

# Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenen Al2024-T3 Malzemesinin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Semih GÜNER<sup>1</sup>  Mustafa YURDAKUL<sup>2</sup>  Emre AYHAN<sup>3\*</sup>  Yusuf Tansel İÇ<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/02/2024  
Düzeltilme: 01/03/2024  
Kabul: 16/03/2024

## Anahtar Kelimeler

Alüminyum  
Al2024  
Elektro erozyon  
Optimizasyon

## Article Info

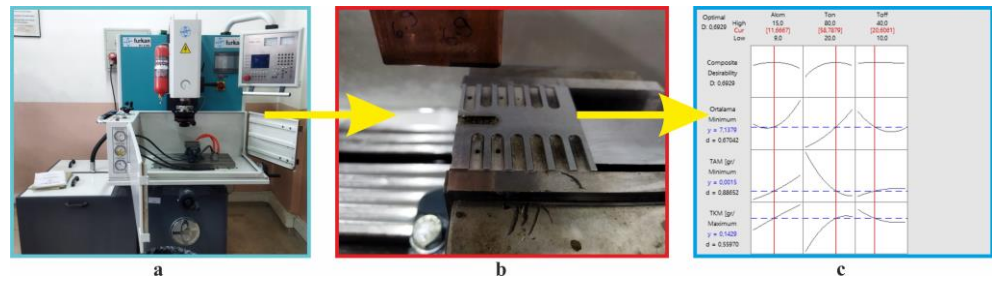
Research article  
Received: 18/02/2024  
Revision: 01/03/2024  
Accepted: 16/03/2024

## Keywords

Aluminum alloy  
Al2024  
Electro Discharge  
Machining  
Optimization

## Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) olarak sıralanabilecek performans yanıtları üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. / In this study, by applying the electro discharge machining in the machining of Al2024-T3 material, performance responses were obtained based on the data of material removal rate (TKM), tool wear rate (TAM) and average surface roughness ( $R_a$ ) data.



Şekil A: a) Elektro erozyon tezgahı / Electro discharge machine b) Deney numunesi / Figure A: Specimen c) "Response Optimizer" sonuçları / "Response Optimizer" results

## Önemli noktalar (Highlights)

- Elektro erozyon yöntemi ile alüminyum işleme / Aluminum machining by electrodischarge method
- Yanıt yüzeyi metodolojisi / Response surface design
- Optimum sonuçların elde edileceği işleme parametrelerinin tespit edilmesi / Determination of machining parameters to obtain optimum results

**Amaç (Aim):** Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) kullanılarak işleme parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to determine the machining parameters by applying the electro discharge method in the machining of Al2024-T3 material, using the amount of material removal rate (TKM), the amount of tool wear (TAM) and the average surface roughness ( $R_a$ ).

**Özgünlük (Originality):** Al2024-T3 malzemesinin elektro erozyon yöntemiyle işlenmesinde işleme parametrelerinin belirlenmesidir. / It is the determination of machining parameters in the processing of Al2024-T3 material by electro discharge method.

**Bulgular (Results):** Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonucunda işlemede etkin parametrelerin sırasıyla  $T_{on}$ ,  $I_p$  ve  $T_{off}$  olduğu tespit edilmiştir. / As a result of the analysis of variance (ANOVA), it was determined that the effective parameters in processing were  $T_{on}$ ,  $I_p$  and  $T_{off}$ , respectively.

**Sonuç (Conclusion):** TKM, TAM ve  $R_a$  için optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri  $I_p$  için 11,6667 A,  $T_{on}$  için 58,7879  $\mu s$  ve  $T_{off}$  için 20,6061 olarak bulunmuştur. / The optimum values for TKM, TAM and  $R_a$  were found to be 11,6667 A for  $I_p$ , 58,7879  $\mu s$  for  $T_{on}$  and 20,6061 for  $T_{off}$ .



## Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenen Al2024-T3 Malzemesinin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Semih GÜNER<sup>1</sup> Mustafa YURDAKUL<sup>2</sup> Emre AYHAN<sup>3\*</sup> Yusuf Tansel İÇ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/02/2024  
Düzeltilme: 01/03/2024  
Kabul: 16/03/2024

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum alaşımı  
Al2024-T3  
Elektro erozyon işleme  
Optimizasyon

### Öz

Günümüzde alüminyum alaşımları hafif olması, yüksek dayanım sunması ve ekonomik olmaları gibi sebeplerle havacılık, otomotiv ve savunma sanayiinde yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) olarak sıralanabilecek performans yanıtları üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan deneylerde boşalım akımı ( $I_p$ ), vurum süresi ( $T_{on}$ ) ve vurum aralığı ( $T_{off}$ ) parametrelerinin performans yanıtları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonucunda deney sonuçları üzerinde etkin parametrelerin sırasıyla  $T_{on}$ ,  $I_p$  ve  $T_{off}$  olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında performans yanıtlarını eniyileyecek parametre değerlerinin tespiti amacıyla bir optimizasyon çalışmasına da yer verilmiştir. TKM, TAM ve  $R_a$  için optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri  $I_p$  için 11,6667 A,  $T_{on}$  için 58,7879  $\mu s$  ve  $T_{off}$  için 20,6061 olarak bulunmuştur.

## Optimization of Machining Parameters of Al2024-T3 Material Machined with Electro Discharge Machining

### Article Info

Research article  
Received: 18/02/2024  
Revision: 01/03/2024  
Accepted: 16/03/2024

### Keywords

Aluminum alloy  
Al2024-T3  
Electro Discharge  
Machining  
Optimization

### Abstract

Aluminum alloys are widely preferred in the aviation, automotive and defense industries today due to their lightness, high strength and economical nature. In this study, by applying the electro discharge machining in the machining of Al2024-T3 material, performance responses were obtained based on the data of material removal rate (TKM), tool wear rate (TAM) and average surface roughness ( $R_a$ ) data. In the experiments, the effects of discharge current ( $I_p$ ), pulse duration ( $T_{on}$ ) and pulse interval ( $T_{off}$ ) parameters were examined. As a result of the analysis of variance (ANOVA), it was determined that the effective parameters on the experimental results were  $T_{on}$ ,  $I_p$  and  $T_{off}$ , respectively. Additionally, an optimization process was applied to the experimental results to obtain the appropriate values of machining parameters. The optimum values for TKM, TAM and  $R_a$  were found to be 11,6667 A for  $I_p$ , 58,7879  $\mu s$  for  $T_{on}$  and 20,6061 for  $T_{off}$ .

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al2024 alaşımları sağlamış oldukları üstün mukavemet/ağırlık oranı değerleri sebebiyle günümüzde havacılık uygulamalarında yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca ısıl işlem uygulanabilmesi, yorulma dayanımının yüksek olması ve kaplanarak korozyona karşı direnç özelliğinin artırılabilmesi

Al2024 alaşımlarının imalatta tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır [1].

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, dielektrik sıvı ile doldurulmuş bir ortamda elektriksel olarak iletken iş parçası ve takım arasında doğru şekilde kontrol edilen bir elektrik deşarjı (kıvılcım) gerçekleşmesiyle talaş kaldıran alışılmamış işleme yöntemidir [2]. Sertliğine bakılmaksızın işlenmesi zor malzemelerin yüksek hassasiyetle imalatı bu

yöntem ile gerçekleştirilebilmektedir. Elektrot malzemesi, talaş kaldırma işlemi sırasında yüksek ısıdan dolayı bir miktar eriyebilir veya buharlaşabilir. Eriyen veya buharlaşan parçacıkların kıvılcımın olduğu bölgeden uzaklaştırma işlemi dielektrik sıvı vasıtasıyla gerçekleştirilir.

