

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE SİNERLENMİŞ GÜMÜŞ-  
HİDROKSİAPATİT TOZ KATKILI ELEKTROTLARIN BİYOLOJİK  
UYUMLULUK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DAMLA ÖZDEMİR**

**ŞUBAT 2021**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE SİNERLENMİŞ GÜMÜŞ-  
HİDROKSİAPATİT TOZ KATKILI ELEKTROTLARIN BİYOLOJİK  
UYUMLULUK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Damla ÖZDEMİR**

**DANIŞMAN**

**: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ**

**ZONGULDAK**  
**ŞUBAT 2021**

**KABUL:**

Damla ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “Elektriksel Kıvılcımla İşlemede Sinterlenmiş Gümüş-Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektrotların Biyolojik Uyumluluk Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 01/02/2021

**Danışman:** Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Oktay ELKOCA .....  
Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. Kürşad GÖV .....  
Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .... / .... / 20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Damla ÖZDEMİR

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE SİNERLENMİŞ GÜMÜŞ- HİDROKSİAPATİT TOZ KATKILI ELEKTROTLARIN BİYOLOJİK UYUMLULUK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Damla ÖZDEMİR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ

Şubat 2021, 139 sayfa

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan elektriksel kıvılcımla işleme, di-elektrik sıvı içerisinde belirli bir mesafede konumlandırılmış elektrot ile iş parçası arasında ardışık elektriksel boşalmaların oluşması ve iş parçasını aşındırması temeline dayanır. İşleme sırasında çok yüksek noktasal sıcaklık değerlerine ulaşılır (~20000 K). İşleme sonrasında elde edilen yüzey özellikleri; elektrot çeşidi, di-elektrik sıvı, darbe süresi, darbe akımı, açık aralık gerilimi gibi çeşitli değişkenlere bağlıdır. Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi, özellikle sert ve karmaşık geometrideki malzemeler ile yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerde kullanılmaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımı, düşük elastisite modülü, yüksek mekanik özellik ve korozyon direncinden dolayı biyomedikal implant uygulamalarında en çok tercih edilen malzemelerdir. Titanyum malzemenin iyi olan biyoyumlu özelliğinin yanı sıra, içerdiği Al ve V elementleri vücut sıvısı ile uzun süre etkileşimde bulunduğu iyon salınımına sebep olur ve Alzheimer, nöropati,

## ÖZET (devam ediyor)

osteomalazi gibi çeşitli hastalıklara yol açar. Bu sebeple literatürde farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler uygulanarak, titanyum alaşımlarının yüzey pürüzlülükleri, topografileri ve kimyasal kompozisyonları değiştirilerek kemik ile implant arasındaki bağlanmanın ve biyouyumluluğun artırılması ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise, Ti-6Al-4V malzemenin yüksek mekanik özelliği, hidroksiapatitin biyouyumluluğu, gümüşün iletkenliği ve antibakteriyel özelliğinden faydalanılarak, kemiğin yapısına benzer gümüş-kalsiyum-fosfat ile kaplanmış poroz bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır. Yöntem sırasında mikronize gümüş ve hidroksiapatit tozlar farklı oranlarda karıştırılarak toz metalürjisi ile 4 elektrot üretilmiştir. Elektriksel kıvılcımla işleme için gerekli olan di-elektrik sıvı, darbe akımı ve darbe süresi parametreleri belirlendikten sonra, toz metalürjisi ile üretilen elektrotlar kullanılarak deney grupları oluşturulmuştur. 3 farklı darbe akımı, 4 farklı darbe süresinde, saf su içerisinde 39 adet numune işlenmiştir. İşlenen yüzeyler optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınım difraktometresi ile detaylı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, kemiğin yapısını andıran porozlar şeklinde kraterlerden oluşan, gümüş-hidroksiapatit tozları ile zenginleştirilmiş fonksiyonel yüzeylerin elde edilebilmesinin mümkün olduğunu doğrulamıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde elektriksel kıvılcımla işleme yönteminin ileriye dönük çalışmalar için alternatif bir yöntem olacağı söylenilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektriksel kıvılcımla işleme, EKİ, Toz metalürjisi, Biyouyumluluk, Yüzey modifikasyonları, Hidroksiapatit, Gümüş, Titanyum ve alaşımları.

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SINTERED SILVER- HYDROXYAPATITE POWDER-ADDED ELECTRODES ON BIOLOGICAL COMPATIBILITY IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING**

**Damla ÖZDEMİR**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ**

**February 2021, 139 pages**

Electrical discharge machining is based on the principle of removing material with the use of consecutive electrical discharges between a work-piece and an electrode placed on a distance in a dielectric liquid. Extremely high-temperature values are achieved during the process (~20000K). Surface topographical features generated during the process are depended on the operational parameters such as the electrode type, dielectric liquid, pulse duration, pulse current, and open gap voltage. Electrical discharge machining is widely used in processing hard materials with complex geometries as well as heat resistant materials.

Ti-6Al-4V alloy is a preferable material for biomedical implant applications due to its low Young's modulus, high mechanical features, and corrosion resistance. It has been noted that Al and V alloying elements release ions when interacted with body liquid for a long period and cause several diseases such as Alzheimer's, neuropathy, or osteomalacia despite the good biocompatibility properties of Ti.

## ABSTRACT (continued)

Therefore, various studies have been conducted in the literature to enhance the bonding and biocompatibility properties of implant surfaces by applying different physical, chemical, and mechanical methods that change the surface roughness, topography, and chemical composition of titanium alloys surfaces.

In this thesis study, a porous surface coated with silver calcium phosphate similar to the structure of bone has been tried to be obtained by using the high mechanical properties of Ti-6Al-4V material, the biocompatibility of hydroxyapatite, conductivity, and antibacterial properties of silver. Micronized silver and hydroxyapatite powders were mixed in different proportions and 4 tool electrodes were produced by powder metallurgy. Then, experimental groups were planned by using the electrodes produced by the powder metallurgy. 39 samples were electrical discharge machined in pure water dielectric liquid by using 3 different pulse currents and 4 different pulse duration. The surfaces of the samples were analyzed by using optical microscopy, scanning electron microscopy and, an X-Ray diffractometer. The findings suggested the possibility to obtain functional surfaces enriched with silver-hydroxyapatite powders, consisting of craters in the form of pores resembling the structure of the bone. Finally, it has been concluded that the use of powder metallurgy electrodes in electrical discharge machining will be an alternative and promising method for prospective studies.

**Keywords:** Electrical Discharge Machining, EDM, Powder Metallurgy, Bio-compatibility, Surface Modifications, Hydroxyapatite, Silver, Titanium and its alloys.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, zor zamanlarımda beni yüreklendiren, hayatı boyunca edindiği bilgi ve tecrübeleri her daim sabır ve samimiyetle paylaşan değerli danışman hocam Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ'ye teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Tez sürecimde yapmış olduğum deneylerde ve analizlerde destek olan, Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü araştırma görevlisi Sudi KALAMAN ve Hamidullah YAŞAR hocalarıma, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü araştırma görevlisi Engin KOCAMAN hocama teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen, iyi yerlere gelebilmem için tüm azmiyle çalışan ve kızı olmaktan gurur duyduğum sevgili babam Mustafa ÖZDEMİR'e, karşılaştığım her zorlukta beni motive eden ve her daim yanımda olan canım annem Lütfiye ÖZDEMİR'e, yüksek lisans eğitimime başlamam konusunda beni yüreklendiren kıymetli ablam Sıla DURSUN'a, fikir ve düşünceleri ile beni aydınlatan sevgili eniştem Mehmet Buğrahan DURSUN'a ve ailemize yeni katılan, mutluluk kaynağım sevgili yeğenim Nihan DURSUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatımda her ihtiyacım olduğunda manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen canım dostum Meltem DOĞU'ya ve yol arkadaşım Yunus ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi manevi yanımda olan manevi ablalarım Ebru TIRPANCI, Arzu ONAGAN ve Ülkü KAYHAN ÇILI'ya teşekkür ederim. Ayrıca bulunduğu noktaya gelmemde ufacık bile katkısı olan ve ismini saymadığım herkese çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxiii
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ .....	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 EKİ YÖNTEMİ .....	2
1.1.1 Servo Sistemi .....	5
1.1.2 Elektrik Güç Kaynağı.....	6
1.1.3 Di-elektrik Sıvı ve Uygulama Yöntemleri .....	8
1.2 EKİ UYGULAMALARI.....	9
1.3 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME .....	11
1.4. EKİ İLE İŞLENMİŞ YÜZEYLERİN ÖZELLİKLERİ .....	12
1.5 BİYOMALZEMELERDEN BEKLENEN ÖZELLİKLER.....	13
1.5.1 Biyouyumluluk .....	14
1.5.2 Korozyon Direnci.....	14
1.5.3 Biyoaktivite.....	15
1.5.4 Mekanik Özellikler .....	15
1.5.5 Tasarım .....	15
1.6 DENEYLERDE KULLANILAN BİYOMALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ .....	16
1.6.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımları .....	16
1.6.2 Hidroksiapatit.....	17
1.6.3 Gümüş .....	19

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
1.7 ÇALIŞMANIN AMACI.....	20
<b>BÖLÜM 2 LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>23</b>
2.1 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME YÖNTEMİ İLE TİTANYUM ALAŞIMLARININ YÜZEY MODİFİKASYONU VE BİYOUYUMLULUK ÜZERİNE YAPILAN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....	23
2.2 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME YÖNTEMİNDE SİNTERLENMİŞ TOZ KATKILI ELEKTROTUN ÜRETİMİ ÜZERİNE YAPILAN SON 5 YILDAKİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	28
<b>BÖLÜM 3 DENEY MALZEMELERİ, DENEY DÜZENEĞİ VE YÖNTEM.....</b>	<b>35</b>
3.1 NUMUNE VE ELEKTROT ÖZELLİKLERİ .....	35
3.2 KULLANILAN CİHAZLAR VE ÖZELLİKLERİ .....	37
3.3 YÖNTEM .....	45
<b>BÖLÜM 4 ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>57</b>
4.1 YÜZEY TOPOGRAFİSİ.....	58
4.2 ELEMENTEL VE GERİ SAÇILIM ELEKTRON MİKROSKOBUN ANALİZLERİ	67
4.3 KESİT MİKRO YAPISI.....	94
4.4 X-IŞINI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ.....	102
<b>BÖLÜM 5 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>105</b>
5.1 SONUÇLAR.....	105
5.2 DEĞERLENDİRME .....	121
5.3 İLERİYE DÖNÜK OLASI ÇALIŞMALAR.....	123

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

KAYNAKLAR.....	125
EK AÇIKLAMALAR .....	131
ÖZGEÇMİŞ .....	139





## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Lazarenko RC devresi .....	3
Şekil 1.2 EKİ tezgâhının ana kısımları .....	3
Şekil 1.3 EKİ mekanizmasında kıvılcım oluşum aşamaları .....	5
Şekil 1.4 Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi sistem bileşenleri .....	5
Şekil 1.5 EKİ'de kontrollü darbe jeneratöründe tipik darbe dalgası formu. ....	6
Şekil 1.6 Darbe akımının malzeme kaldırma hızına etkisi .....	7
Şekil 1.7 Darbe süresinin malzeme kaldırma hızına etkisi .....	8
Şekil 1.8 Di-elektrik sıvı uygulama yöntemleri.....	9
Şekil 1.9 EKİ ile kesme işlemi .....	10
Şekil 1.10 EKİ ile delme ve oyma işlemi .....	10
Şekil 1.11 EKİ ile taşlama işlemi .....	11
Şekil 1.12 EKİ ile frezeleme işlemi.....	11
Şekil 1.13 Toz tanelerinin davranışı .....	12
Şekil 1.14 EKİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerde oluşan katmanlar .....	13
Şekil 1.15 Hidroksiapatitin kristal kafes yapısı .....	18
Şekil 3.1 Kesilmeden önceki Titanyum çubukların görüntüsü.....	36
Şekil 3.2 Kesme işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımının a) Boyutları b) Parlatıldıktan sonraki görüntüsü.....	36
Şekil 3.3 Ajan EDM CNC Model 983 dalma tipi erozyon tezgâhı.....	37
Şekil 3.4 HİDROLİKSAN atölye tipi manuel pres makinası.....	39
Şekil 3.5 PROTHERM marka kamara fırını .....	40
Şekil 3.6 NK marka su arıtma cihazı.....	40
Şekil 3.7 METKON marka Forcipol-2 model zımparalama ve parlatma cihazı .....	41
Şekil 3.8 DRAGONLAB mekanik karıştırıcı.....	42
Şekil 3.9 QUANTA FEG 450 marka SEM cihazı.....	42
Şekil 3.10 METKON MICRACUT-201 marka yüksek hızlı hassas kesme cihazı .....	43

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.11 METKON ECOPRESS-50 marka bakalit pres cihazı.....	43
Şekil 3.12 METKON FORCIMAT marka zımparalama ve parlatma cihazı.....	44
Şekil 3.13 LEICA marka optik mikroskop.....	44
Şekil 3.14 PANALYTICAL marka, EMPYREAN model XRD cihazı .....	45
Şekil 3.15 Gerilim giderme işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımı.....	46
Şekil 3.16 Parlatma işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımı .....	46
Şekil 3.17 Deneyde kullanılan mikronize gümüş ve mikronize hidroksiapatit .....	47
Şekil 3.18 Gümüş tozlarının a)5000 büyütmedeki b)20.000 büyütmedeki SEM görüntüsü....	47
Şekil 3.19 Gümüş tozlarının a) Genel görüntüsü b) EDS analizi .....	47
Şekil 3.20 Hidroksiapatit tozların a)1000 büyütmedeki b)5000 büyütmedeki SEM görüntüsü. .....	48
Şekil 3.21 Hidroksiapatit tozların a) Genel görüntüsü b)EDS analizi .....	48
Şekil 3.22 Mikronize gümüş ve hidroksiapatit tozların sıkıştırıldığı paslanmazçelik kalıp. ...	49
Şekil 3.23 Toz metalürjisi ile üretilen elektrotlar .....	49
Şekil 3.24 Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi için tasarlanan işleme havuzu. ....	50
Şekil 3.25 Elektrotları tutan mandren.....	50
Şekil 3.26 Numunelerin her deneyden önce yapılan su terazisi ile ölçümü. ....	51
Şekil 3.27 Deney sisteminin işleme öncesindeki görünümü. ....	51
Şekil 3.28 EKİ yönteminde ilerleme ve dönme ile işlenmiş numune ve elektrotun görüntüsü a) Elektrot b) İş parçası c)İşleme sırasında kopan parçalar.....	53
Şekil 3.29 EKİ yönteminde dalma ile işlenmiş numune ve elektrotun görüntüsü a) Elektrot b) İş parçası.....	53
Şekil 3.30 EKİ sonrası Ti-6Al-4V alaşımının farklı parametrelerdeki yüzey görüntüleri.....	54
Şekil 3.31 Numunelerin SEM cihazında vakum altına alınmadan önceki görüntüsü.....	54
Şekil 3.32 Metalografik numune inceleme aşamaları a) İşlenmiş numune b) Kesiti alınmış numune c) Bakalite alınmış numune .....	55
Şekil 3.33 Bakalite alınan numuneler a) Parlatma işlemi sonrası b) Dağlama işlemi sonrası ..	55
Şekil 4.1 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag %10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	58

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.2 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	59
Şekil 4.3 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	60
Şekil 4.4 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	61
Şekil 4.5 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	62
Şekil 4.6 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	63
Şekil 4.7 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	64
Şekil 4.8 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	65
Şekil 4.9 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	66
Şekil 4.10 Hacimce karıştırılmış %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe süresi:50µs a) Darbe akımı:7A b)Darbe akımı:12A c)Darbe akımı:22A.....	67
Şekil 4.11 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.12 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.....	69
Şekil 4.13 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.....	69
Şekil 4.14 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.....	69
Şekil 4.15 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.....	70
Şekil 4.16 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	71
Şekil 4.17 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.....	71
Şekil 4.18 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.....	72
Şekil 4.19 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.....	72
Şekil 4.20 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.....	72
Şekil 4.21 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	73
Şekil 4.22 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.23 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.....	74
Şekil 4.24 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.....	75
Şekil 4.25 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.....	75
Şekil 4.26 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	76
Şekil 4.27 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.....	77
Şekil 4.28 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.....	77
Şekil 4.29 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.....	77
Şekil 4.30 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.....	78
Şekil 4.31 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	79
Şekil 4.32 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.....	79
Şekil 4.33 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.34 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.....	80
Şekil 4.35 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.....	80
Şekil 4.36 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot. ....	81
Şekil 4.37 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs .....	82
Şekil 4.38 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs.....	82
Şekil 4.39 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs.....	83
Şekil 4.40 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs.....	83
Şekil 4.41 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot. ....	84
Şekil 4.42 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs .....	85
Şekil 4.43 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs.....	85
Şekil 4.44 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri. Darbe akımı:22A, Darbe süresi:6µs.....	86

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.45 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs.....	86
Şekil 4.46 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	87
Şekil 4.47 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs .....	88
Şekil 4.48 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.....	88
Şekil 4.49 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.....	88
Şekil 4.50 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.....	89
Şekil 4.51 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.....	90
Şekil 4.52 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs .....	90
Şekil 4.53 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.....	91
Şekil 4.54 %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.....	91
Şekil 4.55 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.....	91

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.56 Hacimce karıştırılmış %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe süresi:50µs a)darbe akımı:7A b)darbe akımı:12A c) darbe akımı:22A.....	92
Şekil 4.57 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:50µs.....	93
Şekil 4.58 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:50µs.....	93
Şekil 4.59 %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:50µs.....	93
Şekil 4.60 EKİ ile işlenmiş numunenin kesit mikro yapısının genel görünümü.....	94
Şekil 4.61 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı a) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %100Ag elektrot b) darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs, %100 Ag elektrot c) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %90Ag-%10HA elektrot. ....	95
Şekil 4.62 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı a) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %100Ag elektrot b) darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs, %100 Ag elektrot c) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %90Ag-%10HA elektrot. ....	96
Şekil 4.63 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b) %90 Ag -%10 HA elektrot.....	97
Şekil 4.64 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b) %90 Ag -%10 HA elektrot.....	98
Şekil 4.65 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b) %90 Ag -%10 HA elektrot.....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.66 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100Ag elektrot b) %90 Ag -%10 HA elektrot. ....	100
Şekil 4.67 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %90A%10 HA elektrot b) %70 Ag - %30 HA elektrot. ....	101
Şekil 4.68 EKİ sırasında oluşan çatlama mekanizması .....	101
Şekil 4.69 EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %90A%10 HA elektrot b) %70 Ag - %30 HA elektrot. ....	102
Şekil 4.70 %90 Ag-%10 HA elektrot ile 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde işlenen numunenin XRD izleri .....	103
Şekil 4.71 %90 Ag-%30 HA elektrot ile 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde işlenen numunenin XRD izleri .....	103
Şekil 5.1 Numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM görüntüleri darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot .....	106
Şekil 5.2 Numunelerin kesit mikro yapıları, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot. ....	107
Şekil 5.3 Numunelerin SEM-BSED görüntüleri ve EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot .....	107
Şekil 5.4 Numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM görüntüleri darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot .....	108
Şekil 5.5 Numunelerin SEM-BSED görüntüleri ve EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot c) %70 Ag-%10 HA elektrot. ....	109
Şekil 5.6 Numunelerin kesit mikro yapıları, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot. ....	110
Şekil 5.7 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin a) yüzey topografyası b) kesit mikro yapısı c) SEM-BSED görüntüsü d) EDS izleri .....	111

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.8 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısından alınan noktasal EDAX analizleri.....	112
Şekil 5.9 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısı .....	113
Şekil 5.10 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin noktasal EDAX analizi .....	113
Şekil 5.11 %100 Ag elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu. ....	114
Şekil 5.12 %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.....	115
Şekil 5.13 %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.....	115
Şekil 5.14 %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.....	116
Şekil 5.15 Elektrot, darbe akımı, darbe süresi değişimine göre ağırlıkçaCa yoğunluğu. ....	117
Şekil 5.16 Elektrot, darbe akımı, darbe süresi değişimine göre ağırlıkçaP yoğunluğu. ....	117
Şekil 5.17 Elektriksel kıvılcımla işlemede farklı formlardaki kıvılcım mekanizmaları.....	118
Şekil 5.18 Darbe akımı değişimine göre ortalama katman kalınlıkları (%100 Ag elektrot, darbe süresi:6µs).....	119
Şekil 5.19 Darbe akımı değişimine göre ortalama katman kalınlıkları (%90 Ag-%10 HA elektrot, darbe süresi:6 µs) .....	120
Şekil 5.20 Elektrot toz katkısı yoğunluğuna göre ortalama katman kalınlıkları (darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs).....	121

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Hidroksiapatitin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri.....	18
Çizelge 1.2 Gümüşün fiziksel özellikleri .....	20
Çizelge 3.1 Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) .....	35
Çizelge 3.2 Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özellikleri (20°C).....	35
Çizelge 3.3 Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri (20°C). .....	35
Çizelge 3.4 Ajan EDM CNC Model 983 dalma tipi erozyon tezgâhının teknik özellikleri .....	38
Çizelge 3.5 HİDROLİKSAN atölye tipi manuel pres makinasının teknik özellikleri .....	39
Çizelge 3.6 METKON marka Forcipol-2 model zımparalama ve parlatma cihazının teknik özellikleri.....	41
Çizelge 3.7 Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında kullanılan değişken parametreler .....	52
Çizelge 3.8 Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında kullanılan sabit parametreler.....	52



## EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

### Sayfa

Şekil A.1 7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 200X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.....	131
Şekil A.2 7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 1000X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.....	132
Şekil A.3 7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 40000X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.....	133
Şekil B.1 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin 4000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi .....	134
Şekil B.2 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin 10000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi .....	135
Şekil B.3 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin 1000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi .....	136
Şekil B.4 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin 4000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi .....	137



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

K	: Kelvin
Ti-6Al-4V	: Titanyum-Alüminyum-Vanadyum Alaşımı
Al	: Alüminyum
V	: Vanadyum
V	: Voltaj
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	: Hidroksiapatit
Ca	: Kalsiyum
P	: Fosfat
GPa	: Gigapaskal
MPa	: Megapaskal
g	: Gram
cm	: Santimetre
HV	: Vickers Sertlik Değeri
W	: Watt
Ag	: Gümüş
$\delta$	: Delta
$\gamma$	: Gama
TiH	: Titanyum Hidrür
A	: Amper
Ti	: Titanyum
TiO	: Titanyum Oksit
$\text{CaTiO}_3$	: Titanyum Perovskite

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

l	: Litre
Ta	: Tantalyum
O	: Oksijen
Nb	: Niyobyum
Zr	: Zirkonyum
CaZrO <sub>3</sub>	: Kalsiyum Zirkonat
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	: Trikalsiyum Fosfat
CaO	: Kalsiyum Oksit
NbO	: Niyobyum Monoksit
Si	: Silisyum
μJ	: Mikrojoule
TiC	: Titanyum Karbür
SiC	: Silisyum Karbür
μs	: Mikrosaniye
nm	: Nanometre
W	: Tungsten
EN31	: Yüksek Karbonlu Çelik
Cu	: Bakır
C	: Grafit
B <sub>4</sub> C	: Bor Karbür
mm	: Milimetre
Cr	: Krom
Mo	: Molibden
H11	: Sıcak Kalıp Çeliği
Ni	: Nikel
dk	: Dakika
Mn	: Mangan
C	: Karbon
AA6061	: Alüminyum Alaşımı
EN8	: Orta Karbonlu Çelik
D3	: Takım Çeliği
R <sub>a</sub>	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

Ti <sub>3</sub> SiC <sub>2</sub>	: Titanyum Silikon Karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
AISI 1020	: Yumuşak Çelik
ZE41A	: Magnezyum Alaşımı
mg	: Miligram
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
N	: Azot
Ω	: Ohm
J	: Joule
kN	: Kilonewton
N	: Newton
R <sub>m</sub>	: Çekme Dayanımı
R <sub>p</sub>	: Akma Dayanımı
m	: Metre
KVA	: Elektriksel Anma Gücü
kg	: Kilogram
rpm	: Dönme Hızı

## KISALTMALAR

BEÜ	: Bülent Ecevit Üniversitesi
BSED	: Backscattered Electron Detector
CNC	: Computer Numerical Control
EDAX	: Energy Dispersive X-ray
EDM	: Electrical Discharge Machining
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry
EKİ	: Elektriksel Kıvılcımla İşleme
ELI	: Extra Low Interstitial
ETD	: Everhart Thornley Detector
HA	: Hidroksiapatit
HSS	: High-Speed Steel

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

LT	: Layer Thickness
Max.	: Maksimum
MÖ	: Milattan Önce
MTR	: Mass Transfer Rate
OHNS	: Oil Hardened Non Shrinkage Steel
SEM	: Scanning Electron Microscope
Sermet	: Seramik-Metal
SS	: Stainless Steel
TKEKİ	: Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme
TOPSIS	: Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution
TTK	: Türkiye Taş Kömürü
XRD	: X-Ray Diffraction

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte biyomalzeme biliminde son yıllarda önemli gelişmeler olmuştur. Protez, yapay kalp, stentler ve farklı implant uygulamaları için biyomalzemeler geliştirilmiştir. Bu alandaki çalışmalar hasarlı dokuların yerine alternatif çözümler üretmeye yöneliktir. İnsan vücudunda farklı şekillerde uygulanan biyomalzemelerin seçiminde, biyouyumluluk, üretilebilirlik, korozyon şartlarına karşı dayanıklılık, şekil verilebilirlik gibi özellikler dikkate alınmıştır. Bu sebeple biyomalzemelerin hücrel uyumluluğunun artırılmasında çeşitli yüzey kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, implant performansını ve insan vücudundaki kullanım ömrünü daha iyi duruma getirebilmek için alternatif yollar sunmaktadır.

Biyomalzemelerin yüzey modifikasyonları, biyoimplantların performansının iyileştirilmesinde ve biyolojik sistemlerin karmaşıklıklarının giderilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, biyomalzeme ve bu malzemelerin dokular üzerindeki etkileşimleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Günümüzde, vücudun doğal dokuları ve vücut sıvıları ile uyumlu biyomalzemeler geliştirilmeye devam edilmektedir.

Titanyum ve alaşımları, yüksek mekanik özellik ve yüksek korozyon direncine sahip olduğu için biyomedikal alanda en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Fakat uzun süre vücutta kaldığında, içerdiği Al ve V iyonları sebebiyle alzheimer gibi kalıcı hastalıklara neden olma olasılığı bulunmaktadır. Bu sebeple farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler uygulanarak, titanyum alaşımlarının yüzey pürüzlülükleri, topografyaları ve kimyasal kompozisyonları değiştirilerek kemik ile implant arasındaki bağlanmanın ve biyouyumluluğun artırılması ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin; elektriksel kıvılcımla işleme sırasında di-elektrik sıvıya çeşitli tozlar ilave edilerek iş parçasının yüzeyinde kaplama tabakası oluşturulmaya çalışılmıştır. Son yıllarda yapılan bir çalışmada, toz katkılı elektriksel kıvılcımla işleme (TKEKİ) sırasında di-elektrik sıvıya biyoseramik yapılı HA tozlar ilave edilerek farklı

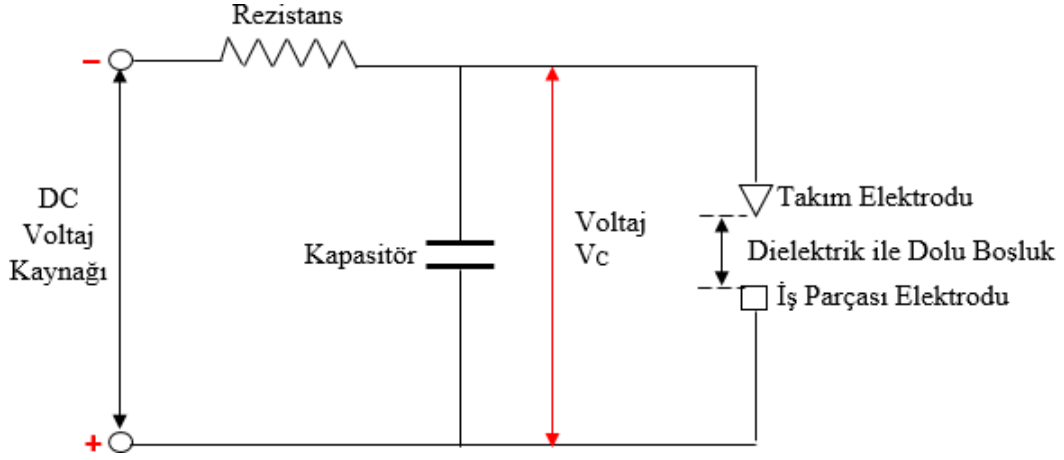
yüzey modifikasyon teknikleri denenmiş ve kemik benzeri yüzeylerin oluşması sağlanmıştır. HA tozların gözenekli bir yapı oluşturduğu ve biyouyumluluğu arttırdığı gözlenmiştir.

Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında di-elektrik sıvıya ilave edilen tozlardan iş parçasına malzeme göçü olabildiği gibi, kullanılan elektrotlardan iş parçasına da malzeme göçü meydana gelebilmektedir. Literatürde, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak çeşitli toz katkıları ile çalışmalar yapılmıştır. Ancak hidroksiapatit ve gümüş tozlarının kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Gümüş tozu hem iletken hem de antibakteriyel özelliğe sahip bir malzemedir. Hidroksiapatit ise elektriksel yalıtkan ve kemik benzeri yapısıyla yüksek biyouyumluluğa sahip bir malzemedir. Bu iki malzemenin toz metalürjisi yöntemi kullanılarak farklı oranlarda bir araya getirilmesi ile elektriksel kıvılcımla işlemede elektrot olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, titanyum malzemenin yüksek mekanik özellikleri, hidroksiapatitin biyouyumluluğu, gümüş tozunun iletkenliği ve antibakteriyel özelliğinden faydalanılarak, kemik hücrelerine benzer gözenekli ve kalsiyum-fosfat ile kaplanmış poroz bir yüzey elde etmek amaçlanmaktadır. EKİ yönteminde kıvılcımların oluşumunu sağlayan elektrot, gümüş ve HA toz katkısı ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilecek ve farklı parametrelerde deneyler yapılarak biyouyumlu yüzeyler elde edilmeye çalışılacaktır.

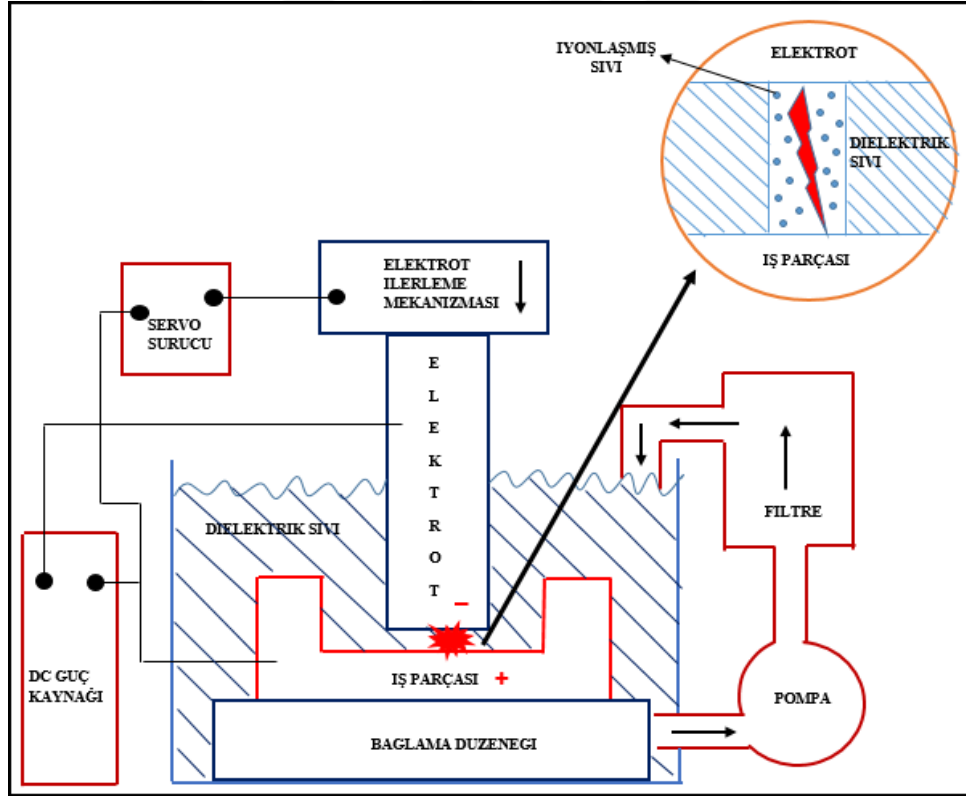
## 1.1 EKİ YÖNTEMİ

Sert, karmaşık ve aşınmaya karşı dirençli olan malzemelerin işlenebilme kabiliyetlerinin düşük olması ve alışılmış imalat yöntemlerinin yeterli olmaması, alışılmamış imalat yöntemlerine olan ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Uçak, otomobil, takım ve kalıp imalatı, biyotıp gibi alanlarda ileri teknolojilere ihtiyaç duyulmasıyla birlikte, alışılmamış imalat yöntemlerinden olan elektriksel kıvılcımla işleme (EKİ) yöntemi bu alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminin temelleri 1768 yılında İngiliz kimyacı Joseph Priestly tarafından ortaya konulmuştur. Priestly, elektrik boşalmasını ve kıvılcımın aşındırıcı etkisi keşfetmiştir. 1940'lı yıllara gelindiğinde B.R ve N.I Lazarenko, kıvılcımın aşındırıcı etkisini daha faydalı bir şekilde kullanabilmek için yeni bir metot geliştirmişlerdir. Böylece Lazarenko devresi olarak adlandırılan bir kıvılcım jeneratörü devresini oluşturarak ilk EKİ tezgâhının temellerini atmışlardır (Şekil 1.1). 1980'li yıllarda EKİ yönteminde Bilgisayar Sayısal Kontrolü'nün (CNC) ortaya çıkmasıyla, işleme verimliliği daha da artmıştır.



Şekil 1.1 Lazarenko RC devresi (Kumar et al. 2009).

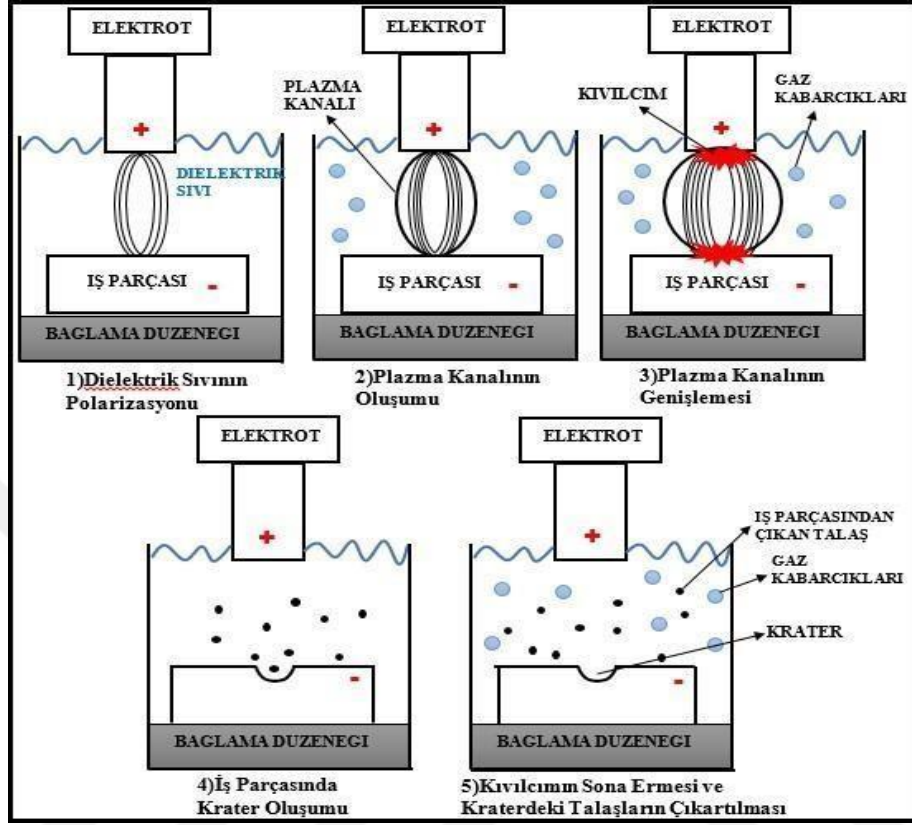
Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi genel olarak elektrot, iş parçası, di-elektrik sıvı ve tezgah bileşenlerinden oluşur (Şekil 1.2). İş parçası ve elektrot elektriksel iletkenliğe sahip olmalı, di-elektrik sıvı ise yalıtkan olmalıdır. Bu yöntemde iş parçası ve elektrot arasında doğrudan fiziksel bir temas ve herhangi bir mekanik gerilme uygulanmadan karmaşık yapıya sahip olan veya işlenebilmesi güç olan elektriksel iletkenliğe sahip parçalar rahatlıkla işlenebilmektedir.



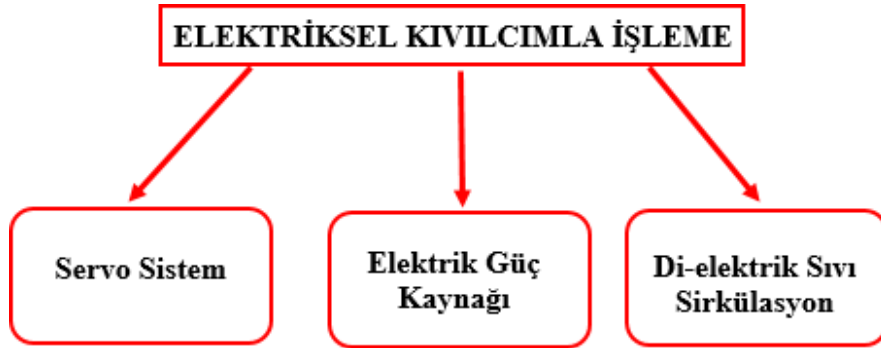
Şekil 1.2 EKİ tezgâhının ana kısımları.

Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi en basit tanımıyla, günlük hayatta yağmurlu havalarda herkesin karşılaştığı ‘‘yıldırım düşmesi’’ olayına benzer. Yıldırım düşmesi sırasında çok yüksek elektriksel boşalım oluşur ve oluştuğu bölgede ciddi zararlara neden olur. Enerji, yıldırım düşmesi esnasında bulutlardan sağlanırken, EKİ sırasında güç kaynağından sağlanır. Benzer şekilde yıldırım düşmesi sırasında havada oluşan ve yeryüzüne boşalan enerji, EKİ yönteminde di-elektrik sıvı içerisinde oluşur ve iş parçasına boşalır. Tanımı daha da genişletecek olursak, elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi, yalıtkan (di-elektrik) bir ortamda, birbirleri ile hiçbir temasta bulunmayan ve dar bir aralıkla konumlandırılmış elektrotlar arasında, darbe üreticisi tarafından oluşturulan kontrollü ardışık elektriksel boşalımların (kıvılcımların) iş parçası üzerindeki bir bölgeyi eritmesi ve buharlaştırması temeline dayanır (Şekil 1.3). Yöntemde bir elektriksel güç kaynağından açık aralık gerilimi (~100-400 V) uygulanır ve oluşturulan gerilim elektrot ile iş parçası arasına uygulanır. Açık aralık gerilimi ile yüklenen elektrot, iş parçasına doğru yaklaştırılır. Elektrot iş parçasına yaklaştıkça aralarındaki mesafe sürekli azalır, aynı zamanda şiddetlenen elektriksel alan di-elektrik sıvının polarize olmasına neden olur. Oluşan elektriksel alan, elektrotla iş parçasının birbirine en yakın olduğu mesafede en yüksek seviyesine ulaşır. Di-elektrik sıvı, elektrotlar arasındaki mesafe kritik bir değere düştüğünde (~ 15-30 µm) üzerindeki elektrik alanı taşıyamayarak yalıtkan ortamın kırılmasına sebep olur. Açık aralık gerilimi hızlı bir şekilde düşer (~30 V). Bu esnada düşük dirençli bir plazma kanalı açılır, elektronlar ve iyonlar iş parçasının ve elektrotun temas yüzeylerine hızla akmaya başlar. Elektriksel akımın şiddeti giderek artar, gerilim düşer ve elektrotların yüzeyinde basınç ve yüksek noktasal sıcaklıklar oluşur (~20000 K). Bu ısın oluşması, plazma kanalından akan elektron ve iyonların temas yüzeylerine çarptıkları anda oluşan kinetik enerjinin termal enerjiye dönüşmesinden kaynaklanır. Bilinen hiçbir imalat yönteminde bu kadar yüksek sıcaklık değerlerine çıkılamamaktadır. Isının oluşmasıyla birlikte iş parçası, elektrot ve di-elektrik sıvının da sıcaklığı artar. Kıvılcım olarak adlandırılan plazma kanalı genişlemeye devam eder. Elektriksel darbe geriliminin sonlandırılmasıyla akım ve gerilim sıfıra düşer, basınç ortadan kalkar. Elektrot ve iş parçası yüzeylerinde bulunan, yüksek sıcaklık etkisi altındaki eriyik malzeme hızla buharlaşarak di-elektrik ortam içerisine püskürür. Püsküren malzeme, soğuk di-elektrik sıvı içerisinde küre benzeri tanecikler şeklinde çökelerek katılaşır. Katılaştıran bu tanecikler di-elektrik sıvının sirkülasyonu sayesinde işlem bölgesinden uzaklaştırılır. İşlem sırasında oluşan her bir kıvılcım, iş parçası ve elektrot yüzeyinde küçük kraterler bırakır. Darbe üreticisi tarafından sağlanan ardışık kıvılcımlar ve takım elektrotu kullanılarak, elektrotun dişi yüzeyinin iş parçası üzerinde işlenmesi sağlanır.

EKİ mekanizmaları temel olarak, servo sistemi, elektrik güç kaynağı ve di-elektrik sıvı sirkülasyon sistemi olmak üzere üç kısımdan oluşur (Şekil 1.4).



Şekil 1.3 EKİ mekanizmasında kıvılcım oluşum aşamaları.



Şekil 1.4 Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi sistem bileşenleri.

### 1.1.1 Servo Sistemi

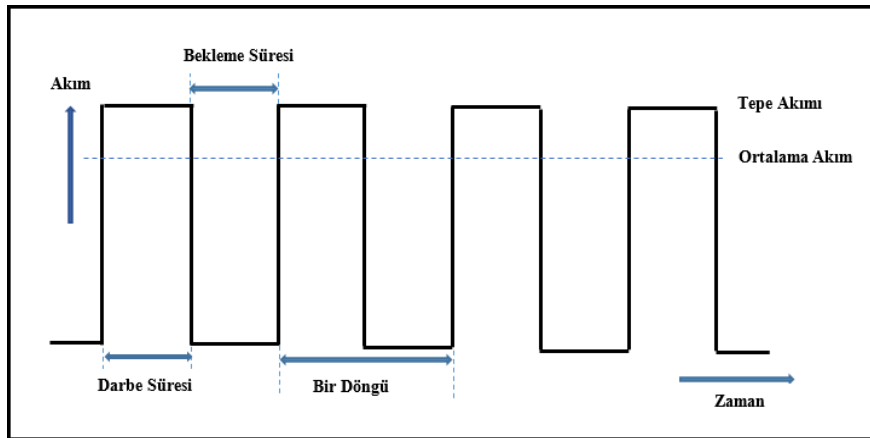
Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde elektrotlar arasındaki mesafenin kontrol edilerek elektrotlar arası mesafenin sabit tutulması gerekmektedir. İş parçasının boyutları işlem sırasında aşınmaya bağlı olarak zamanla değişir ve iş parçası ile elektrot arasındaki mesafe artar. İşlem esnasında bu mesafenin korunabilmesi için servo sistemi kullanılır. Servo sistem, nümerik

kontrollü takım tezgâhlarında bulunan bir sürücü sistemidir. Bu sistem sayesinde işlem ilerledikçe, elektrotun iş parçasına doğru yaklaşması sağlanır. Benzer şekilde yalıtım direnci aşıldığı anda oluşan gerilim düşüşü algılanarak, elektrotun iş parçasına daha fazla yaklaşması bu sistem ile engellenir. Ayrıca işlem sırasında oluşabilecek kısa devre gibi istenmeyen durumlar için elektrotun geriye çekilmesi sağlanır.

### 1.1.2 Elektrik Güç Kaynağı

Elektriksel güç kaynağı istenilen formda ve güç seviyesinde elektriksel darbeler üreten bir sistemdir. Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde birden fazla elektriksel parametre vardır. Bunların başlıcaları; deşarj gerilimi, darbe akımı, darbe süresi ve bekleme süresidir. Bunlara ek olarak kullanılan elektrotun özellikleri, iş parçası özellikleri, gibi parametreler de işlem üzerinde etkilidir.

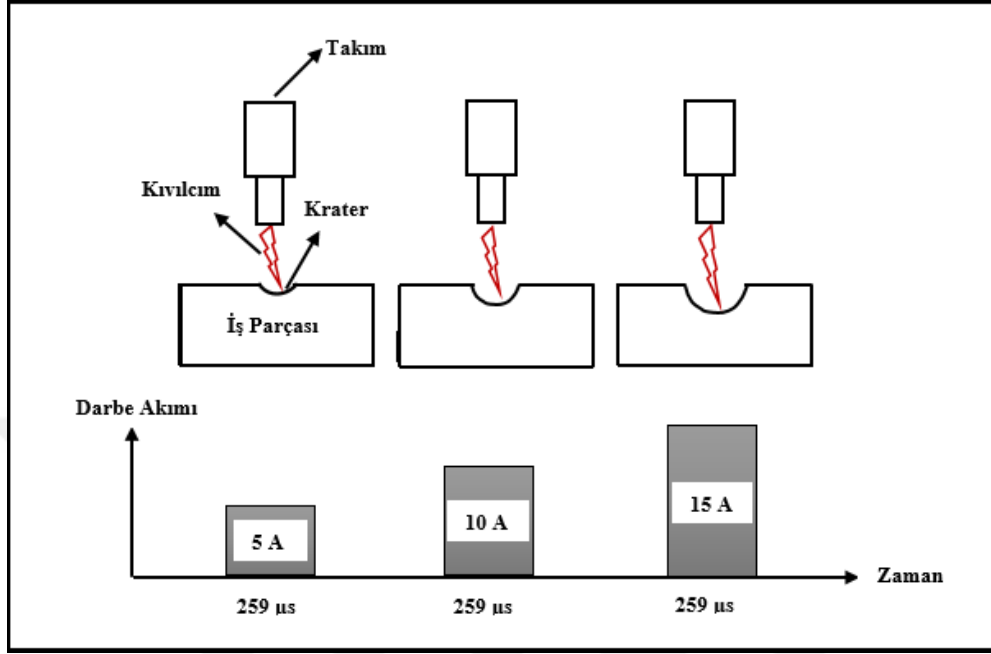
Kıvılcım atlamasını gerçekleştirecek gerilim deşarj gerilimi olarak adlandırılır. Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında, akım akmaya başlamadan önce iş parçası ile elektrot arasında darbe süresi boyunca açık aralık gerilimi uygulanır. Elektrotlar arası mesafenin düşerek, di-elektrik yalıtım direncinin aşıldığı seviyeye geldiğinde akım akmaya ve gerilim hızla deşarj gerilimine düşer. Önceden belirlenmiş olan açık aralık gerilimi, iş parçası ile takımlar arasındaki kıvılcım mesafesini belirler. Yüksek açık aralık gerilimi elektrotlar arası boşluğu genişleterek di-elektrik sınıvının dolaşımını kolaylaştırır (Şekil 1.5).



**Şekil 1.5** EKI'de kontrollü darbe jeneratöründe tipik darbe dalgası formu (Abdel and El-Hofy 2005).

Darbe akımı, kıvılcımın boşalması sırasında oluşan akımın değeridir. Talaş kaldırma hızı ve yüzey kalitesini etkileyen önemli bir parametredir. Sabit darbe süresinde, darbe akımı

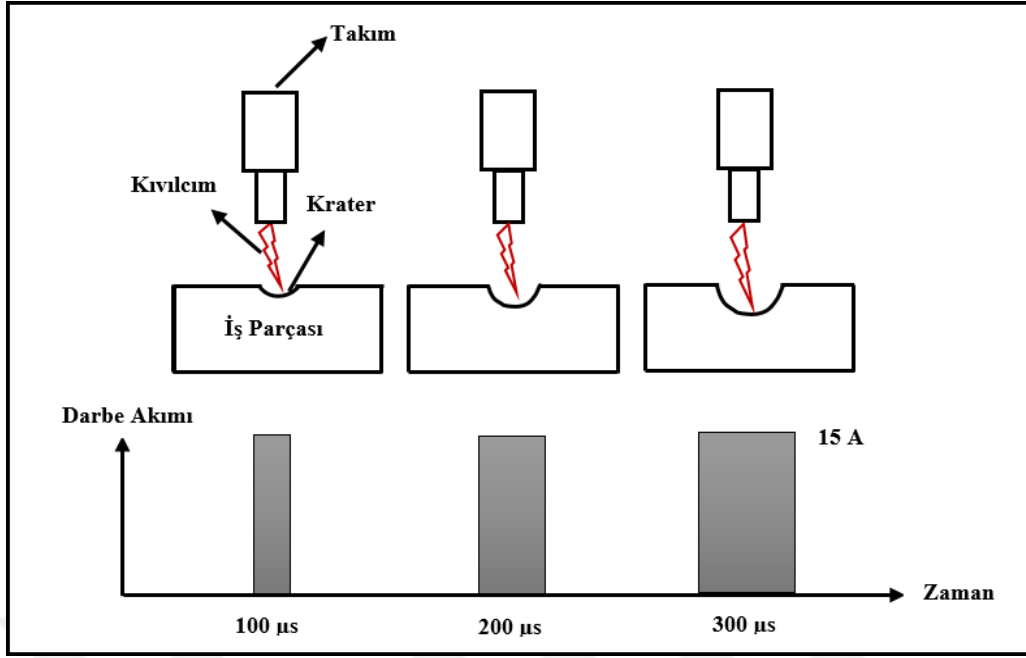
yükseldikçe enerji geçişi daha büyük olacağından daha derin kraterler oluşur ve daha çok malzeme kaldırılır. Ancak takım aşınması artar ve daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Darbe akımının malzeme kaldırma hızına etkisi (Abdel and El-Hofy 2005).

Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde her çevrim mikro saniyeler cinsinden ifade edilen darbe süresi ve bekleme süresinden oluşur. Darbe süresi, kıvılcımın boşalmaya başladığı an ile kıvılcımın sona erdiği an arasında geçen süredir. Bu andan itibaren, yeni bir elektriksel çevrimin başlamasına kadar geçen süre ise bekleme süresi olarak adlandırılır. Darbe süresi arttıkça, daha büyük enerji geçişi sağlanır ve boşalma akımının etkisi daha uzun süre devam eder (Şekil 1.7). Talaş kaldırma işlemi bu sürede gerçekleşir. Darbe akımı ve darbe süresi, yüzeyin özelliklerini ve elektrot aşınmasını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bekleme süresi sırasında iş parçasından kaldırılan malzeme, di-elektrik sıvı sayesinde ortamdan uzaklaştırılır.

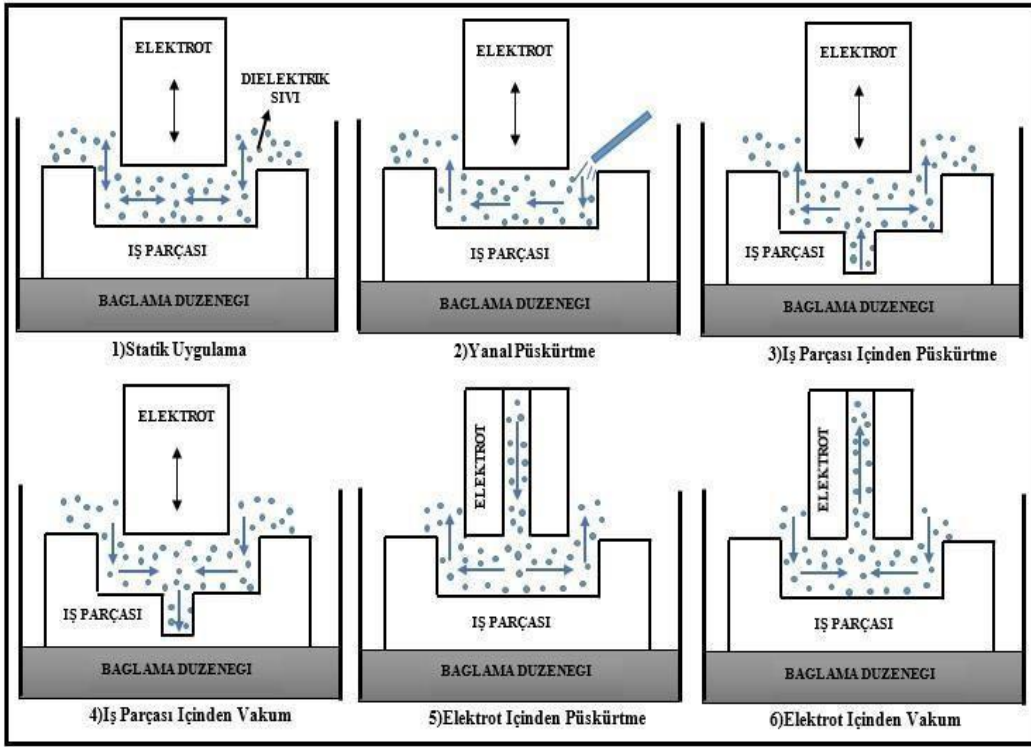
Bekleme süresinin mümkün olduğunca kısa sürede tutulması istenir. Böylece malzeme kaldırma hızının artırılması sağlanır. İş parçası üzerinde istenmeyen işlemler oluşmasını engellemek ve aşınan malzemenin di-elektrik sıvı aracılığıyla uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla bekleme süresinin işleme koşullarına göre özenle seçilmesi gerekir.



Şekil 1.7 Darbe süresinin malzeme kaldırma hızına etkisi (Abdel and El-Hofy 2005).

### 1.1.3 Di-elektrik Sıvı ve Uygulama Yöntemleri

Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde iş parçası ve elektrot di-elektrik sıvının olduğu bir havuz içinde gömülü bir durumdadır. Di-elektrik sıvının görevi iş parçasından kopan talaşları kıvılcım oluşma bölgesinden uzaklaştırma, elektrot ile iş parçasının yüzeylerini soğutma ve kıvılcım atma boşluğunu kontrol altında tutmaktır. Di-elektrik sıvının cinsi ve uygulanma şekli, malzeme kaldırma oranını ve takım aşınmasını etkilemektedir (Şekil 1.8). EKİ yönteminde en çok tercih edilen di-elektrik sıvı su ve hidrokarbon bileşikleridir. Bunlara ek olarak organik bileşiklerden glikol ve etilenin sulu çözeltileri de kullanılmaktadır. Ayrıca deneysel amaçlı kullanılan gaz jeti uygulamaları da bulunmaktadır.

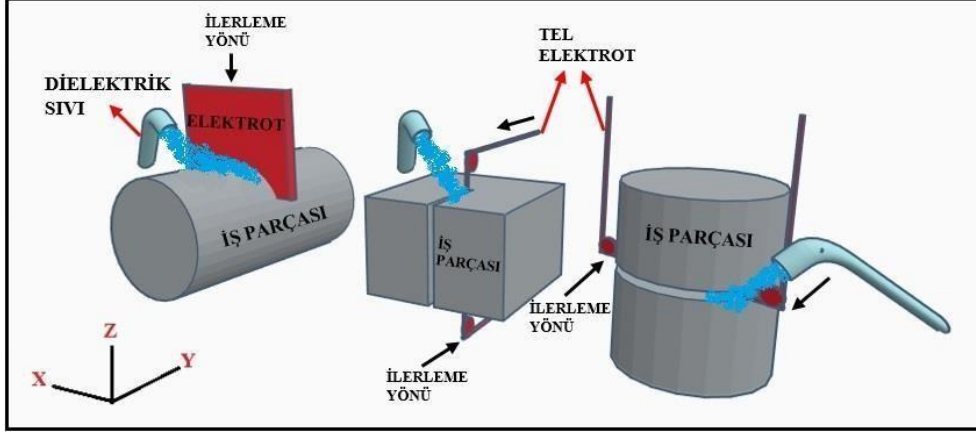


Şekil 1.8 Di-elektrik sıvı uygulama yöntemleri.

## 1.2 EKİ UYGULAMALARI

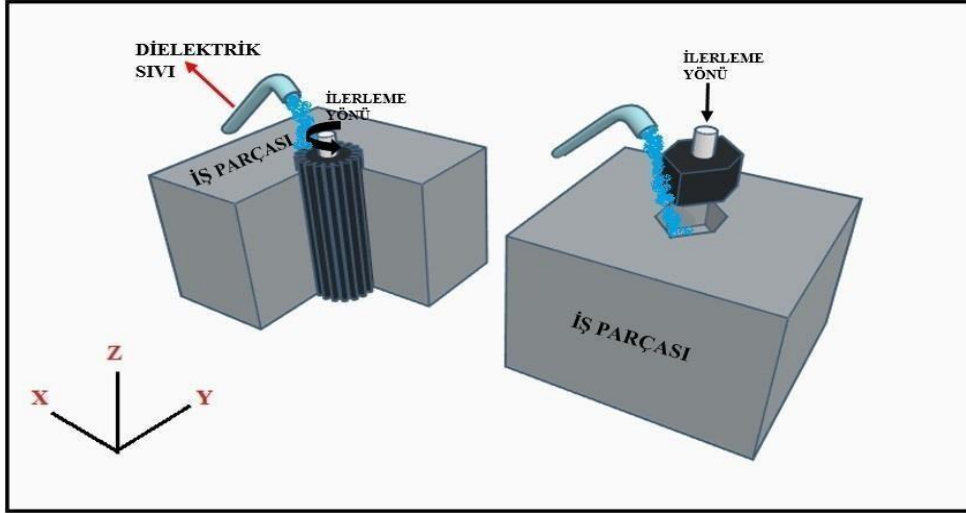
EKİ yönteminde elektrot ile iş parçası arasında temas gerekmediğinden, alışılmış imalat yöntemlerin de ortaya çıkan temas gerilmeleri ortaya çıkmaz. İşleme esnasında büyük avantaj sağlayan bu özellik sayesinde, farklı uygulama yöntemleri geliştirilmiştir. Uygulama alanları farklı olsa da uygulanma şekli değişmemektedir. Diğer yöntemlerde de aynı şekilde kıvılcımlar oluşturulmaktadır. Yaygın olarak kullanılan EKİ uygulamaları aşağıda açıklanmıştır.

Tel erozyon yönteminde, bir telin üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilir ve telin iş parçasını kesmesi sağlanır (Şekil 1.9). Bu yöntem sayesinde sert ve karmaşık geometrilerdeki parçaların işlenebilmesi mümkündür. İşlem sırasında hem iş parçası hem de tel zarar görmektedir. Telde oluşan deformasyondan dolayı ikinci kez kullanılamamaktadır. Kalıpların üretiminde ve farklı birçok sanayi uygulamalarında tercih edilen bir yöntemdir.



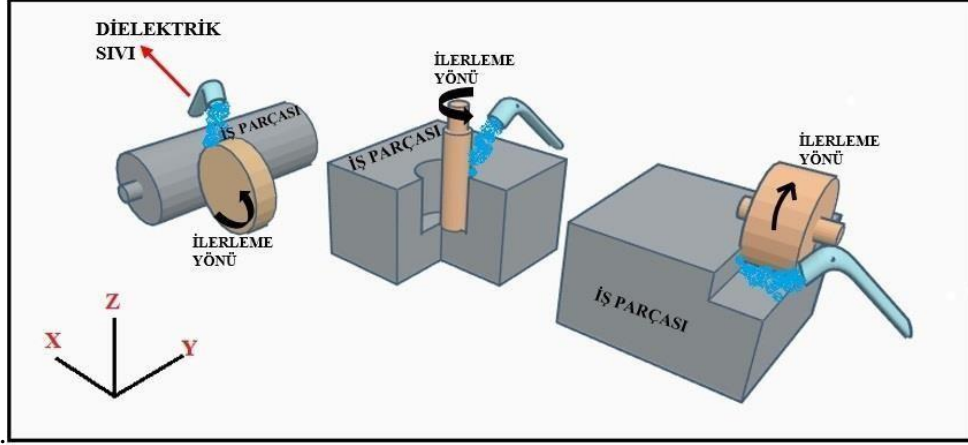
Şekil 1.9 EKİ ile kesme işlemi.

EKİ ile delme ve oyma işlemleri de yapılabilmektedir. Delme ve oyma işlemi, iş parçasının bir elektrot aracılığıyla boydan boyca delinmesi ve elektrotun iş parçasına belli bir işleme derinliğinde dalması esasına dayanır (Şekil 1.10).



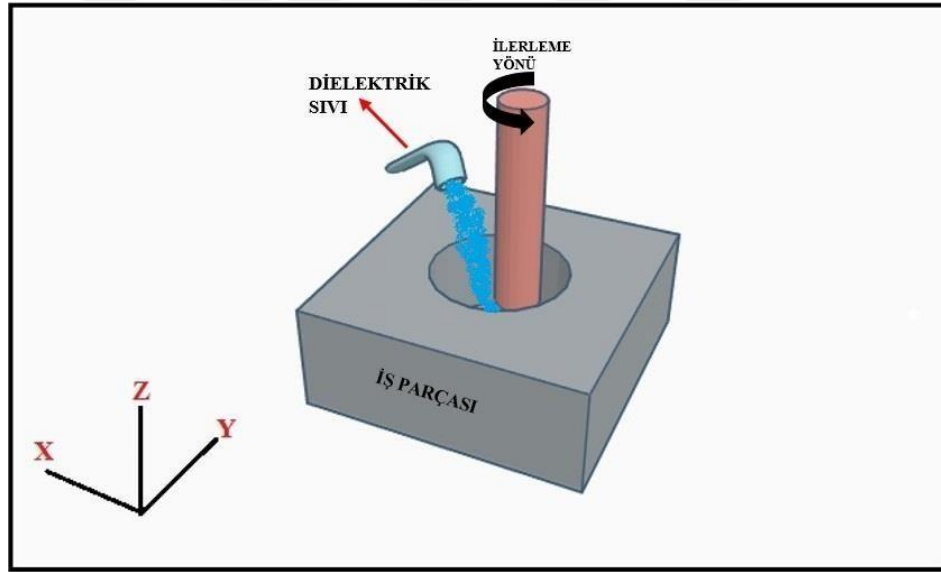
Şekil 1.10 EKİ ile delme ve oyma işlemi.

EKİ ile taşlama yöntemi, konik veya silindirik şekillere sahip olan ve kendi eksenine etrafında dönen elektrotlar ile iş parçasının dış yüzeyinin veya iç deliklerinin taşlandığı bir yöntemdir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 EKİ ile taşlama işlemi.

Elektriksel kıvılcımla frezeleme yönteminde, kendi ekseninde dönen silindirik bir elektrot aracılığıyla elektriksel kıvılcımlar oluşturulur ve iş parçası işlenir (Şekil 1.12).

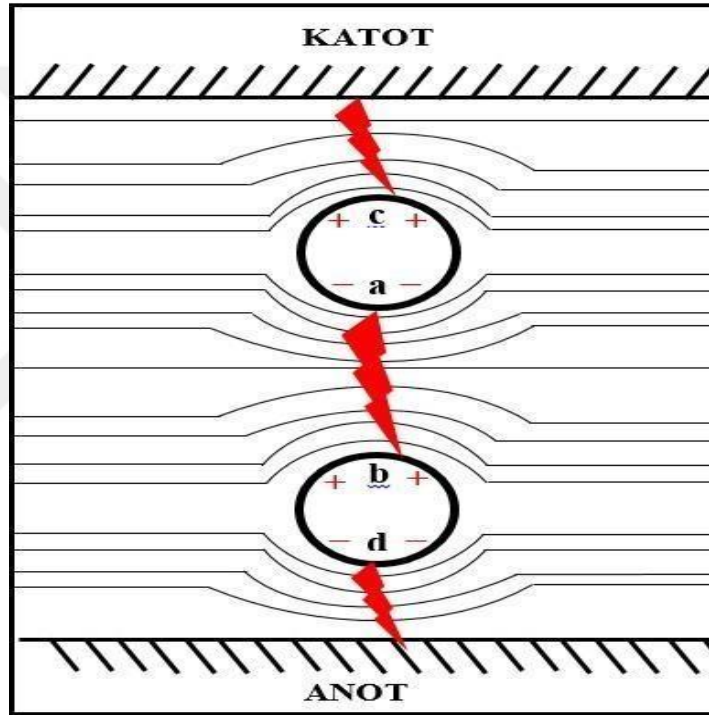


Şekil 1.12 EKİ ile frezeleme işlemi.

### 1.3 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME

Toz katkılı elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde, di-elektrik sıvıya çeşitli tozlar ilave edilir. Eklenen tozların boyutu, tipi ve geometrisi işleme mekanizmasını etkilemektedir. Bu tozların ilave edilmesiyle işleme sırasında deşarj koşullarında değişiklikler yapılarak yüzey kalitesinin artırılması amaçlanır. Asılı tozlar, elektrotlar arasındaki mesafeyi değiştirir ve EKİ yönteminde farklı yüzey özelliklerinin oluşması sağlanır.

Gerilim uygulandığında, tozlar üzerinde negatif ve pozitif yükler oluşur. Tepe ve dip noktalar en çok elektriksel yoğunluğa sahip olan kısımlardır. Birbirlerine en yakın bulunan iki toz tanesi arasında elektrik alan yoğunluğu en yüksek seviyededir. Bu sebeple a ve b noktalarında ilk elektriksel boşalım meydana gelir. İlk boşalmanın ardından bu iki toz tanesi arasında kısa devre oluşur ve elektrik yükleri bu alan içerisinde dağılır. Daha sonra, elektrik yükleri yüksek olan toz tanecikleri c ve d noktalarında yoğunlaşır. Toz taneleri arasında oluşan elektrik yükü yoğunlaşması, iş parçası ile elektrot arasında ardışık deşarjlar şeklinde boşalım oluşmasını sağlar (Şekil 1.13). Bu sayede toz katkılı elektriksel kıvılcıma işleme yönteminde elektriksel boşalmalar daha kolay bir şekilde oluşur (Zhao et al. 2002).

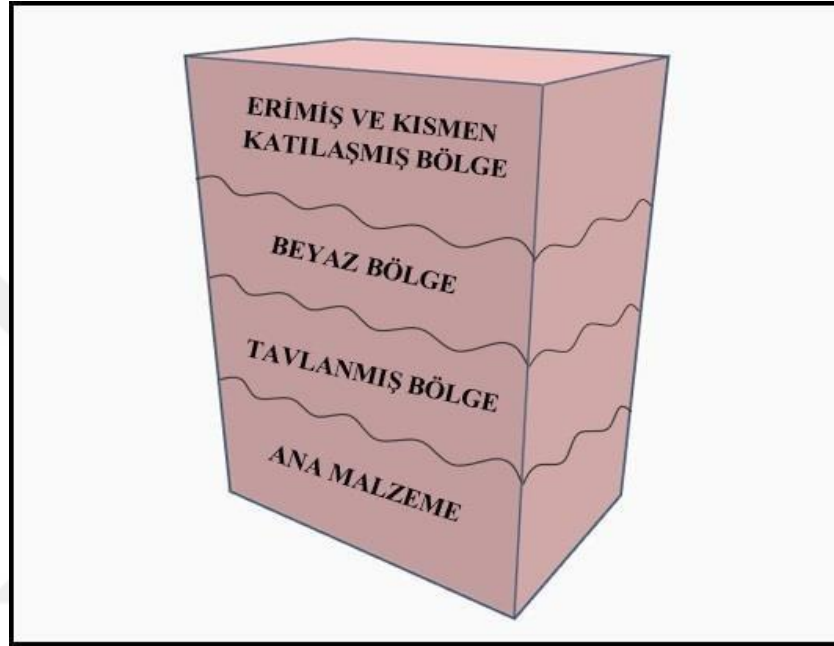


Şekil 1.13 Toz tanelerinin davranışı (Zhao et al. 2002).

#### 1.4. EKİ İLE İŞLENMİŞ YÜZEYLERİN ÖZELLİKLERİ

EKİ yönteminde işlem sırasında çok yüksek noktasal sıcaklık değerlerine ulaşılır. Oluşan yüksek sıcaklıklar sadece iş parçasının yüzeyini değil yüzeyin altındaki malzemeyi de etkiler, buna bağlı olarak ısıl etkilenmiş katmanlar oluşur. En üst katmanda yüksek sıcaklığın etkisiyle ergiyen ve di-elektrik sıvının soğutucu etkisiyle tekrar katılaştıran bir yüzey bulunmaktadır. Altındaki tabaka ise çeliklerin işlenmesi sonucunda, alışılmış asitlere karşı gösterdiği dağlama direnci ve optik mikroskoplarda gözlemlenen beyaz görünümü nedeniyle literatürde beyaz tabaka olarak adlandırılan bir tabaka bulunur (Şekil 1.14). Bu tabakanın özellikleri işlem

sırasında malzeme taşınımı gerçekleştiğinden, kullanılan takım elektrot malzemesi, di-elektrik sıvı tipi ile doğrudan ilişkilidir. Bir alt tabakada ise tavllanmış bölge bulunmaktadır. Bu tabaka genel anlamda katı halde faz dönüşümlerine uğramış bir katman olarak tanımlanabilir. Bu katmanda oluşan dönüşümler, işlem sırasında uygulanan ardışık ısı çevrimleri nedeniyle karmaşık bir yapı sergilemektedir. EKİ yönteminde birden fazla kullanılan işlem değişkenlerine bağlı olarak oluşan tabakaların kalınlıkları değişiklik göstermektedir.



Şekil 1.14 EKİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerde oluşan katmanlar.

## 1.5 BİYOMALZEMELERDEN BEKLENEN ÖZELLİKLER

Biyomalzemeler vücut içerisinde kan, doku ve vücut sıvıları ile temas halinde olan malzemelerdir ve mekanik yüklemelere maruz kalırlar. Bu sebeple nerede ve hangi amaçla kullanılacağına bağlı olarak kayma modülü, elastik modülü, çekme ve basma mukavemeti, yorulma dayanımı gibi parametreler özenli bir şekilde belirlenmelidir. Bunların yanı sıra kullanılacak biyomalzemelerin kimyasal ve ısı dayanıma da sahip olması gerekmektedir. Temel olarak kullanılacak malzemenin biyoaktivite özellikleri önceliklidir ve biyomalzemelerden beklenen özellikler bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

### **1.5.1 Biyouyumluluk**

Biyomalzemelerin ve dokuların kabul edilebilir bir şekilde birlikte var olabilmesi, biyomalzeme biliminin uzun yıllardır odak noktasıdır. Bir biyomalzemeyi herhangi bir maddeden ayıran en önemli faktör, dokularla temasta bulunurken aynı zamanda vücuda kabul edilemez zararlar vermemesidir.

Biyouyumluluk, bir malzemenin dokulara kimyasal, fiziksel ve biyolojik olarak en iyi biçimde uyum sağlayabilmesidir. Başka bir deyişle, malzeme ve vücut sıvılarının etkileşiminin vücuda ne kadar zarar verip vermediği olarak tanımlanabilir. İnsan vücudunda bulunan sıvıların pH değerleri asidik ve bazik bir dengede olmalıdır. Vücutta bulunan hidrojen iyonlarının yoğunluğu arttıkça ortam asidik, azaldığında ise bazik olmaktadır. Vücuttaki dokuların ve bu dokuları çevreleyen sıvıların pH seviyeleri değişiklik göstermektedir. Bu sebeple vücuda implante edilecek malzemeler pH seviyesine uygun olarak tasarlanmalıdır. Biyouyumlu malzemeler, çevrelediği dokuda herhangi bir enfeksiyona, alerjik reaksiyona neden olmamalıdır. Bir malzemenin biyouyumlu olup olmadığı, organizmada yapılan testler sonucunda anlaşılmaktadır.

### **1.5.2 Korozyon Direnci**

Korozyon, metallerin çevresi ile istenmeyen kimyasal reaksiyonlara girerek farklı bileşikler oluşturması ve hasara uğramasıdır. Reaksiyon sonucu oluşan korozyon ürünleri dokulara zarar vermektedir. İnsan vücudu da sulu bir ortam olmasının yanı sıra katyon, anyon ve protein açısından zengindir. Bu nedenle metaller için korozif bir ortam oluşturmaktadır.

Vücuda implante edilecek olan malzemenin korozyon direnci ele alınması gereken hususların başında gelmektedir. Metalik biyomalzemelerde korozyon riski daha fazladır. Kullanılan metalik biyomalzemenin korozyona uğraması, implantın mekanik özelliklerinin zayıflamasına ve çevrelediği dokuların zarar görmesine neden olabilir. Metalik malzemelerde korozyonu önlemenin en iyi yolu, malzeme üzerinde oksit tabakası oluşturmaktır.

Metalik biyomalzemeler korozyon direnci açısından ele alındığında akla ilk gelen titanyumdur. Titanyumun yüzeyinde korozyona uğramasını engelleyen pasif bir tabaka oluşur.

### **1.5.3 Biyoaktivite**

İmplantlar vücut içerisine yerleştirildiğinde, malzeme ve doku arasında kendine özgü bir bağ oluşturması beklenir. Bu tür malzemelere biyoaktif malzemeler denir. Bağın kuvveti, mekanizması ve oluşma süresi kullanılan biyomalzemelere göre farklılık gösterir. Malzeme ve doku arasında oluşan bu bağ, dokunun sağlığı, yaşı, tipi, doku içindeki kanın sirkülasyonu gibi etmenlere bağlı olarak değişmektedir.

Biyoaktivite, implante edilecek malzemedeki beklenen özelliklerden biridir. Malzeme-doku arasındaki biyoaktivitenin uygun olup olmadığının anlaşılabilmesi için laboratuvar ortamında (in vitro) hazırlanan vücut sıvısı kullanılır. Malzeme biyoaktif ise, belli bir süre sonra yüzeyinde apatit tabakası oluşturmaya başlayacaktır.

### **1.5.4 Mekanik Özellikler**

Biyomalzemeler, implante edildikleri bölgede biyolojik ve kimyasal özellikleriyle uygun olmalarının yanı sıra, uygulandıkları bölgede uygun mekanik özelliklere de sahip olmalıdır. İmplant edilen malzemenin dokularla ve organlarla mekanik özelliklerinin uyuşmaması, vücutta kalıcı zararlar oluşturabilir. Bu nedenle, vücuda uygulanan implantların mekanik özelliklerinin kemiğe yakın olması istenir. Vücutta bulunan kemikler gözenekli bir yapıya sahiptir. Hidroksiapatit ise trikalsiyum fosfat içerir. Hidroksiapatit, kemiğin yapısında bulunan kolajenin plastik deformasyona uğramasını engeller.

### **1.5.5 Tasarım**

Kimyasal ve biyolojik özellikleri, biyoaktivitesi ve mekanik özellikleri uygun olan bir malzeme, iyi tasarlanmadığı takdirde vücutta hasara neden olabilir. Kullanılan biyomalzemenin implante edilecek bölgeye göre özel olarak tasarlanması gerekir. Tasarım uygun olmadığında, aşınma ve yorulma gibi hasar mekanizmaları devreye girerek vücuda zarar verebilir. Bu nedenle biyomalzemelerden beklenen diğer özelliklerin uygun olmasının yanı sıra tasarımda büyük önem taşımaktadır.

## 1.6 DENEYLERDE KULLANILAN BİYOMALZEMELER VE ÖZELLİKLERİ

### 1.6.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımları

Titanyum ve titanyum alaşımları 1930'lu yılların sonlarında biyomalzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çelikle kıyaslandığında düşük yoğunluklu ve özgül dayanımı yüksek bir malzemedir. Titanyum ve alaşımları uzay, havacılık, denizcilik, kimya, medikal ve çeşitli mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Oda sıcaklığında hekzagonal bir yapıya sahip olan titanyumun ergime sıcaklığı 1668 °C'dir. Titanyum ve alaşımları, farklı sıcaklık değerlerinde farklı kristal yapıya geçmektedir. Saf titanyum 885 °C sıcaklıkta allotropik dönüşüm gerçekleştirir. 885 °C'nin altında kararlı hekzagonal sıkı paket ( $\alpha$  fazı) yapıya sahipken, 885 °C'nin üstünde hacim merkezli kübik ( $\beta$  fazı) yapıya dönüşür (Chen and Thouas 2015). Titanyum ve alaşımları, endüstriyel alanlarda ve birçok farklı alanda kullanılmak üzere tercih edilirken bu fazlar dikkate alınır. Özellikle medikal ve ortopedik alanlarda  $\alpha/\beta$  veya  $\beta$ 'ya yakın fazlarda tercih edilmesi önerilir.

Her iki fazın da ( $\alpha$  ve  $\beta$ ) bulunduğu alaşımlara en iyi örnek Ti-6Al-4V alaşımıdır. Titanyum malzemesi alaşımlandırılarak ve çeşitli termomekanik işlemlerden geçirilerek mukavemeti artırılabilir. Ti-6Al-4V alaşımında bulunan Al elementi  $\alpha$  fazını stabilize ederken, V elementi  $\beta$  fazını stabilize eder. Ayrıca Al elementinin ilavesi ile iyi olan mekanik özellikler mükemmel yakın bir duruma getirilmiş olur.

Ti-6Al-4V alaşımı düşük elastisite modülü, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, korozyon direnci, yüksek biyoyumluluk ve osseointegrasyon kabiliyeti özelliklerinden dolayı ortopedik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının korozyon direnci mükemmel olmasına rağmen içerdiği Al iyonunun vücut sıvıları ile etkileşime girdiğinde salındığı ve buna bağlı olarak çeşitli alerjik reaksiyonları ve Alzheimer hastalığını tetiklediği saptanmıştır. Vanadyum ise vücutta belli bir miktarda bulunması gereken elementlerden biridir. Ancak vücutta fazla miktarda bulunması toksik etkilere sebep olmakta ve Alzheimer, nöropati, osteomalazi, kanser gibi hastalıkları tetikleyebilmektedir (Hallab et al. 2002).

