

## **Metalik Biyomalzemelerin Elektro Erozyon Yöntemiyle İşlenebilirliklerinin Araştırılması**

**Ulaş ÇAYDAŞ<sup>1</sup>, Dilek YILMAZ<sup>2</sup>, Hakan GÜRÜN<sup>3</sup>, Uğur KÖKLÜ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Muş, Türkiye

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye

Sorumlu yazar: u.caydas@alparslan.edu.tr

### **Özet**

Bu çalışmada, Ti6Al4V ve Rex734 metalik biyomalzemeler, elektro erozyonla işleme (EEİ) yöntemiyle işlenmiştir. Deneylerde vurum ara süresi (10µs), dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı (5 Bar) ve aralık voltajı (100V) faktörleri sabit tutulurken; vurum süresi (2-8µs) ve akım (8-32A) parametreleri değişken olarak kullanılmıştır. Deneyler sonrasında, EEİ yöntemi ile işlenmiş yüzeyler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3B yüzey topografya cihazı yardımıyla incelenmiştir. Numune yüzeylerinden EDS analizleri alınmış, yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY), artık tabaka kalınlığı (ATK), talaş kaldırma oranı (TKO) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür. İşleme parametreleri ile ölçülen değerler arasındaki ilişkiler, lineer regresyon yöntemi ile belirlenmiş ve faktörlerin istatistiksel etkileri varyans analizi (ANOVA) yardımı ile tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, malzeme sınıflandırması yapan bir destek vektör makine (DVM) modeli geliştirilmiştir.

Sonuç olarak; akım ve vurum süresinin artmasıyla, her iki malzeme için de YÇY değerlerinin azaldığı, TKO, ATK ve Ra değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Lineer denklemlerin, çıktıları yüksek oranda tahmin ettikleri görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Metalik biyomalzemeler, Ti6Al4V, Rex734, elektro erozyonla işleme.

## **Investigation of Metallic Biomaterials Machinability Using Electro Erosion Method**

### **Abstract**

In this study, the Ti6Al4V and Rex734 metallic biomaterials were machined by electrical discharge machining (EDM) process. In the experiments, the pulse interval time (10µs), dielectric circulation pressure (5 Bar) and gap voltage (100V) were fixed, while pulse duration (2-8µs) and current (8-32A) factors were chosen as alternative. After experiments, the EDMed surfaces were examined by using scanning electron microscope (SEM) and 3D surface topography devices. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) analyzes were taken from the machined surfaces and surface crack density (SCD), recast layer thickness (RLT) and average surface roughness (Ra) values were measured. The relationships between the machining parameters and measured values were determined by linear regression method. The statistical effects of factors on the performance outputs were determined with the help of analysis of variance (ANOVA) technique. Furthermore, a support vector machine (SVM) model was developed to classify the chosen material.

As a consequence; it was observed that the SCD values were decreased with increase of pulse duration and current for both materials; whenever RLT, MRR and Ra were tendency of increase with EDM parameters.

**Keywords:** Metallic biomaterials, Ti6Al4V, Rex734, electrical discharge machining.

### **1. GİRİŞ**

İnsanların yaşam kalitelerinin artırılması için, biyomedikal implant malzemelere olan gereksinimler giderek artmaktadır. İmplant malzemeler, vücut içerisine yerleştirilen ve ikinci bir cerrahi operasyon gerektirmediği sürece vücut içerisinde sürekli kalabilen doku uyumlu malzemelerdir. Bu malzemeler, günümüzde ortopedi, kalp pili, damar stenti, yapay protez gibi birçok değişik parçaların yapımında kullanılmaktadır. Biyomedikal ürünlerinin iyi bir korozyon dayanımı, uygun yüzey ve mekanik özelliklere sahip olması, kemik ve doku ile uyumlu olması ve doku ile birleşerek vücuda uyum sağlaması gerekmektedir [1]. Dolayısıyla, malzeme seçimi ve tasarımı, implant ömrü için büyük önem arz etmektedir. Paslanmaz çelikler, titanyum ve alaşımları,