Literatürde Al2024 malzemenin EEİ yöntemi ile işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunluğunun işlenebilirlik, optimizasyon ve işleme yöntemin geliştirilmesine yönelik yapıldığı görülmektedir. Çalışmanın bu kısmında literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

Srivastava ve arkadaşları EEİ yöntemi ile işlenen SiC ile güçlendirilmiş Al2024 malzeme için optimum yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranının tespit edilmesi üzerine çalışmışlardır. Söz konusu çalışmada işleme parametreleri optimizasyonunda Yüzey Yanıt Yöntemini (RSM) tercih etmişlerdir. Çalışma sonucunda boşalım akımı, vurum süresi ve takviye yüzdesi değerlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Ayrıca malzeme kaldırma oranı, tepe akımı ve darbe süresi değerlerinin artışı ile arttığı, takviye süresinin artışı ile azaldığı gözlemlenmiştir [3].

Mehmood ve arkadaşları yaptıkları çalışmada EEİ ile Al2024 T6 malzemeyi işleyerek, işleme parametrelerinin yüzey kalitesine ve yorulma performansına etkisini ele almışlardır. Çalışmada beş farklı boşalım akımı değeri belirlenirken diğer parametreler sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüksek boşalım akımının daha kısa yorulma ömrüne yol açtığı ve yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, boşalım akımının beyaz tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri üzerinde paralel etki gösterdiği de görülmüştür [4].

Arunachalam ve arkadaşları EEİ ve frezeleme yöntemlerinin alüminyum alaşımlarının korozyon ve korozyon yorulma davranışı üzerindeki etkisini ele almışlardır. Çalışmada yüzey kalitesi, mikroyapısal analiz, elektrokimyasal testler ve korozyon yorulma testleri üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular EEİ'nin malzeme üzerinde korozyon yönelimini arttırdığını göstermiştir [5].

Guruprakash ve arkadaşları yaptıkları çalışmada EEİ yönteminde farklı işleme parametrelerinin Al2024 malzeme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçları yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranı değerleri kullanılarak

yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum darbe süresinde referans geriliminin artışı yüzey pürüzlülüğüne ve malzeme kaldırma oranına pozitif yönde etki yaptığı görülmüştür [6].

Yahya ve Manning çalışmalarında EEİ yönteminde malzeme kaldırma oranına ilişkin elektriksel ve fiziksel parametre etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada malzeme kaldırma oranını etkileyen faktörlerin tespiti için bir matematiksel model oluşturulmuştur. Deneyler sonucuna gerilim, akım, kıvılcım frekansı ve vurum süresinin malzeme kaldırma oranını doğrudan etkileyen faktörler olduğu tespit edilmişlerdir [7].

Singh ve Pradhan yapmış oldukları çalışmada farklı malzemeler üzerinde EEİ yöntemini uygulayarak malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi performans parametrelerinin optimizasyonu üzerine veriler elde etmişlerdir [8].

Sanghani ve Acharya yapmış oldukları çalışmada EEİ'nin çeşitli performans ölçümlerinin iyileştirilmesi ve optimizasyonuna ilişkin araştırmaları ele almışlardır. Genellikle yapılan çalışmalarda işleme parametreleri olarak vurum süresi, vurum aralığı, boşalım akımı, gerilim değerlerinin malzeme kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınma oranına olan etkisinin incelendiği ifade edilmiştir. Bahse konu olan çalışmalarda deney sonuçlarının optimizasyonunda Taguchi, Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM), Yapay Sinir Ağı (ANN) ve Genetik Algoritma (GA) yöntemlerinin kullanıldığını ifade etmişlerdir [9].

Bhuyan ve arkadaşları çalışmalarında EEİ ile işlemede Al-24%SiC metal matrisli kompozit malzeme kullanarak işleme parametrelerinin optimizasyonunu ele almışlardır. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne proses parametreleri olarak boşalım akımı, vurum süresi ve dielektrik yıkama basıncı değerlerinin etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarının optimizasyonunda çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi uygulanmıştır [10].

Daneshmand ve Masoudi çalışmalarında Al2024 ve Al/7.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemelerinin EEİ ile işlenmesi sonucu malzeme kaldırma, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işleme parametrelerinin tespiti üzerine çalışmışlardır. Çalışmada regresyon analizi aracılığıyla bir matematiksel model elde edilmiştir. Deney sonuçları Taguchi yöntemi ve ANOVA analizi ile

yorumlanarak etkin işleme parametreleri ortaya konmuştur [11].

Satpathy ve arkadaşları EEİ yöntemini AlSiC metal matrisli kompozit malzeme üzerinde uygulayarak malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etki eden işleme parametrelerinin tayini üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, Temel Bileşen Analizi (PCA) ve optimum giriş parametre setlerini elde etmek için TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır [12].

Alagarsamy ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada EEİ ile işleme yönteminde boşalım akımı, vuruş süresi ve vuruş aralığı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini ele almışlardır. Çalışmada AlZrO<sub>2</sub> metal matrisli kompozit malzeme kullanılmıştır. Deneyler Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) aracılığıyla planlanmıştır. İşleme parametreleri ve parametrelerin etkileşimlerini göstermek için ANOVA kullanılmıştır [13].

Phimoolchat ve Muttamara yapmış oldukları çalışmada Al2024 malzemesinin EEİ ile işlenmesinde işleme parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemini kullanarak optimizasyonunu ele almışlardır. Proses

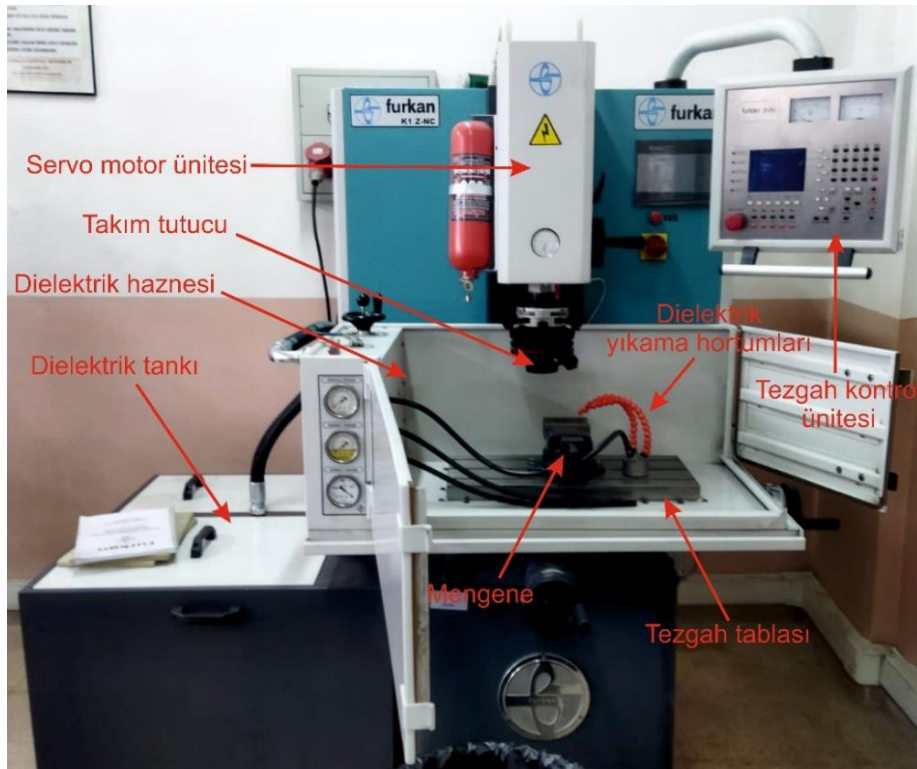
parametreleri olarak vuruş süresi, boşalım akımı, görev faktörü ve gerilim belirlenmiştir. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi performans parametreleri incelenmiştir [14].