Diğer metallerle kıyaslandığında üstün özellikleri sayesinde ortopedik uygulamalarda en fazla tercih edilen malzemelerden biri olan titanyum ve titanyum alaşımlarının en büyük dezavantajı,

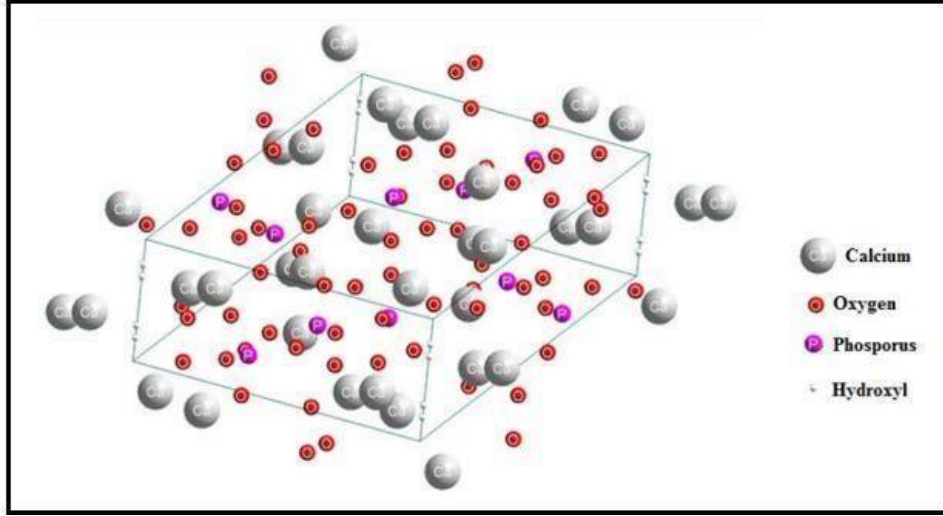
yüzeyde oluşturdukları pasif oksit tabakaya rağmen vücut içinde iyon salınımının devam etmesidir. Bu sebeple özellikle son yıllarda çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri denenmiş ve denenmeye devam etmektedir. Şuana kadar yapılan çalışmalarda, yüzey modifikasyonları ile iyon salınımının sebep olduğu dezavantajların ortadan kaldırılabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca elde edilen yeni yüzey özelliklerinin doku ve implant arasındaki osseointegrasyonu arttırarak iyileşme sürecini hızlandırdığı gözlemlenmiştir (Stanford 2010).

### 1.6.2 Hidroksiapatit

Hidroksiapatit (HA,  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ), içeriğinde bulunan Ca ve P elementleri sayesinde kimyasal olarak kemiğin yapısına benzer bir yapıda olan biyoseramik malzemelerden biridir. Yüksek biyoyumluluğa sahip olan HA, özellikle diş ve kemik gibi sert dokuların içerisinde toz şekilde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Mostafa 2005).

Mekanik özellikleri zayıf olan HA, ortopedik uygulamalarda kullanılmak üzere sinterlenerek, metal implantların yüzeylerinde kaplama malzemesi olarak da kullanılabilir. Hidroksiapatit kaplamalar, plazma püskürtme, sol-jel, sprej boyama, sıcak izostatik presleme, manyetik sıçratma, iyon biriktirme, elektrokimyasal biriktirme, lazerle biriktirme, biyomimetik yöntem gibi çeşitli tekniklerle yapılabilir (Suchanek and Yoshimura 1998). Bu tez çalışmasında ise bahsedilen tekniklerden farklı olarak, Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyinde elektriksel kırılcımla işleme yöntemi kullanılarak hidroksiapatit kaplama tabakası oluşturulacaktır.

Hidroksiapatitin gözenekli yapısı sayesinde hücreler gözeneklerin iç kısımlarına doğru büyür ve doku ile implant arasındaki bağların kuvvetlenmesini sağlar. Yapısal olarak sert dokulara benzeyen bu malzeme vücudun hasarlı kısımlarına implant olarak yerleştirildiğinde, biyoaktif özelliği sayesinde fiber doku oluşumunu ve kemik oluşumunu hızlandırarak iyileşme sürecini kısaltır. HA sayesinde doku ile implant birbirine bağlanarak yapışır ve böylece vücut implantı yabancı bir madde gibi algılamaz. Hidroksiapatitin kemiğin gelişimi ve iyileşmesine etkisi birçok faktöre bağlı olarak değişir. Gözeneklerin büyüklüğü, morfolojisi, kristal kafes yapısı, Ca/P oranı, kimyasal yapısı gibi faktörler bunlardan bazılarıdır. Hidroksiapatitin kristal kafes yapısı Şekil 1.15'de verilmiştir. Hidroksiapatitin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.15 Hidroksiapatitin kristal kafes yapısı (Clemente et al. 2011).

Çizelge 1.1 Hidroksiapatitin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri (Murugan and Ramakrishna 2005).

ÖZELLİK	DEĞER
Kimyasal bileşim	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
Ca/P mol oranı	1.67
Kristal yapısı	Hekzagonal
Young modülü (GPa)	80-110
Elastiklik modülü (GPa)	114
Basınç dayanımı (MPa)	400-900
Eğilme dayanımı (MPa)	115-200
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	3.16
Kırılma tokluğu ( $\text{MPa m}^{1/2}$ )	0,7-1,2

**Çizelge 1.1** (devam ediyor).

<b>Sertlik (HV)</b>	600
<b>Bozunma sıcaklığı (°C)</b>	>1000
<b>Erime noktası (°C)</b>	1614
<b>Termal iletkenlik (W/cm K)</b>	0,013
<b>Biyoyumluluk</b>	Yüksek
<b>Biyoaktivite</b>	Yüksek
<b>Hücreyel uyumluluk</b>	Yüksek

### 1.6.3 Gümüş

Periyodik cetvelde 1B grubunda yer alan, parlak, beyaz ve yumuşak bir metal olan gümüş (Ag), doğada element halde metal formda bulunur. Ağır metal iyonları arasında yer alan gümüş elementi, diğer metallere kıyasla yüksek elektriksel ve ısıl iletkenliğine sahiptir. Altına kıyasla daha mukavemetli ve sert, bakıra kıyasla daha yumuşaktır. Gümüş metali dövülebilme özelliğinden dolayı özellikle dental uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Gümüşün fiziksel özellikleri Çizelge 1.2’de verilmiştir.

MÖ 4000 yıllarından bu yana kullanılan gümüş eski zamanlarda bozuk para, saklama kabı gibi çeşitli şekillerde kullanılmaktaydı. Günümüzde ise vücuttaki enfeksiyonların tedavisi, dental uygulamalar, göz enfeksiyonları, ülser tedavisi, suların arındırılması, yanık tedavilerinde kullanılan kremler gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bakteri, mantar gibi mikroorganizmalar üzerinde öldürücü etkiye sahip olan gümüşün sağlık alanında tercih edilmesinin en önemli sebebi vücutta toksik etkilere sebep olmamasıdır. Bu tez çalışmasında da gümüşün antibakteriyel özelliği sayesinde, EKİ yöntemi kullanılarak mikronize gümüş katkısı ile oluşturulan elektrotlar aracılığı ile Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde bir kaplama tabakası oluşturulacaktır.

**Çizelge 1.2 Gümüşün fiziksel özellikleri.**

<b>ÖZELLİK</b>	<b>DEĞER</b>
<b>Atom ağırlığı</b>	107.87
<b>Atom numarası</b>	47
<b>Öz ağırlık</b>	10490
<b>Atom hacmi</b>	10.3
<b>Erime noktası</b>	1234.9
<b>Elektriksel iletkenliği</b>	0.616
<b>Isı iletkenliği</b>	410.31

## **1.7 ÇALIŞMANIN AMACI**

İnsan vücudunun farklı bölgelerine uygulanmak üzere çeşitli malzemeler kullanılarak, farklı uygulama teknikleri ile implantlar üretilmektedir. Bu malzemeler genellikle metalik biyomalzemeler olarak adlandırılan paslanmaz çelik, kobalt ve alaşımları, titanyum ve alaşımlarıdır. Metalik biyomalzemeler arasında mekanik ve kimyasal özellikleri, korozyon direnci ve biyouyumluluk göz önünde bulundurulduğunda en fazla tercih edilen malzeme titanyum ve alaşımlarıdır. Her ne kadar diğer metalik malzemelere kıyasla daha iyi özelliklere sahip olsa da, kemikle tam olarak bütünleşememesi, vücuttaki sıvılarla etkileşime girerek korozyona uğraması gibi dezavantajları vardır.

Biyoseramik sınıfına giren hidroksiapatit, sertliği, biyouyumluluğu ve kemiğin yapısına çok benzer bir yapıda olması sebebiyle son yıllarda yapılan çalışmalara konu olmuştur. Buna bağlı olarak ilk kez 2013 yılında yapılan bir çalışmada HA tozlar dielektrik sıvıya ilave edilmiş ve TKEKİ yöntemi ile titanyum malzemenin yüzeyi HA bakımından zenginleştirilerek fonksiyonel bir yüzey elde edilmiştir (Ekmekci ve Ekmekci 2013).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, titanyum alaşımları üzerinde farklı kaplama teknikleri denenmiştir. Ancak elektriksel kıvılcımla İşleme yönteminde kullanılan elektrotların, gümüş ve hidroksiapatit toz katkısı kullanılarak toz metalürjisi yöntemi ile üretimi ve biyouyumlu yüzeylerin oluşturulması ile ilgili bir araştırma bulunmamaktadır. Kıvılcımların oluşumunu sağlayan elektrotun da biyouyumlu malzemeler kullanılarak üretilmesiyle, biyouyumluluğun daha da artacağı öngörülebilmektedir. Özellikle gümüş tozların antibakteriyel özelliği ile HA tozların kemiğe benzer yapısı düşünüldüğünde, bu iki tozun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilecek elektrotun, iş parçası yüzeyine malzeme transferi ile yüksek biyouyumluluğa sahip yüzeyler oluşturabileceği düşünülebilir.

Bu tez çalışmasında, titanyum malzemenin yüksek mekanik özelliği, hidroksiapatitin biyouyumluluğu, gümüş tozunun iletkenliği ve antibakteriyel özelliğinden faydalanarak, kemik hücrelerine benzer kalsiyum-fosfat ile kaplanmış gözenekli bir yüzey elde etmek amaçlanmaktadır. EKİ yönteminde kıvılcımların oluşumunu sağlayan elektrot, gümüş ve HA toz katkısı ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen ve farklı parametrelerde deneyler yapılarak biyouyumlu yüzeyler elde edilmeye çalışılacaktır.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

#### 2.1 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME YÖNTEMİ İLE TİTANYUM ALAŞIMLARININ YÜZEY MODİFİKASYONU VE BİYOUYUMLULUK ÜZERİNE YAPILAN LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Çeşitli di-elektrik sıvılar kullanarak, toz katkısız elektriksel kıvılcımla işleme ve biyouyumluluk üzerine yapılan birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Peng et al. (2010), EKİ yöntemini kullanarak, titanyum yüzey üzerinde  $\alpha$  fazı ve  $\gamma$ -TiH fazı oluşturmuşlar ve bu fazların nano gözenekli oksit tabakası oluşturmada önemli bir rol oynadığını ileri sürmüşlerdir. Oluşan bu oksit tabakasının biyouyumluluğu arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca elde edilen yüzeyde  $\alpha \rightarrow (\alpha + \delta) \rightarrow (\delta + \gamma) \rightarrow \gamma$  geçisini gözlemlemişlerdir (Peng et al. 2010). Strasky et al. (2011), Ti-6Al-4V alaşımını, grafit elektrot kullanarak hidrokarbon yağı içerisinde işlemiş ve ortopedik uygulamalar için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yüksek darbe akımlarında (29 A), yeterli yüzey pürüzlülüğü elde etmiş ve yüzeyde oluşan karbonla zenginleştirilmiş tabakanın, hücre büyümesi ve osseointegrasyonu arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca elektriksel kıvılcımla işleme yönteminin yorulma dayanımını azalttığını ileri sürmüşlerdir (Strasky et al. 2011). Harcuba et al. (2012), Ti-6Al-4V alaşımını, hidrokarbon yağı içerisinde, grafit elektrot kullanarak işlemiş ve ortopedik uygulamalar için biyouyumluluğunu araştırmışlardır. Yüksek tepe akımlarında (20-80A) mekanik özelliklerin kötüleştiği ve yeterli yüzey pürüzlülüğünün sağlanabilmesi için 29 A'nın optimum pik akımı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca plazma püskürtme yöntemi ile TiO tabaka oluşturmuş ve insan kemiğindeki hücrelerin büyümesi ve daha iyi yapışması için uygun bir modifikasyon yöntemi olduğunu ileri sürmüşlerdir (Harcuba et al. 2012). Otsuka et al. (2012), Grade-2 titanyum malzemeyi, titanyum elektrot kullanarak su di-elektrik sıvısında işlemiş ve in vitro testler uygulayarak hücre yapışmasını değerlendirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda EKİ ile işlenmiş yüzeylerin hidrofilik karakterde olduğu, hücrelerin bağlanmasını ve farklılaşmasını

arttırdığı ancak çoğalmasında herhangi bir etki oluşturmadığı sonucuna ulaşmışlardır (Otsuka et al. 2012). Yang et al. (2013), Ti-6Al-4V (Ti64) alaşımını, damıtılmış su di-elektrik sıvısında işleyerek TiO tabaka oluşturmuşlar ve yüzeyin hücre sel uyumluluğunu araştırmışlardır. Yüzeyde oluşan oksit tabakasının biyouyumluluğu arttırdığı, MG63 hücrelerinin yapışmasını ve çoğalması için uygun bir ortam oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır (Yang et al. 2013). Lee et al. (2013), Ti64 alaşımını damıtılmış su di-elektrik sıvısı kullanarak işlemiş ve benzer bir çalışma yapmışlardır. Yüzeyde oluşan nano gözeneklerin osseointegrasyonu arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Lee et al. 2013). Lee et al. (2016), titanyum iş parçası üzerinde çift topografya yüzeyleri oluşturmak için, su di-elektrik sıvısında, 10 A ve 29 A tepe akımı değerlerinde elektriksel kıvılcımla işleme yöntemini kullanmışlardır. Deneyler sonucunda EKİ ile biyouyumlu yüzeyler elde edebildiklerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca yağ yerine su di-elektrik sıvısı kullanıldığında, kirletici madde içermeyen bir oksit tabaka oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Lee et al. 2016). Sales et al. (2016), di-elektrik kalsiyum klorür sıvısı içerisinde grafit elektrot kullanarak Ti-6Al-4V alaşımını işlemiş ve dental implant uygulamaları için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İşleme sonucunda 200 µm kalınlığında, düzensiz bir yüzeye sahip titanyum perovskite (CaTiO<sub>3</sub>) tabakası elde etmişlerdir. Kalsiyum ile zenginleştirilmiş bu katmanın biyouyumluluğu arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Sales et al. 2016).

Biyoseramik sınıfına giren hidroksiapatit, kalsiyum ve fosfat içeriği sayesinde, kemiğin yapısına benzer bir yapıya sahiptir ve biyouyumluluğu yüksek olan bir malzemedir. Hücrelerin büyümesi ve çoğalmasına yardımcı olan biyoaktif özelliği sayesinde, çeşitli uygulamalarda kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Hidroksiapatitin, tıbbi uygulamalar için toz katkı elektriksel kıvılcımla işleme ile birlikte kullanımı ilk olarak 2013 yılındaki bir çalışmada yer almıştır. Ekmekci ve Ekmekci (2013), Ti-6Al-4V alaşımını, su di-elektrik sıvısına HA ilave ederek TKEKİ yöntemi ile işlemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda HA tozlarının iş parçası yüzeyinde biriktiğini gözlemlemişlerdir. Düşük darbe süresi ve orta darbe akımının HA kaplama uygulamaları için daha uygun olduğu, bu yöntemin tıbbi uygulamalar için alternatif olabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Ekmekci ve Ekmekci 2013). Ekmekci ve Ekmekci (2016), daha önce yaptıkları çalışmaya ek olarak, saf titanyum elektrot kullanarak HA toz katkı di-elektrik sıvıda, Ti6Al4V alaşımını işlemişlerdir. 22 A darbe akımı, 12 µs darbe zamanı, pozitif elektrot polaritesi seçildiğinde ve HA toz konsantrasyonu 15 g/L veya daha fazla eklendiğinde, yüzeyde biriken HA miktarının daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca işleme sırasında oluşan ikincil kıvılcımların biriktirme mekanizmasını olumlu yönde etkilediğini ileri sürmüşlerdir (Ekmekci ve Ekmekci 2016). Öpöz vd. (2019), HA toz katkı di-elektrik sıvıda

titanyum elektrot kullanarak, Ti-6Al-4V alaşımını işlemiş ve medikal uygulamalar için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Di-elektrik sıvıya HA toz katkısının eklenmesiyle, yüzeyin ıslanılabilirliği arttırılmış ve hidrofilik yüzeyler edilmiştir. 10 g/L ve 15 g/L HA toz konsantrasyonlarında daha iyi hücre bağlanması ve yapışması olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca daha önceki çalışmalarında da belirttikleri gibi (Ekmekci ve Ekmekci 2016), ikincil kıvılcımların yüzeydeki biriktirme mekanizmasını olumlu yönde etkilediğini tekrar kanıtlamışlardır (pz et. al. 2019). Ou and Wang (2016), titanyum alaşımının yüzeyini modifiye etmek için EKİ yöntemini kullanmışlardır. İşlem sırasında di-elektrik su içerisine HA tozu ilave ederek, kaplamanın mikro yapısı, kimyasal bileşimi, yüzey pürüzlülüğü ve ıslanılabilirliğini araştırmışlardır. Kaplama yüzeyinin Ca ve P içerdiğini, Ti ve Ta oksitlerinden olduğunu, kaplamanın kalınlığının ise 7  $\mu\text{m}$  olduğunu belirtmişlerdir. 150  $^{\circ}\text{C}$ 'de hidrotermal işlemden sonra Ca ve P dahil ederek, kaplama yüzeyinde ta yaprağı benzeri HA kristaller oluşturmuşlardır. HA içeren kaplamanın hidrofilik karakterde olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Ou and Wang 2016). Ou and Wang (2017), daha önce yaptıkları çalışma ile benzer şekilde, titanyum ve titanyum-tantalyum alaşımını hidroksiapatit toz kullanarak TKEKİ yöntemi ile işlemiş ve HA toz katkısının işleme performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Malzeme kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyde oluşan tabakanın kalınlığı, di-elektrik sıvı içindeki HA toz konsantrasyonu ve darbe akımının artmasıyla giderek artış göstermiştir. Ti-Ta alaşımı üzerinde oluşan tabakada Ti, Ta, O, Ca, P'ye rastlanmış ve saf Ti ile karşılaştırıldığında, daha sert ve çizilmeye karşı dayanıklı bir özelliğe sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca Ti-Ta alaşımı saf Ti ile karşılaştırıldığında, daha düşük malzeme kaldırma oranı, elektrot aşınması, yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu ortaya koymuşlardır (Ou and Wang 2017). Prakash and Uddin (2017), di-elektirik sıvıya HA tozlar ilave ederek TKEKİ ile  $\beta$ -fazlı Ti alaşımına yüzey modifikasyonu yapmışlar, bunun sonucunda  $\beta$ -fazlı Ti implant yüzeyinde kemik yapısına benzer nano gözenekli bir yüzey topografyası elde etmişlerdir. Nb, Ti, Ta, Zr, O, Ca ve P elementlerinden oluşan bir tabaka oluşurdular ve  $\text{CaZrO}_3$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Nb}_8\text{P}_5$ ,  $\text{Nb}_4\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiP}$  gibi biyoyumlu fazlar elde ettiler. 18-20 mikron kalınlığındaki yeniden kaplanmış tabakanın mkemmek bir metalürjik bağa sahip olduğunu ve HA ile kaplanan yüzeyin 390 HV'den 3 kat daha yüksek olan 1275 HV sertliğe ulaştığını ortaya koydular. Ayrıca biyoyumluluk ve hücre yapışmasını değerlendirmek için in-vitro testler uygulanmıştır. Bu testler sonucunda nano gözenekli HA içeren katmanın üstün biyoaktivite sergilediğini ve hücre yapışmasını, büyümesini, çoğalmasını ve farklılaşmasını desteklediğini ileri srmuşlerdir (Prakash and Uddin 2017).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, HA toz katkısı dışında çeşitli toz katkıları (Si, Ti, Al, Ag vb) ile biyouyumlu yüzeyler elde edilmeye çalışılmıştır. Chen et al. (2014) Mikro-EKİ yöntemi ile farklı çalışma parametrelerinde titanyum malzemeye yüzey modifikasyon işlemi yapmışlardır. Dielektrik sıvıya 3 g/L Ti toz ilave edildiğinde yüzey çatlaklarında azalma gözlenmiş, Ti toz konsantrasyonunun 6 g/L'ye yükseltilmesiyle mikro çatlakların oluşmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Darbe süresi, darbe akımı ve Ti toz konsantrasyonu arttıkça kaplama tabakasının kalınlığının da arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca 30  $\mu$ s ve 50  $\mu$ s darbe süresi ve 0.1 A darbe akımının kullanılmasıyla hidrofilik yüzey özelliği elde edilmiş ve bu nedenle dental implant uygulamalarında biyomalzeme olarak tercih edilebileceğini ileri sürmüşlerdir (Chen et al. 2014). Rani et al. (2017), nano alüminyum toz katkısı ile bakır-tungsten elektrot kullanarak, Ti-6Al-4V alaşımını işlemiş ve biyomedikal uygulamalar için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Alüminyum toz katkısının yüzey pürüzlülüğü, mikro çatlak ve kraterleri azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca karbonla zenginleştirilmiş yüzeyin osseointegrasyonu arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Rani et al. 2017). Bui et al. (2019), nano gümüş toz katkılı, hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıda titanyum malzemeyi işleyerek antibakteriyel bir katman elde etmeye çalışmışlardır. 10 g/L gümüş toz konsantrasyonunda en yüksek malzeme kaldırma oranı ve takım aşınması olduğunu, konsantrasyon arttırıldıkça her iki değer de azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca antibakteriyel ve yeterli pürüzlülükte bir yüzey elde edilebilmesi için 17,5  $\mu$ J'den daha düşük darbe enerjisi seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Bui et al. 2019).

Biyouyumluluğu yüksek olan Ti-6Al-4V alaşımı dışında, farklı titanyum alaşımları ile bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin;  $\beta$  fazlı Ti (Ti-Nb-Ta-Zr) alaşımı, dental uygulamalar, ortopedik uygulamalar ve stentlerde tercih edilen bir alaşım türüdür. Saf titanyumdan daha yüksek mukavemete sahiptir. Ayrıca düşük elastiklik modülü, düşük yoğunluk ve daha iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sebeple bazı çalışmalarda iş parçası olarak kullanılmıştır. Prakash et al. (2015),  $\beta$ -Ti (Ti-Nb-Ta-Zr) bazlı implant malzemeyi, dielektrik sıvıya saf silisyum toz katkısı ilave ederek işlemişlerdir. İşleme sonucunda nano gözenekli biyoseramik bir yüzey elde etmişlerdir. Mikro sertlik ölçümü, üretilen karbürlerin (TiC, SiC ve NbC) substrat ile mükemmel bir metalürjik bağa sahip olduğunu ve substratın sertliğini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca biyoseramik oksit katmanının üstün korozyon direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. TKEKİ ile işlenmiş yüzeylerin biyouyumluluğunun ve osseointegrasyonun arttığı sonucuna ulaşmıştır (Prakash et al. 2015). Prakash et al. (2016),  $\beta$  fazlı Ti alaşımını (Ti-Nb-Ta-Zr), Silisyum toz katkılı EKİ yöntemi ile işlemiş ve Taguchi metodunu da

kullanarak titanyum malzemenin yüzey sertliğini ve yüzey kalitesini iyileştirmek için optimum koşulları araştırmışlardır. 13 A tepe akımı, 5 µs darbe süresi, 8 g/L toz konsantrasyonunda yüzey sertliğinin % 184,42 oranında arttığını ispatlamışlardır. Ayrıca β-Ti alaşımının yüzeyinde oluşan oksit tabakasının biyouyumluluğu arttığı sonucuna ulaşmışlardır (Prakash et al. 2016a). Prakash et al. (2017), Silisyum toz katkılı hidrokarbon yağı içerisinde, saf titanyum elektrot kullanarak, β fazlı Ti alaşımını (Ti–Nb–Ta–Zr) işlemiş ve biyoaktivitesini araştırmışlardır. 4 g/L Si toz konsantrasyonunda 3 µm kalınlığında bir kaplama tabakası oluşmuş ve çatlak oranında azalma gözlemlenmiştir. Toz konsantrasyonu 8 g/L'ye yükseltildiğinde, 15 µm kalınlığında, 200-500 nm boyutlarında nano gözenekli ve hidrofilik özellikte bir kaplama tabakası elde etmişlerdir. Elde edilen kaplama tabakasının osseointegrasyonu arttıran, biyoaktif bir yüzey oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır (Prakash et al. 2017a). Prakash et al. (2017), TKEKİ yöntemi ile β fazlı Ti alaşımını (Ti–Nb–Ta–Zr) işleyerek MG-63 hücrelerinin büyüme ve çoğalma özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar metodunu kullanarak kemik ile implant arasındaki bağlanma kuvvetini hesaplamışlardır. Yüzeyde oluşan nano gözeneklerin, implant ile çevre dokular arasındaki bağlanma kuvvetini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Prakash et al. 2017b). Prakash et al. (2017), silisyum toz katkılı di-elektrik sıvıda, β fazlı Ti alaşımını (Ti–Nb–Ta–Zr) işleyerek yorulma dayanımı ve biyoaktivite özelliklerini araştırmışlardır. Silisyum tozunun ilave edilmesi ile yüzey pürüzlülüğü ve mikro çatlaklarda azalma olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortopedik uygulamalar için yeterli sayılan 280 MPa yorulma dayanımı ile kıyaslandığında, işlenmiş titanyum alaşımının da yorulma dayanımının iyileştiği ve elde edilen kaplama tabakasının osteoblast hücrelerinin yapışmasını ve çoğalmasını desteklediği sonucuna ulaşmışlardır (Prakash et al. 2016b).

Elektriksel kıvılcımla işlenmiş yüzeylerin biyouyumluluğu ve osseointegrasyonu arttırdığı, sadece in-vitro değil in-vivo testlerle de doğrulanmıştır. Yamaki et al. (2012), titanyum malzemeyi tel tipi elektriksel kıvılcım ile işlemiş ve tavşanlar üzerinde in-vivo testler yaparak biyouyumluluğunu araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda EKİ ile işlenmiş yüzeyin osseointegrasyonu arttırdığı ve medikal uygulamalar için umut verici bir modifikasyon yöntemi olduğunu ileri sürmüşlerdir (Yamaki et al. 2012).

## 2.2 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME YÖNTEMİNDE SİNERLENMİŞ TOZ KATKILI ELEKTROTLARIN ÜRETİMİ ÜZERİNE YAPILAN SON 5 YILDAKİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Gill and Kumar (2015), bakır-krom-nikel tozları ile yaptıkları takım elektrotunu kullanarak, yüksek karbonlu çelik EN31 iş parçasını işlemiş ve alaşımlanmış yüzeyin mikrosertlik değerindeki değişimi araştırmışlardır. En iyi mikro sertlik değeri; pozitif takım polaritesi, ağırlıkça %15 W takım elektrotu, 15 A tepe akımı, 200 µs darbe süresi, 50 V darbe gerilimi parametrelerinde elde edilmiştir. Yüzey alaşımlama işleminden sonra mikro sertlik değerinin 566.4 HV'den 1358.1 HV'ye yükseldiğini ve mikro sertliği en çok etkileyen parametrenin tepe akımı olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Gill and Kumar 2015a). Goyal et al. (2017), bakır elektrot ile performansını karşılaştırmak için toz metalürjisi ile ürettikleri bakır-manganez elektrotu kullanarak, di-elektrik kerosen sıvısı içerisinde, EN-31 kalıp çeliğini işlemişlerdir. Bakır elektrotla kıyasla, bakır-manganez elektrot ile daha yüksek mikro sertlik değeri elde etmişlerdir. Mikro sertlikteki bu artışı, manganezin işlenmiş yüzeye aktarılmasına bağlamışlardır. Tepe akımı 4 A'dan 6 A'ya ve 6 A'dan 8 A'ya yükseldikçe, her iki elektrot için de mikro sertlik değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bakır-manganez elektrot ile işleme yapılırken yüzey pürüzlülüğünün bir miktar arttığını ancak bu bozulmanın endüstriyel uygulamalar için önemsiz kabul edilebileceğini ileri sürmüşlerdir (Goyal et al. 2017). Gill and Kumar (2018), toz metalürjisi ile ürettikleri Cu-W elektrotu kullanarak, EN31 takım çeliğinin yüzeyinin mikro sertliğini artırmak için uygun koşulları belirlemeye çalışmışlardır. Elektrottan yüzeye önemli miktarda malzeme göçü olduğunu, tungstenin karbon ile birleştikten sonra tungsten karbür oluşturarak mikro sertliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. En yüksek mikro sertlik değeri için Taguchi yöntemi ile belirledikleri optimum parametreler; 15 A tepe akımı, 200 µs darbe süresi, % 64 görev döngüsü, 50 V deşarj gerilimi, ağırlıkça % 15 elektrot malzemesi ve pozitif takım polaritesidir. Mikro sertliği etkileyen en önemli parametre ise tepe akımıdır. İşlenmiş yüzeyin mikro sertlik değerinin % 150 oranında arttığı sonucuna ulaşmışlardır (Gill and Kumar 2018). Walia et al. (2019), farklı oranlarda bakır (Cu), titanyum karbür (TiC), silisyum karbür (SiC) ve grafit (C) tozlarını sinterleyerek elektrot üretmiş ve sertleştirilmiş EN31 çeliğini işlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde, elektrot aşınma oranı, çıkarılan malzeme hacmi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğünü araştırmışlardır. Elektrot aşınma oranını etkileyen en önemli parametrelerin darbe akımı, darbe süresi ve bekleme süresi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, sermet (seramik-metal) elektrot ile bakır elektrotu karşılaştırmışlardır. Sermet elektrot kullanıldığında bakır elektrotla kıyasla, malzeme çıkarılma hacminin ve yüzey pürüzlülüğünün

daha fazla olduğu, yüzeyde oluşan çatlakların ise daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Walia et al. 2019).

Murray and Clare (2016), 304 paslanmaz çelik malzemeyi TiC ve Si elektrot ile işleyerek, yüzeyde oluşturdukları tek ve çok katmanlı kaplama tabakasının aşınma davranışlarını incelemişlerdir. TiC + Si elektrot kullanıldığında oluşan çift katmanlı kaplama tabakasında, yüzey çatlaklarının çok az olduğunu ve sıfır gözeneklilik içerdiğini gözlemlemişlerdir. En iyi aşınma dayanımı, TiC elektrot kullanıldığında oluşan tek katmanlı kaplama tabakasında elde edilmiştir ve sürtünme katsayısı yaklaşık 0.2-0.3 arasındadır. TiC + Si elektrot kullanılarak oluşan çift kaplama tabakasının daha iyi morfolojiye sahip olduğunu ancak TiC ' e kıyasla daha kötü sürtünme özellikleri içerdiği sonucuna ulaşmışlardır (Murray and Clare 2016). Ying et al. (2017), elmas-kobalt tozu ile ürettikleri kompakt elektrotları sinterleyerek, 304 paslanmaz çelik malzeme yüzeyinde oluşan elmas aşındırıcı katmanların imalat koşullarını analiz etmişlerdir. Elmas aşındırıcı tabakanın kalınlığının darbe akımının artmasıyla arttığı, elektrot sıkıştırma basıncının artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. 100 MPa elektrot sıkıştırma basıncı, ağırlıkça %40 elektrot elmas aşındırıcı içeriği ve 20 A boşaltma akımının en iyi imalat koşulları olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca EKİ'nin elmas aşındırıcı katman üretim hızının, galvanik kaplamadan daha hızlı olduğunu ileri sürmüşlerdir (Ying et al. 2017). Algodı et al. (2018), yarı sinterlenmiş TiC elektrot ve saf Cu elektrot kullanarak, 304 paslanmaz çelik (304 SS) ve yüksek hız çeliği (HSS) malzemelerini işlemiş ve tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. HSS üzerindeki kaplamanın, 304 SS 'ye kıyasla aşınmaya daha dayanıklı olduğunu, bu farklılığın sebebinin ise her iki malzemenin mekanik özelliklerinin farklı olmasına ve kaplamanın morfolojisine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. EKİ'ye ek olarak lazer yüzey işleme ile kaplama üzerindeki çatlak ve gözenekleri ortadan kaldırmışlardır (Algodı et al. 2018).

Cogun vd. (2015), 1040 çeliğini üç farklı bakır elektrot ( katı elektrolitik Cu, toz metalürjisi ile üretilen Cu, toz metalürjisi ile üretilen kompozit Cu-B<sub>4</sub>C ) kullanarak işlemiş ve EKİ sırasındaki işleme performanslarını araştırmışlardır. En düşük malzeme kaldırma oranı toz katkılı Cu-B<sub>4</sub>C, en yüksek malzeme kaldırma oranı ise elektrolitik Cu kullanıldığında oluşmuştur. Darbe akımı ve darbe zamanının artırılması ile üç elektrot için de malzeme kaldırma oranı ve mikro sertlik değerleri artmıştır. Elektrolitik Cu ile işlenmiş yüzeyin en iyi pürüzlülük değeri (en az 2,6 mm), toz katkılı Cu-B<sub>4</sub>C elektrot kullanıldığında ise (en fazla 5,3 mm) olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Cogun vd. 2015). Gülcan vd. (2016), 1040 çeliğini, toz metalürjisi ile ürettikleri Cu-Cr ve Cu-

Mo elektrotları ile işleyerek, elektrotların işleme sırasındaki performansını ve yüzey alaşımlama özelliklerini araştırmışlardır. Mo içeren elektrotun yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olması sebebiyle, Cr içeren elektrottan daha fazla malzeme kaldırma oranına sahip olduğunu ve Mo içeren elektrotun yüksek erime noktası sebebi ile Cr içeren elektrottan daha düşük takım aşınma oranına sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir. Cr içeren elektrotun yüzey pürüzlülüğünün Mo içeren elektrota kıyasla daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. İşleme sırasında Cu, Cr ve Mo tozların iş parçası yüzeyini alaşımlı hale getirdiği ve yeni bir katmanın oluştuğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca yüzeyin mikro sertlik değerinin Cr içeren elektrotta %40-80, Mo içeren elektrotta ise %40-90 oranında arttığını ortaya koymuşlardır (Gülcan vd. 2016).

Gill and Kumar (2015), H11 sıcak kalıp çeliğini, W-Cu sinterlenmiş elektrot ile işlemiş ve yüzeyde oluşan alaşımın pürüzlülük ve mikro sertlik değerlerini araştırmışlardır. H11 kalıp çeliğinin alaşımlanması ile mikro sertliğin %83 oranında arttırdığını ve mikro çatlakların oluşmadığını gözlemlemişlerdir. Alaşımlama sırasında yüzeye tungsten ile birlikte bakırın da aktarılmasıyla yüzeyin kalitesi daha da artmıştır. Pozitif takım polaritesi, ağırlıkça %10 W takım elektrotu, 5 A tepe akımı, 100 µs darbe zamanı ve 30 V deşarj gerilimi parametreleri seçildiğinde en iyi yüzey kalitesini elde etmişlerdir. Pozitif takım polaritesi, ağırlıkça %15 W takım elektrotu, 15 A tepe akımı, 200 µs darbe zamanı ve 50 V deşarj gerilimi parametreleri seçildiğinde ise mikro sertliğin yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca yüzey kalitesi ve mikro sertliği en fazla etkileyen parametrenin darbe akımı olduğunu belirtmişlerdir (Gill and Kumar 2015b). Gill and Kumar (2016), Cu-Cr-Ni toz katkılı sinterlenmiş kompozit elektrot kullanarak, H11 sıcak kalıp çeliğini işlemiş ve kaplanmış yüzeylerin mikro sertliğini araştırmışlardır. Ayrıca yaptıkları deneyler sonucunda elde ettikleri verileri, saf Cu elektrot kullanarak işlenen yüzeylerle karşılaştırmışlardır. İşleme sonucunda oluşan kaplamanın mikro sertlik değerinin 1385.2 HV olduğunu ve saf Cu elektrot kullanarak sadece 705.5 HV sertlik elde edilebildiğini ileri sürmüşlerdir. Mikro çatlak ve mikro boşluk oluşumunun ise kompozit Cu-Cr-Ni elektrot kullanıldığında daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Gill and Kumar 2016). Senapati et al. (2016), H11 kalıp çeliğini, saf Cu elektrot ve toz metalürjisi ile ürettikleri Cu-Cr-Ni metal matriksli kompozit elektrot kullanarak işlemişlerdir. Her iki elektrot için TOPSIS (Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemini kullanarak, en ideal olan parametreleri tespit etmişlerdir. Sonuçlara göre bakır elektrot için en uygun parametreler; 3 A giriş akımı, 200 µs darbe süresi, 50 V aralık voltajı ve 15 dk işleme süresidir. Cu-Cr-Ni elektrot için ise; 6 A giriş akımı, 150 µs darbe süresi, 30 V aralık voltajı ve

15 dk işleme süresidir. Ayrıca her iki elektrot için de görev döngüsü=9 olarak tespit edilmiştir. Giriş akımının cevap değişkenlerini en fazla etkileyen parametre olduğu, görev döngüsünün ise çok fazla etkilemediği sonucuna ulaşımlardır (Senapati et al. 2016). Gill et al. (2016), H11 sıcak kalıp çeliğini, toz metalürjisi ile ürettikleri Cu-Mn elektrot ile işleyerek, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik açısından değerlendirmişlerdir. Bunun için Taguchi tekniği ile en iyi proses parametrelerini elde etmişlerdir. İşleme sonrası yüzeye Mn ve C elementlerinin transfer olması ile mikro sertliğin arttığını, Cu elementinin ise korozyon direncini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca Cu-Mn elektrot yüzeyde mikro çatlak gibi bozulmalara sebep olmamıştır. En iyi yüzey kalitesi; pozitif takım polaritesi, %15 Mn, 5 A tepe akımı, 100 µs darbe zamanı, 30 V deşarj gerilimi parametrelerinde elde edilmiştir. En iyi mikro sertlik değeri; pozitif takım polaritesi, % 15 Mn, 15 A tepe akımı, 200 µs darbe zamanı ve 50 V deşarj gerilimi parametrelerinde elde edilmiştir. En iyi mikro sertlik değeri ise ana malzemedan (615 HV) %93.7 daha yüksek olan 1191.1 HV'dir (Gill et al. 2016).