kobalt-krom alaşımları, nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımlar ve magnezyum alaşımları gibi metalik alaşımlar, en çok kullanılan biyomalzemelerdir. Yüksek tokluğa sahip seramik ve polimerler de özellikle yapay kalça kemiği yapımında kullanılan biyomalzemelerdir [2]. Seramik ve polimer malzemeler genellikle tek başlarına veya diğer metalik biyomalzemelerle birlikte kullanılırlar. Titanyum ve alaşımları eklem protezleri, omurga ve belkemiği sistemlerinde, diş implantlarında ve kalp pillerinin yapımında tercih edilirler. Magnezyum ve alaşımları da özellikle düşük maliyetlerinden dolayı sökülebilen implantların yapımında kullanılan diğer metalik malzemelerdendir. Magnezyum, insan vücudu için gerekli ve doğal olarak kemik dokusunda yer alan bir elementtir. Ancak magnezyumun özellikle insan vücudu gibi tuzlu ortamlardaki korozyon direnci oldukça düşüktür. Korozyon direncini arttırmak için genellikle bu alaşımların yüzey özellikleri elektro erozyonla işleme (EEİ), elektrokimyasal işleme (ECM) ve haddeleme gibi çeşitli işlemler kullanılarak iyileştirilir [3]. İmplant kalitesi, biyomalzemelerin işlenebilirlikleri ile doğrudan ilişkilidir. İşleme sonrasında elde edilen yüzey kalitesi, implantın doku, kemik ve vücut ortamıyla uyumunu (osteo - integrasyon) önemli derecede etkilemektedir. Ortopedide kullanılan en yaygın implantlardan bir tanesi de kalça protezidir. Bu protez, eklem ağrılarını azaltarak daha aktif ve kaliteli bir yaşam sağlar. Protezdeki en önemli parça, küre şeklindeki femur başı olan kısımdır. Bu bölümün yüzey pürüzlülüğü mümkün olduğunca düşük olmalı ve özellikle dinamik yüklemelere maruz kalarak vücut ağırlığını karşıladığı için, yüzey özelliklerinin başta yorulma dayanımı olmak üzere korozyon, sürtünme ve aşınma gibi diğer gereksinimleri de karşılaması beklenmektedir. Bu beklentilere ilave olarak, vücut için iyi bir biyo-uyumluluk göstermelidir [4]. EEİ yönteminde, dielektrik sıvısı içerisine daldırılmış olan iş parçasının yüzeyinden vurum süresi ve vurum ara süresi içerisinde akımın kontrollü bir şekilde uygulanmasıyla, parça yüzeyi yerel olarak ergitilmekte ve/veya buharlaştırılarak talaş kaldırılmaktadır. EEİ yönteminde, işlenecek parçanın sertlik değerinin bir önemi yoktur. Konu ile ilgili bazı güncel çalışmalar, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Verma ve Sajeevan [5] çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımını dalma erozyon yönteminde gazyağı dielektrik sıvısı ortamında bakır elektrotlar yardımıyla işlemişlerdir. Çalışmada, vurum süresi, vurum ara süresi, sıvı sirkülasyon basıncı ve aralık voltajı faktörlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü, TAO ve TKO üzerindeki etkileri, Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak belirlenmiştir. İşlenmiş yüzeylerde meydana gelen artık tabaka ve mikro çatlaklar, SEM mikroskobu yardımıyla görüntülenmiştir. Yüzeylerden ayrıca XRD analizleri alınmış ve TiC karbürleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yüzey çatlak yoğunluklarının artan vurum süresi ile arttığı; vurum ara süresi ile azaldığı gözlemlenmiştir. Mondal ve arkadaşları [6] çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımının EEİ yönteminde işlenmesinde uç kısımları düzgün ve açılı elektrotlar kullanmışlardır. Çalışmada, tepe akımı, vurum süresi, çevrim oranı, sirkülasyon basıncı ve takım uç açısı faktörlerinin TKO ve işleme derinliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Açılı takımlarla işlemede, ara bölgedeki talaşların daha etkin bir şekilde işleme bölgesinden uzaklaştırılmasından dolayı işleme verimliliği ve dolayısıyla TKO değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, bu artış oranının, uç koniklik açısının 35°'den daha büyük olduğu durumlarda yeniden azaldığı belirlenmiştir. Kong ve arkadaşları [7] çalışmalarında, su dielektrik ortamında, boru tipi bakır elektrotlar kullanarak, elektrot içerisinden yüksek basınçlı hava ve argon gazları desteği ile Ti6Al4V alaşımının EEİ yöntemiyle işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, vurum süresi, ortalama akım ve gaz basınçlarının işlenmiş yüzey karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hava gazının kullanıldığı deneylerde, yüzeylerde oksijen ve nitrojen reaksiyonlarından kaynaklanan tabakaların meydana geldiği ve işleme kararlılığının azaldığı; argon ortamında ise üç kat daha kaliteli yüzeylerin elde edildiği gözlemlenmiştir. Argon ortamında, yüzeyde hemen hemen hiç çatlak veya mikro boşlukların meydana gelmediği, artık tabaka kalınlığının kesit boyunca homojen bir şekilde oluştuğu ve enine çatlakların görülmediği tespit edilmiştir. Ancak argon ortamında yapılan deneylerde, eş zamanlı elektrot aşınma değerlerinin hava ortamına nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Gurpreet ve arkadaşları [8] çalışmalarında, AISI 316L biyomalzemeyi EEİ yönteminde bakır elektrot kullanarak ters kutuplama tekniği ile işlemişlerdir. Çalışmada, Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal dizin kullanılmış ve akım, vurum süresi, vurum ara süresi ve voltaj parametrelerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ölçülen değerlerle işleme faktörleri arasındaki matematiksel ilişkiler, regresyon yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca taramalı elektron mikroskobu ile işlenmiş yüzeyler incelenmiş ve yüzeylerde artık tabaka, boşluk ve çatlak şeklinde metalurjik hasarların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, Ti6Al4V ve Rex734 metalik biyomalzemeler, EEİ yöntemiyle işlenmiştir. Her iki malzemenin yüzey kaliteleri karşılaştırılmış ve en uygun işlem koşulları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların ortopedi alanında çalışmalara katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

## 2. MATERYAL ve METOD

### 2.1. Malzeme ve Deneysel Parametreler

Deneylerde, ticari olarak temin edilen Ti6Al4V ve Rex734 malzemeleri kullanılmıştır. Numuneler,  $\varnothing 10mm \times 10mm$  boyutlarında hazırlanmıştır. Standardizasyonu sağlamak amacıyla her bir numune kesme diski yardımıyla kesilmiştir. Kesme işlemleri  $\varnothing 200mm \times 1,5mm$  silisyum karbür (SiC) diskler yardımıyla

numunelerin ısıdan etkilenmemesi amacıyla soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri sonrasında, yüzey zımparalardan geçirilerek elmas pastayla parlatılmış ve EEİ deneyleri için hazır hale getirilmiştir. Elektro erozyon deneylerinde %99,9 saflık derecesine sahip  $\varnothing 12mm \times 40mm$  boyutlarında bakır uç elektrotlar kullanılmıştır. Tornalama işlemlerinde her elektrot için P20 kalitesinde sıfır bir karbür kesici uç kullanılmıştır. EEİ deneylerinde dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Dielektrik sıvısı 5 bar basınçla yandan püskürtme yöntemiyle uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan işleme parametreleri ve faktör seviyeleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** İşleme parametreleri ve faktör seviyeleri.

EEİ Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Vurum Süresi ( $\mu s$ )	2	5	8
Akım (A)	8	16	32
Vurum Ara Süresi ( $\mu s$ )	10		
Dielektrik Sıvısı	Gazyağı		
Püskürtme Basıncı (bar)	5		

Her bir deney 3 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. TKO değerleri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TKO = \frac{V}{t} \left( \frac{mm^3}{dak} \right) \quad (1)$$

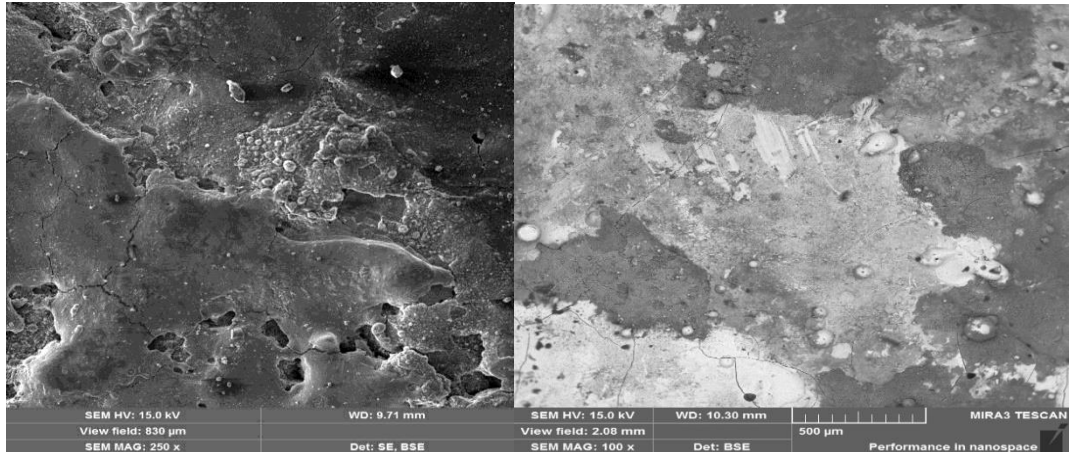
Burada,  $V$  yüzeyden kaldırılan talaş hacmini,  $t$  ise işleme süresini ifade etmektedir. EEİ sonrası numunelerin yüzey görüntüleri ve yüzeydeki kimyasal değişimler incelenmiştir.