Literatür çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde, deney sonuçlarının yorumlanmasında farklı istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda çoğunlukla etkin parametrelerin tespiti üzerine yapıldığı ve deney sonuçlarının birbirinden bağımsız olarak değerlendirildiği tespit edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, Al2024 malzemenin EEİ yöntemi ile işlenmesi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme yönteminin uygulandığı çalışmaların literatüre katkı sağlayacağı fikri ortaya çıkmıştır.

## 2. EXPERIMENTAL STUDY (DENEYSEL ÇALIŞMA)

### 2.1. Electro Discharge Machine (Elektro Erozyon Tezgahı)

Deneylerde Furkan K1 Z-NC marka dalma elektro erozyon tezgahı kullanılmıştır (Şekil 1). Tezgaha ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Elektro erozyon tezgahı (Electro discharge machine)

**Tablo 1.** Furkan K1 Z-NC elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri (Furkan K1 Z-NC Electro discharge machine technical properties) [15]

Tezgah Özellikleri	
Tezgah gücü (kVA)	3,5
En yüksek çalışma akımı (A)	25
İş tablası ölçüleri (mm)	550 x 250
İşlenebilir en büyük parça boyutu (mm)	790 x 490 x 300
Eksenlerdeki hareket hassasiyeti (mm)	0,005
Dielektrik tank kapasitesi (lt)	270
Pompa kapasitesi (lt/dk)	40
Dielektrik filtre hassasiyeti ( $\mu\text{m}$ )	5

## 2.2. Deney Numunesi (Specimen)

Deneylerde numune malzemesi olarak Al2024-T3 alaşımı kullanılmıştır (Tablo 2). Al2024-T3 malzeme geleneksel imalat yöntemleriyle şekillendirilebilen bir malzeme olmasına karşın, günümüzde sürdürülebilir ve yeşil üretime duyulan talep nedeniyle geleneksel olmayan işleme yöntemleriyle şekillendirilmesi tercih edilmektedir [16]. Deney numunesi 51 x 51 x 8 mm boyutlarında

olup numuneye ait mekanik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

## 2.3. Takım (Tool)

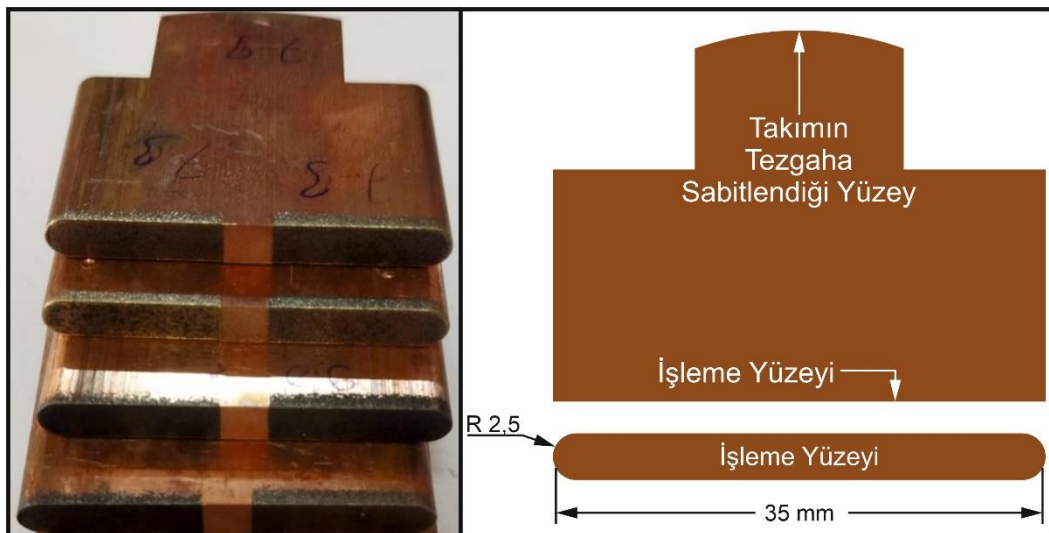
Deneylerde bakır malzemeden üretilmiş takımlar (elektrot) kullanılmıştır. Tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanmış olan elektrotun geometrisi ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Takım malzemesine ait mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 2.** Al2024-T3 malzemenin içeriği (Content of Al2024-T3 material) [17]

Alaşım İçeriği (%)								
Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zn	Cr	Diğer
92,5	4	1,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,1	0,15

**Tablo 3.** Deney numunesinin özellikleri (Specimen properties) [18]

Deney Numunesinin Özellikleri	
Sertlik (HB)	120
Çekme dayanımı (MPa)	475
Akma dayanımı (MPa)	340
Kopma uzaması (%)	18

**Şekil 2.** Takım geometrisi ve boyutları (Tool geometry and dimensions)

**Tablo 4.** Bakır elektrotun özellikleri (Cooper tool properties) [15]

Bakır Elektrotun Özellikleri	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2660
Sertlik (Vickers)	87
Çekme dayanımı (MPa)	275-350
Akma dayanımı (MPa)	125-145
Elektriksel iletkenlik ( $\Omega\text{m}$ )	$5,98 \times 10^{-8}$
Erime sıcaklığı (°C)	590,6 - 638

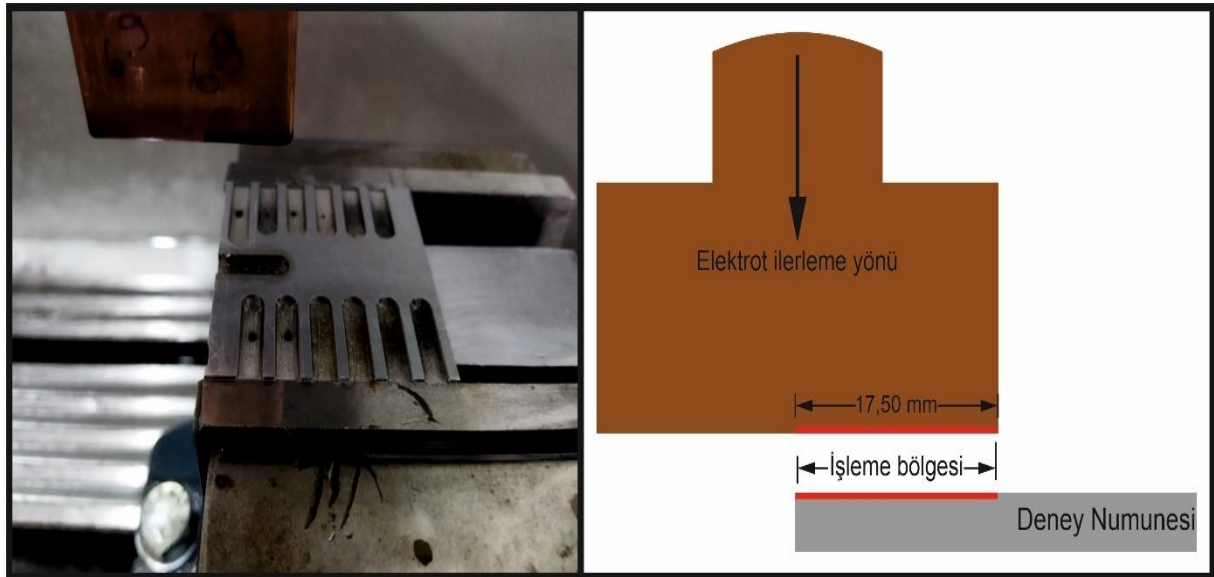
Deneylerde takım işleme yüzeyinin 17,5 mm uzunluğundaki kısmı işleme yapacak şekilde deney numunesinin kenarına göre hizalanmıştır (Şekil 3). Bu sayede deneyler sonucunda elde edilen geometrilerin kesit görüntüleri başka bir imalat yöntemine gerek duymadan elde edilebilmiştir.

