal İletkenlik (W/mK, 100°C ve 300°C)	Ergime Noktası (°C)
	1.75	44.9x10 ³	26.1x10 ⁻⁶	72	595-650

Tablo 3 Dielektrik sıvısı özellikleri (Dielectricliquidproperties)

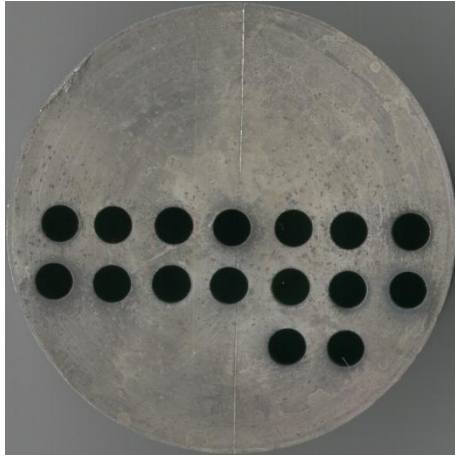
Yoğunluk (lbs/gal)	Dielektrik Dayanımı (MV/m)	Dinamik Vizkozite (g/msn)	Termal İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı Kapasite si (J/gK)
6.406	13	0.92	0.606	4.19

Tablo 4'de elektro erozyonla işleme parametreleri ve faktör seviyeleri görülmektedir. İki faktörlü ve dört seviyeli toplam 16 deneyden oluşan tam faktörlü bir deneysel tasarım (2⁴) tercih edilmiştir. Dielektrik sıvısı elektrotların içinde yer alan iki adet kanal yardımıyla

püskürtülmüştür. Kör bir delik elde edebilmek amacıyla 20 mm delik delme derinliği ayarlanmıştır. Silindirik Mg-0.8Ca iş parçası ve üzerinde oluşturulan delikler Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 4 Elektro erozyonla işleme girdi parametreleri ve ayarlama şartları

Elektro Erozyon ile İşleme Parametresi	Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Çalışma Akımı (A)	A	10	15	20	25
Vurum Açık/Kapalı Süresi (μ sn)	B	20	40	60	80
Vurum boşluk oranı (%)		50			
Çalışma Voltajı (V)		150			
Boşluk Voltajı (V)		20			
Kapasitans (μ F)		3			
Mil Hızı (rpm)		187			
Servo İlerleme Hızı (mm/min)		50			
Su Basıncı (kg/cm^2)		75			



Şekil 1 İş parçası ve üzerine oluşturulan delikler

2.1. Talaş kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı ve elektrot şekil değişimi (Materialremoval rate, electrode wear ratio and electrode shape deformation)

Talaş kaldırma oranı (MRR) ve elektrot aşınma oranı (EWR), numunelerin işleme öncesi ve işleme sonrası ağırlık

farklılıklarının maksimum 1210 gr kapasiteli ve 0.001 gr okunaklılığa sahip bir Sartorius tip (E-1200S) hassas terazi kullanılarak ölçülmesiyle belirlenmiştir. Bu ölçümler için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır [8].

$$MRR = (w_f - w_i) / \rho \cdot t_{sec} \quad (1)$$

$$EWR = (V_T / V_W) \times 100 \quad (2)$$

Bu eşitliklerde, w_f elektro erozyonla işleme öncesi iş parçası ağırlığını, w_i elektro erozyonla işleme sonrası iş parçası ağırlığını, t_{sec} elektro erozyonla işleme süresini, ρ kullanılan iş parçası yoğunluğunu, V_T elektro erozyonla işleme öncesi ve sonrası elektrotun hacim farkını, V_W ise elektro erozyonla işleme öncesi ve sonrası iş parçasının hacim farkını ifade etmektedir. Takımda meydana gelen şekil değişimleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 2).

2.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) (Average Surface Roughness)

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) maksimum 100 μm dikey aralığa sahip bir AMBIOS XP-2 iğne uçlu bir cihaz kullanılarak ölçülmüştür. İğne hızı, iğne ucu yarıçapı, iğne kuvveti, ölçüm uzunluğu ve veri noktası sayıları sırasıyla, 0.05 mm/sn, 2.5 mikron, 10 mg, 10 mm ve 12500 olarak kullanılmıştır. Ölçü cihazının kalibrasyonu, ölçümlerden önce gerçekleştirilmiştir. Numuneler yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinden önce delik ortalarından testere ile kesilmiş ve ultrasonik bir temizleyici (3210 Branson) kullanılarak aseton içerisinde 20 dk. süresince temizlenmişlerdir. Tüm yüzey pürüzlülüğü ölçümleri delinen her bir deliğin üst yanal yüzeyinden başlayarak gerçekleştirilmiştir.