### 3. TARTIŞMA

#### 3.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları

##### 3.1.1. Yüzey yapısı

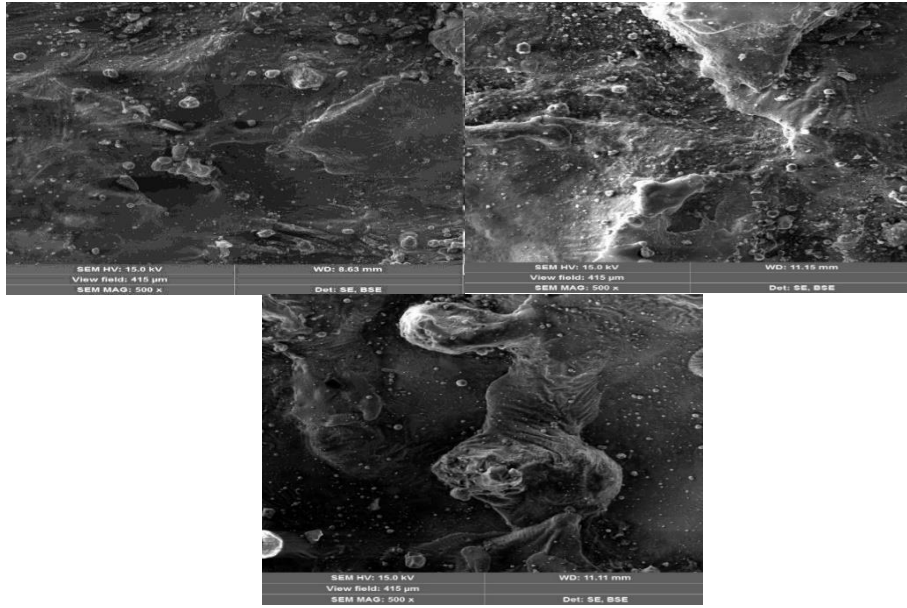
Şekil 1.’de EEİ yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V metalik malzemesinin tipik yüzey görüntüsü verilmiştir. Yüzeylerde kraterlerden farklı olarak mikro boşluklar, mikro çatlaklar, eriyerek yüzeye yapışan malzeme formları ve sıvı sirkülasyonu ara bölgeden uzaklaştırılmayıp yeniden katılmış küresel yapıda kalıntı parçacıkların olduğu da görülmektedir.



**Şekil 1.** Ti6Al4V ve Rex734 malzemesinin EEİ ile işlenmiş tipik bir yüzey görüntüsü.

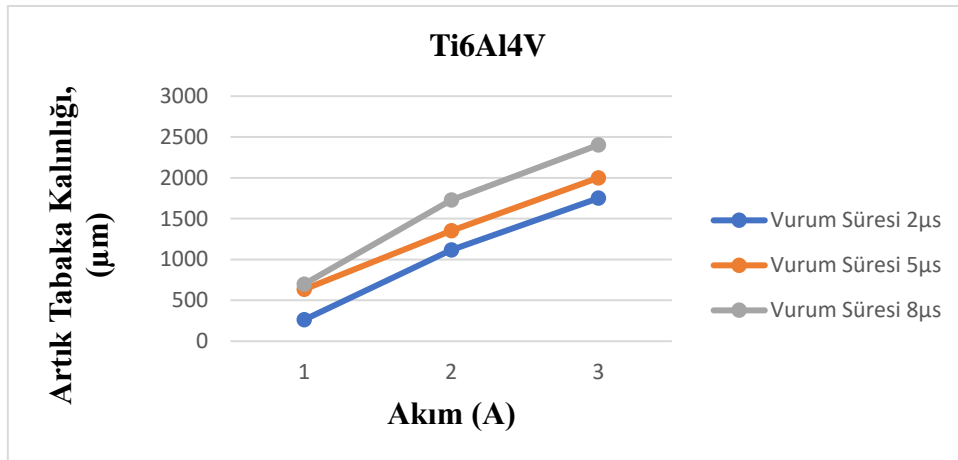
### 3.1.2. Akımın yüzey yapısına etkisi

Şekil 2.'de, EEİ yöntemiyle işlenmiş metalik malzemelerin, vuruş süresinin sabit olduğu koşullarda akım parametresinde artışına bağlı olarak yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi akımın artmasıyla birlikte, yüzey yapısının kötüleştiği ve daha kaba yüzeylerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, akımın artmasıyla birlikte yüzeye uygulanan enerji yoğunluğunun da artması ve böylece daha fazla malzemenin ergitilerek yüzeyden kaldırılmasıyla ilişkilendirilebilir [9]. EEİ parametrelerinin ATK üzerindeki etkileri Ti6Al4V metalik malzemesi için Şekil 3'de, Rex734 metalik malzemesi için ise Şekil 4'de verilmektedir. Her iki malzeme için de akım ve vuruş süresi parametrelerindeki artışa bağlı olarak ATK değerlerinin de orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ti6Al4V malzemesi için akım değerinin 8A, vuruş süresinin 2µs olduğu durumda ortalama ATK değeri 262µm iken akım değerinin 4 katına çıkmasıyla (32A) aynı vuruş süresi değerlerinde ATK değeri 1750 µm olmaktadır. Dolayısıyla akım değerindeki bu artışla beraber ATK değerinin 6,67 kat arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla ATK değerlerinin Ti6Al4V alaşımı için daha yüksek olduğu görülmektedir.

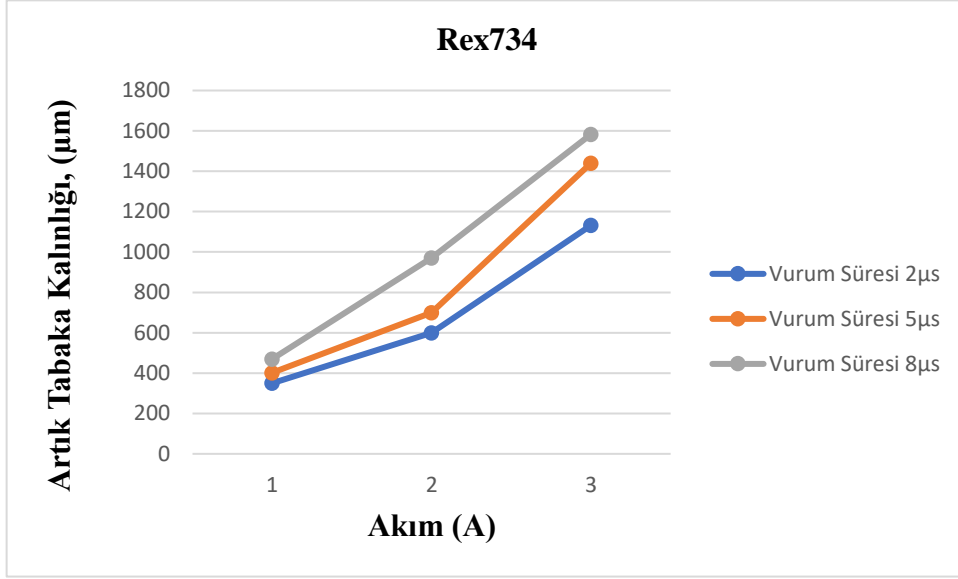


Şekil 2. Akımın yüzey yapısı üzerindeki etkisi.