#### 2.4. Dielektrik Sıvısı (Dielectric Fluid)

Deneylerde işlem esnasında yüksek parlama noktasına, düşük viskoziteye ve yüksek oksidasyon kararlılığına sahip standart Belone EDM F tanımlı dielektrik sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde kıvılcımla aşınma oluşan bölgeye 8 psi basınçla yanıl yıkama yapacak şekilde sıvı akışı uygulanmıştır. Kullanılan dielektrik elektro erozyon sıvısının özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

#### 2.5. Deney Parametreleri (Experimental Parameters)

İncelenen literatür çalışmalarından da faydalanılarak belirlenen deney parametreleri ve parametrelere ait değerler Tablo 6'da verilmiştir. Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı etkisi incelenecek deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Yüksek boşalım akımı değerlerinde malzeme kaldırma oranı artarken, yüzey kalitesi düşmekte ve takım aşınması artmaktadır [19]. Vurum aralığının artması ile işleme süresi de artmaktadır. Ayrıca vurum aralığı değerlerinin işleme sonucuna oluşan yüzeyin pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu görülmüştür [16].

**Şekil 3.** Deneylerde kullanılan işleme bölgesi (Machining zone of the experiments)**Tablo 5.** Elektro erozyon sıvısının özellikleri (Dielectric fluid properties) [15]

Görünüş	C&B
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	0,760
Renk (Saybolt)	+30
Kinematik vizkozite (mm <sup>2</sup> /s)	1,910
Alevlenme noktası (°C)	102

**Tablo 6.** Deney parametreleri (Experimental parameters)

Deney Parametresi	Parametre Değeri		
	Alt	Orta	Üst
Seviyeler			
Boşalım akımı [ $I_p$ ] (A)	9	12,5	15
Vurum süresi [ $T_{on}$ ] ( $\mu$ s)	20	40	80
Vurum aralığı [ $T_{off}$ ] ( $\mu$ s)	10	20	40
Referans voltajı (V)	55		
Açık devre voltajı (V)	130		
İşleme süresi (sn)	2		
Geri çekme mesafesi (mm)	2		
İşleme derinliği (mm)	2		
Dielektrik basıncı (psi)	8		
Hassasiyet	25		
Dielektrik sıvısı uygulama biçimi	Sürekli		
Kutuplama	Takım pozitif, deney numunesi negatif		
Tank doluluğu	Deney numunesinin üst yüzeyinden 25 mm yukarıda		
İşleme bölgesi boyutları (mm)	17,5 x 5		

### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Tablo 6'da verilen parametreler belirlenerek çalışma kapsamında 27 adet deney yapılmıştır (Şekil 4). Deney sonuçlarının yorumlanmasında 3 farklı performans çıktısından faydalanılmıştır. Bunlar talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değerleridir.

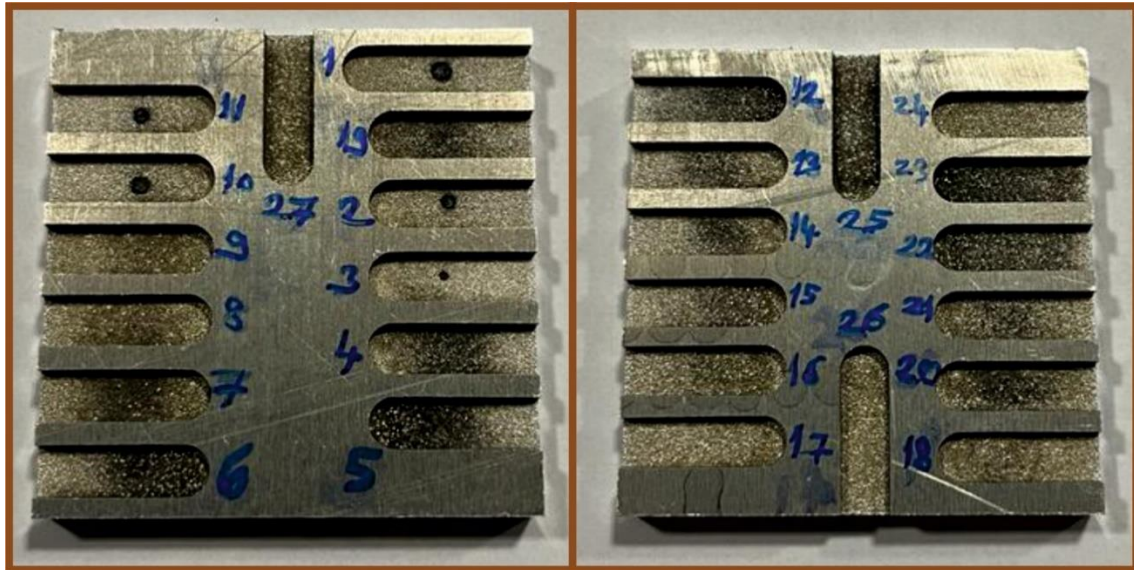
TKM, deneyde kaldırılan talaş miktarının deney süresine oranlanması ile hesaplanan bir değer olup Eşitlik 3.1'den hesaplanmıştır.

$$TKM = \frac{(\text{Numunenin işleme öncesi ağırlığı} - \text{Numunenin işleme sonrası ağırlığı})}{(\text{İşleme süresi})} \quad [gr/dk] \quad (3.1) [15]$$

Diğer bir performans çıktısı olan TAM değeri ise her bir deney esnasında elektrotta (takımda) meydana gelen aşınma miktarının ölçüsüdür ve Eşitlik 3.2'den hesaplanmıştır.

$$TAM = \frac{(\text{Takımın işleme öncesi ağırlığı} - \text{Takımın işleme sonrası ağırlığı})}{(\text{İşleme süresi})} \quad [gr/dk] \quad (3.2) [15]$$

TKM ve TAM değerlerinin hesaplanabilmesi için her bir deneyin başlangıcında deney numunesinin ve takımın ağırlıkları dijital terazi aracılığıyla ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan TKM ve TAM değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

**Şekil 4.** Deney sonuçları (Experimental results)

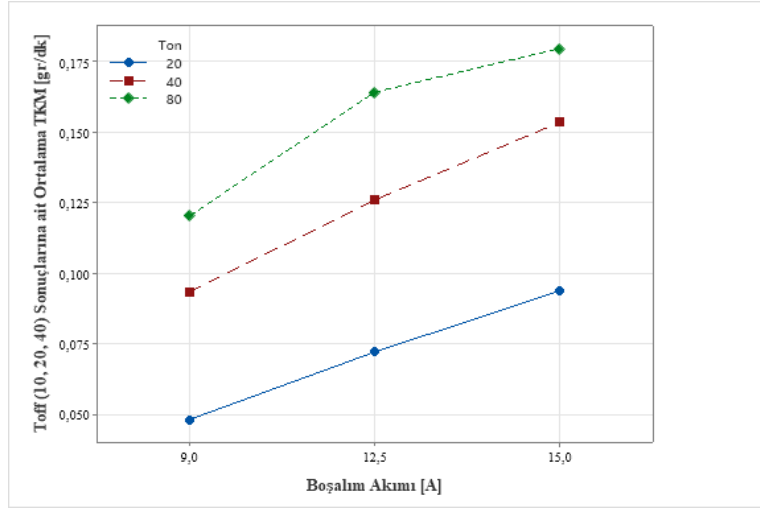
Deneylerin sonucunda numunede oluşan yeni yüzeylerin pürüzlülük değerleri de deneylerin yorumlanmasında kullanılmıştır. Her bir deney için yüzey pürüzlülük parametreleri ölçülerek  $R_a$  elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük parametreleri Mitutoyo SJ-210 cihazı ile ölçülmüştür. Deney sonuçlarının yorumlanması amacıyla Şekil 5 ile Şekil 10 arasında verilen grafikler oluşturulmuştur. Deney çıktılarından biri olan TKM değerleri incelendiğinde;  $I_p$  ve  $T_{on}$  değerlerindeki artış TKM'yi arttırdığı,  $T_{off}$  değerlerindeki artış ise TKM değerini arttırdığı görülmektedir (Şekil 5-6).