2.3. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

DeneySEL sonuçların istatistiksel analizi için varyans analizi tabloları (ANOVA), her bir dENEYSEL faktörün (A: çalışma akımı ve B: vurum süresi) sonuca olan katkısını çalışmak için kullanılmıştır. Bu analiz, ilgili sonuçların değişimi üzerine süreç parametrelerinin önemini belirtmektedir. Bu tablolar genel lineer model (GLM) kullanılarak elde edilmişlerdir. Bu tablolardaki P değeri sıfır/farksızlık hipotezinin belirlenen bir önem seviyesine göre ret edilip edilmediğine karar vermek için kullanılır. Bu çalışmada belirlenen önem seviyesi 0.05 (α -seviyesi) olarak saptanmıştır. 3 no'lu eşitlikte δ ise ilgili sonuçların değişimi üzerine her bir faktörün yüzde olarak katkısını vermektedir.

$$\delta = \left(\frac{[SS_f - (MS_e)(DF)]}{SS_f} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.4. Regresyon Analizi (Regression Analysis)

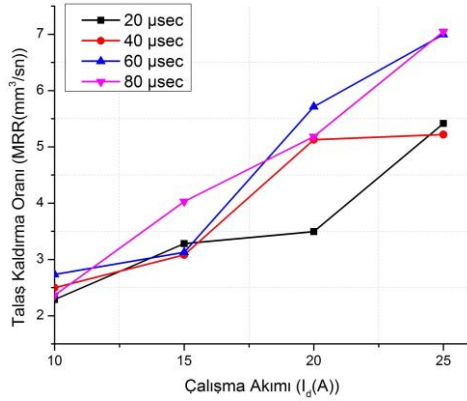
Bu çalışmada regresyon analizi, sonuçlar (MRR, EWR ve R_a) ve kestiriciler (A: çalışma akımı ve B: vurum süresi) arasındaki istatistiksel ilişkiyi matematiksel olarak modellemek, incelemek ve yeni gözlemleri tahmin etmek için kullanılmıştır. Regresyon analizlerinde genellikle en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada istatistiksel analiz için, birinci dereceden çoklu lineer regresyon modeli kullanılmıştır. Bu model aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (4)$$

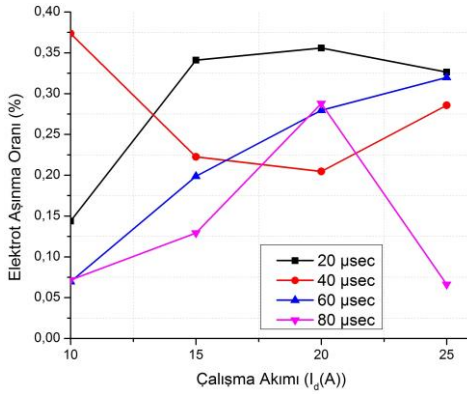
Bu eşitlikte, Y sonuç, β_0 sabit sayı, β_1 ve β_2 kestirici katsayıları, X_1 ve X_2 A ve B faktörlerini tanımlayan kestiricileri, ε ise hata terimini ifade etmektedir. Regresyon analizinden türetilen bu matematiksel ifade sonuçlar ve kestiriciler arasındaki ilişkinin yönünü, boyutunu ve istatistiksel önemini göstermektedir. Bu ifadede ki her bir katsayının işareti ilişkinin yönünü, katsayıların değeri ise ilişkinin boyutunu tanımlamaktadır. Tüm bu analizler uygun bir yazılım kullanarak gerçekleştirilmiştir [10].