Singh et al. (2015), sinterlenmiş Cu-W elektrot kullanarak, %10 SiC içerikli AA6061 kompozit malzemenin işlenebilirliğini ve yüzey modifikasyonunu araştırmışlardır. Malzeme kaldırma oranı, elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini dört elektriksel parametrenin (darbe akımı, darbe süresi, bekleme süresi, açık aralık gerilimi) değişimine göre optimize etmeye çalışmışlardır. En yüksek malzeme kaldırma oranı ile en düşük elektrot aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü, 6 A darbe akımı, 30 µs darbe süresi, 200 µs bekleme süresi ve 40 V açık aralık gerilimi değerlerinde elde edilmiştir. Ayrıca sinterlenmiş W-Cu elektrot ile işlenen yüzeyin sertlik değerini, Cu elektrot ile karşılaştırdıklarında 60 HV'den 85 HV'e yükseldiği gözlemlemişlerdir (Singh et al. 2015). Ahmed (2016), Ti+B<sub>4</sub>C tozlarını kullanarak ürettikleri elektrot ile Al iş parçasını işlemişlerdir. Alüminyum malzeme üzerinde TiB<sub>2</sub>-TiC kaplama tabakası oluşmuştur. İşleme sonrası mikro sertlik değeri maksimum 754 HV ve ortalama 640 HV değerine ulaşmıştır. Malzeme birikme oranı, takım aşınma oranı ve ortalama katman kalınlığını en fazla etkileyen parametrenin tepe akımı olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Ahmed, 2016). Das et al. (2019), toz metalürjisi yöntemi ile ürettikleri TiB<sub>2</sub> elektrot kullanarak, endüstriyel Al 5052 alaşım malzemesini EKİ yöntemi ile işlemişlerdir. Yüzeyde eşit TiB<sub>2</sub>-SiC katmanı oluşturabilmek için optimum parametreler 331, 400, 468 ve 536 µs deşarj darbe genişliği ile 4 A darbe akımıdır. Alaşımlama sonrası yüzey pürüzlülük değerinin 0.6 µm'den 5 µm'ye çıkmıştır. EKİ yönteminin endüstriyel parçalarda istenen yüzey özelliklerine ulaşmak için ekonomik ve alternatif bir yöntem olduğunu ileri sürmüşlerdir (Das et al. 2019).

Balasubramanian and Senthilvelan (2015), EN-8 ve D3 çelik malzemelerini, toz metalürjisi ile ürettikleri sinterlenmiş bakır, pirinç ve bronz elektrotlar ile işlemişlerdir. Sonuçları, tepki yüzey metodolojisi yöntemi ile malzeme uzaklaştırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri cinsinden karşılaştırmışlardır. EN-8 çeliği sinterlenmiş bakır ile işlendiğinde en yüksek malzeme kaldırma oranı, bronz ile işlendiğinde en düşük takım aşınması, pirinç ile işlendiğinde ise en düşük tepe akımı değerinde yüzey pürüzlülüğünün minimum olduğunu gözlemlemişlerdir. D3 çeliği bakır ile işlendiğinde en yüksek malzeme kaldırma oranı, bronz ile işlendiğinde en düşük takım aşınması, pirinç ile işlendiğinde ise yüzey pürüzlülüğünün en az olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Balasubramanian and Senthilvelan 2015). Rao et al. (2018), nano ve mikron boyutundaki toz parçacıklarını kullanarak ürettikleri WC/Co elektrotu ile D2 alaşımlı çeliği işlemiş ve elde ettikleri alaşımlı yüzeyi, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik açısından değerlendirmişlerdir. En iyi yüzey pürüzlülüğü; 75 µs darbe süresi, 10A tepe akımı, ağırlıkça %10 Co takım elektrotu, 350 MPa sıkıştırma basıncı parametrelerinde elde edilirken, en iyi mikro sertlik 225 µs darbe süresi, 30 A tepe akımı, ağırlıkça %12 Co takım elektrotu, 250 MPa sıkıştırma basıncı parametrelerinde elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertliği en fazla etkileyen parametrenin tepe akımı, etkisi daha az olan parametrenin ise ağırlıkça % Co miktarı olduğunu gözlemlemişlerdir. Elektrotta nano parçacıkların kullanılmasının, yüzeye olan malzeme transferini arttırdığı ve kısa devre oluşmasını azaltarak daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca yüzeyde oluşan karbürlerin ve oksitlerin sertlik, aşınma ve korozyon direncini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Rao et al. 2018).

Patowari et al. (2015), toz metalürjisi ile ürettikleri W-Cu sinterlenmiş elektrotu kullanarak C-40 çeliğini işlemiş ve yaptıkları deneyler sonucunda kütle transfer hızı (MTR), biriken katman kalınlığı (LT), ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) parametrelerini değerlendirmişlerdir. Kütle transfer hızı 1-191 mg/dk arasında, ortalama yüzey pürüzlülüğü 3-15 µm arasında, ortalama katman kalınlığı ise 3-785 µm arasında elde edilmiştir. Elde edilen katman kompozit bir yapıya sahip olduğu için mikro sertlik değerinin her bölgede aynı olmadığı, ortalama sertlik değerinin 9.8-15.7 GPa arasında değişkenlik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır (Patowari et al. 2015).

Xie et al. (2016), karbon çeliğini, kısmen sinterlenmiş titanyum elektrot kullanarak, grafit toz katkılı di-elektrik sıvıda işlemiş ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Grafit tozunun ilave edilmesiyle, mikrosertlik, kaplama kalınlığı ve aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca grafit tozlarının karbon kaynağı olarak görev yaptığı, oluşan düzensiz  $sp^2$  karbon

fazlarının temas yüzeyini yağladığı, mekanik aşınmayı ve kaplamanın oksidasyonunu yavaşlattığı sonucuna ulaşmışlardır (Xie et al. 2016).

Oglezneva and Oglezneva (2017), toz Cu-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> kompozit malzeme içindeki yapı oluşumu, metal takım çeliği malzemesini işleyerek incelemişlerdir. Kompozit elektrottaki Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> konsantrasyonu arttırıldıkça, iletken özelliğın azaldığı, elektrotun sertliğının, dayanıklılığının ve aşınma direncinin, saf bakır elektrota kıyasla 5 6 kat arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca işleme sırasında Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> elektrotun ayrışmasının önlenmesi ile iletkenliğin daha da arttırılabileceğini ileri sürmüşlerdir (Oglezneva and Oglezneva 2017).

Hussain et al. (2017), toz metalürjisi yöntemi ile bakır (Cu) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) kompozit elektrot üreterek, aşınma ve sertlik analizlerini yapmışlardır. Ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren dört farklı oranda elektrot üretmişlerdir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı arttıkça aşınma direncinin ve sertlik değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sinterleme işlemi sırasında yüzeyde oluşan yeşil karbonat tabakasının yüzey sertliğini etkilediği sonucuna ulaşmışlardır (Hussain et al. 2017).

Tijo et al. (2018), TiC-Cu toz kompakt elektrot kullanarak, AISI 1020 yumuşak çelik üzerinde kompozit bir kaplama tabakası oluşturmuşlardır. TiC-Cu elektrot, üç farklı oranda (Ağırlıkça % 60:40, 70:30, 80:20) toz katkısı ile üretilmiştir. Ağırlıkça % 60:40'lık elektrotun, malzeme yüzeyi üzerinde eşit birikme sağladığını gözlemlemişlerdir. Darbe süresi 100 µs'den 200 µs'ye arttığında kaplama birikme oranının arttığı, 200 µs'den 300 µs'ye arttırıldığında ise kaplama birikme oranının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca kaplamanın mikro sertlik değerinin alt tabakadaki malzemedan on kat fazla olduğunu ve tepe akımı ile darbe süresinin arttırılmasıyla ortalama mikro sertlik değerinin arttığını gözlemlemişlerdir (Tijo et al. 2018).

Elaiyarsan et al. (2018), ZE41A magnezyum alaşımını, toz metalürjisi ile ürettikleri % 50 WC-% 50 Cu yarı sinterlenmiş elektrot kullanarak, yüzey kaplama özelliklerini metal aktarım hızı ve yüzey pürüzlülüğü şeklinde incelemişlerdir. Metal aktarım hızı ve yüzey pürüzlülüğü, düşük sıkıştırma basıncında (150 MPa) akım ve darbe süresi arttıkça artar. Yüksek sıkıştırma basıncında, düşük akım ve darbe zamanı parametrelerinde minimum yüzey pürüzlülüğü elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır (Elaiyarsan et al. 2018).

Goyal et al. (2018), kardiyovasküler stentlerde kullanılan yüksek kromlu platin çeliğini, bakır elektrot ile bakır-kalay kompozit elektrot kullanarak işlemiş ve malzeme kaldırma oranını kıyaslamışlardır. Bakır elektrot kullanıldığında, akım 5 A'den 15 A'ye yükseltildiğinde, malzeme kaldırma oranının %96,31 oranında arttığı, bakır-kalay elektrot kullanıldığında ise %99,73 oranında bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Bakır elektrotun malzeme kaldırma oranının daha fazla olduğu ve yüksek kromlu platin çeliğin işlenmesi için daha iyi bir seçenek olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Goyal et al. 2018).

Kumar et al. (2018), toz metalürjisi CrB<sub>2</sub>-Cu elektrot kullanarak, OHNS (oil hardened non shrinkage steel) iş parçası üzerinde malzeme aktarım hızı ve yüzey pürüzlülüğü değişimini analiz etmişlerdir. Darbe akımı ve darbe zamanının artmasıyla yüzeyde daha derin kraterler ve daha kalın bir tabaka oluşmuştur. Malzeme aktarma hızının 26.75 mg/dk ile 49.92 mg/dk arasında değiştiği ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün 5.18 µm ile 7.58 µm arasında değiştiği sonucuna ulaşmışlardır (Kumar et al. 2018).

Arun et al. (2019), nikel ve tungsten tozlarını sinterleyerek elektrot malzemesi olarak kullanmış ve metal matriksli malzemenin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Kaplanmış yüzey üzerindeki ortalama mikro sertlik değerinin 950-1100 HV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yüzeyde oluşan karbon tabakasının kaplamayı kayganlaştırdığı ve aşınmaya karşı direnci arttırdığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, sinterlenmiş elektrot kullanılarak işlenen yüzeydeki kaplama tabakasının sertliğinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Arun et al. 2019).

Prakash et al. (2019), Nb toz katkılı dielektrik sıvıda Ti-6Al-4V alaşımını işleyerek, eklenen toz katkısının mikro çatlak, kaplama tabakası kalınlığı, mikro sertlik gibi yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İşleme sırasında, Ti-Nb alaşımını plazma ile sinterleyerek elektrot olarak kullanmışlardır. İşlenmiş yüzeyde TiO, TiC, NbC ve NbO kaplama katmanı oluşmuştur. Kaplama tabakasının kalınlığının, tepe akımı, darbe süresi ve Nb toz konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Toz katkısız EKİ ile işlenmiş yüzeyin kaplama tabakasının kalınlığı 149 µm iken, 10 g/L ve 20 g/L toz konsantrasyonunda 195 µm ve 215 µm kaplama tabakası kalınlığı elde etmişlerdir. Ayrıca mikro sertliğin 365 HV'den 1465 HV'ye yükseldiğini, yapışma mukavemetinin ise 82 N değerinden 118 N değerine yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır. (Prakash et al. 2019)

## BÖLÜM 3

### DENEY MALZEMELERİ, DENEY DÜZENEĞİ VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan cihazlar, deneysel parametreler ve deney sürecinde hangi yöntemlerin kullanıldığı hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

#### 3.1 NUMUNE VE ELEKTROT ÖZELLİKLERİ

İş parçası malzemesi olarak Ti-6Al-4V Grade 5-ELI (Extra Low Interstitial) alaşımı seçilmiştir. Deneyde kullanılan titanyum alaşımının fiziksel, kimyasal ve mekanik bileşimi Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3' de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %).

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89,551	6,15	4,06	0,10	0,09	0,02	0,028	0,001

Çizelge 3.2 Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özellikleri (20°C).

Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Özgül Isı Kapasitesi J/kg K	Termal İletkenlik W/m K	Elektrik Direnci Ω mm <sup>2</sup> /m
≥ 4.43	≥ 560	≥ 7.1	≥ 1.71

Çizelge 3.3 Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri (20°C).

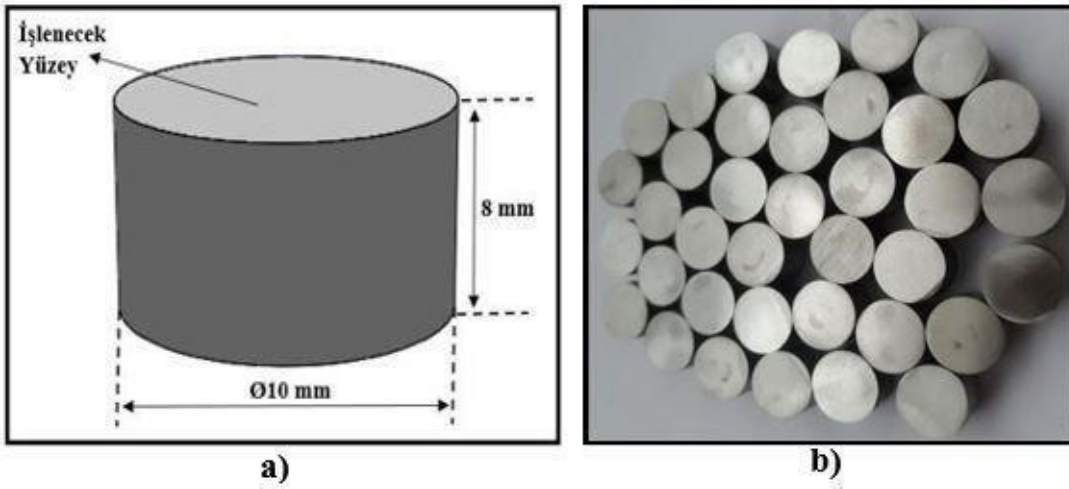
Sertlik HB 30	0.2% Akma Dayanımı R <sub>p</sub> N/mm <sup>2</sup>	0.2% Çekme Dayanımı R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Uzama	Elastiklik Modülü kN/mm <sup>2</sup>
≥ HB 310	≥ 830	≥ 895	≥ %10	114

Titanyum çubuklar 2 m uzunluğunda ve 10 mm çapında alınmış (Şekil 3.1) ve deneylerde kullanılmak üzere Zonguldak Merkez TTK'de 8 mm uzunluğunda kesilmiştir (Şekil 3.2a). Kesilen numunelere 600 °C sıcaklıkta gerilim giderme işlemi uygulanmıştır. Ardından iş

parçası ile elektrot arasındaki paralelliği sağlayabilmek için numunelerin yüzeyleri 600 grid zımpara ile parlatılmıştır (Şekil 3.2b).



Şekil 3.1 Kesilmeden önceki Titanyum çubukların görüntüsü.



Şekil 3.2 Kesme işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımının a) Boyutları b) Parlatıldıktan sonraki görüntüsü.

Numuneleri işlemek için kullanılan elektrotlar, mikronize gümüş ve mikronize hidroksiapatit toz katkısı ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Tozlar hacimce karıştırılarak 12 mm çapındaki paslanmaz çelik kalıba dökülmüş ve hidrolik pres ile 200 bar basınçta sıkıştırılmıştır. 12 mm çapında, hacimce %100 Ag, %90 Ag-%10 HA, %80 Ag-%20 HA, %70 Ag-%30 HA oranlarında 4 farklı elektrot üretilmiştir. Elektrotlar 7,5-9 gr arasında farklı ağırlıklarda elde edilmiştir. Ardından PROTHERM marka fırında 5°C/dk ısınma hızıyla 900 °C sıcaklığa çıkarılmıştır. 2 saat sinterlenen elektrotlar 5°C/dk soğuma hızı ile fırında soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işleminden sonra elektrotlarda oluşan oksit tabasını temizlemek için

600 grid zımpara ile parlatma işlemi yapılmıştır. Elektrot ile iş parçası arasındaki paralelliği sağlayabilmek için her işlemeden önce zımparalama işlemi tekrarlanmıştır.

### 3.2 KULLANILAN CİHAZLAR VE ÖZELLİKLERİ

Numuneler deney süreci boyunca, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi kaynak laboratuvarında bulunan Ajan EDM CNC Model 983 4 eksenli dalma tipi elektriksel kıvılcımla işleme tezgâhında işlenmiştir (Şekil 3.3). Tezgâhın teknik özellikleri firma kataloğundan alınarak Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Ajan EDM CNC Model 983 dalma tipi erozyon tezgâhı.

**Çizelge 3.4** Ajan EDM CNC Model 983 dalma tipi erozyon tezgâhının teknik özellikleri.

<b>Makine Boyutları</b>	Minimum kapladığı alan	2.7 m <sup>2</sup>
	Yükseklik x Genişlik x Derinlik	2200 x 1800 x 1500 mm
	Toplam ağırlık	1000 kg
<b>Çalışma Tablası</b>	İş tablası ölçüleri	635 x 315 mm
	Maksimum iş parçası yüksekliği	250 mm
	Maksimum iş parçası ağırlığı	400 kg
	X ve Y eksenleri hareketi	420 x 270 mm
	T kanal sayısı ve genişliği	4 x 12 mm
	Max. İş tab. Elektrot tab. açıklığı	460 mm
	Çalışma tankı boyutları	950 x 600 x 300 mm
<b>Çalışma Başlığı</b>	Hareketli kolon kursu	250 mm
	Maksimum hareket hızı	600 mm/dk
	Kafa yataklama kapasitesi	250kg
	Max. Elektrot ağırlığı	150kg
	Elektriksel anma gücü	1.1 KVA
<b>Di-elektrik Sistemi</b>	Kapasite	345 lt
	Filtre alanı	4 m <sup>2</sup>
	Tank ölçüleri	900 x 700 x 550 kg
	Net ağırlık	80 kg
	Elektriksel anma gücü	1 KVA
<b>Jeneratör</b>	Ortalama elektrot akımı	50 A
	Maksimum anma gücü	4.5 KVA
	Darbe gerilimi	75 V
	Maksimum aşındırma hızı	600 mm <sup>3</sup> /dk
	En pürüzsüz yüzey	0.5 mikron
<b>Ölçme Sistemi</b>	Derinlik durdurma hassasiyeti	± 0.01 mm
	Vernier okuma ayrıntısı	0.05 mm
	Dijital okuma hassasiyeti	± 0.01 mm

Deneyde kullanılan gümüş (Ag) ve hidroksiapatit (HA) tozları, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi kaynak laboratuvarında bulunan HİDROLİKSAN marka atölye tipi manuel pres makinasında preslenmiştir (Şekil 3.4). Pres makinasına ait teknik özellikler firma kataloğundan alınarak Çizelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.4 HİDROLİK SAN atölye tipi manuel pres makinası.

Çizelge 3.5 HİDROLİK SAN atölye tipi manuel pres makinasının teknik özellikleri.

<b>Kapasite</b>	20 ton
<b>Çalışma Ölçüsü</b>	490 x 200
<b>Strok</b>	150 mm
<b>İş Alma Yüksekliği</b>	700 mm
<b>Genel Ölçüler</b>	6700 x 8700 x 1900 mm
<b>Ağırlık</b>	200 kg

İşleme sırasında kullanılan elektrotlar, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi kaynak laboratuvarında bulunan PROTHERM marka kamara fırınında sinterlenmiştir (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5** PROTHERM marka kamara fırını.

Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında di-elektrik sıvı olarak kullanılan de-iyonize su, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi malzeme laboratuvarında bulunan NK marka su arıtma cihazından alınmıştır (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6** NK marka su arıtma cihazı

Elektrot ve iş parçasının parlatılmasında METKON marka Forcipol-2 model zımparalama ve parlatma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7). Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3.6’da verilmiştir.

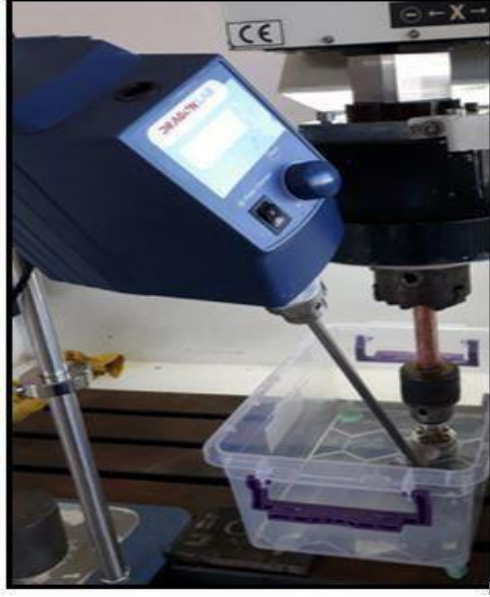


Şekil 3.7 METKON marka Forcipol-2 model zımparalama ve parlatma cihazı.

Çizelge 3.6 METKON marka Forcipol-2 model zımparalama ve parlatma cihazının teknik özellikleri.

<b>Disk Sayısı ve Tipi</b>	2
<b>Motor Gücü</b>	0.75 HP, 220V-50 Hz
<b>Disklerin Dönme Hızı</b>	300 rpm
<b>Disk Ebatları</b>	200-250 mm
<b>Cihaz Ebatı</b>	700 x 690 x 340 mm
<b>Ağırlık</b>	39 kg

Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında elektrot ve iş parçasından kopan parçaları işleme bölgesinden uzaklaştırmak için Bülent Ecevit Üniversitesinde bulunan DRAGONLAB marka mekanik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.8).



**Şekil 3.8** DRAGONLAB mekanik karıştırıcı.

Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi kullanılarak işlenen Ti-6Al-4V alaşımının farklı parametrelerdeki yüzey topografileri ve EDS analizleri, Bülent Ecevit Üniversitesi tıp fakültesi laboratuvarında bulunan QUANTA FEG 450 marka SEM cihazında yapılmıştır (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9** QUANTA FEG 450 marka SEM cihazı.

İşlenen numuneler, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi malzeme laboratuvarında bulunan METKON MICRACUT-201 marka yüksek hızlı hassas kesme cihazında kesilmiş (Şekil 3.10) ve ardından METKON ECOPRESS-50 marka bakalit pres makinesinde bakalite alınmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.10 METKON MICRACUT-201 marka yüksek hızlı hassas kesme cihazı.

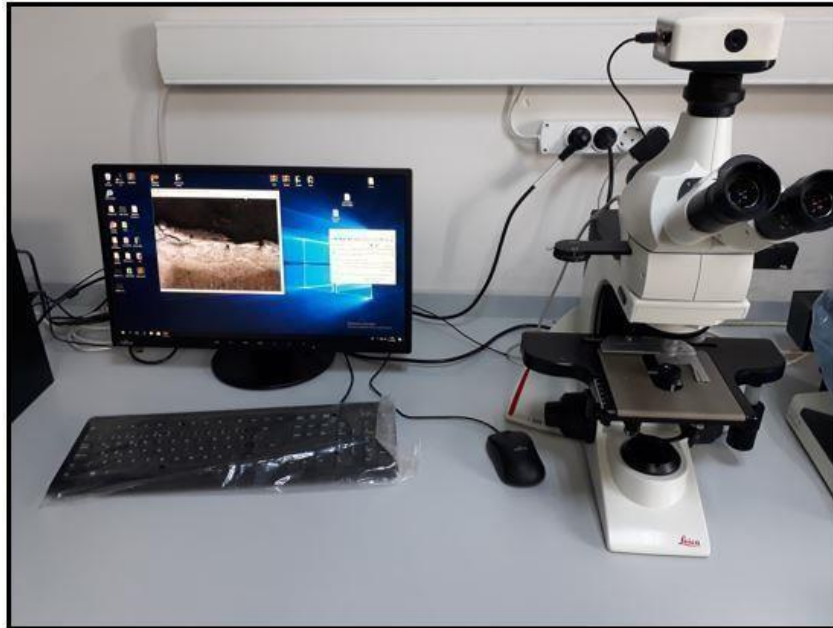


Şekil 3.11 METKON ECOPRESS-50 marka bakalit pres cihazı.

Bakalite alınan numunelere METKON FORCIMATE marka zımparalama ve parlatma cihazında parlatma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.12). Kesilen ve parlatılan numuneler LEICA marka optik mikroskop ile incelenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.12 METKON FORCIMATE marka zımparalama ve parlatma cihazı.



Şekil 3.13 LEICA marka optik mikroskop.

Farklı kesit mikro yapısı ve elementel analize sahip olan 2 adet numune seçilerek, kimyasal bileşim ve faz değişimlerinin incelenmesi için X Işını Kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Analizler sırasında PANALYTICAL marka, EMPYREAN model XRD cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 PANALYTICAL marka, EMPYREAN model XRD cihazı.

### 3.3 YÖNTEM

Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi ile yapılan deneyler, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi kaynak laboratuvarında bulunan Ajan EDM CNC Model 983 4 eksenli dalma Tipi elektriksel kıvılcımla işleme tezgâhında yapılmıştır. İş parçası olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı 2 m uzunluğunda ve 10 mm çapında alınmıştır. Yaklaşık 8 mm boyutlarında kesilerek 600 °C’de gerilim giderme işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.15). Yüzeyde oluşan oksit tabakasının giderilmesi için 600 grid zımpara ile parlatma işlemi yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 Gerilim giderme işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımı.

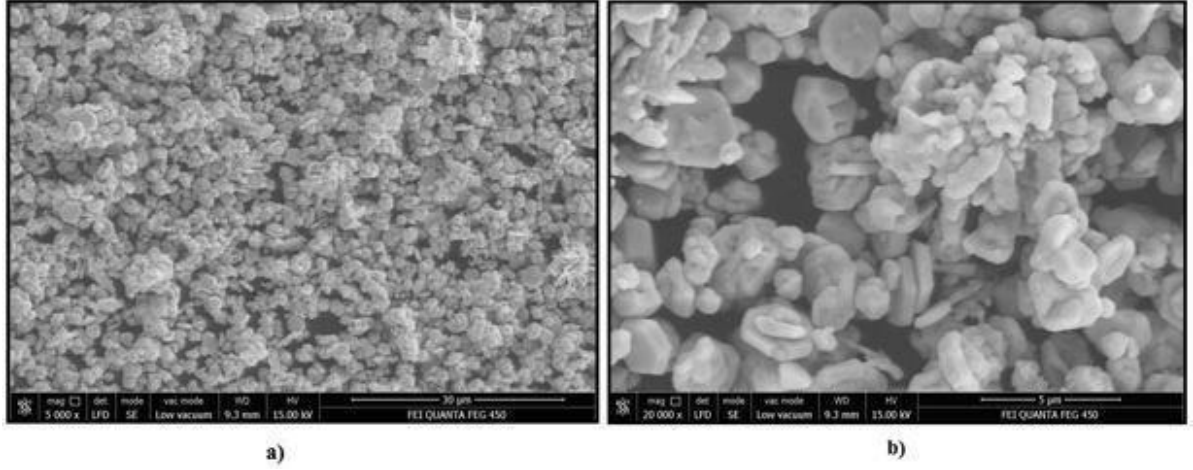


Şekil 3.16 Parlatma işleminden sonra Ti-6Al-4V alaşımı.

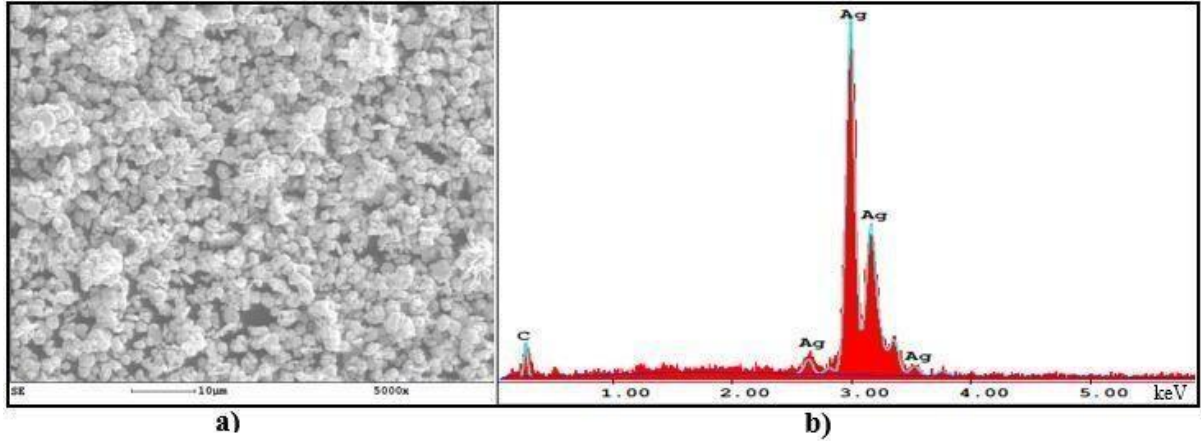
İşleme sırasında kullanılacak elektrot, 2-10  $\mu\text{m}$  boyutlarında gümüş ve hidroksiapatit toz katkısı ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.17). Tozların elementel analizi ve yüzey topografileri QUANTA FEG 450 SEM cihazında incelenmiştir. Gümüş tozunun genel görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’de, HA tozların genel görünümü ve EDS analizleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



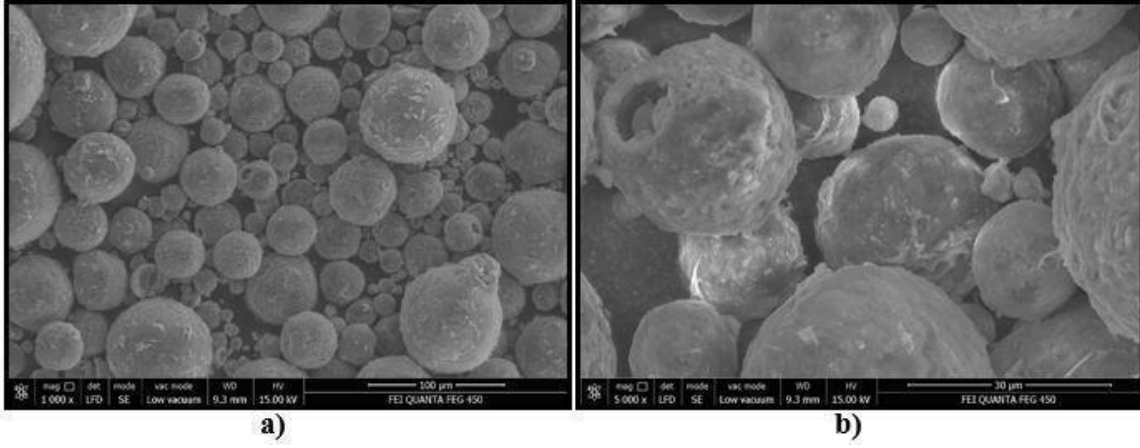
Şekil 3.17 Deneyde kullanılan mikronize gümüş ve mikronize hidroksiapatit.



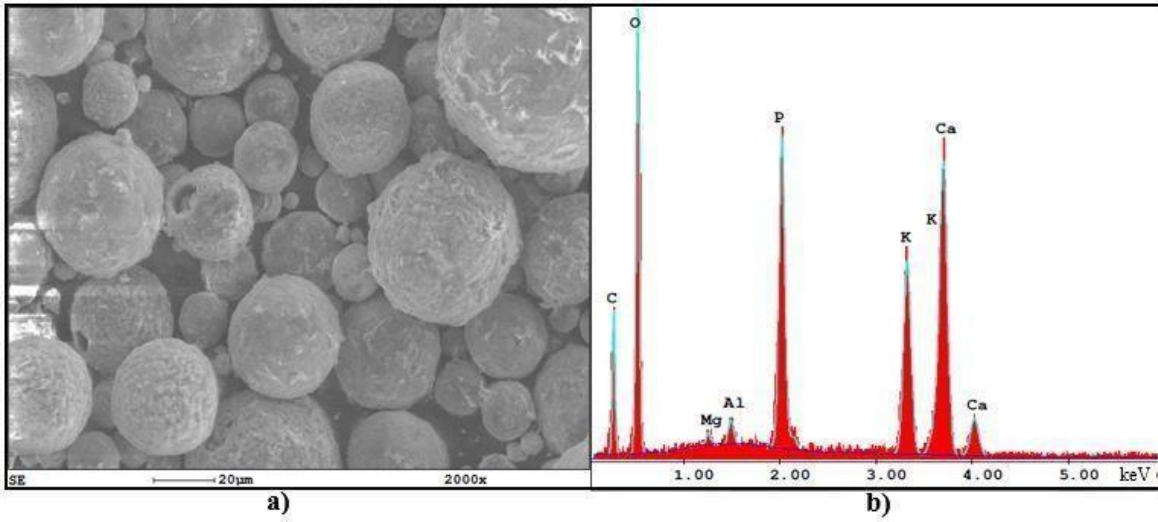
Şekil 3.18 Gümüş tozlarının a)5000 büyütmedeki b)20.000 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 3.19 Gümüş tozlarının a) Genel görüntüsü b) EDS analizi.



Şekil 3.20 Hidroksiapatit tozların a) 1000 büyütmedeki b)5000 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 3.21 Hidroksiapatit tozların a) Genel görüntüsü b) EDS analizi.

Tozlar hacimce 4 farklı oranda hesaplanarak, 12 mm çapında paslanmaz çelik malzemenin yapılan bir kalıba dökülmüştür (Şekil 3.22). Ardından HİDROLİKSAN marka manuel pres ile 200 bar basınçta sıkıştırılmıştır. Preslenen elektrotlar PROTHERM marka kamara fırınında 5°C/dk ısınma hızıyla 900 °C sıcaklıkta 2 saat sinterlenmiş ve 5 °C/dk soğuma hızı ile fırında soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işleminden sonra yüzeyde oluşan oksit tabakasını gidermek için 600 grid zımpara ile parlatma işlemi yapılmıştır. Hacimce %100 Ag, %90 Ag-%10 HA, %80 Ag-%20 HA, %70 Ag-%30 HA olmak üzere dört farklı oranda elektrot üretilmiştir (Şekil 3.23).

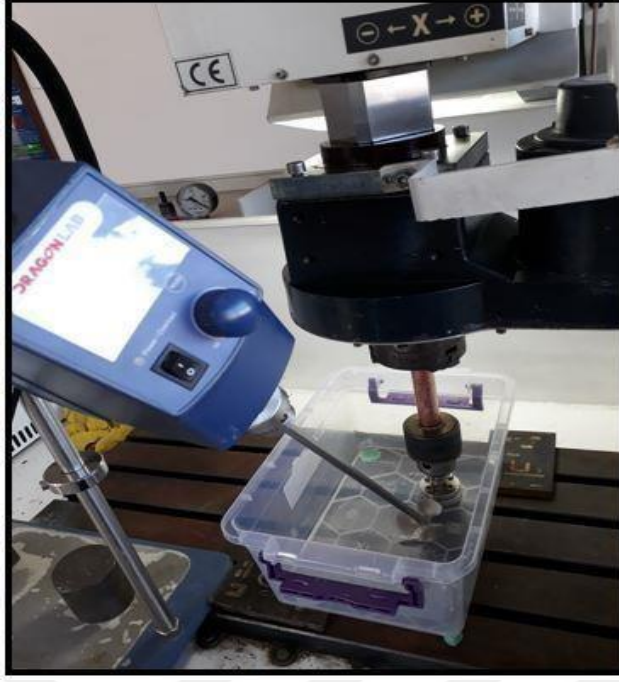


Şekil 3.22 Mikronize gümüş ve hidroksiapatit tozların sıkıştırıldığı paslanmaz çelik kalıp.



Şekil 3.23 Toz metalürjisi ile üretilen elektrotlar.

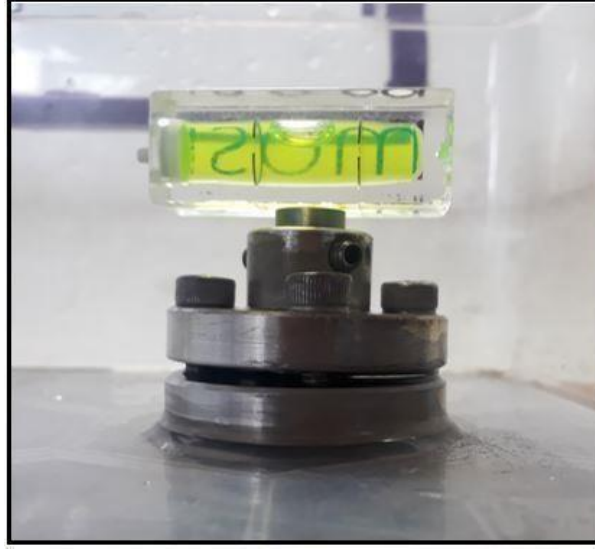
İşlenecek Ti-6Al-4V alaşımının boyutları küçük olduğu için (çap 10 mm, yükseklik~ 8 mm) tezgâhının içerisine küçük bir işleme havuzu tasarlanmıştır (Şekil 3.24). 12 mm çapında hazırlanan elektrotlar ise bir mandren aracılığı ile tutturulmuştur (Şekil 3.25). Ti-6Al-4V alaşımını işlemeye başlamadan önce, elektrot ile iş parçası arasındaki paralelliğin sağlanması için her deneyden önce su terazisi ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.24 Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi için tasarlanan işleme havuzu.

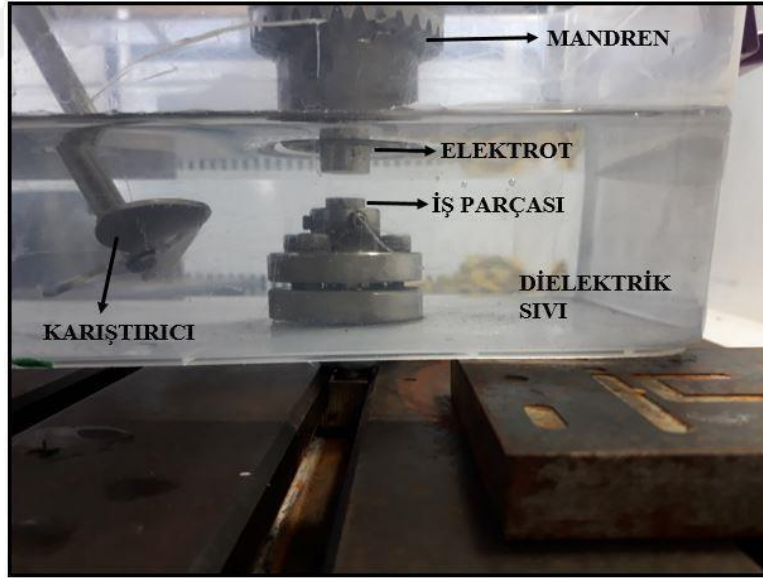


Şekil 3.25 Elektrotları tutan mandren.



**Şekil 3.26** Numunelerin her deneyden önce yapılan su terazisi ile ölçümü.

İşleme sırasında oluşabilecek kararsız koşulları önlemek için di-elektrik sıvı olarak de-iyonize su kullanılmıştır. İşleme bölgesinde biriken tozların sirkülasyonunu sağlayarak ark oluşmasını önlemek ve yüzey özelliklerini daha iyi hale getirmek için kullanılan karıştırıcı 1500 dev/dk olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.27).