Tablo ve şekiller birlikte değerlendirildiğinde benzer şekilde Rex734 malzemesi için bu oran 3,23 kat olarak tespit edilmiştir.



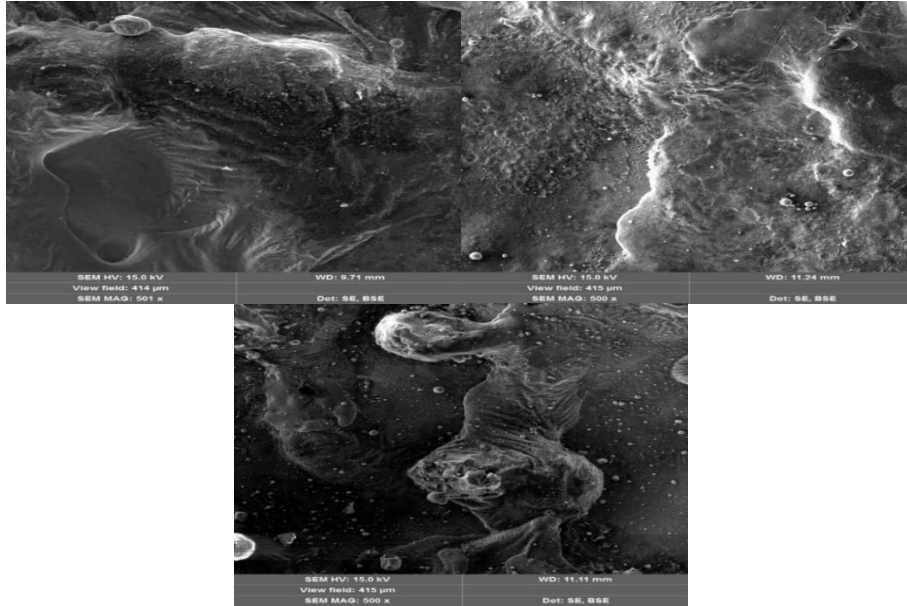
Şekil 3. Ti6Al4V malzemesinin EEİ parametrelerinin ATK üzerindeki etkileri.



Şekil 4. Rex734 malzemesinin EEİ parametrelerinin ATK üzerindeki etkileri.

### 3.1.3. Vurum süresinin yüzey yapısına etkisi

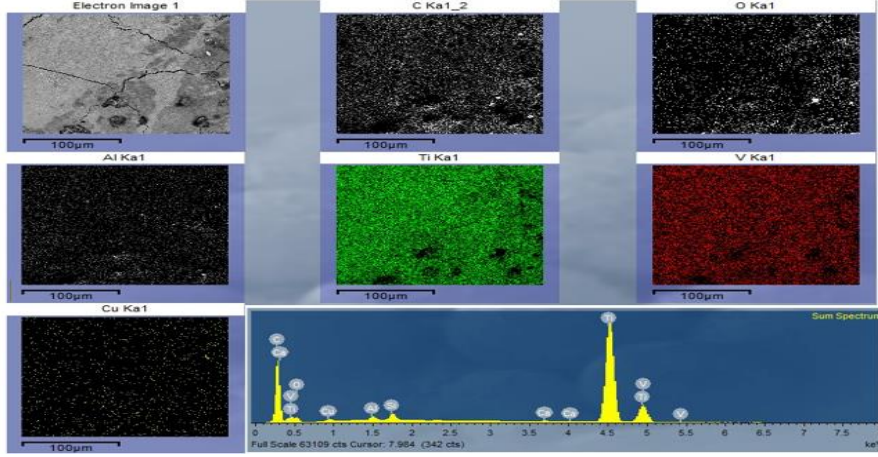
Şekil 5'de EEİ yöntemiyle işlenmiş metalik malzemelerin, akımın sabit olduğu koşullarda vurum süresindeki artışına bağlı işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, akım parametresinin etkisine benzer şekilde vurum süresinin artmasıyla birlikte yüzey yapısının kötüleştiği ve daha kaba yüzeylerin oluştuğu tespit edilmiştir. Akım şiddeti sabit olmasına rağmen enerjinin yüzeyde kalma süresi arttığı için daha fazla malzemenin eritildiği ve yüzeylerin kötüleştiği söylenebilir.



Şekil 5. Vurum süresinin yüzey yapısı üzerindeki etkisi.

### 3.1.4. EDS analiz sonuçları

Şekil 6'da metalik malzemelerin EEİ ile işlenmeleri neticesinde yüzeylerinden alınan nicel SEM-EDX elementel haritalama sonucu verilmiştir. Şekilde görüntünün her bir pikseli üzerindeki gri noktalar karbon (C) yeşil titanyum (Ti) kırmızı noktalar vanadyum (V) ve diğer siyah noktalar ise sırasıyla oksijen (O), alüminyum (Al) ve bakırın (Cu) nicel olarak bulunduğu bölgeleri temsil etmektedir. Ayrıca numunelere ait mikro yapısal görüntüleme ve kimyasal analiz sonuçları pik formatında görülmektedir. Sonuçlardan, genel mikro yapı içerisinde elementlerin hangi miktarlarda ve nerelerde yoğunlaştığını görmek mümkündür.

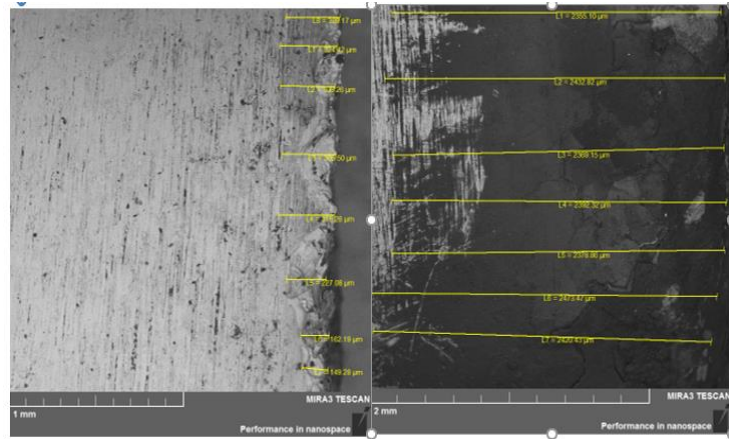


Şekil 6. Elemental haritalama ve EDS analizi.

Numuneler karşılaştırıldığında; Rex734 malzemesinin işlenmesinde elektrot aşınma oranlarının Ti6Al4V alaşımına nazaran yaklaşık olarak 10 kat daha fazla olduğu görülmektedir.