3. Tartışma ve Sonuçlar

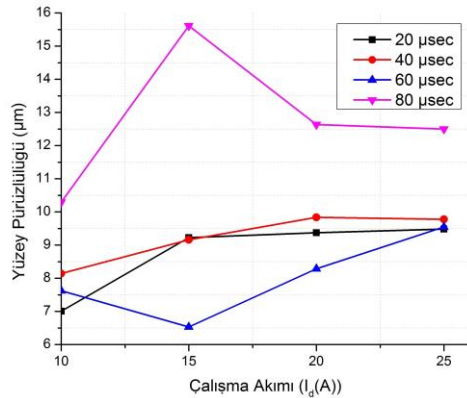
Elde edilen talaş kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının grafiksel gösterimleri Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4 ile gösterilmektedir.



Şekil 2 Talaş Kaldırma Oranı



Şekil 3 Elektrot Aşınma Oranı



Şekil 4 Yüzey Pürüzlülüğü

Ayrıca, bağımlı değişkenlerin tümü için varyans analizi sonuçları Tablo 5 ile verilmiştir. Çalışma akımı faktörünün (A) talaş kaldırma oranı üzerine etkisi küçük p değerinden (<0.05 olması sıfır hipotezinin ret edileceğini gösterir)

dolayı önemlidir. Ayrıca çalışma akımının varyasyon üzerine olan katkısı %80.53 ile dikkate değerdir. Mg-0.8Ca alaşımının elektro erozyon ile işleme sonucu elde edilen ortalama talaş kaldırma oranı 4.22 mm³/sn ile çok iyidir. Veri ortalamalarına göre talaş kaldırma oranı, 10A çalışma akımı ile elde edilen 2.47 mm³/sn değerinden 25A çalışma akımı ile elde edilen 6.17 mm³/sn değerine ulaşmıştır. Bu değerler yaklaşık olarak %150 oranında bir artışı ifade etmektedir. Bu sonuç, çalışma akımı yoğunluğuna bağlı olarak elektriksel kıvılcımların artması ile açıklanabilir. Çünkü bu kıvılcımlar aynı zamanda talaş kaldırma oranını ve böylece elektrotun iş parçası içerisine ilerlemesini de arttıracaktır. Ancak, çalışma akımı faktörünün elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü varyasyonları üzerine olan etkisi ise önemsiz gözükmektedir. Bununla birlikte vurum süresinin (B), %62.03 katkı oranı ile sadece yüzey pürüzlülüğünün değişimi için önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır. Talaş kaldırma oranının değişimi üzerine hata teriminin katkı oranı %14.09 olarak bulunmuştur. Bu değer belirlenen %15 sınırından daha azdır. Dolayısıyla bu bulgu deneysel sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir. Ancak, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü için değişimler üzerine hataların katkı oranlarının miktarları sırasıyla %83.51 ve %30.03 oranları ile oldukça fazladır. Dolayısıyla, bazı önemli faktörlerin ihmal edildiği ve daha iyi bir gösterim için deneysel verilerin yetersiz görüldüğü sonucuna varılabilir. ANOVA tablosunda elektrot aşınma oranı için bulunan aşırı hata miktarı ihmal edilebilir. Çünkü sonuçların varyasyonu, A (0.424) ve B (0.191) faktörlerine bağlı olarak çok yüksek p değerleri bulunduğundan, oldukça düşük veya önemsizdir. Elektrot aşınma oranı sonuçlarının %0.31 olan aralık değeri de bu sonucu doğrulamaktadır.

Tablo 5 Çok değişkenli ANOVA sonuçları

Kaynak	Bağımlı Değişken	SS	DF	MS	F	P	δ (%)
A	MRR	32.021	3	10.674	29.581	0.000	80.53
	EWR	0.030	3	0.010	1.031	0.424	0.52
	R _a	10.945	3	3.648	2.323	0.143	7.94
B	MRR	3.149	3	10.050	2.909	0.093	5.38
	EWR	0.056	3	0.019	1.956	0.191	15.97
	R _a	53.389	3	17.796	11.330	0.002	62.03
Hata	MRR	3.247	9	0.361			14.09
	EWR	0.086	9	0.010			83.51
	R _a	14.136	9	1.571			30.03
Toplam	MRR	38.417	15				100
	EWR	0.172	15				100
	R _a	78.470	15				100