**Şekil 3.27** Deney sisteminin işleme öncesindeki görünümü.

Hazırlanan deney sistemi için 3 farklı akım değeri ( 7A-12A-22A), 4 farklı darbe süresi ( 6 $\mu$ s-25 $\mu$ s-50 $\mu$ s-100 $\mu$ s) ve hacimce 4 farklı elektrot (%100 Ag, %90 Ag-%10 HA, %80 Ag-%20 HA, %70 Ag-%30 HA) parametre olarak belirlenmiştir. Toplamda farklı parametrelerde işlenen 39 adet numune elde edilmiştir. Deneyler her parametrede iki kez tekrarlanmış olup toplamda

78 deney yapılmıştır. 50  $\mu$ s darbe süresi yalnızca %70 Ag-%30 HA içeren elektrot için denenmiş olup, diğer akım ve darbe süreleri ile tüm elektrotlarda işleme yapılmıştır. Deneylerde kullanılan değişken parametreler Çizelge 3.7’de özetlenmiştir. Deney sisteminde belirlenen sabit parametreler ise Çizelge 3.8 de verilmiştir.

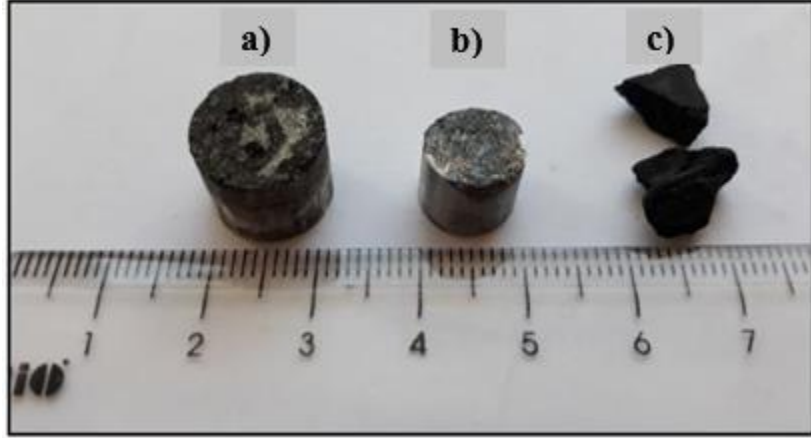
**Çizelge 3.7** Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında kullanılan değişken parametreler.

ELEKTROT ÇEŞİDİ	DARBE SÜRESİ	DARBE AKIMI		
		7 A	12A	22A
%100 Gümüş (A)	6 $\mu$ s	A <sub>1</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>7</sub>
	25 $\mu$ s	A <sub>2</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>8</sub>
	100 $\mu$ s	A <sub>3</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>9</sub>
%90 Gümüş %10 Hidroksiapatit (B)	6 $\mu$ s	B <sub>1</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>7</sub>
	25 $\mu$ s	B <sub>2</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>8</sub>
	100 $\mu$ s	B <sub>3</sub>	B <sub>6</sub>	B <sub>9</sub>
%80 Gümüş %20 Hidroksiapatit (C)	6 $\mu$ s	C <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>7</sub>
	25 $\mu$ s	C <sub>2</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>8</sub>
	100 $\mu$ s	C <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>9</sub>
%70 Gümüş %30 Hidroksiapatit (D)	6 $\mu$ s	D <sub>1</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>9</sub>
	25 $\mu$ s	D <sub>2</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>10</sub>
	50 $\mu$ s	D <sub>3</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>11</sub>
	100 $\mu$ s	D <sub>4</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>12</sub>

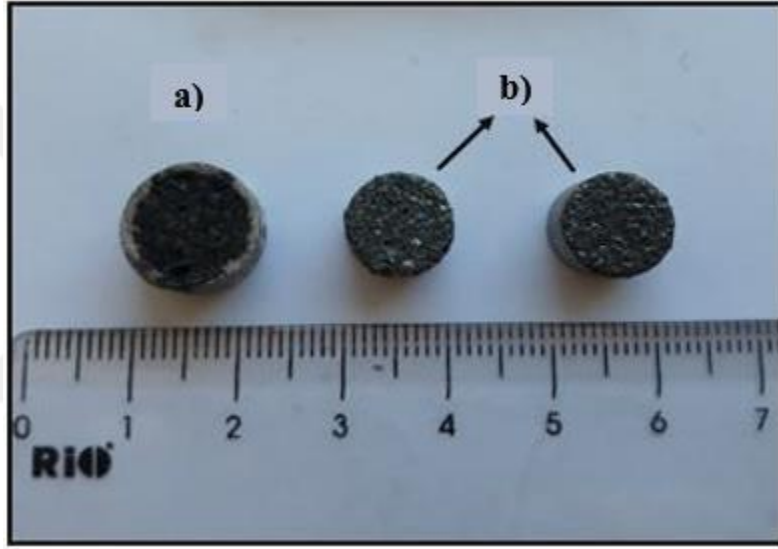
**Çizelge 3.8** Elektriksel kıvılcımla işleme sırasında kullanılan sabit parametreler.

<b>Dielektrik Sıvı</b>	De-iyonize su
<b>İş Parçası</b>	Ti-6Al-4V
<b>Karıştırma Hızı</b>	1500 dev/dk
<b>Elektrot Kutbu</b>	Pozitif
<b>Gap Voltaj</b>	100 V
<b>Talaş Kaldırma Miktarı</b>	0.2 mm

Elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi ile yapılan deneylerde ilk olarak ilerleme ve dönme ile işleme yapılmıştır. Ancak işleme sırasında elektrottan parçalar kopmuş ve çok kez ark oluşmuştur (Şekil 3.28). Ardından dalma yöntemi ile işleme denenmiş ve yüzey özellikleri açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Elektrotta kopma ve dağılmalar olmamış ve daha az ark oluşumu gözlenmiştir (Şekil 3.29).



**Şekil 3.28** EKI yönteminde ilerleme ve dönme ile işlenmiş numune ve elektrotun görüntüsü  
a) Elektrot b) İş parçası c) İşleme sırasında kopan parçalar.



**Şekil 3.29** EKI yönteminde dalma ile işlenmiş numune ve elektrotun görüntüsü a) Elektrot  
b) İş parçası.

EKI sırasında çeşitli parametrelerde ve hacimce farklı oranlarda üretilen elektrotlarda, farklı yüzeylerin oluştuğu gözlenmiştir. Deneylerde belirlenen parametreler ve bunlara bağlı olarak oluşan yüzeylerin görüntüleri Şekil 3.30'da özetlenmiştir.

ELEKTROT	DARBE AKIMI			DARBE SÜRESİ
	7 A	12 A	22 A	
%100 Ag %0 HA				6 µs
				25 µs
				100 µs
%90 Ag %10 HA				6 µs
				25 µs
				100 µs
%80 Ag %20 HA				6 µs
				25 µs
				100 µs
%70 Ag %30 HA				6 µs
				25 µs
				50 µs
				100 µs

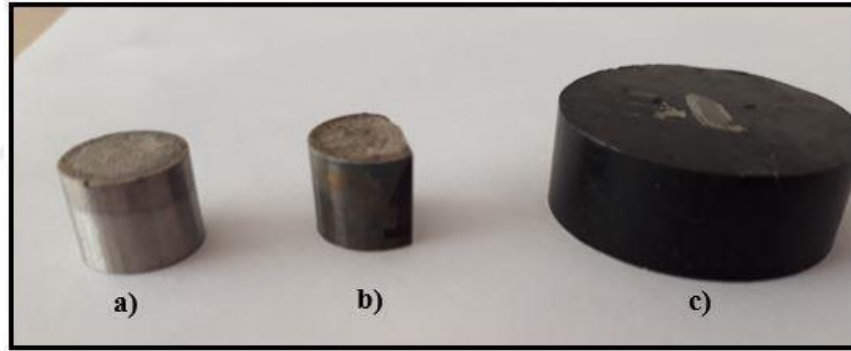
**Şekil 3.30** EKİ sonrası Ti-6Al-4V alaşımının farklı parametrelerdeki yüzey görüntüleri.

Farklı elektriksel parametrelerde işlenmiş olan 39 adet numunenin SEM ve EDS analizleri, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi tıp fakültesi laboratuvarında bulunan QUANTA FEG 450 marka SEM cihazında yapılmıştır. SEM analizleri sırasında numunelerin aşınan yüzeyleri üzerinden ETD ve BSED dedektörü ile 200-500-1000 büyütme olmak üzere 3 farklı büyütme oranında görüntü alınmıştır. Numuneler yedişerli gruplar halinde SEM analiz cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 3.31).

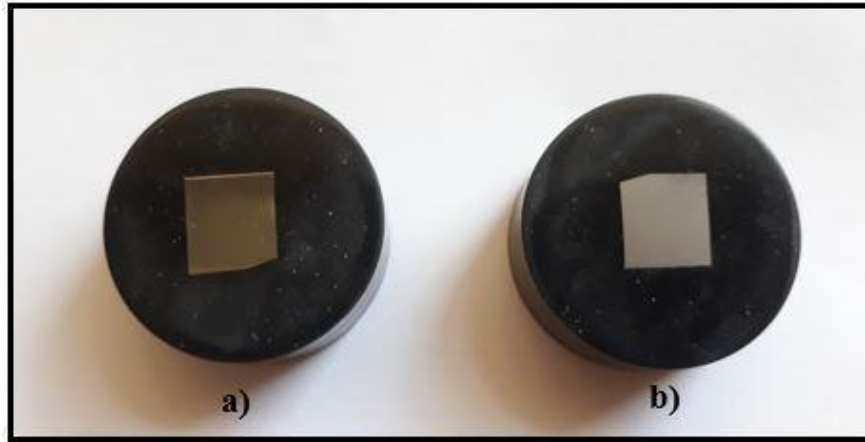


**Şekil 3.31** Numunelerin SEM cihazında vakum altına alınmadan önceki görüntüsü.

SEM analizleri tamamlanan numuneler incelenerek farklı yüzey topografisinde olan 9 adet numune seçilmiş ve kesit analizleri yapılmıştır. Kesit analizi için geleneksel metalografik numune hazırlama yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, numuneler METKON MICRACUT-201 marka yüksek hızlı hassas kesme cihazında ikiye kesilmiştir. Kesitleri alınan numuneler METKON ECOPRESS-50 marka bakalit pres cihazında 140°C sıcaklıkta 4 dk bekletilmiş ve ardından soğutulmuştur (Şekil 3.32). Bakalite alınan numuneler sırasıyla; 240, 400, 800, 1200, 2000 grid zımparalar ile zımparalanmıştır. Ardından METKON FORCIMATE marka zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla 6 µm ve 1 µm elmas süspansiyonları kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan ve parlatılan numuneler, optik mikroskopta kesitlerin daha belirgin şekilde görüntülenebilmesi için dağlama işlemine tabii tutulmuştur (Şekil 3.33). Dağlama işlemi sırasında Weck dağlama ajanı kullanılmıştır. Numuneler, 5 g amonyum biflorür ve 100 ml de-iyonize su ile hazırlanan Weck dağlama ajanında daldırma yöntemi kullanılarak 12 sn bekletilmiştir. Dağlama işleminin ardından LEICA marka optik mikroskop kullanılarak 50-100-200-500 büyütmede kesit görüntüleri alınmıştır.



**Şekil 3.32** Metalografik numune inceleme aşamaları a) İşlenmiş numune b) Kesiti alınmış numune c) Bakalite alınmış numune.



**Şekil 3.33** Bakalite alınan numuneler a) Parlatma işlemi sonrası b) Dağlama işlemi sonrası.



## BÖLÜM 4

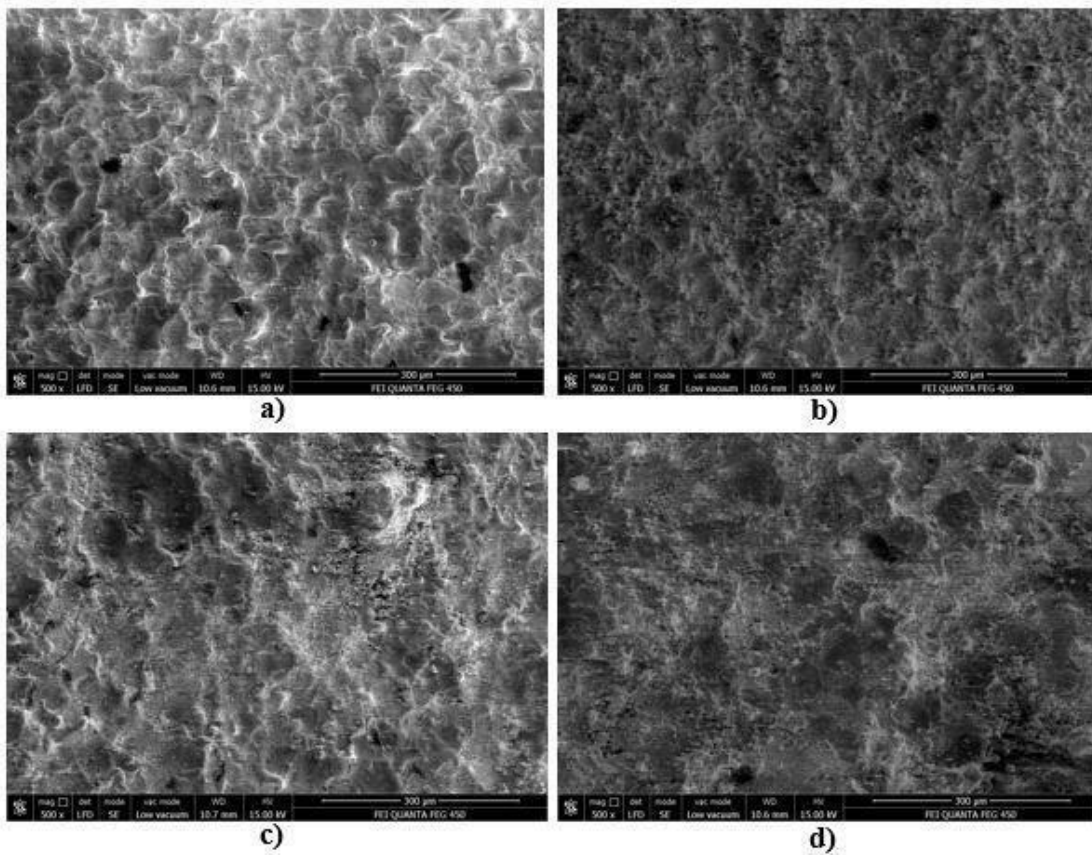
### ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elektriksel kıvılcım ile işlenen yüzeylerde kıvılcımın etkidiği bölgede küçük bir krater oluşur. Kıvılcımın etkidiği bölgede eriyik metal aniden di-elektrik sıvının taşınım ve yaklaşık oda sıcaklığında bulunan ana faz malzemesinin ısı iletimiyle aniden katılaştır. Ardışık uygulanan kıvılcımlar genel anlamda işlenen yüzeyde üst üste binmiş krater görünümünün yüzeyde oluşmasına sebebiyet verir. Yüzey topografisinin değişimleri aynı zamanda işleme koşullarının etkisini de göstermektedir. Örneğin işleme sırasında oluşan kraterlerin yanak özellikleri, küremsi eklentilerin varlığı, di-elektrik sıvıdan ya da takım elektrotundan işlenen yüzeye malzeme taşınımı yüzey incelemeleri ile anlaşılabilir.

Bu bölümde, elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımlı numunelerin deneysel analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar 3 farklı akım değeri ( 7A-12A-22A), 4 farklı darbe süresi ( 6 $\mu$ s-25 $\mu$ s-50 $\mu$ s-100 $\mu$ s) ve hacimce 4 farklı elektrot (% 100 Ag, %90 Ag-%10 HA, %80 Ag-%20 HA, %70 Ag-%30 HA) için ayrı ayrı detaylı bir biçimde incelenmiştir. Toplamda 39 adet numunenin her biri için krater yapılarının ve çatlak mekanizmalarının belirgin bir biçimde görüntülediği yüzey topografileri, yüzeyde oluşan kalıntıların ve elektrot malzemesinden işlenen yüzeylere taşınımların değerlendirilebilmesi için elementel analiz sonuçları ve EDS izlerini içeren SEM analizleri ayrı ayrı sunulmuştur. SEM analizleri sırasında her numune için 3 farklı büyütme oranında (X200-X500-X1000) görüntü alınmış ve değerlendirme için en belirgin olan görüntüler kıyaslanarak bir araya getirilmiştir. Değerlendirmeyi daha anlaşılır kılmak için aynı akım değerinde ve darbe süresinde, farklı oranlar da Ag ve HA tozları kullanılarak sinterlenmiş elektrotlar ile işlenen numuneler arasındaki yapısal değişimler, 500 büyütmede elde edilen SEM görüntüleri ile gruplandırılarak sunulmuştur. SEM görüntüleri incelendikten sonra farklı yüzey topografisine sahip 9 adet numune seçilerek kesit analizleri yapılmıştır. Kesiti alınan numunelerin X50-X100-X200-X500 büyütmede optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Farklı darbe akımı, darbe süresi ve HA-Ag toz katkılı elektrot oranları ile işlenen numunelerin kesit analizleri birbirleri ile kıyaslanarak detaylı bir biçimde incelenmiştir.

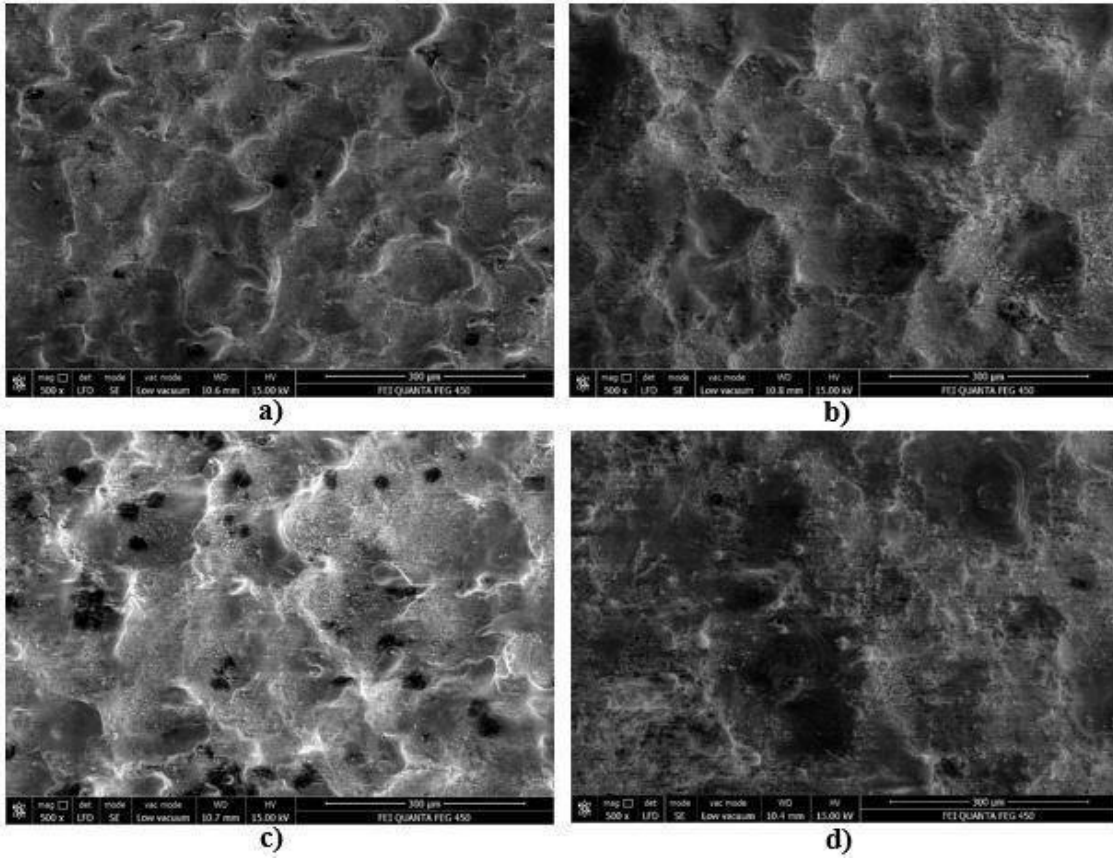
#### 4.1 YÜZEY TOPOGRAFİSİ

Takım elektrotlarının farklı oranlardaki toz katkıları ve işleme için belirlenen elektriksel parametreler, Ti-6Al-4V alaşımın numunelerin yüzey topografilerinde değişimlere sebep olmuştur. İşleme sırasında darbe akımı 7A, darbe süresi 6µs kullanıldığında %100 Ag toz katkıli elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde küçük kraterler ve belirgin krater yanakları gözlemlenirken, elektrottaki HA toz katkısının artırılması ile krater yanaklarının belirginliğini kaybettiği görülmektedir. (Şekil 4.1a, Şekil 4.1d). %10 HA içeren elektrot ile işlenen numunede çok küçük kraterlerin oluştuğu dikkat çekmektedir (Şekil 4.1b). Böyle bir yüzey elde edilmesinin ana sebebi; işleme sırasında ana kıvılcım kanalından ayrılarak dağılmış farklı kollarındaki boşalım kanallarının oluşması ve ikincil kıvılcım mekanizmasının etkin olmasıdır. %20 HA toz katkıli elektrot ile işlenen numune yüzeyinde ikincil kıvılcımların oluşmadığı ve kraterlerin belirginliğini kaybettiği görülmektedir (Şekil 4.2c).



**Şekil 4.1** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag %10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

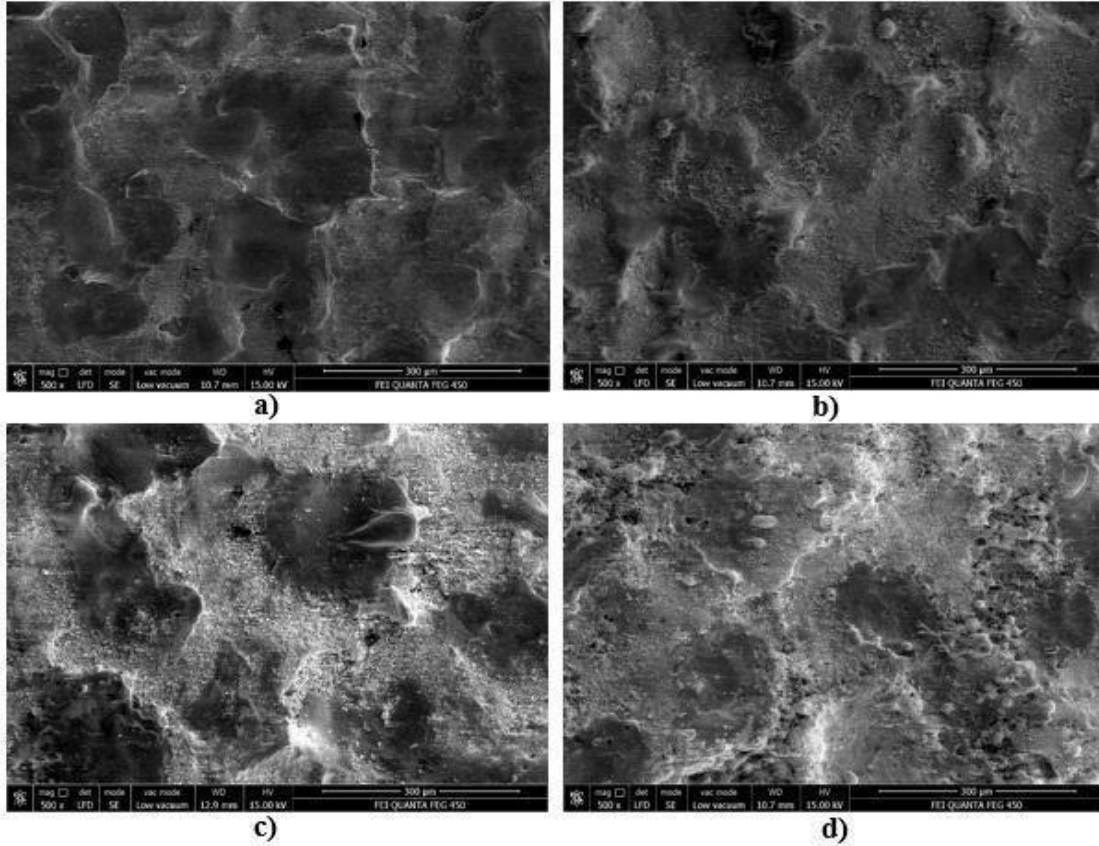
Aynı darbe akımında (7A) darbe süresi  $25\mu\text{s}$ 'ye yükseltildiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede krater yanaklarının belirgin olmasına karşılık küçük çaplarda oyukların oluştuğu gözlemlenirken (Şekil 4.2a), %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede krater yanaklarının yayvanlaşarak belirginliğinin azaldığı ve oyukların kaybolduğu görülmüştür (Şekil 4.2b). Elektrottaki HA oranının artışıyla tekrar oluşan oyukların boyutu artmış ve farklı geometrilere gözenekler oluşmuştur (Şekil 4.2c). %70 Ag-% 30 HA toz katkılı elektrot kullanarak işlenen numunede ise krater çeperlerinde küre benzeri yapıda eklentilerin özellikle krater yanaklarında oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.2d).



**Şekil 4.2** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi: $25\mu\text{s}$  a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

Benzer biçimde darbe süresi  $100\mu\text{s}$ 'ye yükseltildiğinde; %100 Ag içeren takım elektrot ile işleme sonunda yüzeyde yayvan ve belirgin krater yanaklarına sahip kraterlerin oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.3a). Aynı işleme koşullarında %10 HA ve %20 HA içeren elektrot ile işlenen numune yüzeylerinde krater çapları nispeten küçük ve krater yanakları belirgin değildir (Şekil 4.3b, Şekil 4.3c). İşleme sırasında kıvılcımın oluşması çok kısa bir sürede gerçekleşir ve

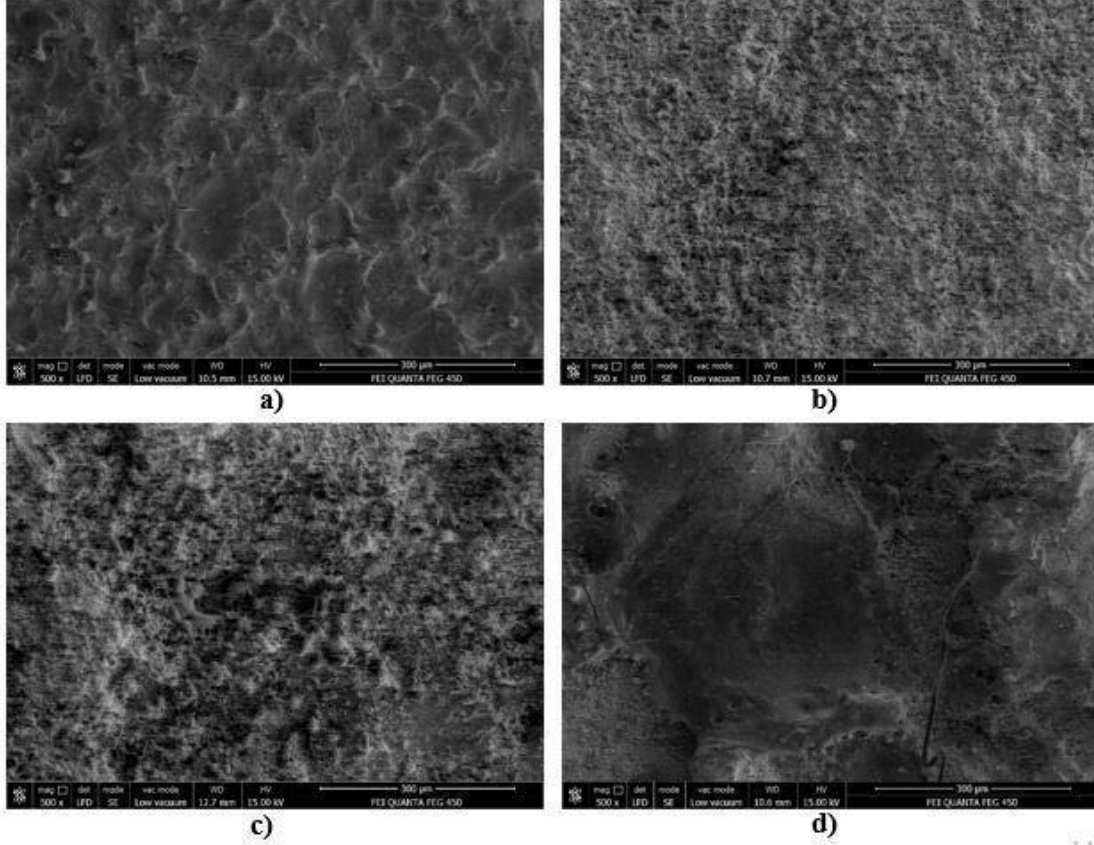
ani oluşan çok yüksek noktasal sıcaklık değerlerine ulaşılır. Buna bağlı olarak işleme sırasında eriyen metalin di-elektrik sıvı ile karşılaşması sonucu küre benzeri yapılar kaynamaya başlayan ana faz metalin aniden katılaşması sonucu oluşur. Bu küresel yapılar, %70 Ag-% 30 HA içeren takım elektrotu ile işlenen numunede görülmektedir (Şekil 4.3d). Ayrıca elektrottaki HA toz katkısı miktarı arttıkça, krater kenarlarında yoğun şekilde oluşan radyal çatlakların varlığı göze çarpmaktadır.



**Şekil 4.3** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

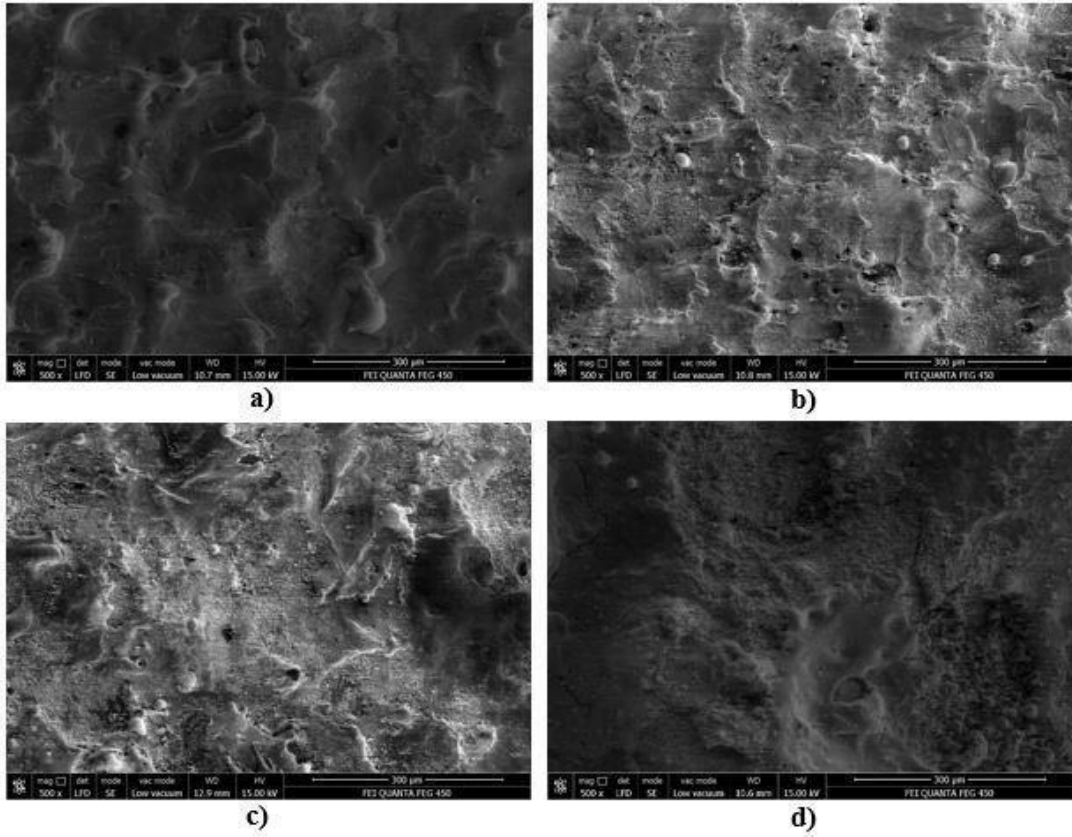
6µs darbe süresinde, akım seviyesi 7 amperden 12 ampere çıkarıldığında; %100 Ag elektrot ile 7A darbe akımında işlenen numuneler karşılaştırıldığında (Şekil 4.1a), krater çeperlerinin yaklaşık benzer çaplarda olmasına karşılık, krater derinlikleri nispeten artmıştır (Şekil 4.4a). %90 Ag-%10 HA ve %80Ag-%20 HA içeren elektrotlar ile işlenen numunelerde yüzey yapısının dramatik biçimde değiştiği görülmüştür. (Şekil 4.4b, Şekil 4.4c). Yüzeyler dikkatli biçimde incelendiğinde çok küçük boyutta kraterler göze çarpmaktadır. Bu işleme koşullarında, ana kıvılcım kanalının tek bir kol üzerinden boşalımından daha çok ana kanalın elektrottan salınan malzemelerin etkisiyle bütünlüğünü kaybederek dağılmış bir boşalım kanalının (ikincil

kıvılcımlar) yüzeyde bıraktığı izlerdir. %70 Ag-%30 HA içeren elektrot ile işlenen numunede ise, boşalım kanalının dağılım etkisinin azaldığı ve krater çeperlerinde yoğun bir şekilde çatlak ağlarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.4d).



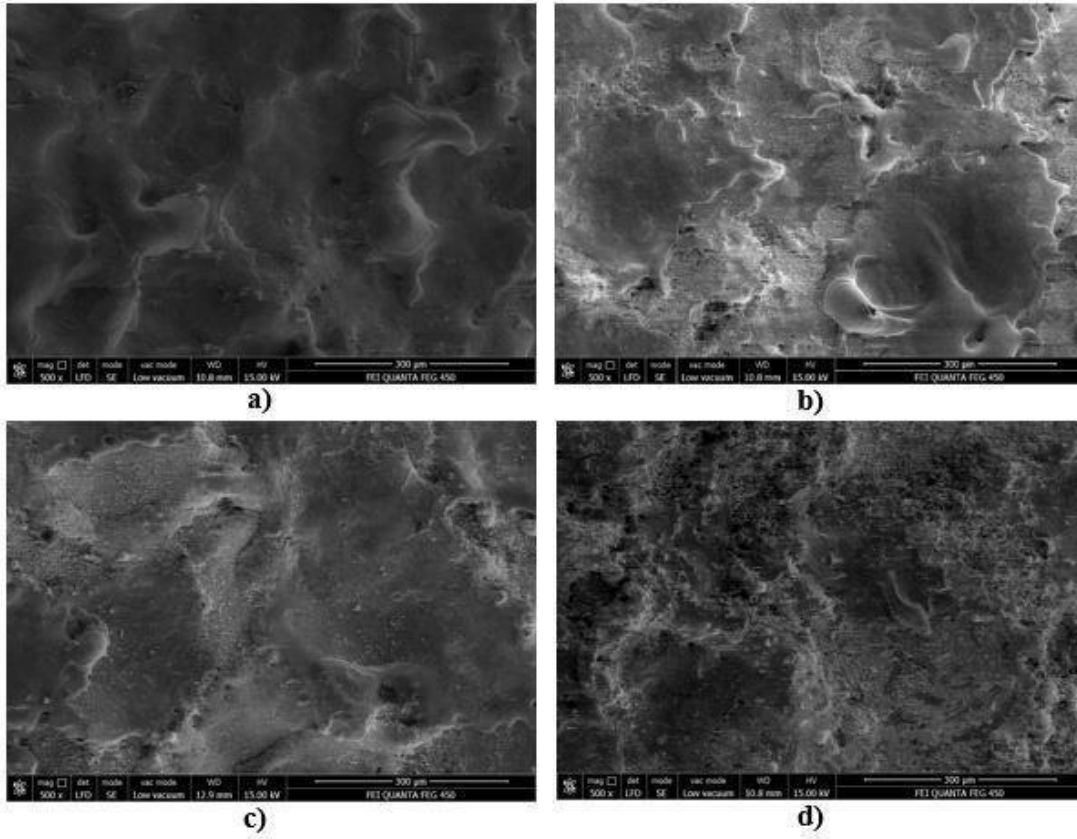
**Şekil 4.4** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

% 100 Ag takım elektrot ile işlenen numuneler karşılaştırıldığında, 12A darbe akımı, 6 µs darbe süresinde daha küçük boyutlarda kraterler oluşurken (Şekil 4.4a), darbe süresi 25 µs'ye çıkarıldığında nispeten daha geniş ve yayvan kraterler oluşmuştur (Şekil 4.5a). %90 Ag-%10 HA takım elektrotu ile işlenen numunede, işleme sırasında yüksek kaynama sıcaklıklarının oluşması ve malzemenin tam katılaşmadan donması sonucu krater çeperlerinde hava birikintileri şeklinde globuller ile küçük boyutlarda oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.5b). %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunede kraterlerin belirginliği kaybettiği ve farklı boyutlarda globullerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.5c). %70 Ag-%30 HA toz katkılı elektrot ile işlenen numunede işleme sırasında yüksek elektriksel alanın kırılması ile oluşan ikincil kıvılcımların etkisi belirginleşmektedir ve yüzeyde dalgalanmalar oluşmaktadır (Şekil 4.5d).



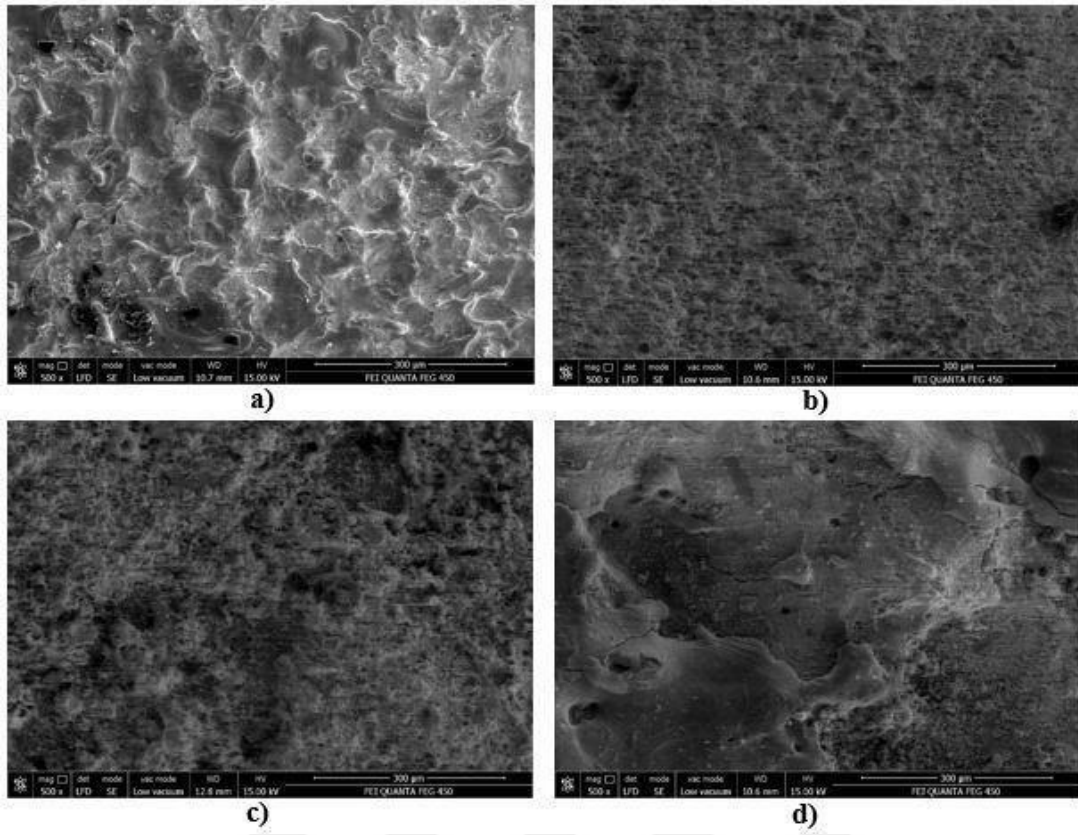
**Şekil 4.5** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

12A darbe akımı, 100µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, geniş ve yayvan kraterler ile belirgin krater yanaklarının olduğu görülmektedir (Şekil 4.6a). %90 Ag-%10 HA ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerde kraterlerin belirginliğini kaybettiği ve yüzeyde ince çatlak ağlarının olduğu görülmüştür (Şekil 4.6b, Şekil 4.6c). % 70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede krater çeperlerini çevreleyen derin çatlaklar ile çatlak kenarlarında oluşan küresel eklentiler dikkat çekmektedir. Yüzeyde ikincil kıvılcımların etkileri de görülebilmektedir (Şekil 4.6d).