TAM değerleri için deney sonuçları incelendiğinde;  $I_p$  ve  $T_{off}$  değerlerinin artışının TAM değerlerini arttırdığı, ancak Ton değerlerindeki artışın TAM değerlerini azalttığı anlaşılmaktadır (Şekil 7-8). Şekil 9 ve 10'da verilen  $R_a$  sonuçlarına ait grafikler incelendiğinde;  $I_p$  ve  $T_{on}$  değerlerindeki artışın yüzey pürüzlülüğünün artmasına,  $T_{off}$  değerlerindeki artışın ise yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatür çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir.

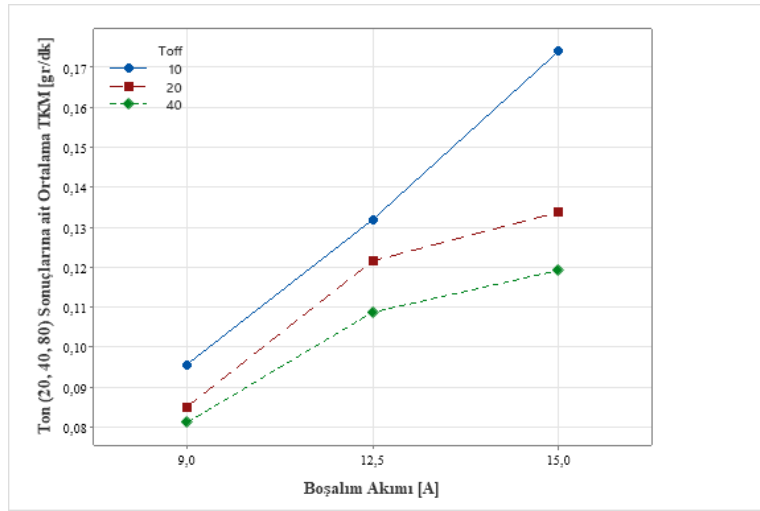
**Tablo 7.** Deney sonuçları tablosu (Table of experimental results)

Deney Numarası	$I_p$ [A]	$T_{on}$ [ $\mu$ s]	$T_{off}$ [ $\mu$ s]	Numunenin İlk Ağırlığı [gr]	Takım İlk Ağırlığı [gr]	Numunenin Son Ağırlığı [gr]	Takım Son Ağırlığı [gr]	İşleme Süresi [dk]	TKM [gr/dk]	TAM [gr/dk]	$R_a$ [ $\mu$ m]
1	9	20	10	58,7253	56,6134	58,2042	56,5924	8,967	0,058115	0,002342	6,489
2	9	20	20	57,7306	56,5974	57,2659	56,5746	12,033	0,039000	0,001895	5,492
3	9	20	40	57,2613	56,6223	56,7972	56,5988	9,900	0,047343	0,002374	5,483
4	9	40	10	56,7926	56,5769	56,3415	56,5724	4,483	0,101665	0,001004	7,390
5	9	40	20	56,3368	56,5746	55,8606	56,5642	5,067	0,094895	0,002053	6,407
6	9	40	40	55,8506	56,5988	55,3715	56,5889	5,850	0,083607	0,001692	7,169
7	9	80	10	55,3615	56,5724	54,8755	56,5698	3,900	0,127179	0,000667	9,306
8	9	80	20	54,8655	56,8310	54,3702	56,8290	4,167	0,121272	0,000480	8,771
9	9	80	40	54,3592	56,8290	53,8702	56,8242	4,450	0,112360	0,001079	7,970
10	12,5	20	10	53,8375	56,5970	53,4114	56,5692	5,717	0,080257	0,004863	6,861
11	12,5	20	20	53,3787	56,5713	52,9364	56,5351	6,617	0,071773	0,005471	6,171
12	12,5	20	40	52,9038	56,5894	52,4893	56,5502	6,950	0,064331	0,005640	5,699
13	12,5	40	10	52,4567	56,5692	52,0082	56,5578	3,433	0,140155	0,003320	8,106
14	12,5	40	20	51,9755	56,5351	51,5120	56,5241	3,817	0,130009	0,002882	6,583
15	12,5	40	40	51,4793	56,5509	51,0416	56,5373	4,367	0,107702	0,003115	6,374
16	12,5	80	10	51,0090	56,5900	50,5332	56,5870	2,900	0,175310	0,001034	9,910
17	12,5	80	20	50,5006	56,2574	50,0281	56,2525	3,100	0,162935	0,001581	9,237
18	12,5	80	40	49,9955	56,5870	49,5142	56,5790	3,333	0,154200	0,002400	8,014
19	15	20	10	58,2042	56,5924	57,7352	56,5549	4,033	0,116281	0,009298	8,694
20	15	20	20	49,4815	56,1072	49,0417	56,0584	5,150	0,091748	0,009476	8,747
21	15	20	40	49,0090	56,2525	48,5780	56,1933	6,317	0,073393	0,009372	9,486
22	15	40	10	48,5454	55,8790	48,0738	55,8705	2,783	0,181186	0,003054	8,525
23	15	40	20	48,0411	56,0584	47,5902	56,0401	3,217	0,150342	0,005689	7,363
24	15	40	40	47,5575	55,8705	47,1126	55,8489	3,700	0,129081	0,005838	9,311
25	15	80	10	47,0799	56,6015	46,5960	56,5995	2,300	0,224609	0,000870	10,504
26	15	80	20	46,5300	56,5949	46,1287	56,5918	2,933	0,159307	0,001057	9,580
27	15	80	40	46,0627	55,5052	45,6399	55,5018	3,150	0,155175	0,001079	9,470

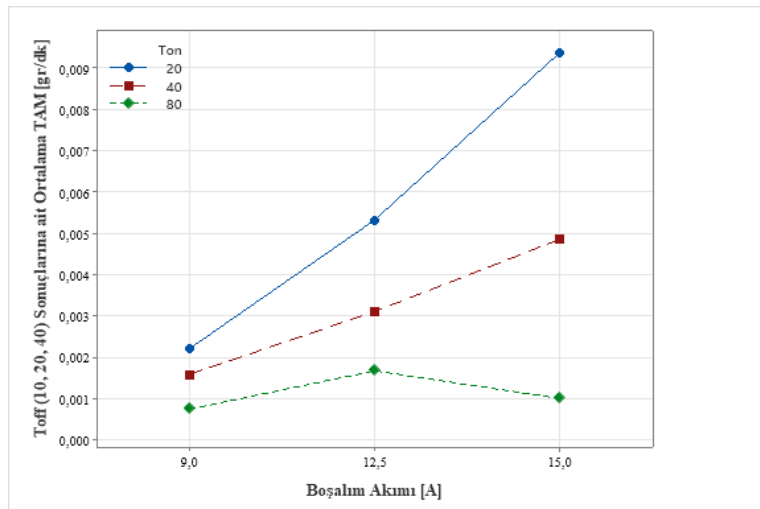




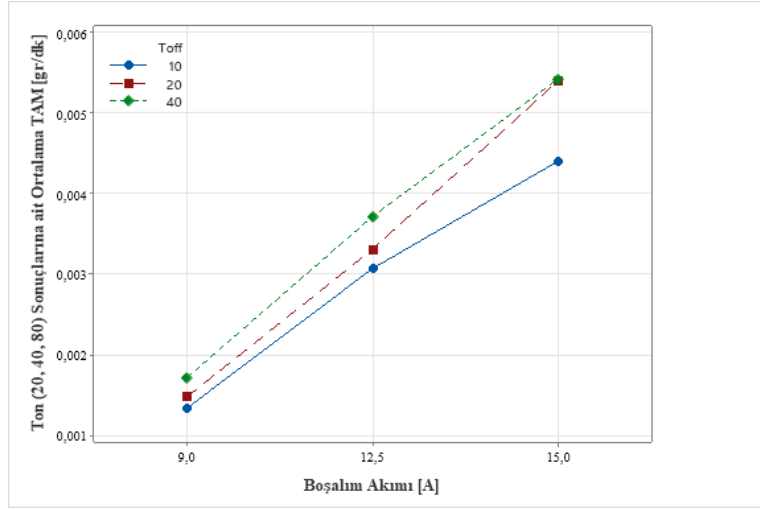
Şekil 5. TKM'nin  $I_p$  ve  $T_{on}$  değerlerine göre değişimi (Variation of TKM according to  $I_p$  and  $T_{on}$  values)