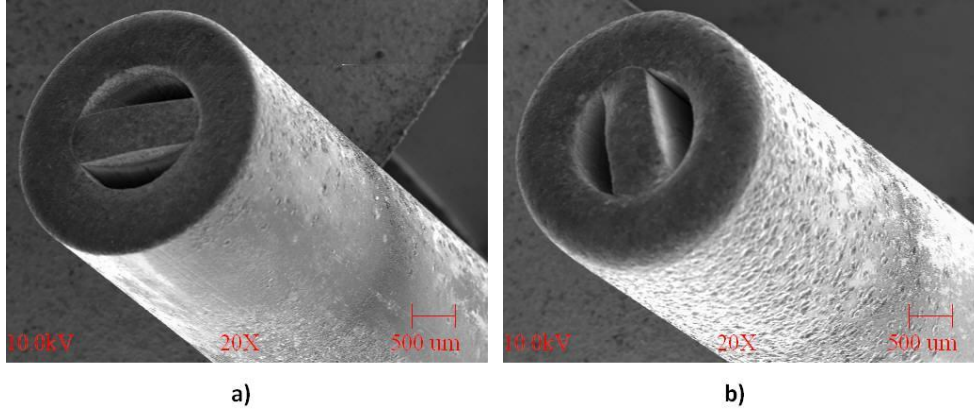
Mg-0.8Ca alaşımlarının elektro erozyon ile işleme sonrası elektrot şekil deformasyonlarını incelemek için kullanılmış elektrotların bazı SEM fotoğrafları Şekil 5 ile gösterilmiştir. Elektrot içerisindeki veya merkezindeki deformasyonlar yüzey aşınmalarına sebebiyet verirken elektrotların dışarısında oluşan deformasyonlar ise yan kenar veya köşe aşınmalarına sebebiyet verebilmektedirler. Elektrotların şekilleri düzensiz aşınmalardan dolayı çoğunlukla elektrotun uç kısmı etrafında deformasyona uğramakta ve daha önceki çalışmalarda da belirlendiği gibi [11, 12] elektrotların şekilleri elektro erozyon ile işleme esnasında çok kısa bir süre içerisinde deforme olmaktadır. Ancak Şekil 2'de görülebileceği gibi Mg-0.8Ca alaşımının elektro erozyon ile işleme sonucunda elektrot şekil değişimi 10A çalışma akımı ile neredeyse önemsiz gözükmemektedir. Buna karşılık 25A çalışma akımı sonucu elektrotun köşesinde meydana gelen şekil deformasyonu ise fark edilebilir bir formdadır. Elektro erozyon esnasında elektrotların köşesinde meydana gelen deformasyonlar esas olarak elektrot ucundaki aşırı elektrik yoğunluğundan meydana gelmektedir. Çalışma voltajı uygulandığında, elektrotların dış

kenarlarındaki elektrik alanı elektrotların sonlu ölçülerinden dolayı çok yoğundur. Bu durum elektrotların köşesinde çok fazla aşınmalara sebep olmaktadır [12]. Elektro erozyonla 25A çalışma akımı ile işleme sonrası elektrotun yüzeyinde oluşan şekil deformasyonu da aynı zamanda fark edilebilir bir formda oluşmuştur. Bu durum elektro erozyonla işleme esnasında elektriksel alan yoğunluğunun elektrot kenarlarından elektrot ucunun merkezine kayması ile açıklanabilir. Bu tip deformasyonlar üretilen delikler içerisinde hatalı bir geometrik şekle sahip olmasına sebep olacaktır. Elektrot aşınma oranı ve elektrot şekil değişimi sonuçlarına bağlı olarak Mg-Ca alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde elektrot uç ve yüzey aşınmaları açısından hacimsel elektrot aşınmalarının [11] ihmal edilebileceği sonucu çıkarılabilir. Her ne kadar hacimsel köşe aşınması çok ciddi olmasa da yüksek çalışma akımları için şekil deformasyonu göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrotların yan kenarlarında oluşan hacimsel aşınmalar da çok daha derin işlemler için dahi ihmal edilebilir. Tüm bu sonuçlar elektrotların farklı bölgelerinden boşalan kıvılcıkların dağılımı ile açıklanabilir. Çünkü elektrot ucuna doğru boşalan

kıvılcıkların sayısı elektrot ucu ve iş parçası arasındaki boşluk boyutunun elektrotun yan kenarı ve iş parçası arasındaki boşluk boyutundan daha küçük olduğundan dolayı elektrotun yan kenarındaki kıvılcıkların sayısından daha yoğundur [13].

alaşımının yüksek termal iletkenliği, düşük ergime noktası ve düşük sertliği ile ilişkili olabilir. Bu özellikler elektriksel kıvılcıklar ile malzemenin ergimesini kolaylaştırmıştır. Sonuç olarak da işleme zamanı hızlanmış ve pürüzlü bir yüzey kalitesi ortaya çıkmıştır.