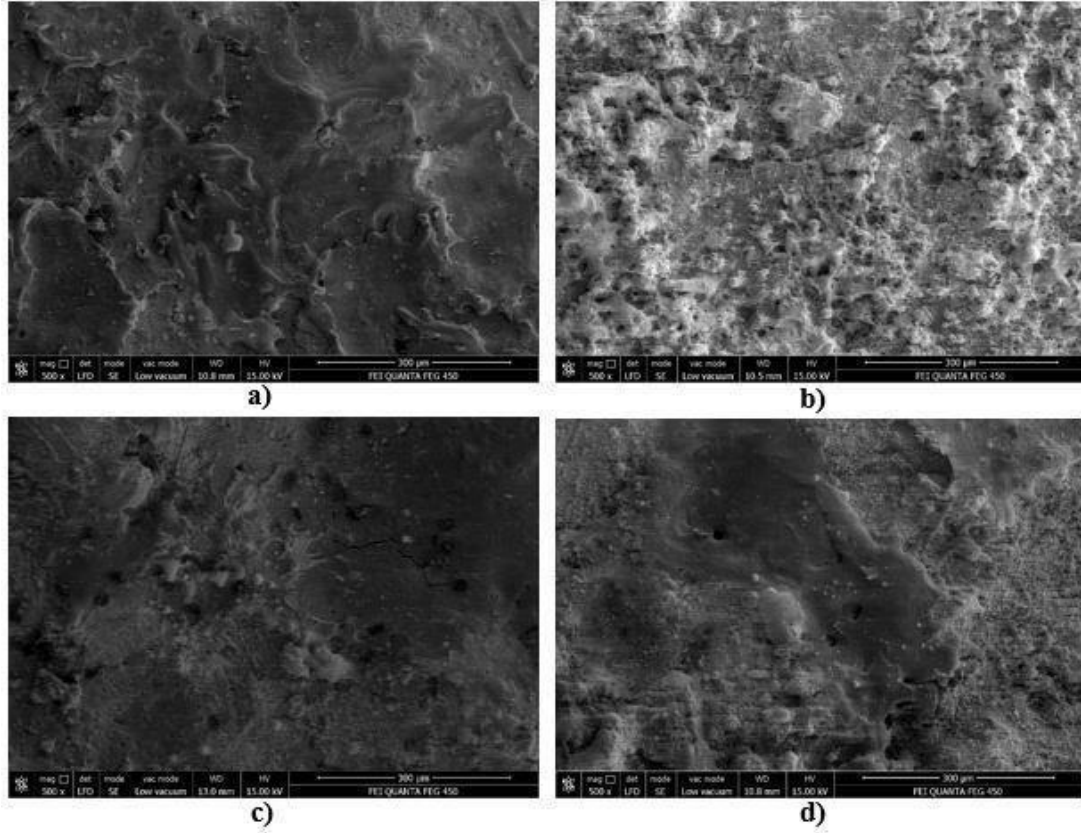
**Şekil 4.6** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

En yüksek akım değeri 22A darbe akımı ile 6µs darbe süresinde %100 Ag elektrot kullanılarak işlenen numune ile aynı darbe süresinde 12A darbe akımında işlenen numune kıyaslandığında (Şekil 4.4a), krater çaplarının nispeten aynı boyutlarda olduğu; fakat akımın artması ile daha derin kraterlerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.7a). Elektrottaki HA toz katkısının artması ile yüzey topolojisinde önemli bir değişim görülmektedir. Özellikle %90 Ag-%10 HA ve %80 Ag-%20 HA toz katkılı elektrotlar ile işlenen numunelerde tekrar oluşan ikincil kıvılcımların etkileri, yüzeyde oluşan izlerden anlaşılmaktadır (Şekil 4.7b, Şekil 4.7c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede belirgin olmayan krater çeperleri ile yoğun çatlak ağları gözlemlenmiştir (Şekil 4.7c). Ayrıca ikincil kıvılcımların etkileri de devam etmektedir.



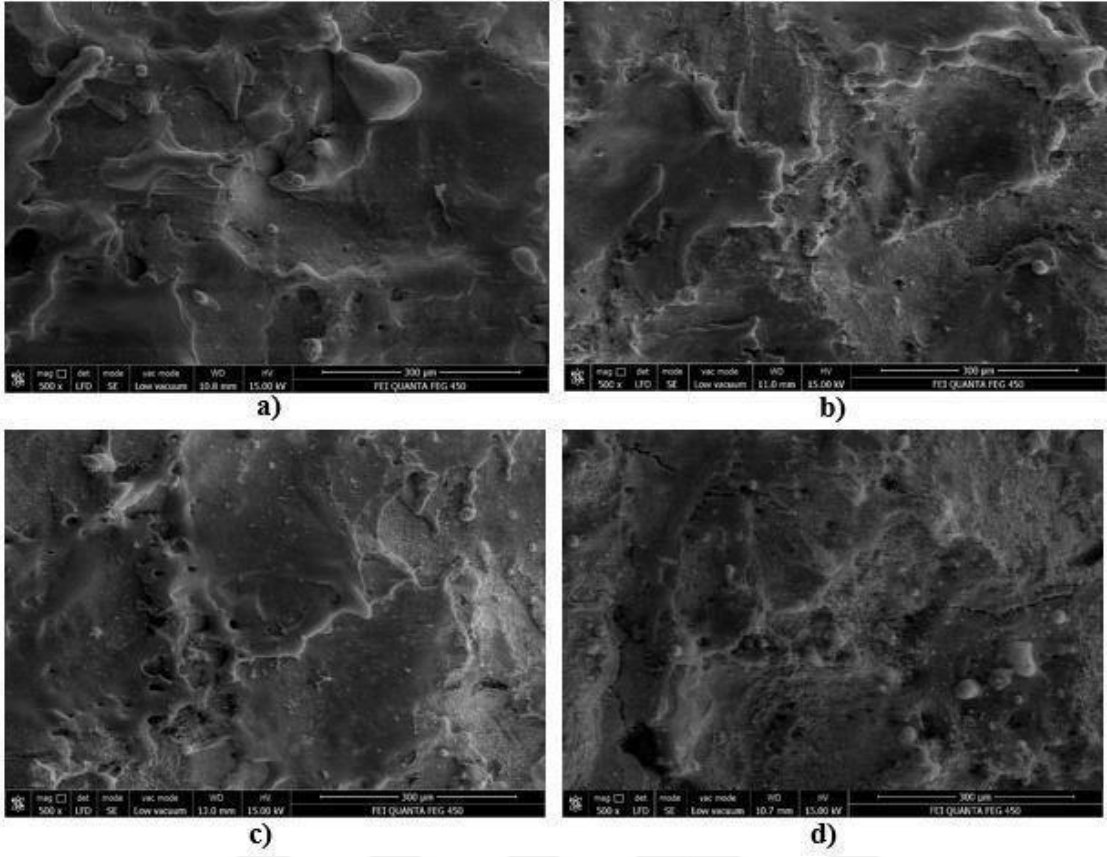
**Şekil 4.7** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde, belirgin krater yanakları ile farklı boyutlarda oluşmuş globuller görülmektedir (Şekil 4.8a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede krater çaplarının küçülerek ikincil kıvılcım mekanizmasının etkin olduğu ve kraterleri çevreleyen küresel eklentilerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.8b). %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde radyal şekilde oluşmuş geniş ve derin çatlak ağları fark edilmektedir (Şekil 4.8c). HA toz katkısının artırılması ile oluşan yüksek elektriksel alan kırılarak ikincil kıvılcımları oluşturmuş ve yüzeyde dalgalanmalara sebep olmuştur (Şekil 4.8d).



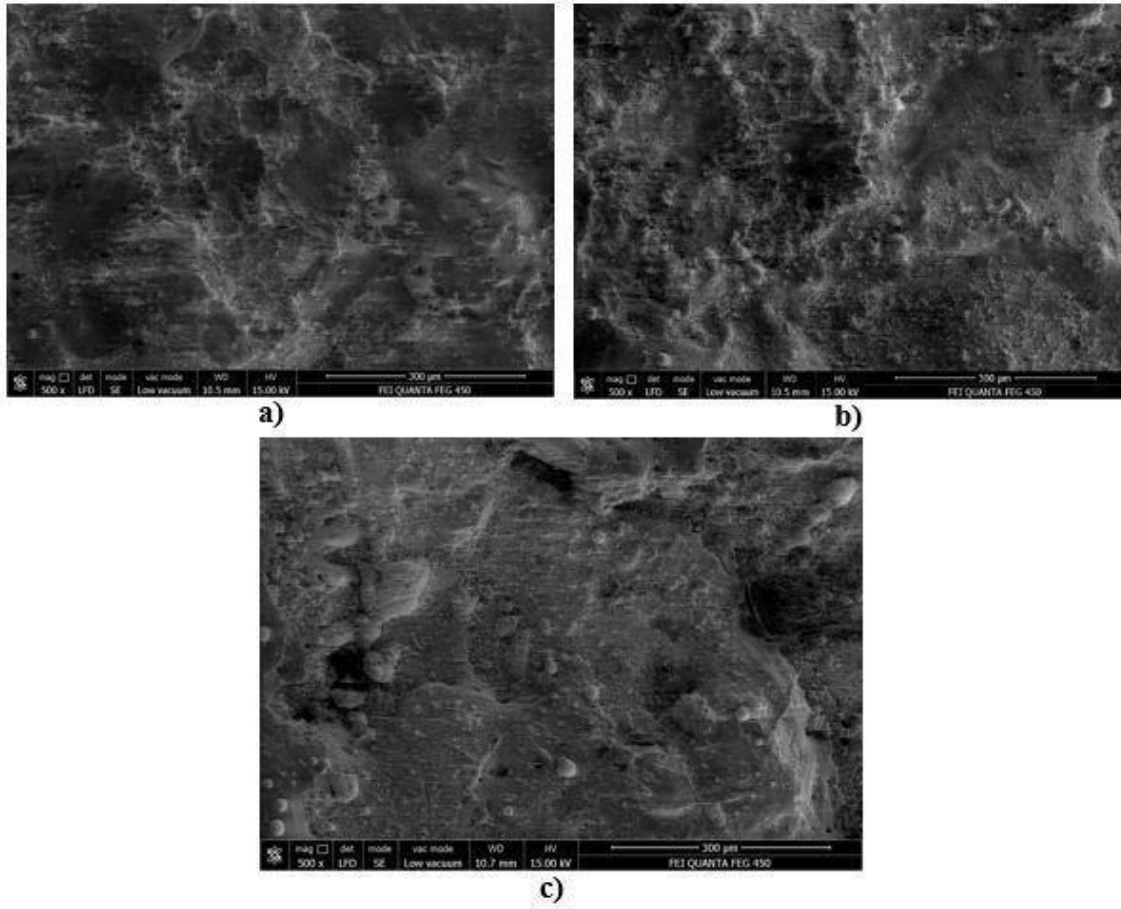
**Şekil 4.8** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

Deney parametreleri arasında en yüksek darbe akımı 22A ve en yüksek darbe süresi 100 µs işleme koşullarında, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede geniş ve derin kraterler ile kraterleri kesen enine çatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.9a). Özellikle aynı takım elektrotu kullanılarak (%100 Ag) işlenen iki numune karşılaştırıldığında, 7A darbe akımı, 100 µs darbe süresinde işlenen numunede çok derin olmayan kraterler oluşurken (Şekil 4.3a), 22A darbe akımı, 100 µs darbe süresinde işlenen numunede oldukça derin kraterlerin oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.9a). %90 Ag-%10 HA takım elektrotu ile işlenen numunede daha az ve çapları küçük olan gözenek şeklindeki yapıların (Şekil 4.9b), %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunede arttığı ve belirli bir bölgede toplandığı dikkat çekmektedir (Şekil 4.9c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede daha önceki görüntülere benzer şekilde oluşan ikincil kıvrımların etkileri ile birbirlerini dik şekilde kesen derin çatlaklar görülmektedir (Şekil 4.9c).



**Şekil 4.9** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

50 µs darbe süresi ile işleme, yalnızca %70 Ag-%30 HA toz katkılı elektrot ile denenmiştir. Darbe akımı 7A-12A-22A olarak belirlenen 3 farklı numunenin SEM görüntüleri kıyaslandığında kraterlerin belirgin şekilde oluşmadığı görülmektedir (Şekil 4.10). 7A darbe akımında numune yüzeyinde ufak boyutlarda oyukların oluştuğu gözlemlenirken (Şekil 4.10a), darbe akımı arttırıldığında elektriksel boşalım kanalının dağılarak farklı boşalım kanallarına ayrıldığı ve yüzey topografyasını değiştirerek ikincil kıvılcımların etkin olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 4.10b, Şekil 4.10c).

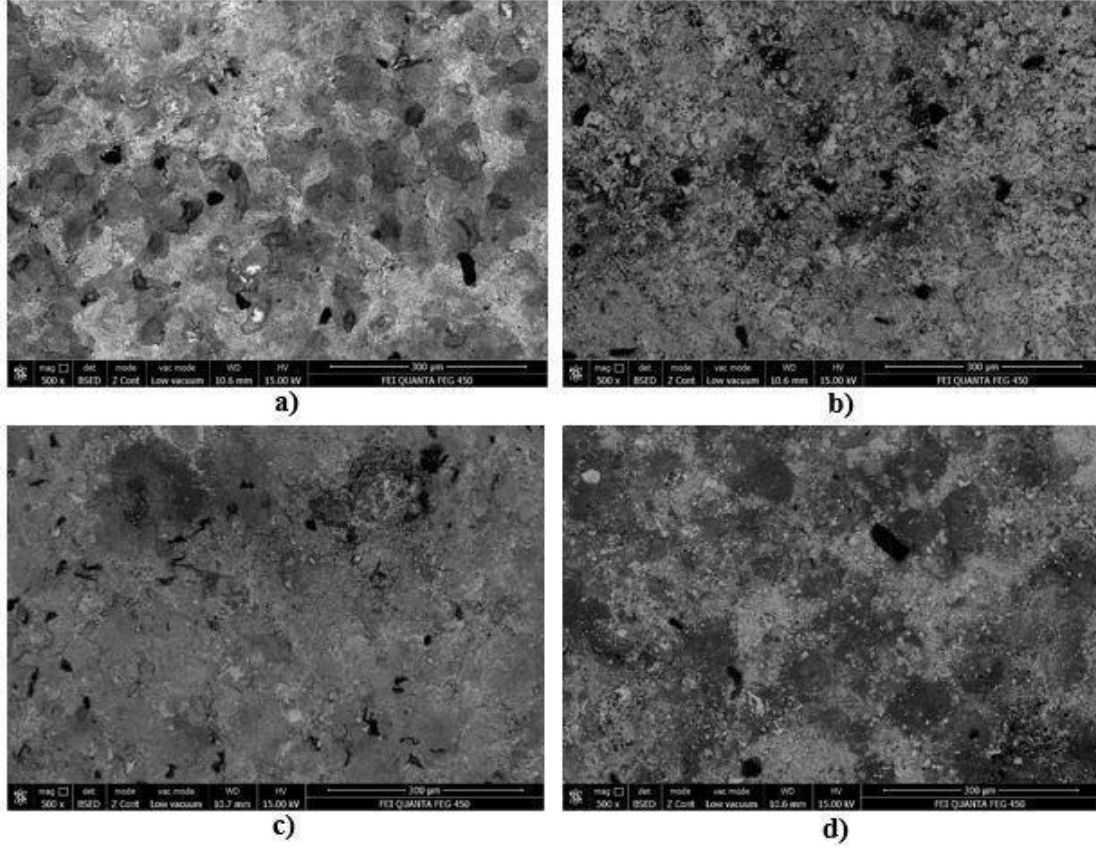


**Şekil 4.10** Hacimce karıştırılmış %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM görüntüleri, darbe süresi:50µs a)Darbe akımı:7A b)Darbe akımı:12A c)Darbe akımı:22A.

#### 4.2 ELEMENTEL VE GERİ SAÇILIM ELEKTRON MİKROSKOBU ANALİZLERİ

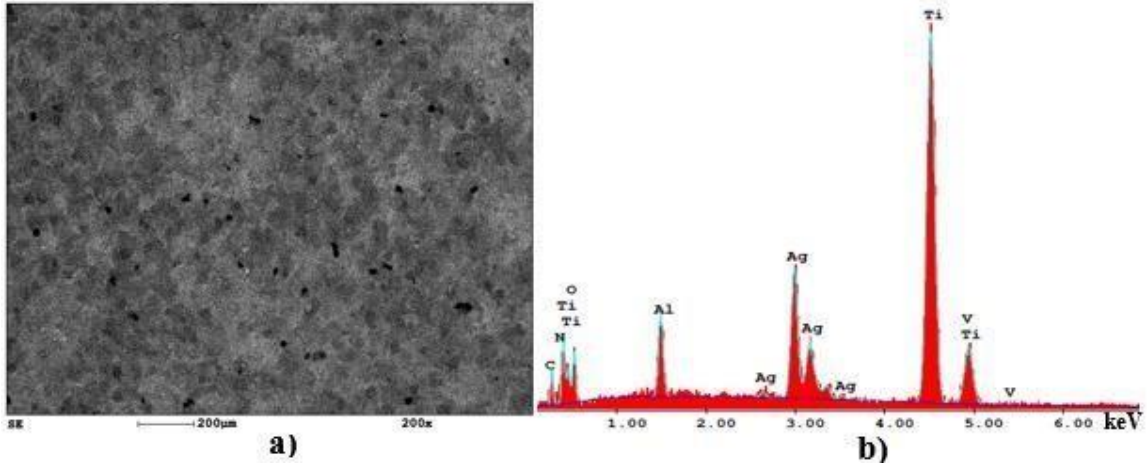
Ag ve HA toz katkılı elektrotlar ile işleme sırasında belirlenen elektriksel parametrelerin değişmesi, elektrottan ya da di-elektrik sıvıdan yüzeye taşınan malzeme yoğunluklarında farklılaşmalara yol açmıştır. 7 A darbe akımı, 6 µs darbe süresinde, % 100 Ag toz katkılı elektrot ile işlenen numunede koyu gri renkte olan ana faz malzeme (Ti) ve işleme sırasında yüzeye nüfuz eden elektrottaki Ag elementinin varlığı ile birlikte yoğun çatlak ağlarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.11a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede açık ve parlak renkte görünen bölümlerde Ag elementinin varlığı ve yüzeye bölgesel olarak yayılımı görülebilmektedir (Şekil 4.11b). Ayrıca yüzey dikkatli incelendiğinde, işleme sırasında tek bir kıvılcım kanalından birçok farklı boşalım kanalına ayrılarak oluşmuş ikincil kıvılcımların izleri görülebilmektedir. % 80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde çatlakların oldukça küçüldüğü ve HA toz katkısının artması ile HA ile zenginleşmiş ve koyu gri rengeyle belirginleşen alanların oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.11c). %70 Ag-%30 HA toz katkılı

elektrot ile işlenen numunede küresel geometrideki HA tozlarının bir bölümü; geometrik şeklini bozmadan, yüzeye zayıf bağlarla bağlanmaktadır. İşleme sırasında oluşan yüksek noktasal sıcaklıklar sebebiyle bir bölüm HA tozunun kısmi geometrik bozulmaya maruz kalarak yüzeye nüfuz ettiği görülmektedir (Şekil 4.11d).

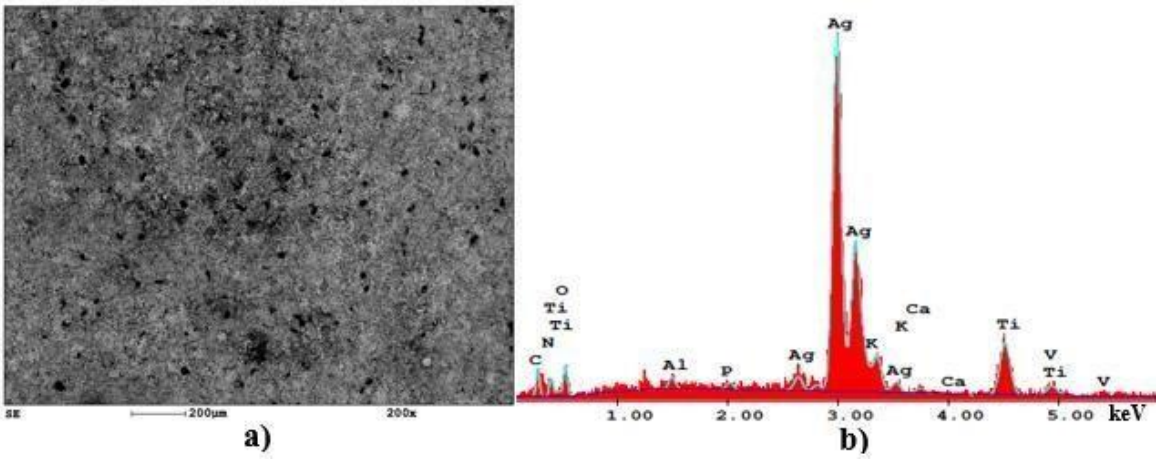


**Şekil 4.11** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

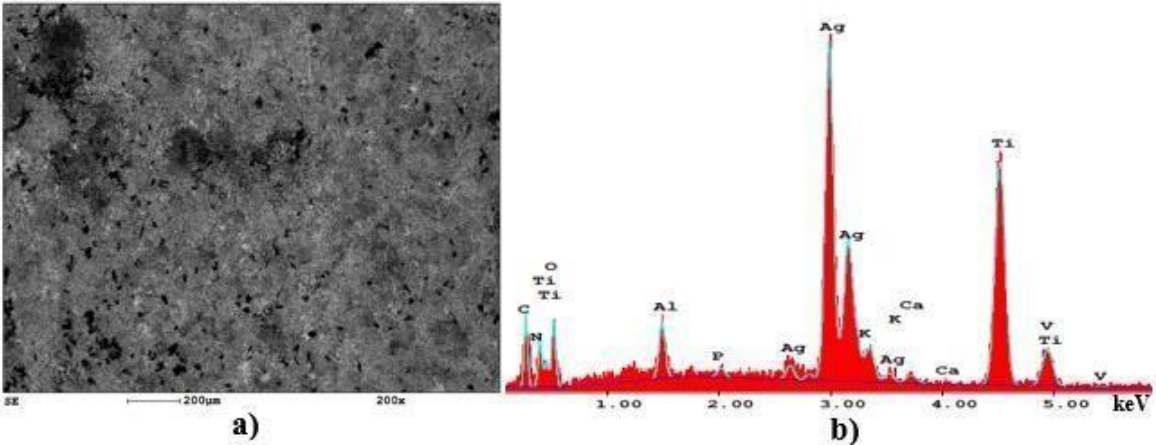
Enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri incelendiğinde, %100 Ag toz katkıli elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde ana faz malzemeyi oluşturan Ti, Al ve V ile birlikte elektrot malzemesinden taşınan Ag varlığı gözlenebilmektedir (Şekil 4.12). İkincil kıvılcımların etkin olduğu %10 HA toz katkıli elektrot ile işlenen numunede, Ag yoğunluğu ana faz malzemedan elde edilen Ti iz şiddetini baskılayacak düzeyde artmıştır (Şekil 4.13). Elde edilen sonuç işlenen yüzeyin elektrot malzemesinden taşınan elementlerce hızlı biçimde arttığını ortaya koymaktadır. %80 Ag-%20 HA elektrot ve %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunelerde, Ag ve Ti iz tepelerinin şiddetli olduğunu, Ca ve P iz tepelerinin ise HA ve Ag'nin bir arada bulunduğu birikim bölgelerinin yüzeyde oluştuğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.14, Şekil 4.15).



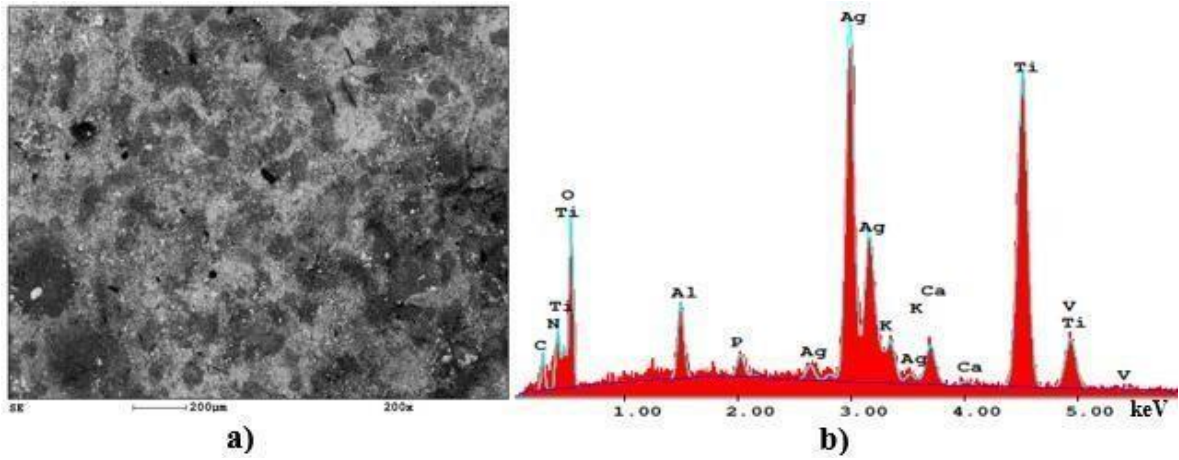
**Şekil 4.12** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.



**Şekil 4.13** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.



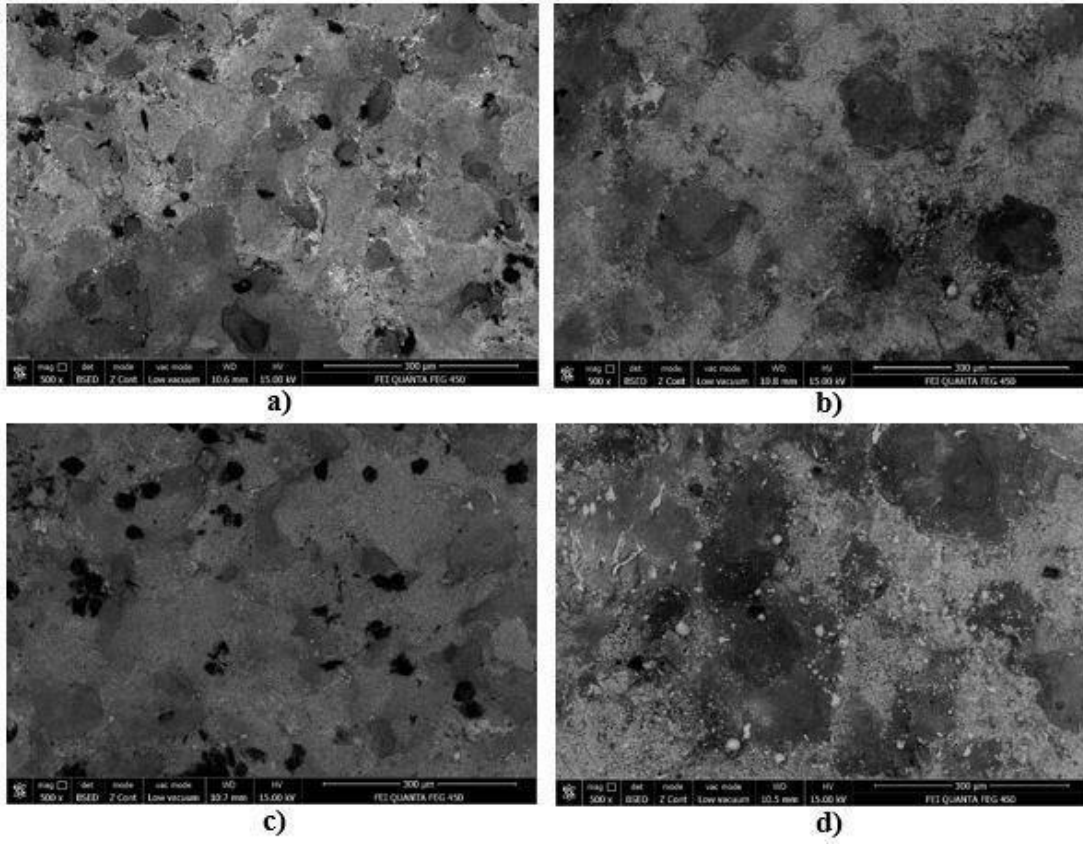
**Şekil 4.14** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.



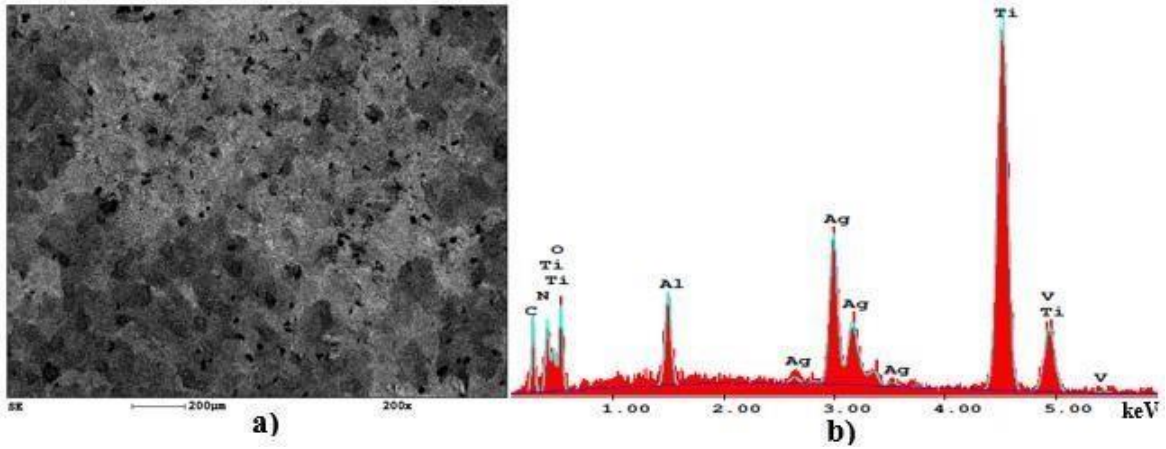
**Şekil 4.15** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs.

7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, belirgin krater yanakları ile krater çeperlerinde birikmiş Ag elementi ve krater çeperlerini çevreleyen çatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.16a). %90 Ag-%10 HA elektrot ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerde, Ag elementinin yüzeye bölgesel olarak yayıldığı ve belli bölgelerde noktasal apatit birikintilerinin oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.16b, Şekil 4.16c). Benzer şekilde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde, parlak ve açık renkte görünen, bölgesel olarak nüfuz etmiş Ag elementinin varlığı ile belli bölgelerde öbekler halinde HA yoğun bölgeler dikkat çekmektedir (Şekil 4.16d).

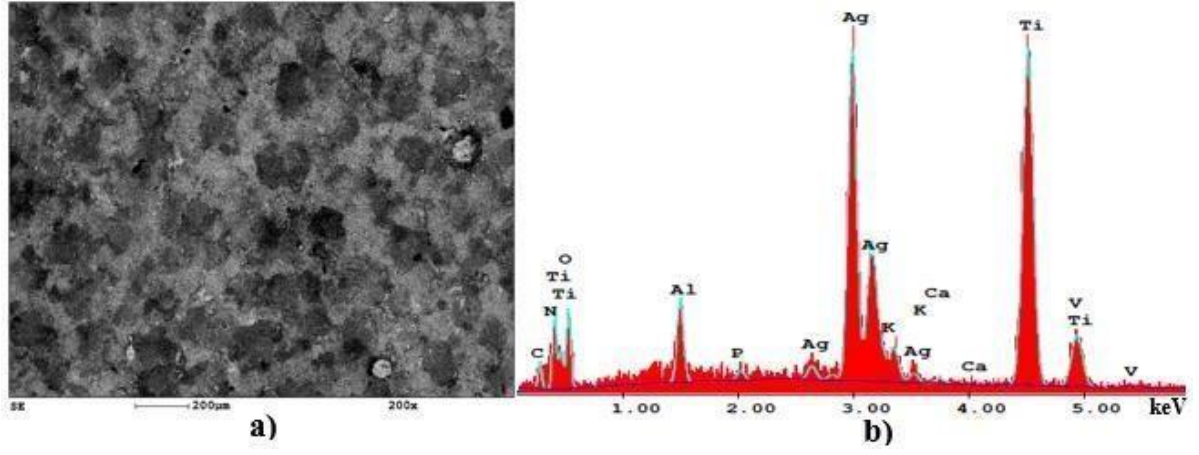
7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde işlenen numune yüzeylerinden elde edilen EDS izleri incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede ana faz Ti elementinin etkin olduğu görülmektedir (Şekil 4.17). Elektrot malzemesinde HA oranı arttıkça Ag iz şiddetinin artarak, beraberinde yüzeyde HA oluşumunu destekleyen Ca ve P iz şiddetleri fark edilmektedir. %90 Ag-%10 HA elektrot ile %80 Ag- %20 HA elektrot ile işlenen numunelerde Ag ve Ti elementlerinin çok yakın iz şiddetinde olduğu ve Ag elementinin ana faz malzeme yüzeyine homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.18, Şekil 4.19). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede Ag elementinin ana faz elementine göre daha yüksek iz şiddet değerlerine çıktığı ve yüzeyin açık parlak renkte bir görünüm sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 4.20).



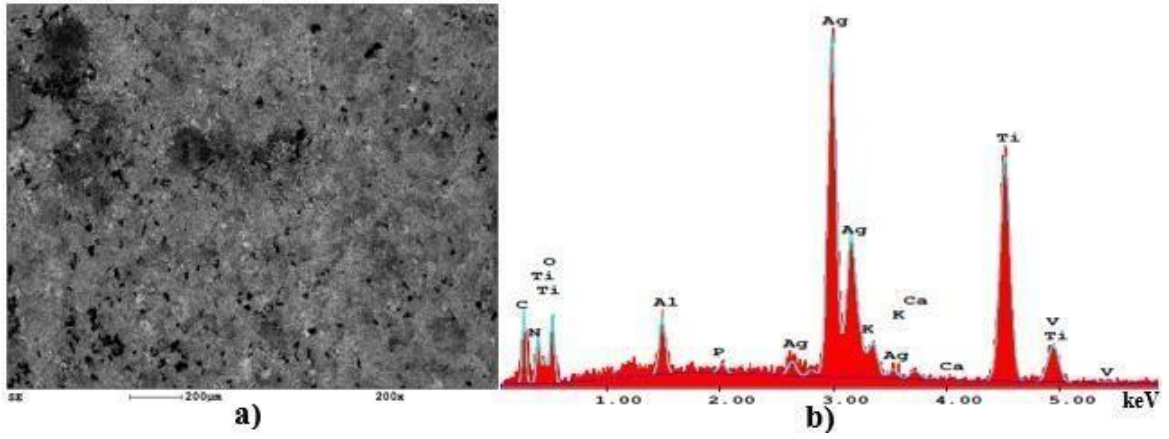
**Şekil 4.16** EKI ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs a)%100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c)%80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.



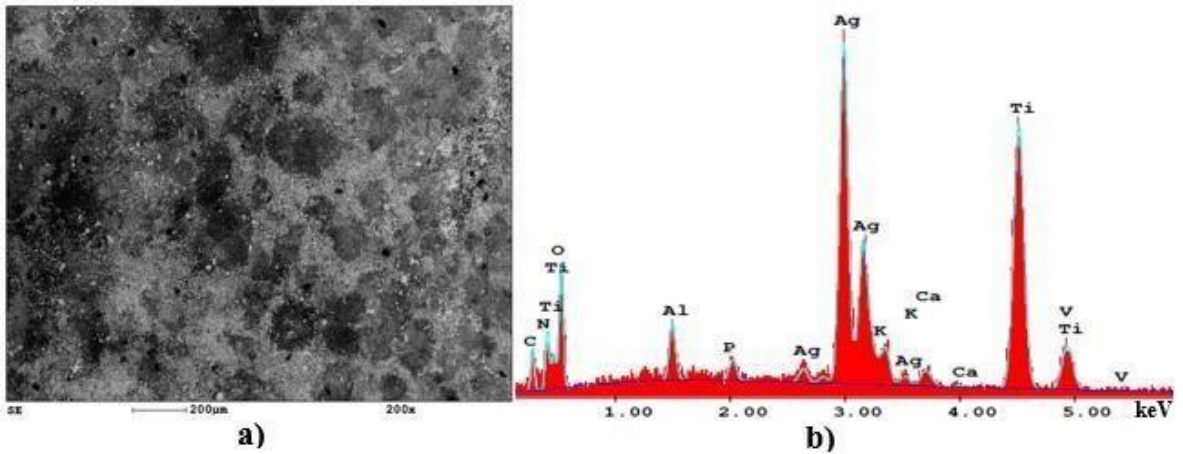
**Şekil 4.17** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.