### 3.1.5. Artık tabaka kalınlığı (ATK) ölçüm sonuçları

EEİ yönteminde yüzeyden ergitilerek kaldırılan malzemenin oldukça düşük bir bölümü dielektrik sıvı sirkülasyonu yardımıyla işlenmiş yüzeyden süpürülürken geriye kalan önemli bir bölümü ise yeniden katılarak yüzeye yapışır. Bu tabaka kalınlığı EEİ yönteminde işleme koşullarına da bağlı olarak değişmektedir. Şekil 7.'de metalik malzemelerin EEİ ile işlenmeleri sonrasında yan yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekilde artık tabaka kalınlıkları (ATK) 8-9 farklı noktadan ölçülerek ortalama kalınlık değerleri belirlenmiştir. Her iki metalik malzeme için de akım ve vurum süresi parametrelerindeki artışa bağlı olarak ATK değerlerinin de orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Akım değerindeki bu artışla beraber ATK değerinin 6,67 kat arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Rex734 malzemesi için bu oran 3,23 kat olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla ATK değerlerinin Ti6Al4V alaşımı için daha yüksek olduğu görülmektedir. ATK sonuçlarının değerleri Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 7. Artık tabaka kalınlığının ölçümü.



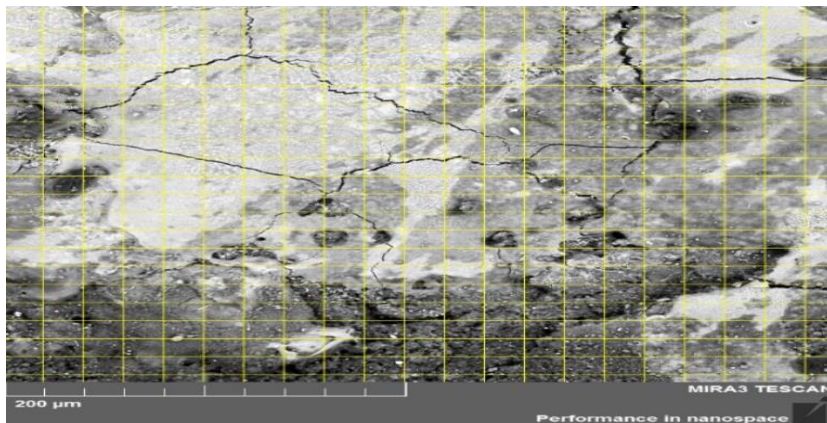
**Tablo 2.** Artık tabaka kalınlığı ölçüm sonuçları.

Deney No	Akım (A)	Vurum süresi (µs)	ATK (Ti6Al4V)	ATK (Rex734)
1	8	2	262	350
2	8	5	634	402
3	8	8	698	470
4	16	2	1116	600
5	16	5	1352	700
6	16	8	1730	970
7	32	2	1750	1132
8	32	5	2000	1440
9	32	8	2402	1583

### 3.1.6. Yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) ölçüm sonuçları

EEİ yöntemi elektro termal bir yöntemdir. Yüzeye yüksek elektrik enerjisi belirli bir süre aralığı boyunca kontrollü bir şekilde uygulanmakta; vurum ara süresi boyunca ise dielektrik sıvı basıncı yardımıyla soğutulmaktadır. Sıcaklıktaki bu dalgalanmalar (artma ve azalma) yüzeyde termal çevrimlere yol açarak yorulma mekanizması etkisiyle genleşme ve büzölmeye neden olurlar. Termal yük değerleri malzemenin maksimum çekme mukavemeti değerini aştığı anda, yüzeye paralel ve malzeme iç yapısına doğru dik çatlaklar şeklinde hasarlar meydana gelir. Bu termal çatlak yoğunluğunun mukavemet üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Dolayısıyla çalışmanın bu bölümünde, yüzey çatlak yoğunluğu (YÇY) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 8.'de EEİ işlemi sonrası elde edilen bir yüzeydeki tipik bir çatlak yapısının SEM fotoğrafı görülmektedir. Çatlak uzunluk ölçümünü kolaylaştırmak amacıyla fotoğraf karesi  $20 \mu\text{m}^2$ 'lik eşit ızgaralara ayrılmış ve her bir ızgaradaki çatlak uzunluğu ölçek yardımıyla ölçülerek toplam fotoğraf karesi alanına bölünmek suretiyle YÇY değerleri belirlenmiştir. Akım ve vurum süresi parametrelerine bağlı olarak YÇY değerlerinin azaldığı görülmektedir.

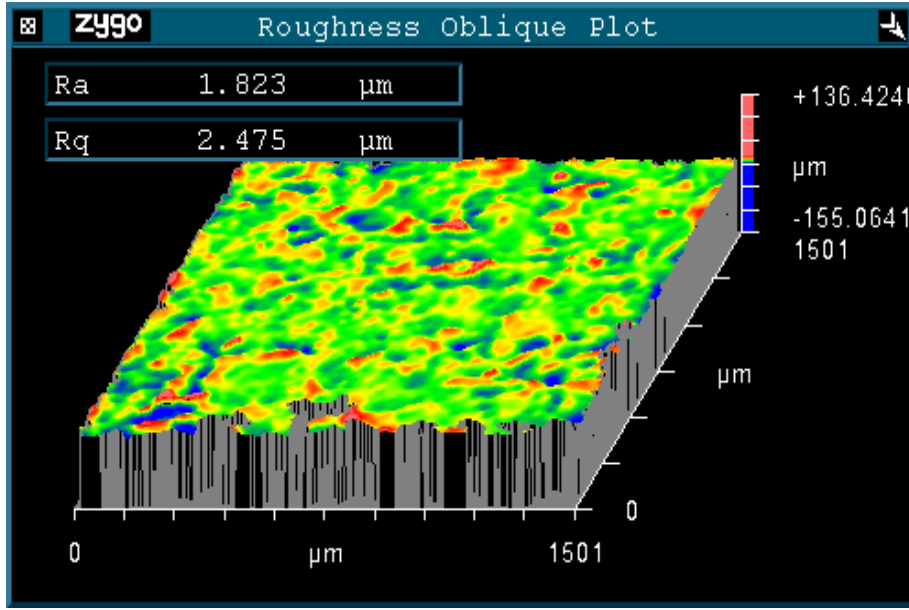
Yüzey kalitesi bakımından normalde akım ve vurum süresindeki artış, olumsuz etki yaratırken YÇY bakımından yorulma mukavemeti açısından olumlu etkileri olduğu görülmektedir. Dolayısıyla YÇY değerleri bakımından; dinamik yüklemelere maruz kalacak implant malzemelerinin EEİ ile işlenmesinde yüksek akım ve vurum süresi değerleri önerilmektedir.



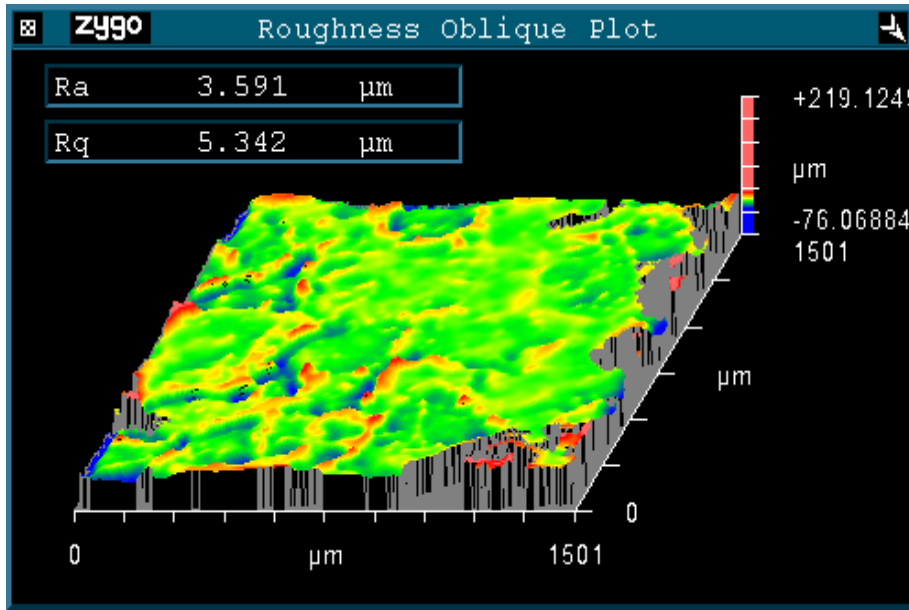
**Şekil 8.** Yüzey çatlak yoğunluğu ölçümü.