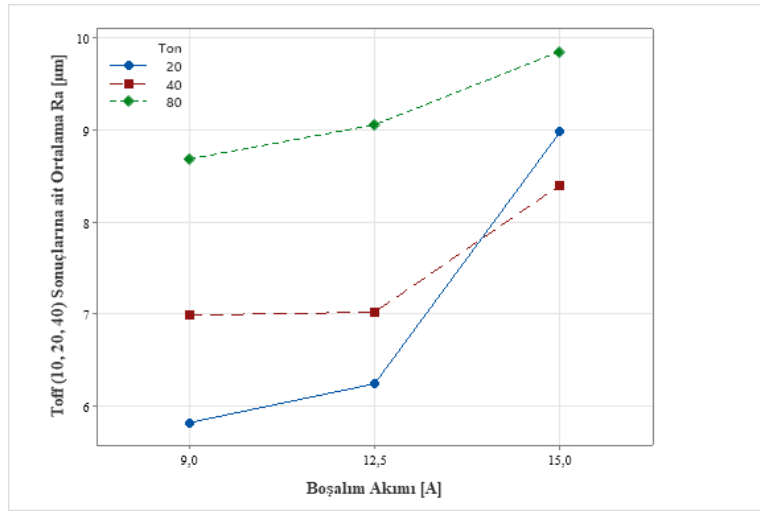
Şekil 6. TKM'nin  $I_p$  ve  $T_{off}$  değerlerine göre değişimi (Variation of TKM according to  $I_p$  and  $T_{off}$  values)



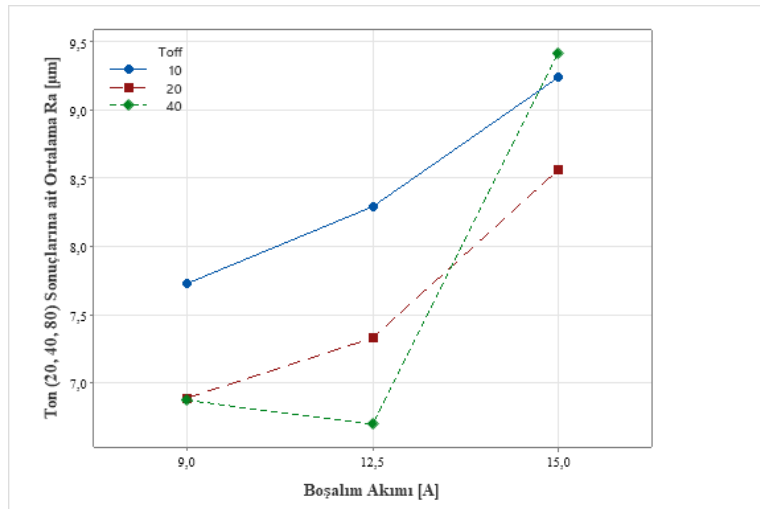
Şekil 7. TAM'ın  $I_p$  ve  $T_{on}$  değerlerine göre değişimi (Variation of TAM according to  $I_p$  and  $T_{on}$  values)



Şekil 8. TAM'ın  $I_p$  ve  $T_{off}$  değerlerine göre değişimi (Variation of TAM according to  $I_p$  and  $T_{off}$  values)



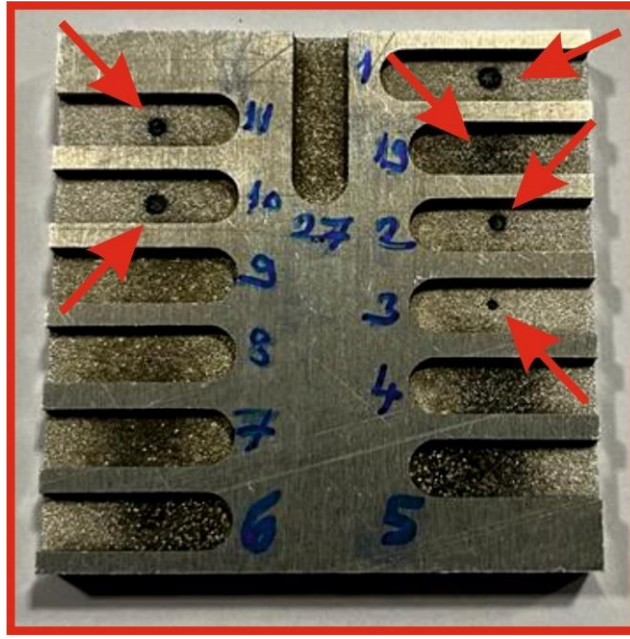
Şekil 9.  $R_a$ 'nın  $I_p$  ve  $T_{on}$  değerlerine göre değişimi (Variation of  $R_a$  according to  $I_p$  and  $T_{on}$  values)



Şekil 10.  $R_a$ 'nın  $I_p$  ve  $T_{off}$  değerlerine göre değişimi (Variation of  $R_a$  according to  $I_p$  and  $T_{off}$  values)

1, 2, 3, 10, 11 ve 19 numaralı deneylerde oluşan yüzeylerin üzerinde koyu renkli bölgelerin oluştuğu görülmüştür (Şekil 11). Bu bölgelerin, işleme esnasında takıma karbon moleküllerinin yapışması

ve bundan dolayı takım iş parçası arasında meydana gelen kısa devre sebebiyle oluştuğu bilinmektedir [20].



**Şekil 11.** Takım ve numune arasında kısa devre oluşan deneyler (Experiments with a short circuit between the tool and the specimen)

EEİ bünyesinde çok yönlü ve bütünlük alt işlemler barındıran bir operasyon olup; elektrik, akışınlar mekaniği, ısı transferi ve kimyasal reaksiyon gibi çoklu fiziksel olayların eş zamanlı meydana gelmesiyle gerçekleşmektedir. Bu sebeple performans çıktılarının yorumlanmasında ve en uygun değerlerin belirlenmesinde istatistiksel yöntemlerden de faydalanılmıştır. Performans çıktılarının analizi için Minitab programında yer alan Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Design (RSM)) modülü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bu metot, süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için sıklıkla tercih edilen istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir [21].