**Şekil 4.18** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.

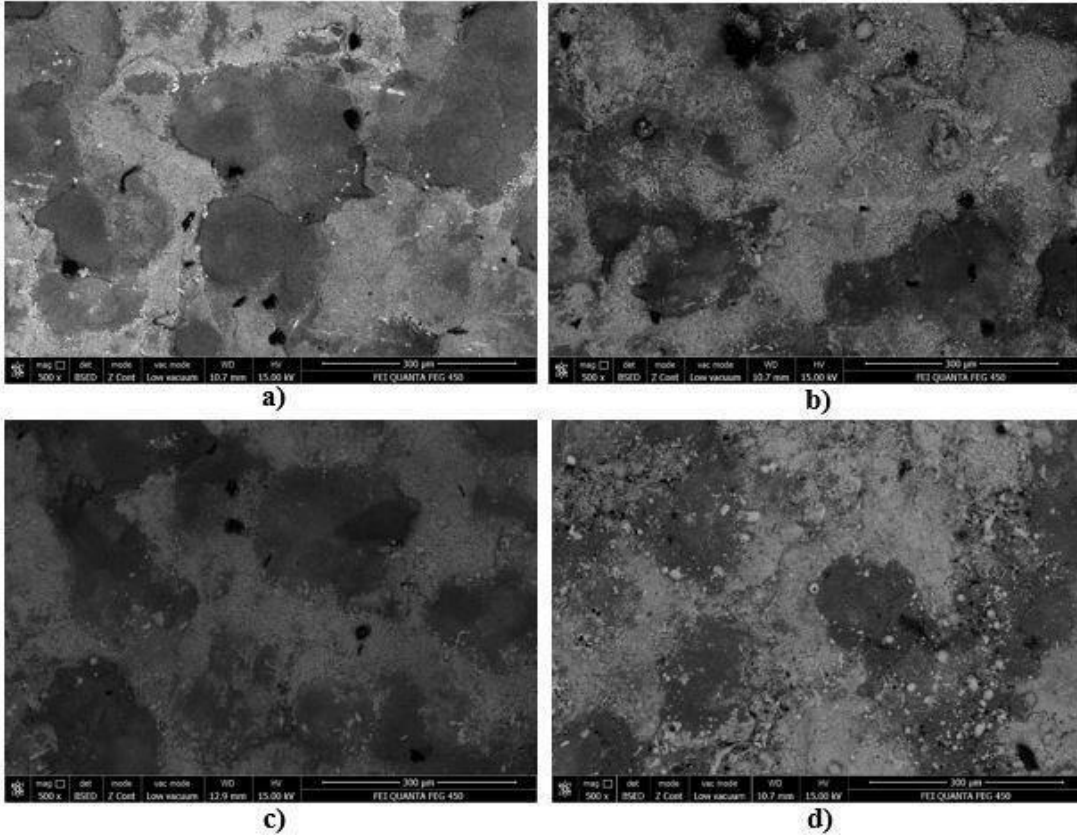


**Şekil 4.19** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.



**Şekil 4.20** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:25µs.

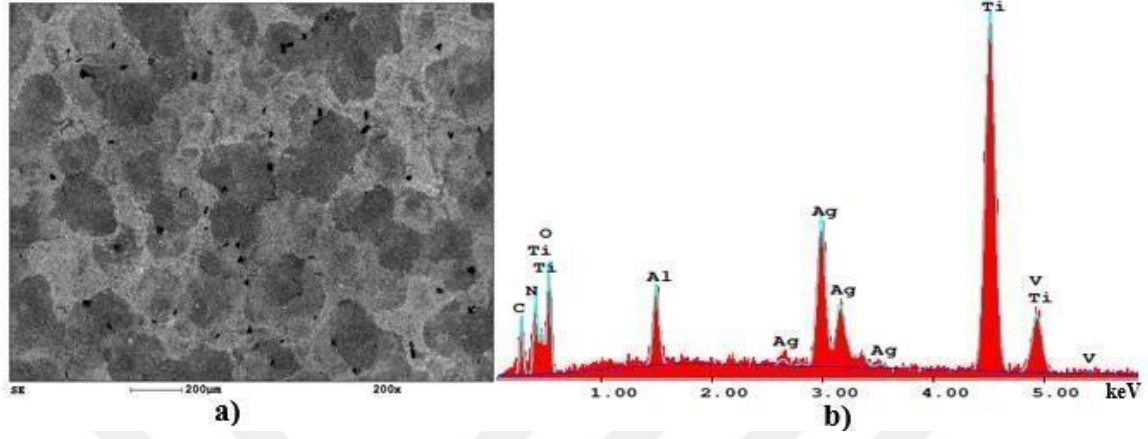
7A darbe akımı, 100 $\mu$ s darbe süresinde, %100 Ag toz katkılı elektrot ile işlenen numunede, darbe süresinin artmasıyla birlikte geniş ve yayvan kraterler ile yüzeyin her yerine yayılmış çatlak ağlarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.21a). %90 Ag-%10 HA takım elektrotu ile işlenen numunede bölgesel olarak yayılmış ve açık ve parlak renkte görünen Ag elementinin varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 4.21b). %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunede ana faz malzeme (Ti) ile birlikte işleme sırasında elektrottan taşınan Ag elementinin yüzeyde homojen olarak yayıldığı görülmektedir (Şekil 4.21c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, apatit tozlarının bir bölümü şekli bozulmadan yüzeye zayıf bağlarla bağlanırken, bir bölümünün kısmi geometrik bozulmaya maruz kalarak yüzeye nüfuz ettiği görülmektedir (Şekil 4.21d).



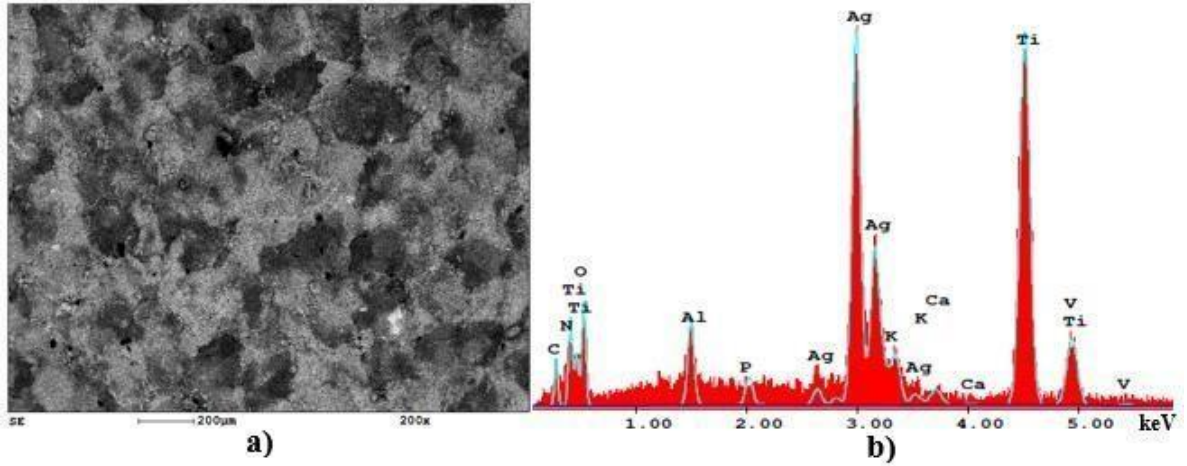
**Şekil 4.21** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100 $\mu$ s a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

7A darbe akımı, 100 $\mu$ s darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin enerji dağılım spektrometresi analizi incelendiğinde, Ti iz şiddetinin Ag iz şiddetini baskılayacak düzeyde arttığı görülmektedir (Şekil 4.22). Elektrottaki HA toz katkısı miktarı arttıkça Ag iz şiddetinin arttığı ve yüzeye daha fazla Ag elementinin nüfuz ettiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.23, Şekil 4.24,

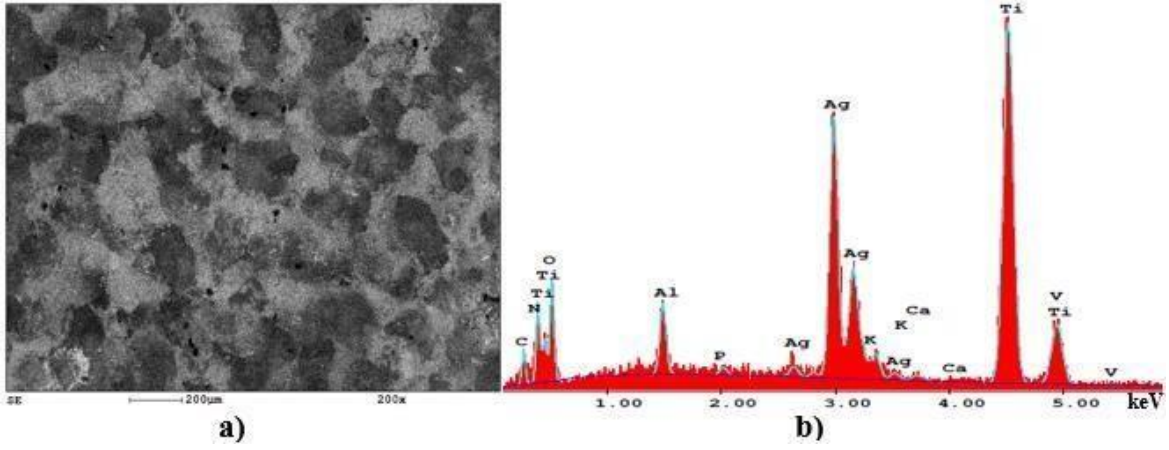
Şekil 4.25). Bu sonuçlar, belirlenen parametrelerde elektrottan ve di-elektrik sıvıdan yüzeye taşınan tozların rastlantısal şekilde taşınmadığını ve kıvrımların oluşum şeklinin ve geometrisinin ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır.



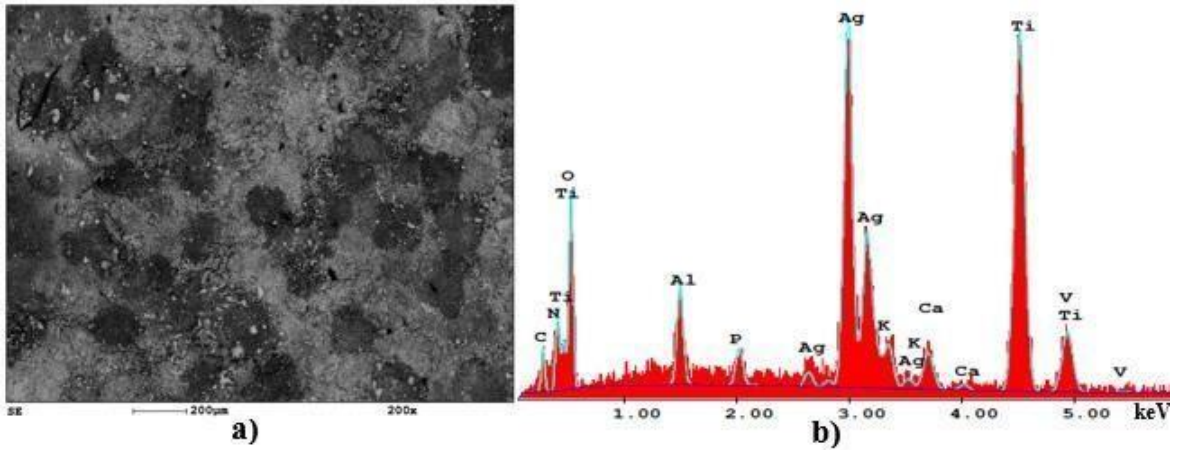
Şekil 4.22 %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.



Şekil 4.23 %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.



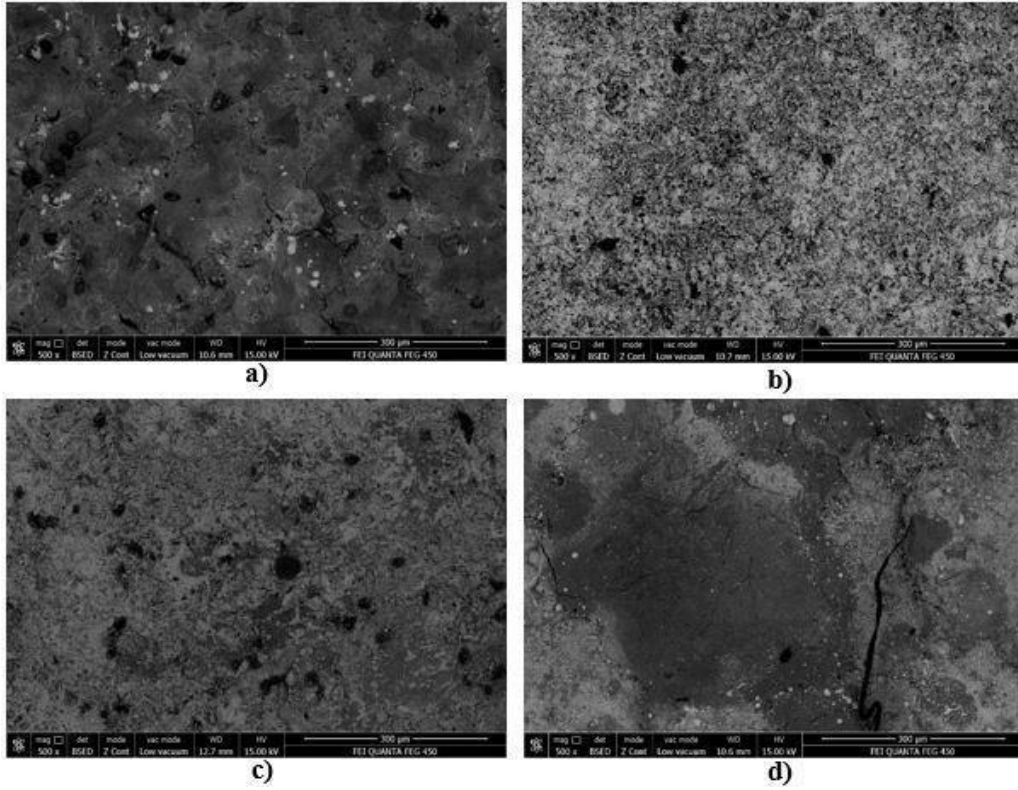
**Şekil 4.24** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.



**Şekil 4.25** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs.

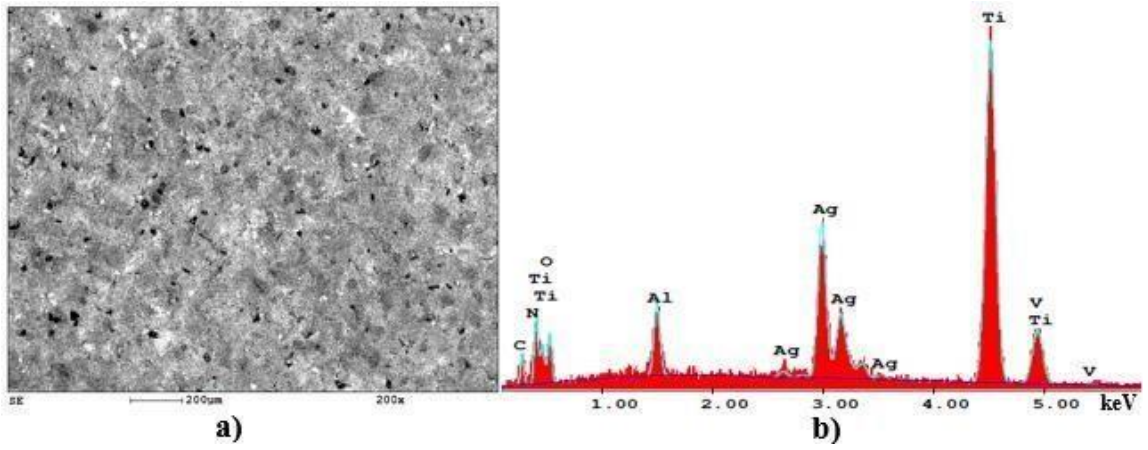
12A darbe akımı, 6µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, koyu gri renkte yüzeye hâkim olan Ti ana faz malzeme ile belli bölgelerde öbekler halinde açık parlak renkte görünen Ag elementinin varlığı göze çarpmaktadır (Şekil 4.26a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyi açık ve parlak renkle kaplanmış olup, Ag elementinin yüzeye homojen olarak nüfuz ederek kaplama tabakası oluşturduğu ve yüzeyde fazla sayıda gözenek oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.26b). Benzer şekilde %80 Ag-%20 HA toz katkıli elektrot ile işlenen numunede, yüzeyin tamamına yayılmış Ag elementi ile öbekler halinde gruplanmış HA tozlar görülmektedir (Şekil 4.26c). Elektrottaki Ag miktarı arttıkça yüzeye daha fazla malzeme taşınımı olması beklenirken, tam tersi Ag miktarı azaldıkça yüzeyde daha fazla Ag elementi biriktiği görülmektedir. Bu durum, işleme sırasında yüksek elektriksel alan oluşturarak kırılan

ikincil kıvrımların oluşması ile açıklanabilir. Genel olarak, elektrottaki HA toz katkısı arttıkça ikincil kıvrımların da arttığı ve Ag elementinin yüzeye daha fazla nüfuz ettiği öngörülebilir. %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, krater çeperlerinde belirgin olarak görülen çatlak ağlarının oluşumu ile yüzeye tam olarak nüfuz etmeden zayıf bağlarla bağlanmış küresel formdaki HA tozların varlığı görülmektedir (Şekil 4.26d).

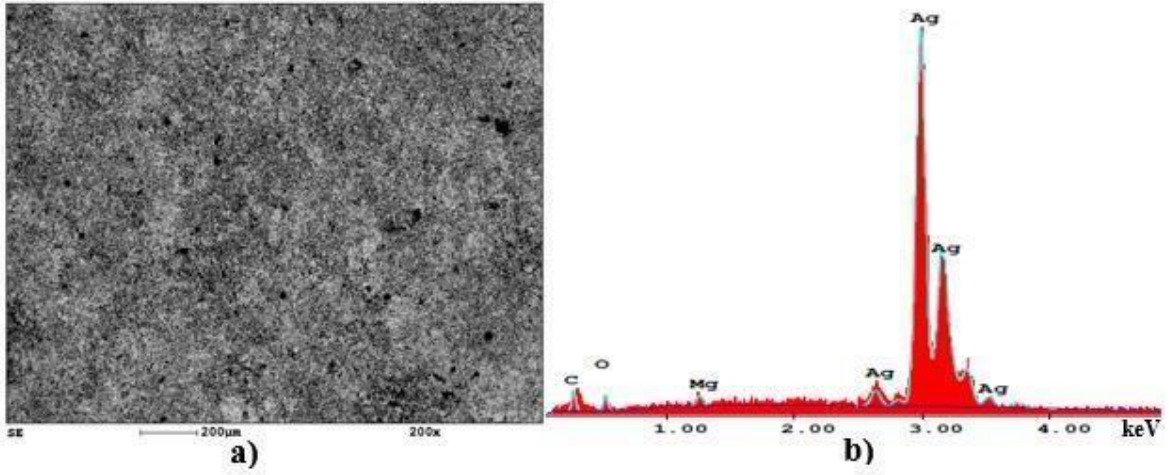


**Şekil 4.26** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı: 12A, darbe süresi: 6µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d) %70Ag-%30HA elektrot.

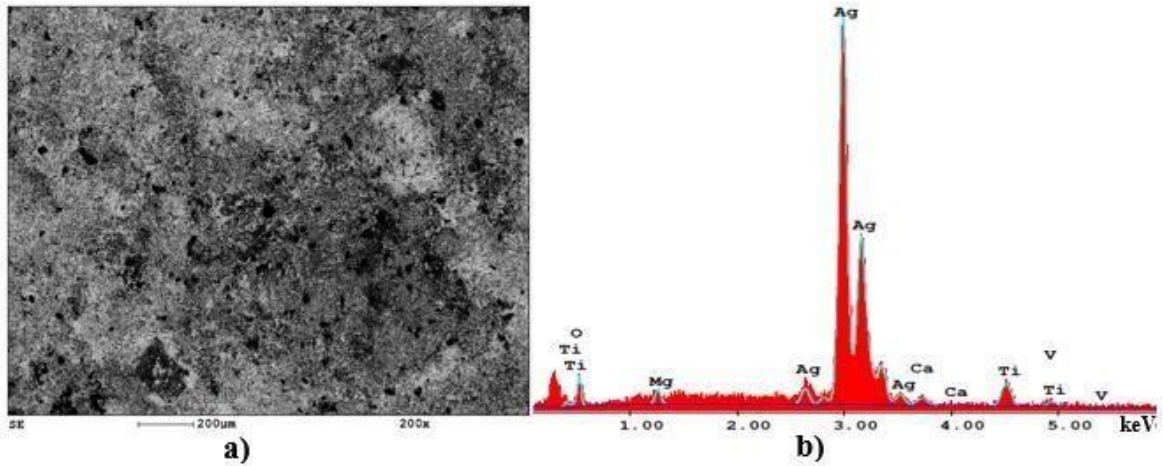
%100 Ag elektrot ile işlenen numunenin enerji dağılım spektrometresi analizi incelendiğinde, yüzeyde ana faz malzeme olan Ti elementinin iz şiddetinin daha baskın olduğu ve bunu takiben Ag elementinin iz şiddetinin yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.27). %90 Ag-%10 HA elektrot ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerin EDS analizi incelendiğinde sadece Ag pikinin görülmesi, yüzeyinin tamamının Ag ile kaplandığını ve işleme sırasında oluşan ikincil kıvrımların etkisini doğrulamaktadır (Şekil 4.28, Şekil 4.29). %70 Ag-%30 HA elektrot kullanıldığında, yüzeyde ana faz malzeme (Ti) ile birlikte Ca ve P iz şiddetlerinin tekrar oluşması yüzeye apatit tozlarının nüfuz ettiğini göstermiştir (Şekil 4.30).



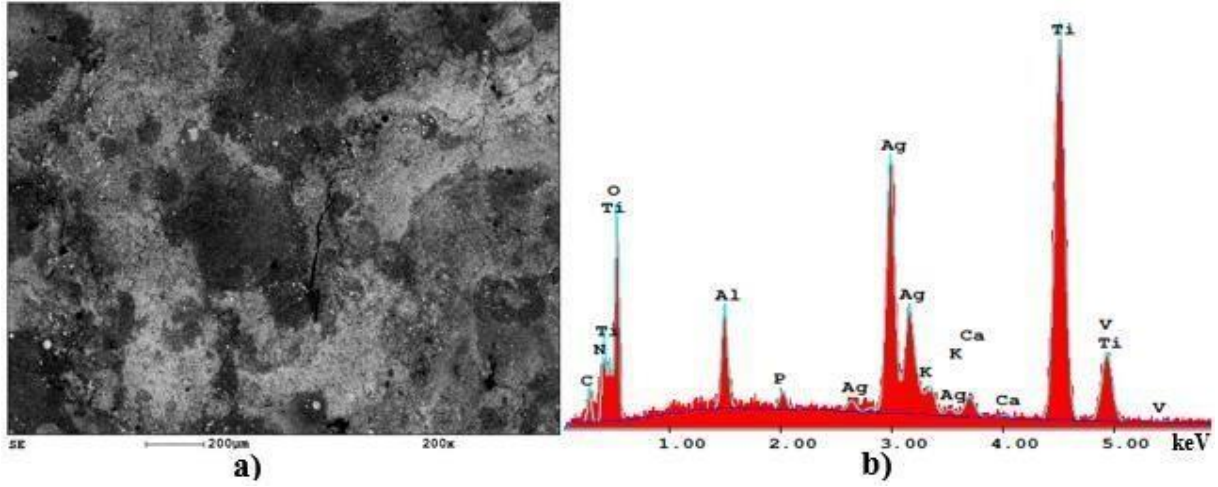
**Şekil 4.27** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.



**Şekil 4.28** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.



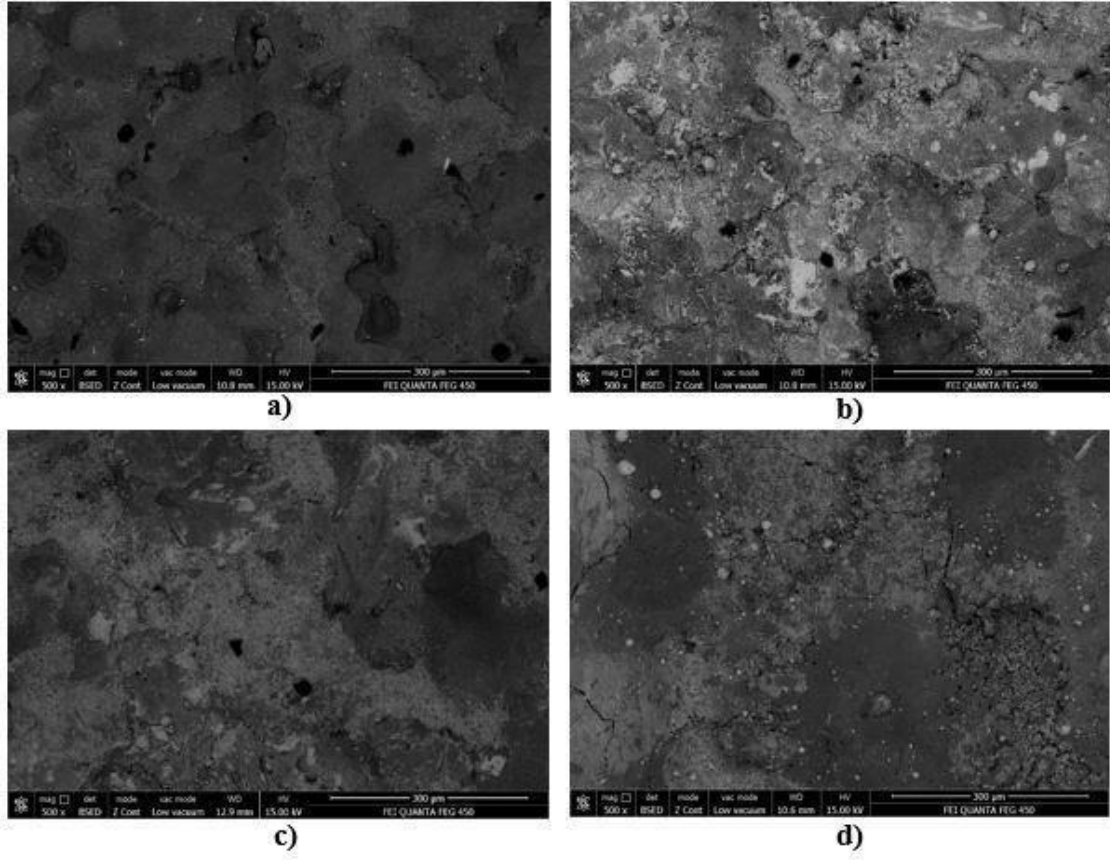
**Şekil 4.29** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.



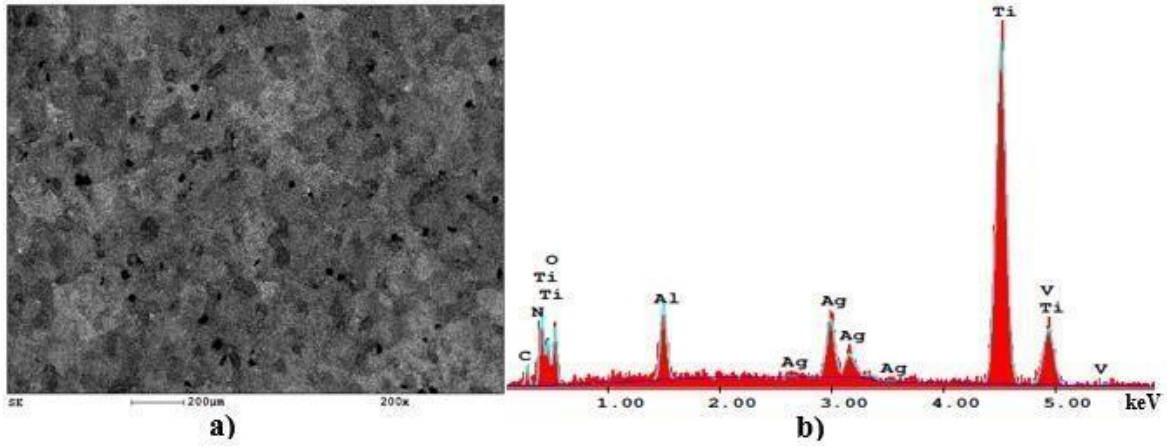
**Şekil 4.30** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs.

12A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde, koyu gri renkte hâkim olan Ti ana faz malzeme ile noktasal olarak yüzeye nüfuz eden Ag elementi dikkat çekmiştir (Şekil 4.31a). %90 Ag-%10 HA elektrot ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerde, krater çeperlerinde belirginleşen Ag elementinin öbekler halinde gruplandığı görülmektedir (Şekil 4.31b, Şekil 4.31c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde yoğun çatlak ağları oluştuğu ve çatlak kenarlarında küresel geometrisi bozulmadan yüzeye zayıf bağlarla bağlanmış apatit tozlarının varlığı göze çarpmaktadır (Şekil 4.31d).

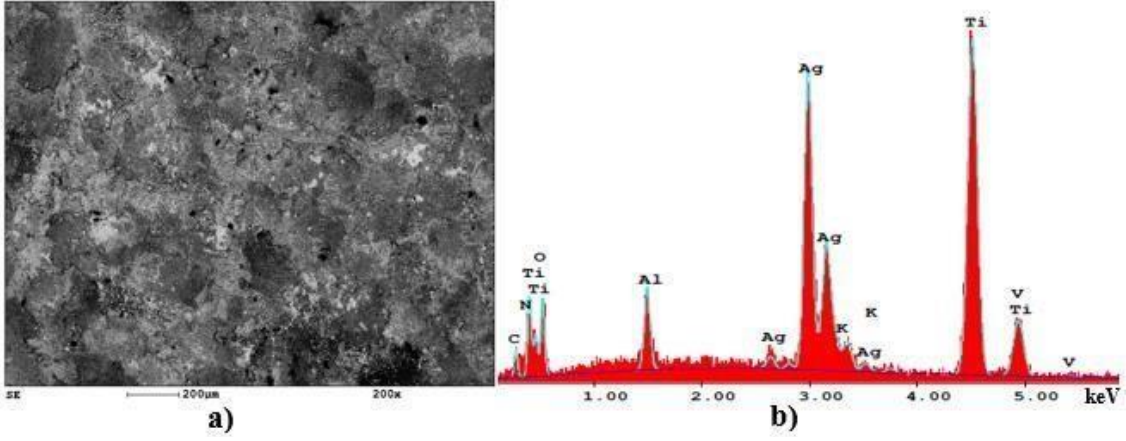
12A darbe akımı, 25µs darbe süresindeki EDS izleri incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede ana faz malzeme olan Ti iz şiddetinin, Ag iz şiddetini baskıladığı görülmektedir (Şekil 4.32). %90 Ag-%10 HA elektrot ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerde, Ag ve Ti izlerinin yaklaşık aynı şiddette olduğu; fakat Ca ve P iz şiddetlerinin oluşmadığı görülmektedir (Şekil 4.33, Şekil 4.34). Bu durum, 12A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde bu iki elektrot ile işlenen numunelerde yüzeyde herhangi bir HA kaplama tabakasının oluşmadığı şeklinde yorumlanabilir. Elektrottaki HA toz katkısının artırılması ile EDS analizinde, Ag iz şiddeti ile birlikte tekrar görülen Ca ve P izleri, yüzeye apatit tozlarının nüfuz ettiğini kanıtlar niteliktedir (Şekil 4.35).



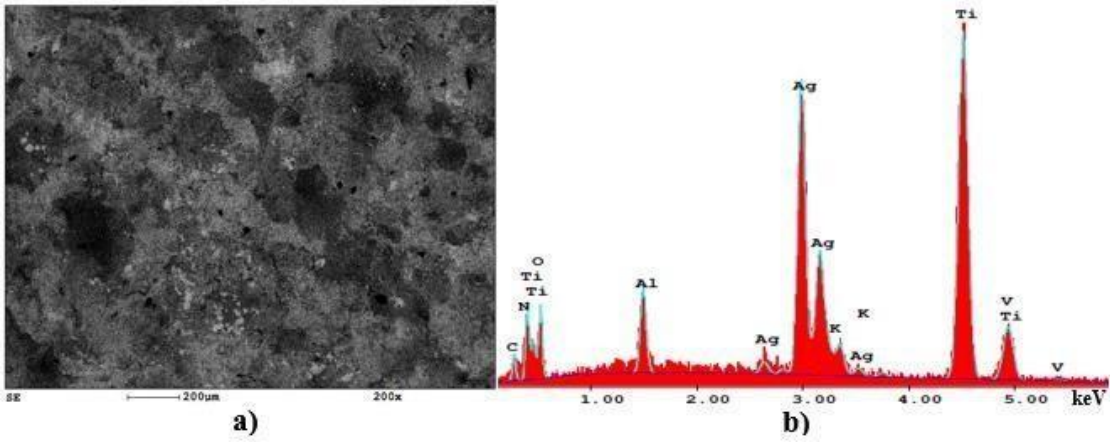
**Şekil 4.31** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b)%90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.



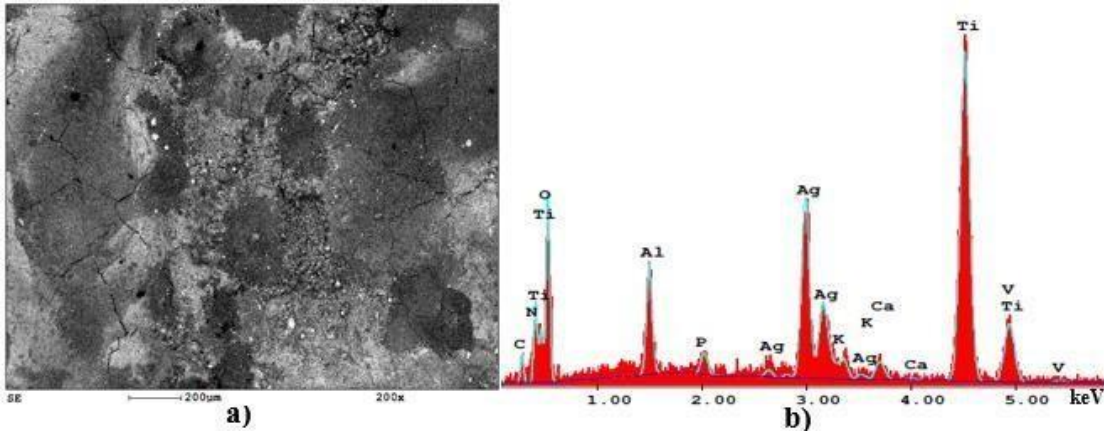
**Şekil 4.32** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.



**Şekil 4.33** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.

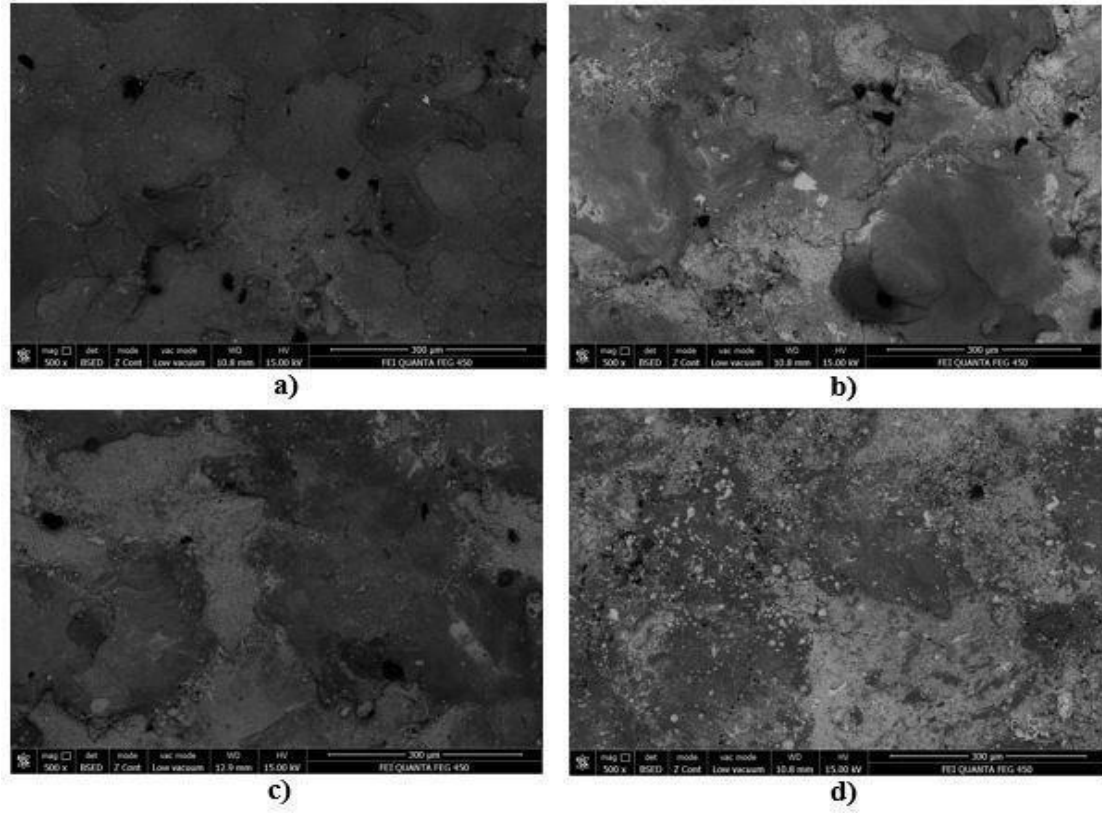


**Şekil 4.34** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.



**Şekil 4.35** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:25µs.

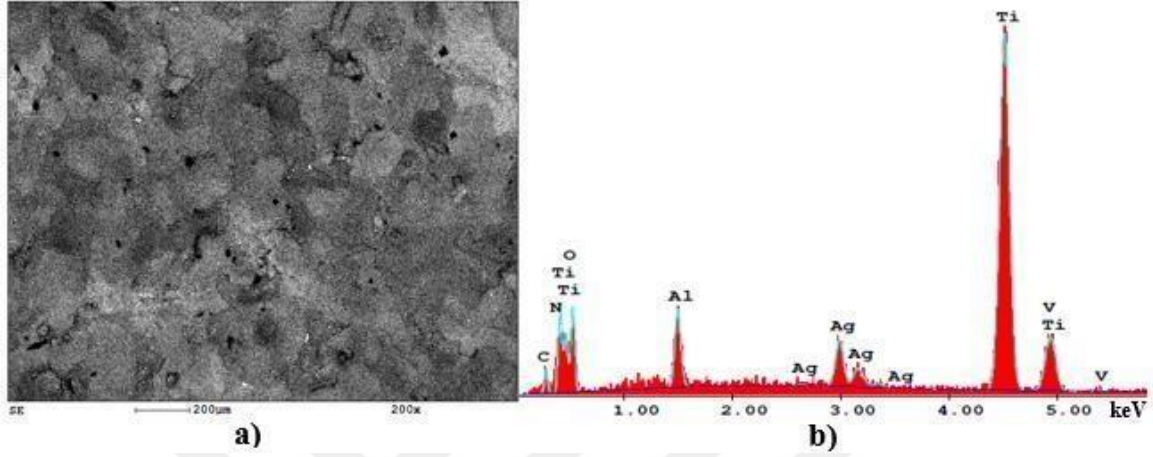
12A darbe akımı, 100µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, darbe süresinin artması ile kraterlerin yayvanlaştığı ve yüzeyin tamamında radyal çatlak ağlarının oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.36a). %90 Ag-%10 HA ve %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerde, belli bölgelerde gruplanmış Ag elementleri ile özellikle krater çeperlerinde oluşmuş çatlaklar göze çarpmaktadır (Şekil 4.36b, Şekil 4.36c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, küresel geometrisi bozulmamış HA toz taneleri ile birlikte, işleme sırasında ikincil kıvılcımların etkisiyle saçılarak yüzeye nüfuz etmiş Ag elementinin varlığı görülmektedir (Şekil 4.36d).