### 3.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Bütün veriler birlikte değerlendirildiğinde etkisine benzer şekilde akım ve vurum süresine bağlı olarak  $R_a$  değerlerinin de her iki malzeme için de arttığı görülmektedir. Ti6Al4V alaşımı için en küçük  $R_a$  için  $T_{ON}:2\mu s$  ve  $I:8A$  koşullarında  $1,805\mu$ ; Rex734 malzemesi için ise yine aynı koşullarda  $1,378\mu$  olarak ölçülmüştür. EEİ işleme parametreleri seviyelerinin en üst düzeye ulaşmasıyla  $R_a$  değerleri Ti6Al4V ve Rex734 malzemeleri için sırasıyla  $3,591$  ve  $2,359$  olmaktadır. Dolayısıyla  $R_a$  değerlerinin yaklaşık olarak  $1,7-1,9$  kat arttığı söylenebilir. Sonuçlardan Ti6Al4V alaşımından daha kaba yüzeylerin meydana geldiği ve  $R_a$  değer aralığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 9.'de Ti6Al4V metalik malzemesi için, Şekil 10.'da ise Rex734 metalik malzemesi için EEİ sonrasında yüzeyden alınan 3D yüzey topografyası verilmiştir.



Şekil 9. Ti6Al4V malzemesi için EEİ sonrasında yüzeyden alınan 3D yüzey topografyası.



Şekil 10. Rex734 malzemesi için EEİ sonrasında yüzeyden alınan 3D yüzey topografyası.



### 3.3. ANOVA Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, EEİ işleme parametreleri olan akım ve vurum süresinin  $R_a$ , YÇY, ATK ve TKO çıktıları üzerindeki istatistiksel etkileri varyans analizi metodu (ANOVA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ti6Al4V alaşımının vurum süresi istatistiksel olarak  $R_a$  üzerinde %89,5 akımın ise %7,95 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir. Dolayısıyla  $R_a$  bakımından vurum süresinin çok daha etkili olduğu ve yine vurum süresinin P değerine bakıldığında ( $P:0,001<0,005$ ) bu faktörün  $R_a$  üzerinde önemli bir faktör olduğu, akımın ise ( $P:0,780>0,005$ ) önemsiz olduğu görülmektedir. Lineer regresyon yöntemi ile işleme parametreleri ( $I$ ,  $T_{ON}$ ) ve  $R_a$  arasındaki matematiksel ilişki, eşitlik 2' de görülmektedir.

$$R_a = 1,22 + 0,0176 \times I + 0,240 \times T_{ON} \quad (2)$$

Bu denklem yardımıyla hesaplanan (tahmin edilen) değerler ile gerçek ölçüm sonuçları arasındaki ilişki incelenmiştir. Denklem  $R^2=97,4$  gibi oldukça yüksek oranda doğru tahminler yapmaktadır. Dolayısıyla, bundan sonraki çalışmalarda deney yapmadan bu denklem kullanılarak akım ve vurum süresinin herhangi bir seviyesi için tahminler yapılabilir.

Ti6Al4V alaşımı için YÇY değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 3'de görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak YÇY üzerinde %82,56, akımın ise %11,34 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$YÇY = 5,36 - 0,105 \times I - 0,156 \times T_{ON} \quad (3)$$

Ti6Al4V alaşımı için ATK değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 4'de görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak ATK üzerinde %12,05, akımın ise %87,04 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$ATK = -267 + 60,1 \times I + 94,6 \times T_{ON} \quad (4)$$

Ti6Al4V alaşımı için TKO değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 5'de görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak TKO üzerinde %10,30, akımın ise %79,96 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$TKO = 6,62 + 0,637 \times I + 0,214 \times T_{ON} \quad (5)$$

Bütün varyans analizi sonuçları değerlendirildiğinde Ti6Al4V alaşımı için;  $R_a$  ve YÇY üzerinde vurum süresinin daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülürken TKO ve ATK üzerinde ise akım faktörünün daha etkili olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, yüzey kalitesi bakımından vurum süresinin düşük seviyeleri önerilirken işleme hızı bakımından ise akım faktörünün yüksek seviyeleri önerilmektedir.

Rex734 alaşımı için YÇY değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 6'da görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak YÇY üzerinde %69,05, akımın ise %21,51 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$R_a = 1,29 + 0,0129 \times I + 0,946 \times T_{ON} \quad (6)$$

Rex734 alaşımı için  $R_a$  değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 7'da görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak YÇY üzerinde %26,30, akımın ise %50,86 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$YÇY = 6,41 - 0,110 \times I - 0,342 \times T_{ON} \quad (7)$$

Rex734 alaşımı için ATK değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 8'de görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak ATK üzerinde %8,89, akımın ise %88,75 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$ATK = -168 + 40,5 \times I + 52,3 \times T_{ON} \quad (8)$$

Rex734 alaşımı için TKO değerlerinin varyans analizi yapılmıştır. Tahmin edilen regresyon eşitliği ise eşitlik 9'da görülmektedir. Vurum süresinin istatistiksel olarak TKO üzerinde %24,20, akımın ise %29,29 oranında bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

$$TKO = 7,51 + 0,152 \times I - 0,731 \times T_{ON} \quad (9)$$

Ti6Al4V metalik malzemesi için Tablo 2.'de Ra, Tablo 3.'de YÇY, Tablo 4'de ATK ve Tablo 5'de TKO'nun analiz sonuçları verilmiştir.

**Tablo 3.** Ti6Al4V malzemesinin Ra için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	0,139	0,26	0,78	7,95
Vurum Süresi (µs)	2	1,5598	25,58	0,001	89,5
Hata	6	0,298	-	-	2,55
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>1,9968</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

**Tablo 4.** Ti6Al4V malzemesinin YÇY için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	0,69	0,38	0,697	11,34
Vurum Süresi (µs)	2	4,994	14,2	0,005	82,56
Hata	6	1,071	-	-	6,1
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>6,755</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

**Tablo 5.** Ti6Al4V malzemesinin ATK için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	1743016	20,15	0,002	87,04
Vurum Süresi (µs)	2	241406	0,41	0,68	12,05
Hata	6	336788,5	-	-	0,91
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>2321210,5</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

**Tablo 6.** Ti6Al4V malzemesinin TKO için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	222,9	11,97	0,008	79,96
Vurum Süresi (µs)	2	28,7	0,34	0,722	10,3
Hata	6	50,95	-	-	9,74
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>302,55</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

Rex734 metalik malzemesi için Tablo 6.'da Ra, Tablo 7.'de YÇY, Tablo 8'de ATK ve Tablo 9'da TKO'nun analiz sonuçları verilmiştir.