Ortalama yüzey pürüzlülüklerinin aralığı oldukça yüksektir. Bu sonuç Mg-0.8Ca



Şekil 5 a) Mg-0.8Ca alaşımının 10A çalışma akımı ve 20µsn vurum süresi ile işlenmesi
b) Mg-0.8Ca alaşımının 25A çalışma akımı ve 20µsn vurum süresi ile işlenmesi

3.1. Talaş kaldırma oranı için Çoklu Regresyon Analizi (Multiple Regression Analysis for MRR)

Bu bölümde elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının regresyon analizleri önemsiz varyasyonlarından dolayı dikkate alınmamıştır. Talaş kaldırma oranı sonucu ve ilgili faktörler arasındaki ilişki aşağıdaki istatistiksel olarak yeterli olan 5 ve 6 no'lu fonksiyon ile temsil edilebilir.

$$MRR_{Mg-Ca} = -1.129 + 0.252A + 0.0189B \quad (5)$$

$$R^2 = 90.0\% \dots \dots R^2(adj) = 88.5\% \quad (6)$$

Bu eşitliklerde A çalışma akımı faktörü ve B ise vurum süresi faktörüdür. R^2

değeri kestiricilerin talaş kaldırma oranındaki değişimi %90 oranında tahmin edebileceğini göstermektedir. Her iki R^2 ve düzeltilmiş R^2 oranlarının birbirine yakın değerlerde olması da regresyon modelinin verilerle çok uygun olduğunu ve bu modelin yeterli bir tahmin etme becerisine sahip olduğunu göstermektedir. Regresyon analizi sonucu elde edilen eşitlikten de görülebileceği gibi A ve B faktörlerindeki artış talaş kaldırma oranını artıracaktır. Bundan dolayı, Mg-0.8Ca alaşımlarının elektro erozyonla işlenmesinde daha yüksek malzeme kaldırma hızları için maksimum çalışma akımı ve vurum süresi tercih edilmelidir. Sonuç olarak, Mg-0.8Ca alaşımının elektro erozyonla işlenmesinde talaş kaldırma oranına etkisinde, çalışma akımı katsayısının (A) daha büyük bir değere sahip olması

(0.252) sebebi ile vuruş süresinden daha önemli bir parametre olduğu sonucuna varılabilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, alışılmamış bir malzeme olan Mg-0.8Ca alaşımının elektro erozyon ile işleme performansını incelemesi açısından önemli bir girişimdir. Bir dalma elektro erozyon işleminin için talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin genel olarak 0.000273-0.0273 mm³/sn ve 0.178-0.254 µm aralıklarında [8] olması beklenirken, bu malzemelerin (Mg-0.8Ca) elektro erozyonla işlenmesi ile elde edilen ortalama 4.22 mm³/sn talaş kaldırma oranı ve %0.37 ortalama elektrot aşınma oranı sonuçları çok iyidir. Ancak, yüzey pürüzlülüğü sonuçları ise ortalama 9.69 µm değeri ile arzu edilir değildir ve bu parametreler Mg-Ca alaşımının elektro erozyonla işlenmesi için tekrar incelenmelidir. Sonraki yapılacak benzer çalışmalar bu alaşım için elektro erozyon ile işleme sonrası delik büyümesi, beyaz katman kalınlığı ve yüzey çatlak yoğunluğu gibi çıktıları incelemek için de yapılabilir.