Minitab'de TKM, TAM ve  $R_a$  sonuçları için oluşturulan modellerin performanslarına ait bilgiler Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de yer alan S değeri,

deney sonuçları ile programın oluşturduğu model arasındaki farkın standart sapmasını ifade etmektedir. Dolayısıyla bu değer 0 eşit veya yakın olması modelin verdiği yanıtın başarısını arttırmaktadır. Tabloda yer alan R-sq değeri oluşturulan model ile deney verilerinin uyum yüzdesini ifade etmektedir. Tablodaki R-sq(adj) değeri, model tarafından elde edilen sonuçların varyasyonunun, deney sayısına göre modeldeki tahminlerin ayarlanmış yüzdesini ifade etmektedir. Son olarak tabloda yer alan R-sq(pred) değeri modelin yeni deney sonuçları için yanıtı ne kadar iyi tahmin ettiğini göstermektedir. İşleme parametrelerinin performans çıktıları üzerine olan etkisinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi (ANOVA) sonuçları elde edilerek Tablo 9'da verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarından TKM, TAM ve  $R_a$  sonuçları üzerinde sırasıyla  $T_{on}$ ,  $I_p$  ve  $T_{off}$  parametrelerinin etkili olduğu anlaşılmaktadır

**Tablo 8.** Deney sonuçlarına ait modellerin performans parametreleri (Performance parameters of the models of the experimental results)

	S	R-sq (%)	R-sq(adj) (%)	R-sq(pred) (%)
<b>TKM</b>	0,0093748	97,18	95,69	92,61
<b>TAM</b>	0,0007931	94,48	91,56	86,42
<b><math>R_a</math></b>	0,605613	89,03	83,23	73,38

**Tablo 9.** Modellerin varyans analizi (ANOVA) sonuçları (Results of analysis of variance (ANOVA) of models)

Terim	Serbestlik Derecesi	TKM		TAM		R <sub>a</sub>	
		Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri
Model	9	0,05149	65,1	0,000183	32,34	50,6254	15,34
Doğrusal etki	3	0,04722	179,09	0,000129	68,43	39,4926	35,89
I <sub>p</sub>	1	0,012595	143,31	0,000046	72,8	15,2284	41,52
T <sub>on</sub>	1	0,029979	341,11	0,000082	129,86	20,6619	56,34
T <sub>off</sub>	1	0,004054	46,13	0,000002	3,27	3,1381	8,56
Karelerin etkisi	3	0,004262	16,16	0,000006	3,12	6,5223	5,93
I <sub>p</sub> x I <sub>p</sub>	1	0,000011	0,12	0	0,48	4,1915	11,43
T <sub>on</sub> x T <sub>on</sub>	1	0,00366	41,65	0,000005	8,38	0,4259	1,16
T <sub>off</sub> x T <sub>off</sub>	1	0,000591	6,72	0	0,49	1,9049	5,19
İkili etkileşim	3	0,001181	4,48	0,000032	17,04	3,7749	3,43
I <sub>p</sub> x T <sub>on</sub>	1	0,000134	1,52	0,000032	50,72	2,1054	5,74
I <sub>p</sub> x T <sub>off</sub>	1	0,000986	11,22	0	0,32	0,6669	1,82
T <sub>on</sub> x T <sub>off</sub>	1	0,000061	0,69	0	0,09	1,0025	2,73
Hata	17	0,001494		0,000011		6,235	
Toplam	26	0,052984		0,000194		56,8604	

Oluşturulan modellere ait katsayılar ve P-değerleri ise Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'da verilen ve her bir model tarafından hesaplanan katsayılar, modelin etkililiğini incelemek için kullanılır. Aynı tabloda yer alan P-değerleri ise ilgili terimlerin TKM, TAM ve R<sub>a</sub> modellerindeki istatistiksel önemini ifade etmektedir. Literatür çalışmalarında, P-değerinin 0,05 değerinden düşük veya eşit olmasının ilgili parametrenin model için istatistiksel

olarak anlamlı olduğu ifade edilmektedir [21]. Tablo 9'da verilen katsayıları ve P-değerleri dikkate alınarak TKM, TAM ve R<sub>a</sub> için regresyon denklemleri elde edilmiştir (Eşitlik 3.3,3.4 ve 3.5). I<sub>p</sub>, T<sub>on</sub> ve T<sub>off</sub> etkisi gözlemlenen deney parametreleri olması sebebiyle tekil etkilerinin P-değerlerine bakılmaksızın regresyon denklemlerinde yer alması gerekmektedir.

**Tablo 10.** Modellere ait katsayılar ve P-değerleri (Coefficients and P-values of the models)

Terim	TKM		TAM		R <sub>a</sub>	
	Katsayı	P-Değeri	Katsayı	P-Değeri	Katsayı	P-Değeri
Denklem Sabiti	0,13103	0,000	0,002289	0,000	6,664	0,000
I <sub>p</sub>	0,02692	0,000	0,001623	0,000	0,936	0,000
T <sub>on</sub>	0,04125	0,000	-0,002153	0,000	1,083	0,000
T <sub>off</sub>	-0,01517	0,000	0,000341	0,088	-0,422	0,009
I <sub>p</sub> x I <sub>p</sub>	-0,00138	0,731	0,000232	0,497	0,864	0,004
T <sub>on</sub> x T <sub>on</sub>	-0,02830	0,000	0,001074	0,010	0,305	0,296
T <sub>off</sub> x T <sub>off</sub>	0,01137	0,019	-0,000261	0,492	0,646	0,036
I <sub>p</sub> x T <sub>on</sub>	0,00326	0,234	-0,001594	0,000	-0,409	0,028
I <sub>p</sub> x T <sub>off</sub>	-0,00886	0,004	0,000126	0,581	0,230	0,195
T <sub>on</sub> x T <sub>off</sub>	-0,00217	0,417	0,000067	0,765	-0,279	0,117

$$TKM = 0,13103 + 0,02692I_p + 0,04125T_{on} - 0,01517T_{off} - 0,02830T_{on}^2 + 0,01137T_{off}^2 - 0,00886I_pT_{off} \quad (3.3)$$

$$TAM = 0,002289 + 0,001623I_p - 0,002153T_{on} - 0,000341T_{off} - 0,001074T_{on}^2 - 0,001594I_pT_{on} \quad (3.4)$$

$$R_a = 6,664 + 0,936I_p + 1,083T_{on} - 0,422T_{off} + 0,864I_p^2 + 0,646T_{off}^2 - 0,409I_pT_{on} \quad (3.5)$$

#### 4. OPTİMİZASYON (OPTIMIZATION)

Performans çıktılarının optimizasyonu için Minitab programında yer alan “Response Optimizer” modülü kullanılmıştır. Bu aşamada daha önce oluşturulmuş modeller aracılığıyla üç performans çıktısı (Eş. 3.3,3.4,3.5) eş zamanlı olarak optimize edilecek ve optimum faktör değerlerinin belirlenmesi gerçekleştirilecektir. Optimizasyon sonucunda performans çıktılarından TKM'nin en büyük, TAM ve Ra'nın ise en küçük olması hedeflenmektedir.

Optimizasyon hedeflerinin tanımlanması işleminin ardından optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 12). Hesaplanan optimum performans çıktıları ve bu değerlerin elde edildiği işleme parametreleri Tablo 11’de verilmiştir.

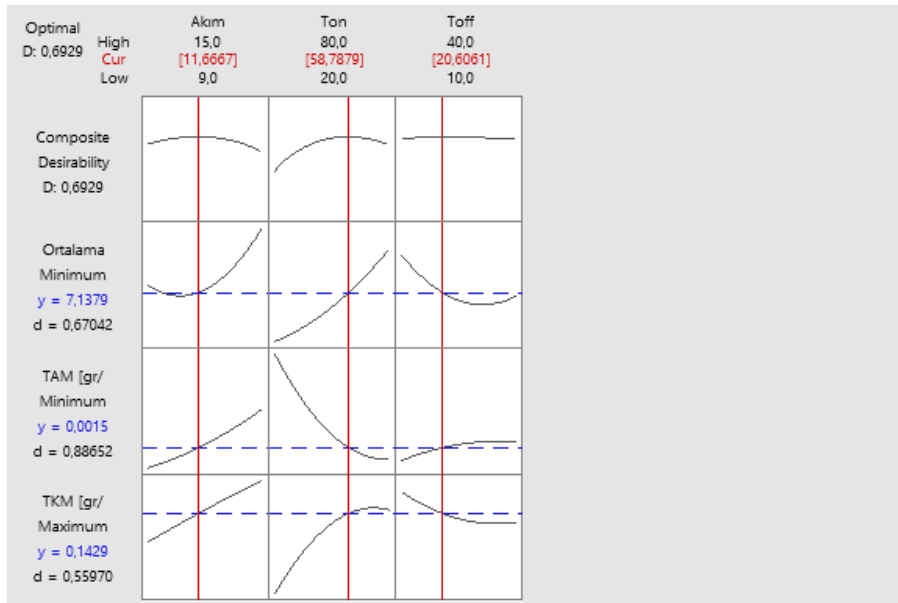
Tablo 11’de verilen işleme parametreleri kullanılarak yapılacak deneylerin sonuçları TKM, TAM ve Ra için en iyi sonuçları verecektir. Bu noktada erozyon tezgahının elde edilen işleme parametrelerinde çalıştırılabilmesi karşılaşılabilecek tek kısıttır. En iyi sonuçların elde edileceği işleme parametreleri deneylerin yapıldığı elektro erozyon tezgahının çalışma sınırları içerisinde yer almaktadır.