**Tablo 7.**Rex734 malzemesinin Ra için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	0,759	0,82	0,484	21,51
Vurum Süresi (µs)	2	0,2437	6,69	0,03	69,05
Hata	6	0,06435	-	-	9,44
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>1,06705</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

**Tablo 8.** Rex734 malzemesinin YÇY için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	6,16	3,11	0,119	50,86
Vurum Süresi (µs)	2	3,19	1,07	0,4	26,3
Hata	6	2,48	-	-	22,84
<b>Toplam</b>	<b>10</b>	<b>11,83</b>	<b>-</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

**Tablo 9.** Rex734 malzemesinin ATK için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	736334	23,66	0,001	88,75
Vurum Süresi (μs)	2	73802	0,29	0,756	8,89
Hata	6	126000	-	-	2,36
Toplam	10	936136	-	--	100

**Tablo 10.** Rex734 malzemesinin TKO için ANOVA analiz sonuçları.

EEİ İşleme Parametresi	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	Önem Derecesi	% Katkı
				(P değeri)	
Akım (A)	2	17,5	1,24	0,354	29,29
Vurum Süresi (μs)	2	14,5	0,96	0,436	24,2
Hata	6	14,6	-	-	46,51
Toplam	10	46,6	-	--	100

### 3.4. Deneysel Sonuçlarının Destek Vektör Makinaları ile Sınıflandırması

Bu yöntemde veri uzayı hiper düzlem ile sınıf sayısına bölünerek, bilinmeyen verilerin sınıf etiketleri oluşturulur. DVM'ler doğrusal ve doğrusal olmayan DVM olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrusal DVM'nin yapısındaki çekirdek işlevi sadece giriş uzayının bir ürünüdür. Doğrusal olmayan DVM'de ise, probleme uygun doğrusal olmayan bir çekirdek fonksiyonunun seçilmesine ihtiyaç vardır. Hiper düzlem Denklem 10 ile ifade edilmektedir.

$$g(x_i) = wx_i + b \quad (10)$$

Burada,  $g(x_i)$  optimal hiper düzlem fonksiyonu,  $x$  giriş vektörü,  $w$  ağırlık vektörü ve  $b$  ise bias katsayısıdır. SVM için hata fonksiyonu, Denklem 12'de verilen Lagrange çarpanları kullanılarak oluşturulan Denklem 11'de verilmiştir.

$$C \sum_{i=1}^L (\xi_i^+ + \xi_i^-) + \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (11)$$

$$L_p = C \sum_{i=1}^L (\xi_i^+ + \xi_i^-) + \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^L (\mu_i^+ \xi_i^+ + \mu_i^- \xi_i^-) - \sum_{i=1}^L \alpha_i^+ (\varepsilon + \xi_i^+ + y_i - t_i) - \sum_{i=1}^L \alpha_i^- (\varepsilon + \xi_i^- - y_i + t_i)$$

$$\alpha_i^+ \geq 0, \alpha_i^- \geq 0, \mu_i^+ \geq 0, \mu_i^- \geq 0 \quad \forall_i \quad (12)$$

$$\max \left[ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^L (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) t_i - \varepsilon \sum_{i=1}^L (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) - \frac{1}{2} \sum_{i,j} (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) (\alpha_j^+ - \alpha_j^-) \\ - \sum_{i=1}^L (\mu_i^+ \xi^+ + \mu_i^- \xi^-) - \sum_{i=1}^L \alpha_i^+ (\varepsilon + \xi^+ + y_i - t_i) x_i \cdot x_j \end{array} \right] \quad (13)$$

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^L (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \mathbf{x}_i \quad (14)$$

Denklem 15 ve 16, i indeksler belirlenerek destek vektörlerinin ayarlanması için kullanılabilir.

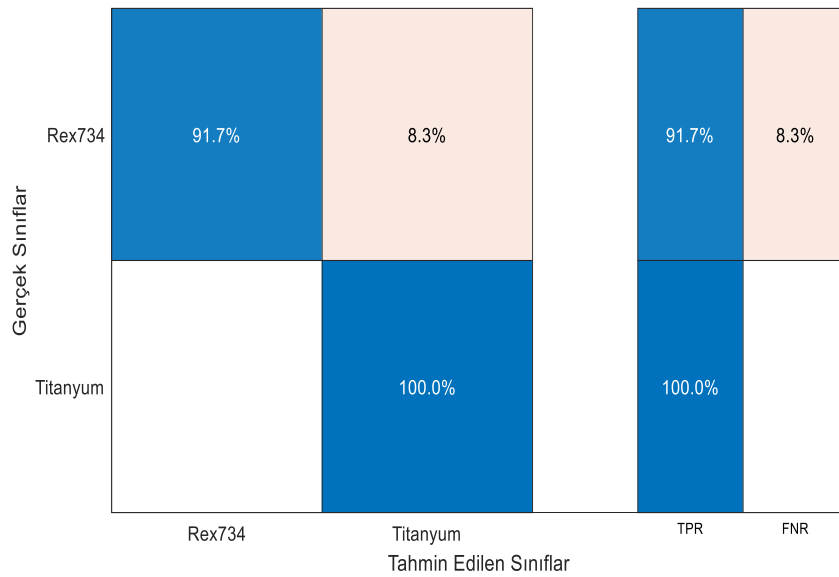
$$b = \frac{1}{N_s} \sum_{s \in S} \left[ t_s - \varepsilon - \sum_{m=1}^L (\alpha_m^+ - \alpha_m^-) \mathbf{x}_m \cdot \mathbf{x}_s \right] \quad (15)$$

$$y' = \sum_{i=1}^L (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}' + b \quad (16)$$

burada  $0 < \alpha < C$  ve  $\xi_i = 0$ 'dır.

Bu çalışmada doğrusal olmayan kübik DVM sınıflandırma modeli oluşturularak performans metrikleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Modelde her biri 6 adet özellik içeren ve 18 örnekten oluşan deney veri seti kullanılmıştır. Her bir veri örneği için 6 tanımlayıcı özellik ve bir adet etiket sınıfı olmak üzere toplam 7 özellik bulunmaktadır. 6 adet tanımlayıcı özellik; akım, vurum süresi, talaş kaldırma oranı, ortalama yüzey pürüzlülüğü, yüzey çatlak yoğunluğu ve artık tabaka kalınlığı gibi verilerden oluşmaktadır. 6 adet özelliğin 2 tanesi doğrudan deney düzeneği üzerinden direkt olarak ölçülen akım ve vurum süresi, 4 tanesi ise bunlara malzemenin cinsine bağlı olarak elde edilen diğer sayısal değerlerdir. 18 verinin sınıf dağılımı ise 9'u Titanyum, 9'u Rex734 malzeme tipi şeklindedir.