Semboller

w_f : Elektro erozyonla işleme öncesi iş parçası ağırlığı (gr)
 w_l : Elektro erozyonla işleme sonrası iş parçası ağırlığı (g)
 t_{sec} : Elektro erozyonla işleme süresi (sn)
 ρ : Kullanılan iş parçası yoğunluğu (gr/mm³)
 V_T : Elektro erozyonla işleme öncesi ve sonrası elektrotun hacim farkı
 V_W : Elektro erozyonla işleme öncesi ve sonrası iş parçasının hacim farkı
 SS : Kareler toplamı
 SS_e : Kareler toplamının hatası
 F : MS/MS_e

MS : Ortalama kare değeri (SS/DF)
 δ : Yüzde katkı oranı
 SS_f : ANOVA tablosunda ki ilişkili her bir faktörün kareler toplamı
 MS_e : Ortalama karekök hatası
 DF : Serbestlik derecesi
 SS_t : Toplam kareler toplamı
 Y : Regresyon sonucu
 β_0 : Sabit sayı,
 β_1, β_2 : Katsayılar
 X_1, X_2 : Faktörlerini tanımlayan kestiriciler
 ϵ : Hata terimi
 A : Çalışma akımı faktörü
 B : Vuruş süresi faktörü
 MRR : Talaş kaldırma oranı
 EWR : Elektrot aşınma oranı
 R_a : Ortalama yüzey pürüzlülük değeri

Teşekkürler

Bu çalışmanın yapılmasını sağlayan Nebraska-Lincoln üniversitesinden Prof. Dr. Kamlakar P. Rajurkar'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca iş parçası (Mg-0.8Ca) malzemesini sağlayan Alabama Üniversitesi'ne ve deneysel çalışmalar için sağladığı kolaylıklardan dolayı Nebraska-Lincoln Üniversitesi'ne de ayrıca teşekkür ederim.

Kaynaklar

[1] Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai, J. ve Dias, G. 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review, *Biomaterials*, Cilt 27, No 9, s. 1728-1734.
DOI:10.1016/j.biomaterials.2005.10.003

[2] Denkena, B., Lucas, A. 2007. Biocompatible Magnesium Alloys as Absorbable Implant Materials-Adjusted Surface and Subsurface Properties by Machining Processes, *Annals of the CIRP*, Cilt 56, No 1, s. 113-116.
DOI:10.1016/j.cirp.2007.05.029

- [3] Song, G.L., Song, S.Z. 2007. A possible biodegradable magnesium implant material, *Advanced Engineering Materials*, Cilt 9, No 4, s. 298-302.DOI: 10.1002/adem.200600252
- [4] You, B.S., Park, W.W., Chung, I.S. 2000. The Effect of Calcium Additions on the Oxidation Behavior in Magnesium Alloys, *Scripta Materialia*, Cilt 42, s. 1089-1094. DOI:10.1016/S1359-6462(00)00344-4
- [5] Tomac, N.,Tonnessen, K. 1991. Formation of Build-up in Cutting Magnesium Alloys, *Annals of the CIRP*, Cilt 40, No 1, s. 79-82. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61938-6
- [6] Guo, Y.B., Salahshoor, M. 2010. Process mechanics and surface integrity by high-speed dry milling of biodegradable magnesium-calcium implant alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Cilt 59, No 1, s. 151-154.DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.051
- [7] Wan, Y., Xiong, G., Luo, H., He, F., Huang, Y., Zhou, X. 2008. Preparation and characterization of a new biomedical magnesium-calcium alloy. *Materials and Design*, Cilt 29, s. 2034-2037. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.04.017
- [8] Rajurkar, K.P. 1994. Nontraditional Manufacturing Processes. *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*, Cilt 13, John Wiley&Sons, Inc., 211-212s.
- [9] Guo, Y.B., Brooks, V.S., Todd, B.A. 2009. Characterization of Mechanical Property and Microstructure of Biomedical Magnesium-CalciumAlloy, *Proceedings of ASM 2009 Materials&Process for medical Devices Conference*, Minneapolis, Minnesota
- [10] www.minitab.com, MinitabInc., 2007.
- [11] Bigot, S.,Ivanov, A., Popov, K. 2005. A study of the micro EDM electrode wear, *Proceedings of the 1st International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Karlsruhe, Germany, 355-358s.
- [12] Sundaram, M.M.,Rajurkar, K. P. 2008. Towards Free form Machining by Micro Electro Discharge Machining Process, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME (NAMRI/SME)*, Cilt 36, s. 381-388.
- [13] Luo, Y.F. 1998. An investigation into the actual EDM off-time in SEA machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 74, No 1-3, s. 61-68. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00250-1