#### 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı parametrelerinin elektro erozyon yöntemiyle işlenen Al2024-T3 ile ilişkisi incelenmiştir. İnceleme TKM, TAM ve Ra sonuçları üzerinden yapılmıştır. Deney sonuçları literatür çalışmaları ile uyumluluk gösterdiği anlaşılmaktadır. Deney sonuçlarının yorumlanmasında Yanıt Yüzeyi Metodolojisi aracılığıyla oluşturulan modellerden faydalanılmıştır. Çalışmanın son kısmında performans çıktıları için hedefler belirlenerek, optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri ( $I_p=11,6667$ ,  $T_{on}= 58,7879$  ve  $T_{off}= 20,6061$ ) tespit edilmiştir.

Çalışmada sonunda tespit edilen optimum sonuçların elde edileceği işleme parametreleri incelendiğinde deney tasarımında belirlenen parametrelerinin en büyük ve en küçük değerlerinin arasında kalan değerler olduğu görülmektedir. Aksi bir durumda yani sınır değerlerin optimum sonuçları sağladığı tespit sonucu elde edilmiş olsaydı, deney tasarımında belirlenen parametrelerin gözden geçirilmesi söz konusu idi.

Bu çalışma ile aynı koşullar altında araştırma yapan ve sonuçlarını bu çalışmada elde edilen verilerle karşılaştıran araştırmalara yardımcı olacağı ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 12. “Response Optimizer” sonuçları (“Response Optimizer” results)

Tablo 11. Optimum işleme parametreleri ve sonuçları (Optimum machining parameters and their results)

$I_p$ [A]	$T_{on}$ [ $\mu$ s]	$T_{off}$ [ $\mu$ s]	TKM [gr/dk]	TAM [gr/dk]	$R_a$ [ $\mu$ m]
11,6667	58,7879	20,6061	0,14288	0,001501	7,138

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Semih GÜNER:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

He conducted experiments and analyzed the results.

**Mustafa YURDAKUL:** Verileri analiz etmiştir sonuçları yorumlamıştır.

He analyzed the data and interpreted the results.

**Emre AYHAN:** Verilerin analizinde kullanılan modelleri oluşturmuş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He created the models used in the analysis of the data and wrote the article.

**Yusuf Tansel İÇ:** Verileri analiz etmiş ve sonuçları yorumlamıştır.

He analyzed the data and interpreted the results.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dave, S., Vora, J. J., Thakkar, N., Singh, A., Srivastava, S., Gadhvi, B., Patel, V., & Kumar, A. (2016). Optimization of EDM Drilling Parameters for Aluminum 2024 Alloy Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *Key Engineering Materials*, 706, 3–8.
- [2] Norliana Mohd Abbas, Darius G. Solomon, Md. Fuad Bahari (2077). A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7-8), 1214-1228.

- [3] Srivastava, A., Dixit, A. R., and Tiwari, S. (2014). Experimental investigation of wire edm process parameters on aluminium metal matrix composite Al2024/SiC, *International Journal of Advanced Research and Innovation*, 2(2), 511-515.
- [4] Mehmood, S., Shah, M., Pasha, R. A., and S. A. (2017). Evaluation of fatigue behaviour and surface characteristics of aluminium alloy 2024 T6 after electric discharge machining, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(10), 4910-4922.
- [5] Arunachalam, S. R., Galyon Dorman, S. E., Buckley, R. T., Conrad, N. A., and Fawaz, S. A. (2018). Effect of electrical discharge machining on corrosion and corrosion fatigue behavior of aluminium alloys, *International Journal of Fatigue*, 111, 44-53.
- [6] Kumar, T. R., Guruprakash, T., Kumar, P. R., and Gokul, R. (2019). Study on surface roughness and material removal rate (MRR) of aluminium 2024 in electrical discharge machining, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(7), 144-148.
- [7] Yahya, A., and Manning, C. D. (2004). Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(10), 1467-1471.
- [8] Singh, V., and Pradhan, S. K. (2013). Optimization of EDM process parameters: a review, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(4).
- [9] Sanghani, C. R., and Acharya, G. D. (2014). A review of research on improvement and optimization of performance measures for electrical discharge machining, *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(1), 433-450.
- [10] Bhuyan, R. K., Routara, B. C., and Parida, A. K. (2015). An approach for optimization the process parameter by using TOPSIS method of Al-24%SiC metal matrix composite during

- EDM, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3116-3124.
- [11] Daneshmand, S., and Msoudi, B. (2018). Investigation and optimization of the electro-discharge machining parameters of 2024 aluminium alloy and Al/7.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate-reinforced metal matrix composite, *Sci Eng Compos Mater*, 25(1), 159-172.
- [12] Satpathy, A., Tripathy, S., Senapati, N. P., and Brahma, M. K. (2017). Optimization of EDM process parameters for AlSiC-20% SiC reinforced metal matrix composite with multi response using TOPSIS, *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3043-3052.
- [13] Alagarsamy, S. V., Ravichandran, M., Sakthivelu, S., Kumar, S. D., Chanakyan, C., and Meignanamoorthy, M. (2020). Optimization of electric discharge machining parameters on surface roughness for Al/ZrO<sub>2</sub> composite through response surface methodology, *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1006-1012.
- [14] Phimoolchat, J., and Muttamara, A. (2019). Multi-objective optimization of electro discharge machining parameters for 2024 aluminum alloys using Grey-Taguchi method, *Materials Science Forum*, 998, 55-60.
- [15] Işık, A. T. (2022). *Semente Karbürün Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu (Doktora tezi)*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [16] Samuel, A. U., Araoyinbo, A. O., Elewa, R. R., and Biodun, M. B. (2021). Effect of Machining of Aluminium Alloys with Emphasis on Aluminium 6061 Alloy – A Review, *IOP Conf. Ser.*, 1107, 012157.
- [17] Kabakçı, M. O., Karaağaç, İ., ve Demirel, M. Y. (2020). Tavlama İşleminin Al 2024-T3 Sac Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine ve Mikroyapıya Etkilerinin Deneysel Araştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(1), 169-181.
- [18] Aydın, H., ve Bayram, A. (2010). Farklı Isıl İşlem Koşullarındaki 2024 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Kaybın Belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1).
- [19] Yahya, A., Manning C.D. (2004), Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 1467–1471.
- [20] Işık, A. T., Cakıroğlu, R. (2022). Investigation of Workpiece and Tool Surface Quality in Electro Discharge Machining of Al 5083 Alloy Produced by Powder Metallurgy. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 3(1), 47-58.
- [21] Emre Ayhan, Mustafa Yurdakul, Can Çoğun and Yusuf Tansel iç (2023), The entropy method integrated RSM model to evaluate hole geometries in electrochemical blind hole drilling, *Australian Journal of Mechanical Engineering*.