Model, MATLAB programı kullanılarak oluşturulmuştur. Veri setinin %75'i eğitim, %25'i test olarak ayrılmıştır. Veriler z-skora göre standartlaştırılmıştır. Eğitim süresi 0.1516 sn sürmüştür. Oluşturulan modelin performansı; karışıklık matrisi, ROC eğrisi, doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri üzerinden incelenmiştir. Şekil 11.'de karışıklık matrisi verilmiştir. Bu matris, veri setindeki durum ile modelin doğru ve yanlış tahminlerinin oranının göstermektedir. TP gerçek pozitif (True Positive), FP yanlış pozitif (False Positive), FN yanlış negatif (False Negative) ve TN gerçek negatif (True Negative) değerleri kullanılarak doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 11. Karışıklık matrisi.

Herhangi bir sınıflandırma modelinin performansını incelemek için kullanılan bir diğer yöntem ise ROC eğrisinin oluşturulmasıdır. Bu yöntemle modelin tahmin yeteneğinin ne kadar yüksek olduğu açıklanmaktadır. Olasılık eğrisi olan bu egride X ve Y eksenleri sırasıyla, Yanlış Pozitif Oran (FPR) ve Gerçek Pozitif Oran (TPR) değerleri kullanılarak oluşturulur. Eğri altında kalan alanın değeri ne kadar 1'e yakınsa, modelin verilen sınıfları ayırt etme oranının o kadar yüksek olduğunu gösterir.

Bu bölümde elde edilen deney sonuçlarına göre, deneyde kullanılan iki farklı malzeme için sınıflandırma probleminin çözümü amacıyla makine öğrenmesi uygulamalarında sıkça kullanılan DVM'dan faydalanılmıştır. Oluşturulan modelin %95,7 doğruluk oranıyla tahmin performansının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Modelin doğruluğu ayrıca diğer istatistiksel başarımlar kriterleri de kullanılarak ispatlanmıştır.

#### 4. SONUÇ

Yapılan metalurjik incelemeler neticesinde her iki malzeme içinde işlenmiş yüzeylerde eriyik tabakalar, küresel tanecikler vb. yapılar tespit edilmiştir. Yüzeylerde mikro çatlakların oluştuğu, bu çatlakların genişlik ve uzunluklarının yine işleme parametreleri olan vuruş süresi ve akım faktörlerine bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Yüzeylerden alınan EDS analiz sonuçlarına göre her iki malzeme için de işlenmiş yüzeylerde elektrot malzemesi olan bakır tespit edilmiştir. Yüzeylerde tespit edilen bakırın yüzde yoğunluk değeri işleme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Yüzeylerde yeniden katılmış bir artık tabakanın meydana geldiği tespit edilmiş, bu tabaka kalınlıkları vuruş süresi ve akımın artmasıyla artmaktadır. Vuruş süresi ve akım faktörlerine bağlı olarak her iki malzeme için de ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı tespit edilmiştir. Vuruş süresi ve akım faktörlerinin artışına bağlı olarak her iki malzeme için YÇY değerinin azaldığı tespit edilmiştir.

TKO değerlerinin akım ve vuruş süresine bağlı olarak her iki malzemede de arttığı tespit edilmiştir. Yapılan ANOVA analizi neticesinde Ti6Al4V malzemesi için; Ra ve YÇY üzerinde vuruş süresinin daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülürken TKO ve ATK üzerinde ise akım faktörünün daha etkili olduğu belirlenmiştir. Rex734 malzemesi için ise; Ra üzerinde vuruş süresinin daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülürken YÇY, TKO ve ATK üzerinde ise akım faktörünün daha etkili olduğu belirlenmiştir. Lineer regresyon denklemi; istenen çıktılar Ti6Al4V malzemesi için: Ra:(R<sup>2</sup>=0,97), YÇY:(R<sup>2</sup>=0,927), ATK:(R<sup>2</sup>=0,928), TKO:(R<sup>2</sup>=0,656), Rex734 malzemesi için ise; Ra:(R<sup>2</sup>=0,894), YÇY:(R<sup>2</sup>=0,709), ATK:(R<sup>2</sup>=0,976), TKO:(R<sup>2</sup>=0,413) oranında çıktıları tahmin etmektedir. Her iki malzeme içinde TKO değerlerini tahmin eden lineer regresyon denklemlerinin R<sup>2</sup> değerleri oldukça düşük olduğundan bu denklemlerin tahmin amaçlı kullanılmaları önerilmemektedir. Dolayısıyla geliştirilen denklemlerin R<sup>2</sup> değerleri oldukça yüksektir ve denklemler yüksek bir doğruluk oranında sonuçları tahmin edebilmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.20.03 No'lu proje tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKÇA

- [1] Kumar, N., Arora, N.C., Datta, B. Bearing Surfaces In Hip Replacement-Evolution And Likely Future, Medical Journal Of Armed Forces India, 70 371–376, 2014.
- [2] Meftah, M., Klingenstein, G.G., Yun, R.J., Ranawat, A.S., Ranawat, C.S. Long-Term Performance Of Ceramic And Metal Femoral Heads On Conventional Polyethylene In Young And Active Patients: A Matched-Pair Analysis, JBJS, 95 1193–1197, 2013.
- [3] Denkena, B., Lucas, A. Biocompatible Magnesium Alloys As Absorbable Implant Materials Adjusted Surface And Subsurface Properties By Machining Processes, CIRP Annals Manufacturing Technology, 56 113–116, 2007.
- [4] Kushendarsyah, S., Mebrahitom, A.G., Mohd, A.B.M.A. Machining Of Biocompatible Materials: A Review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97 2255 – 2292, 2018.
- [5] Vijay,V., Ram, S. Multi Process Parameter Optimization Of Diesinking EDM On Titanium Alloy (Ti6Al4V) Using Taguchi Approach, Materials Today: Proceedings 2 2581 – 2587, 2015.
- [6] Mondal,A., Roy,P., Mitra,S. Experimental Study of Machining Characteristics of Ti6Al4V in EDM Using Tapered Tool, Materials Today: Proceedings 18 2933–2941, 2019.
- [7] Kong,L., Liu, Z., Qiu, M., Wang, W., Han, Y., Bai, S. Machining Characteristics Of Submersed Gas-Flushing Electrical Discharge Machining Of Ti6Al4V Alloy, Journal of Manufacturing Processes 41 188–196, 2019.



[8] Gurpreet, S., Amandeep, S.B., Yubraj, L., Prabin, M., Purushottam, K., Bikram, T. Machining Performance and Influence of Process Parameters on Stainless Steel 316L Using Die – Sinker EDM with Cu Tool, *Materials Today Proceedings* 18 2468–2476, 2019.

[9] Sabyron, N., Jahan M.P., Bilal A., Perveen A. Ultrasonic Vibration Assisted Electro-Discharge Machining (Edm)-An Overview, *Materials*, 12(3), 522, 2019.