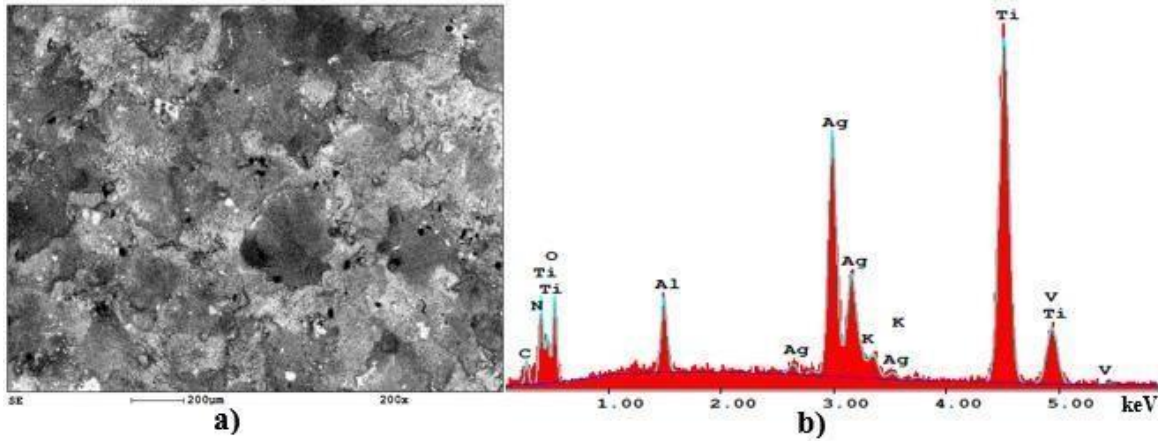
**Şekil 4.36** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

12A darbe akımı, 100µs darbe süresindeki EDS analizleri incelendiğinde, Ag yoğunluğu en fazla olan elektrot ile işlenmiş numunede, ana faz malzeme olan Ti iz şiddetinin Ag iz şiddetine kıyasla daha baskın olduğu görülmektedir (Şekil 4.37). %90 Ag-%10 HA elektrot ve %80Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerin EDS izlerine bakıldığında Ca ve P izlerinin görülmemesi, yüzeye HA tozlarının nüfuz etmediğini göstermektedir (Şekil 4.38, Şekil 4.39). Elektrottaki toz katkısı miktarı %70 Ag-%30 HA olarak belirlendiğinde, yüzeyde ana faz

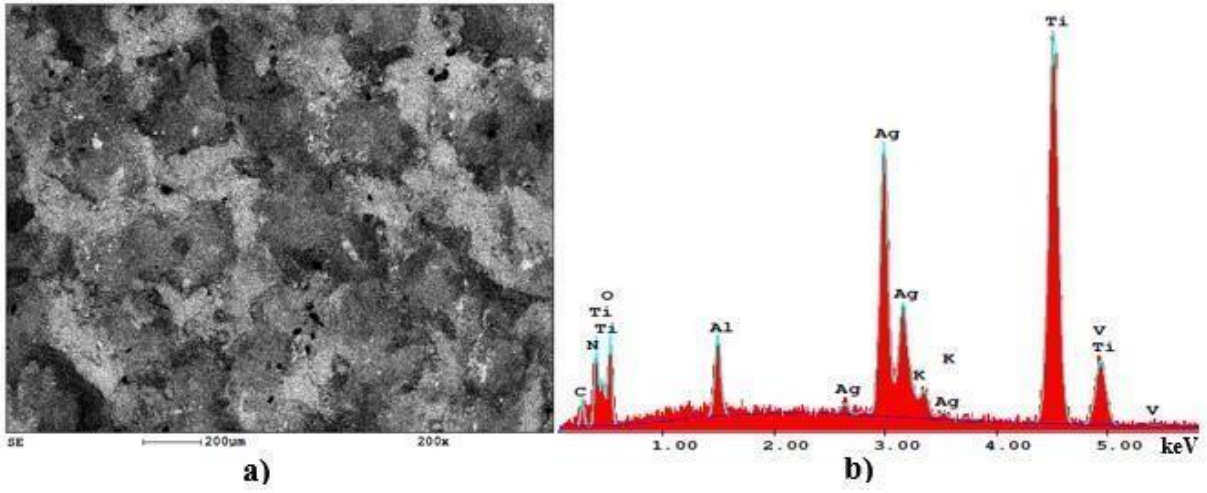
malzeme olan Ti elementi ile Ag iz şiddetinin yaklaşık olarak aynı olması, Ag tozlarının yüzeye homojen şekilde nüfuz ettiğini gösterirken, Ca ve P izlerinin tekrar görülmesi yüzeyde HA nüfuziyetinin de olduğunu göstermektedir (Şekil 4.40). Ag tozlarının yüzeye homojen olarak nüfuz etmesini sağlayan etkenin ikincil kıvılcımlar olduğu öngörülebilir.



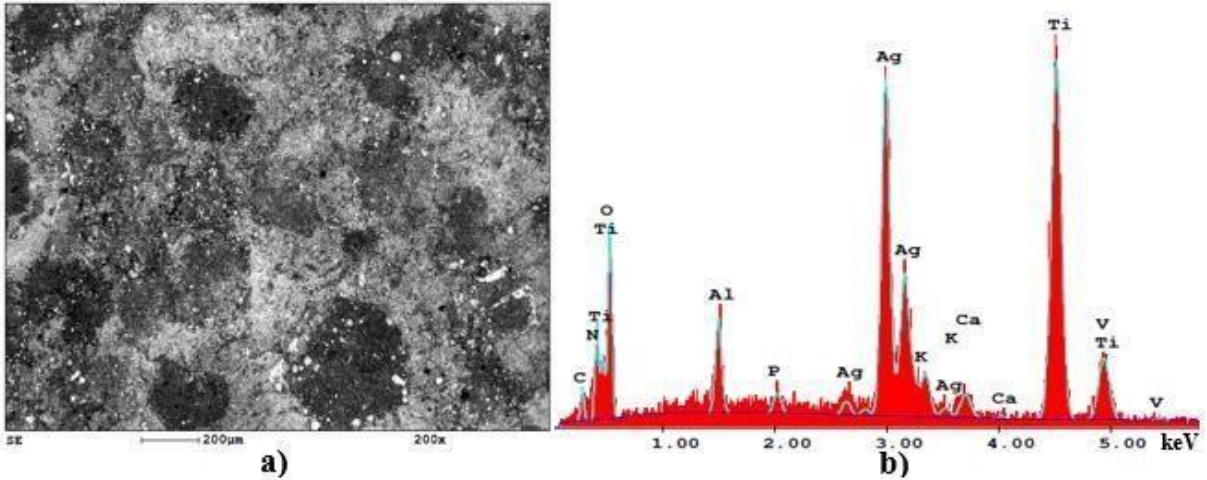
**Şekil 4.37** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100μs.



**Şekil 4.38** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100μs.



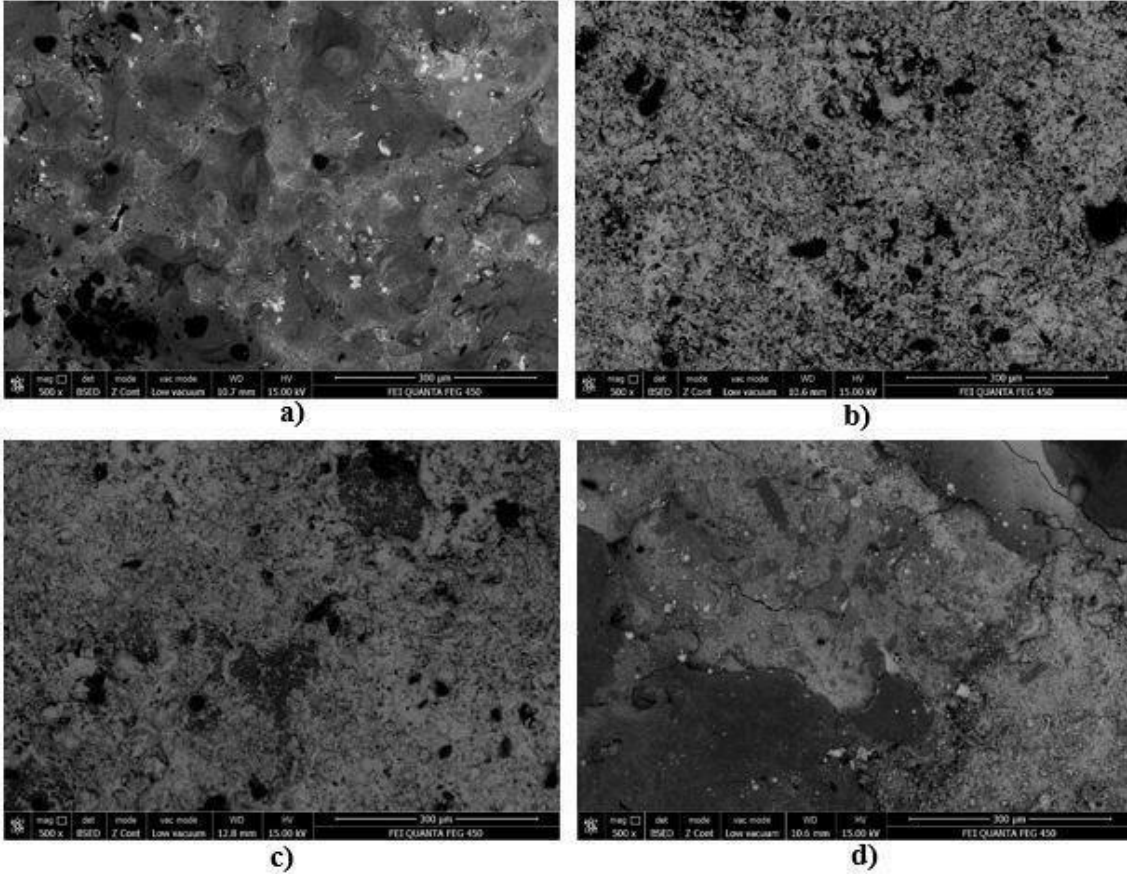
**Şekil 4.39** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs.



**Şekil 4.40** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:100µs.

6µs darbe süresi, 22A darbe akımında, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde, geometrisi nispeten bozulmuş Ag tozlarının noktasal nüfuziyet sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle krater çeperlerinde ince çatlakların oluştuğu dikkat çekmiştir. (Şekil 4.41a). 6µs darbe süresi, 12A darbe akımında %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numune (Şekil 4.26b) ile 6µs darbe süresi, 22A darbe akımında aynı elektrot ile işlenen numuneler kıyaslandığında, benzer bir görüntü elde edildiği ve yüzeyin tamamen Ag elementi ile kaplandığı görülmüştür (Şekil 4.41b). Benzer şekilde %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzeyinde de Ag tozlarının yoğun olduğu ve irili ufaklı gözeneklerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.41c). Bu iki analiz sonucu, işleme sırasında yüksek elektriksel alanın

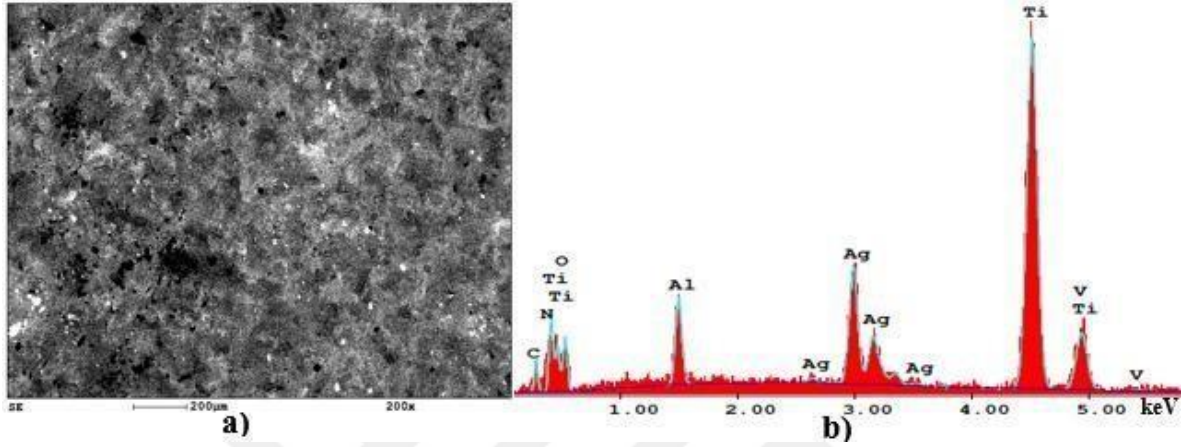
kırılması ve birçok farklı kola ayrılması şeklinde sonuçlanan ikincil kıvılcımların etkisini ortaya koymuştur. %70 Ag-%30 HA elektrot kullanıldığında, yüzeyde koyu rengin hâkim olduğu bölgelerde ana faz malzeme olan Ti elementi ile birlikte çatlakların kenarlarına yığılmış Ag elementinin varlığı görülmektedir. Ayrıca belli bölgelerde öbekler halinde HA birikintilerine rastlanmıştır (Şekil 4.41d).



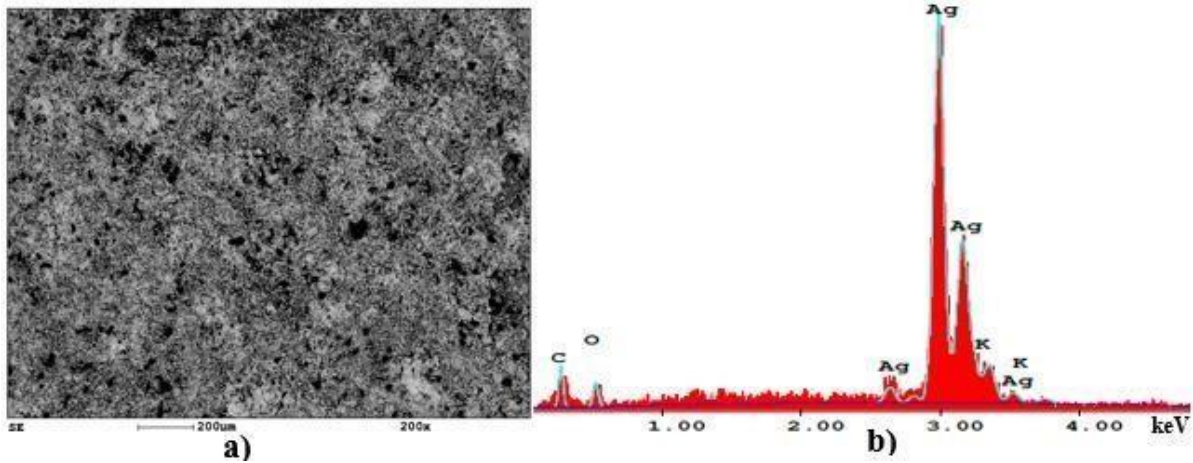
**Şekil 4.41** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d) %70Ag-%30HA elektrot.

En yüksek akım değeri olan 22A darbe akımı ile en düşük darbe süresi olan 6µs parametrelerindeki EDS izleri incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, ana faz malzeme olan Ti elementinin iz şiddetinin Ag elementine kıyasla baskın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ana faz malzeme alaşımında bulunan Al elementi ile Ag elementinin EDS izlerinin yaklaşık aynı şiddette olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 4.42). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin EDS analizinde Ca ve P iz şiddetinin hiç oluşmaması, yüzeye HA tozların nüfuz etmediğini gösterirken, Ag elementinin iz şiddetinin yükselmesi ile yüzeyin tamamen Ag ile kaplandığı görülmektedir (Şekil 4.43). Benzer şekilde %80 Ag-%20 HA

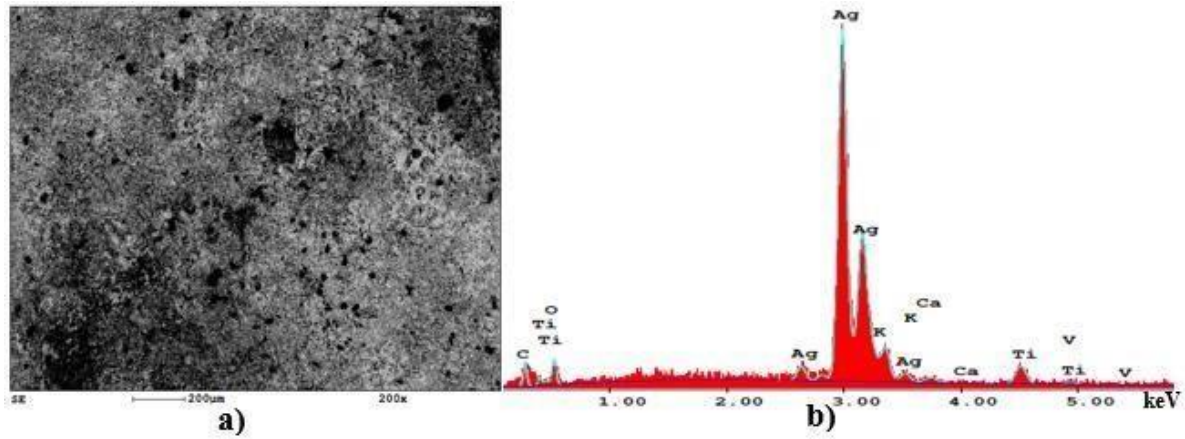
elektrot ile işlenen numunede en yüksek iz şiddetinin Ag olması, işleme sırasında Ag elementinin oldukça iyi nüfuz ettiğini göstermiştir. Ayrıca Ca ve P izlerinin de görülmesi, elektrot veya di-elektrik sıvıdan yüzeye taşınan apatit tozlarının varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 4.44). HA toz katkısının artması ile Ti iz şiddetinin tekrar yükseldiği ve Ag iz şiddetini baskıladığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.45).



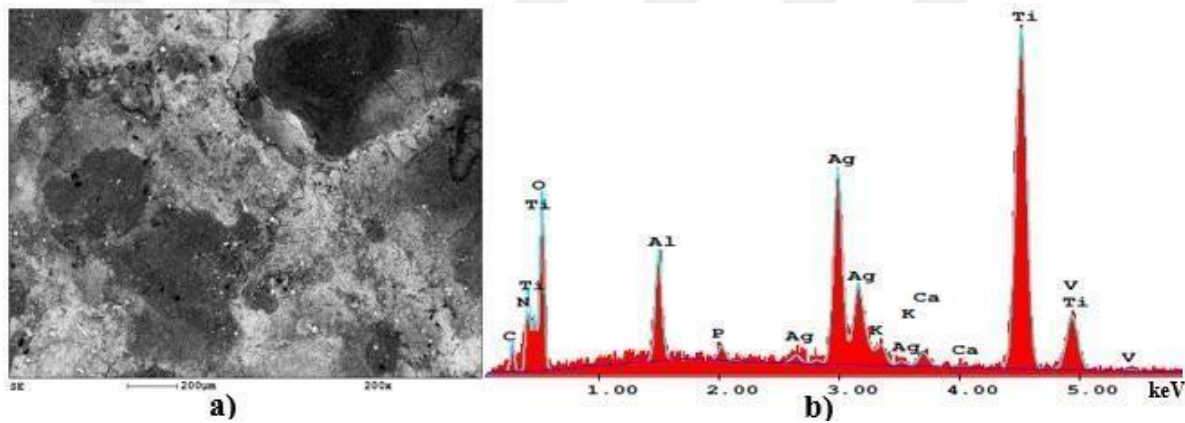
**Şekil 4.42** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs.



**Şekil 4.43** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs.

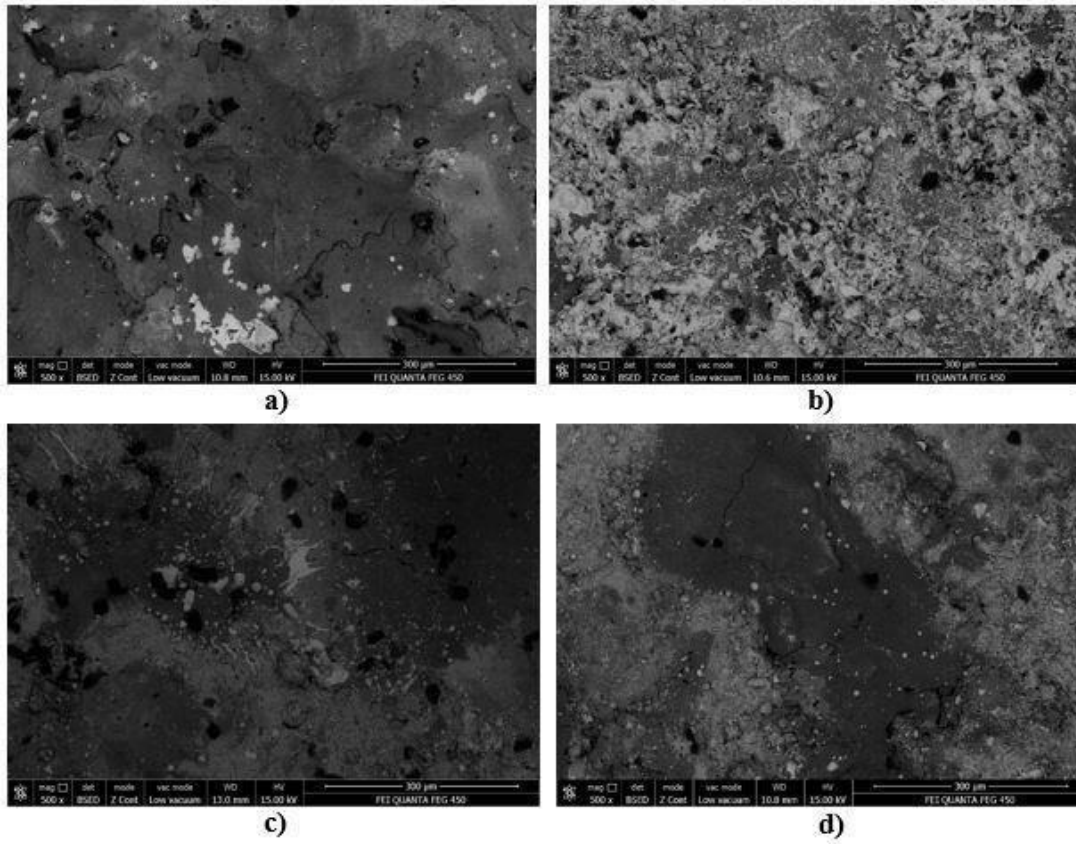


**Şekil 4.44** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri. Darbe akımı:22A, Darbe süresi:6µs



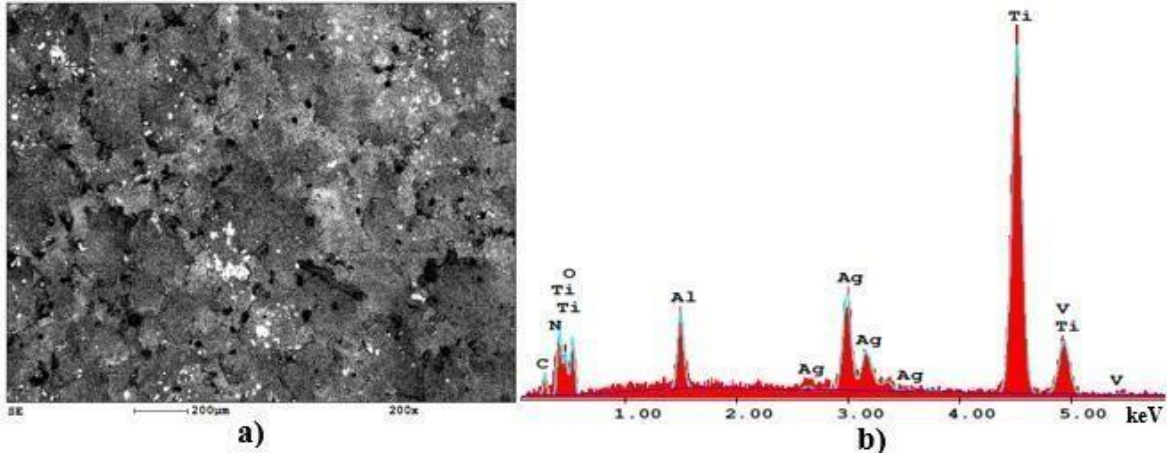
**Şekil 4.45** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs.

22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede koyu rengin hâkim olduğu ana faz malzeme olan Ti elementi ile belli bir bölgede öbek halinde toplanmış Ag birikintilerine rastlanmıştır (Şekil 4.46a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, ikincil kıvılcımların etkisi ile oluşmuş farklı boyutlardaki gözenekler ve neredeyse yüzeyin tamamını kaplamış Ag tozlarının homojen şekilde dağıldığı dikkat çekmiştir (Şekil 4.46b). %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunede, belli bölgelere homojen şekilde nüfuz etmiş, belli bölgelerde ise topaklanarak kalmış Ag tozları görülmektedir (Şekil 4.46c). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, küresel geometrisi bozulmadan yüzeye zayıf bağlarla bağlanmış apatit tozları ile birlikte derin çatlak ağlarının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca daha önceki analiz görüntülerine benzer şekilde, işleme sırasında oluşan ikincil kıvılcımların etkisi yüzeyin kenar bölümlerinde fark edilebilmektedir (Şekil 4.46d).

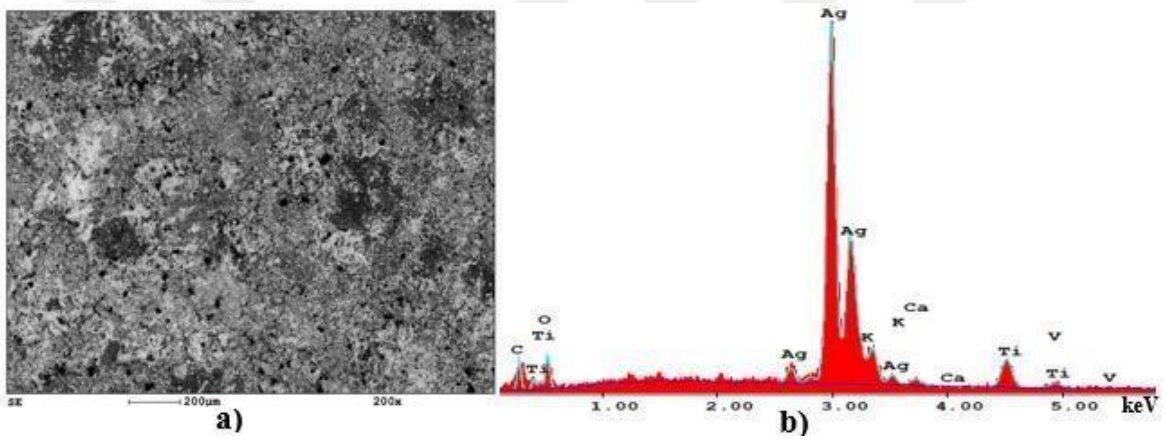


**Şekil 4.46** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d)%70Ag-%30HA elektrot.

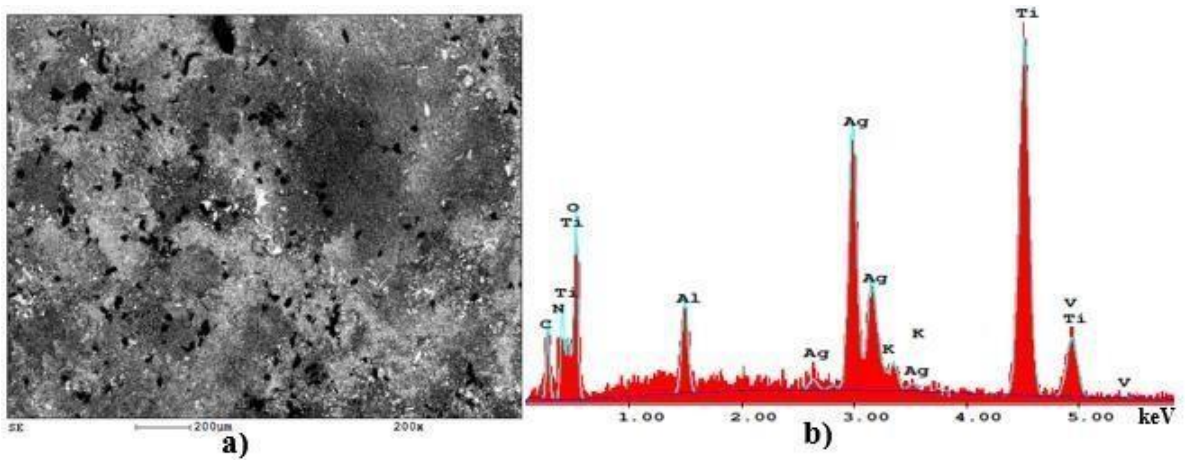
22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin EDS analizinde, Ti iz şiddetinin Ag iz şiddetine kıyasla daha baskın olması, yüzeyde yoğun bir Ag kaplamasının oluşmadığını göstermiştir (Şekil 4.47). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, ana faz malzeme olan Ti iz şiddetinin hiç oluşmaması ve Ag iz şiddetinin yükselmesi, yüzeyde Ag tozlarının homojen bir dağılım sergilediğini ortaya koymuş ve ikincil kırılcımların etkisini doğrulamıştır (Şekil 4.48). %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenmiş yüzeyin EDS izleri incelendiğinde, Ag tozlarının yüzeyde homojen bir kaplama tabası oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuca ek olarak, Ca ve P iz şiddetlerinin görülmemesi, bu parametre değerinde yüzeyde HA kaplama tabakası oluşmadığını göstermiştir (Şekil 4.49). %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, Ag iz şiddeti ile birlikte Ca ve P iz şiddetleri tekrar görülmüş ve elektrottaki HA toz katkısının artmasıyla, işleme sırasında yüzeye Ag tozu ile birlikte apatit nüfuziyeti de gerçekleşmiştir (Şekil 4.50).



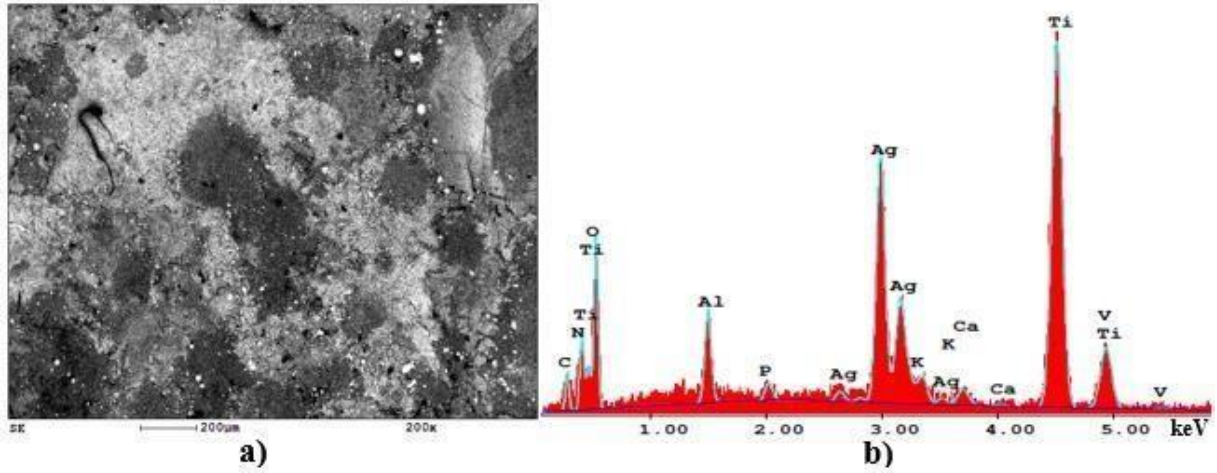
**Şekil 4.47** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.



**Şekil 4.48** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.



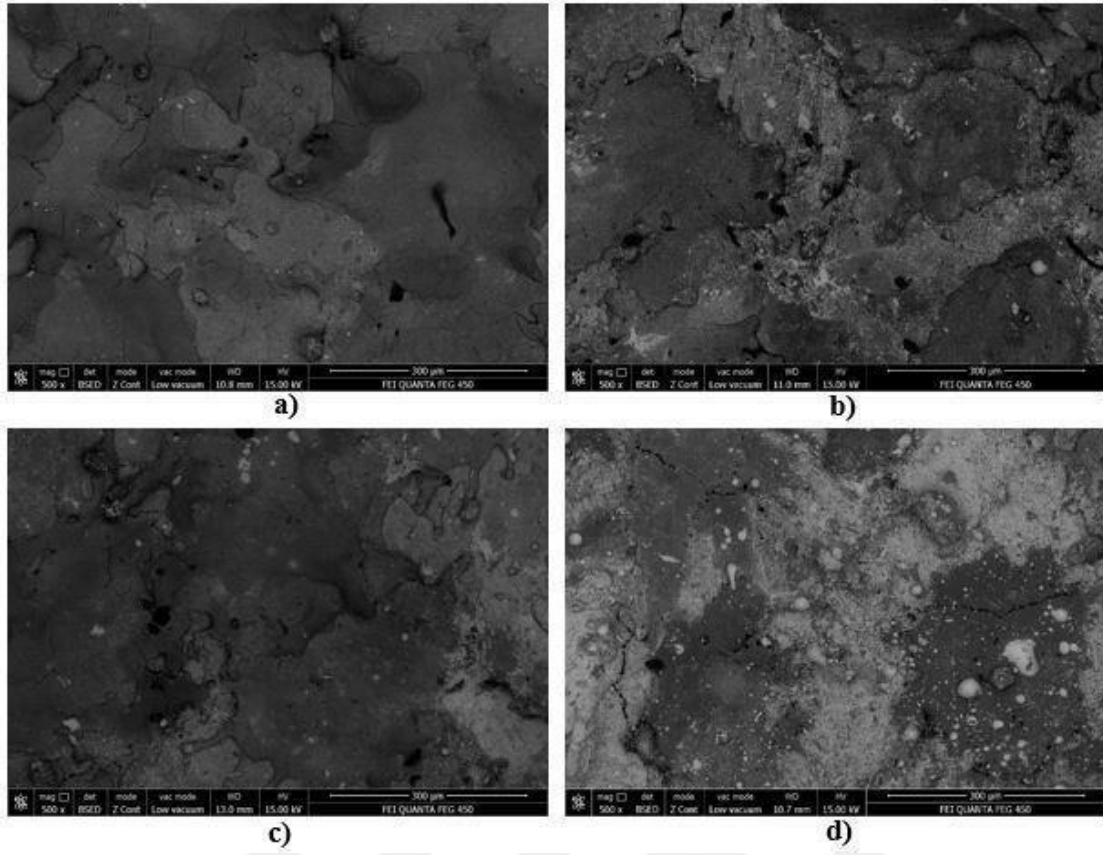
**Şekil 4.49** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.



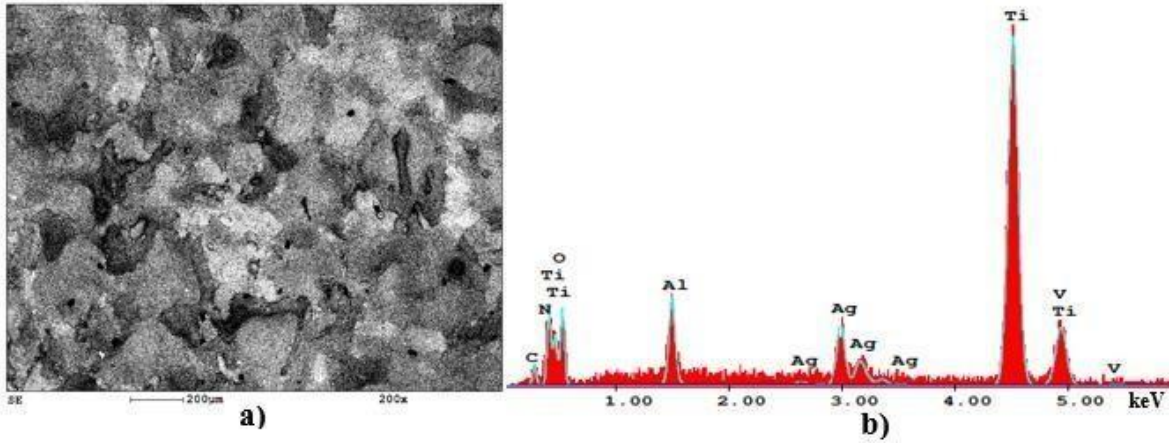
**Şekil 4.50** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs.

En yüksek akım değeri olan 22A ile en yüksek darbe süresi olan 100µs işleme koşullarında, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, krater çeperlerinde yoğunlaşmış çatlak ağları ile işleme sırasında yüksek noktasal sıcaklıkların etkisiyle eriyip küresel formda tekrar katılşan ana faz malzeme olan Ti dikkat çekmektedir. Noktasal olarak yüzeye nüfuz etmiş açık parlak renkte görünen bölgelerde ise Ag tozlarının varlığı görülmektedir (Şekil 4.51a). Elektrottaki Ag toz katkısının azaltılması ile Ag tozlarının yüzeye daha homojen nüfuz ettiği, belli bölgelerde ise geometrik şeklini bozmadan zayıf bağlarla bağlanarak noktasal nüfuziyet gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.51b, Şekil 4.51c). %70 Ag-% 30 HA elektrot ile işlenen numunede, derin ve geniş çatlak ağları ile birlikte küresel geometrideki apatit kalıntıları dikkat çekmektedir. Açık parlak renkte görünen bölümlerde ise işleme sırasında elektrottan veya di-elektrik sıvıdan yüzeye nüfuz eden Ag tozlarının hâkim olduğu söylenebilir (Şekil 4.51d).

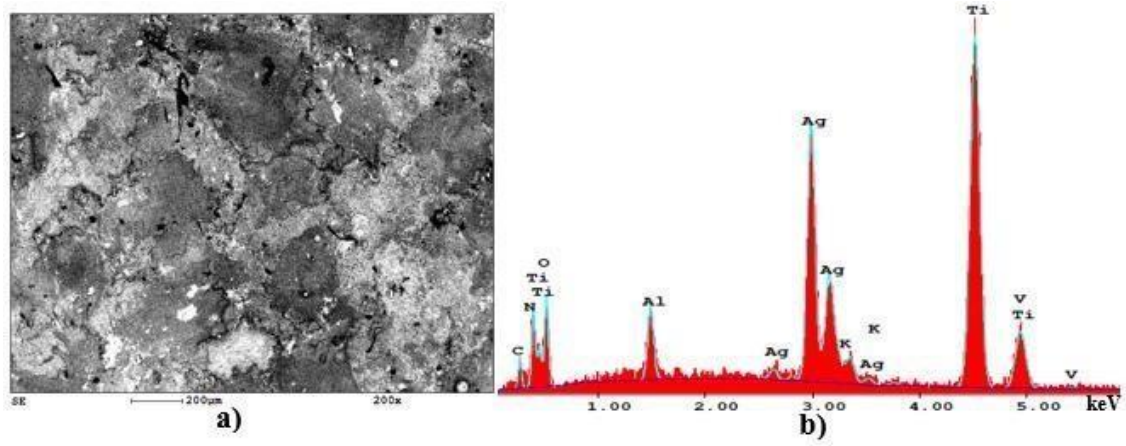
22A darbe akımı, 100µs darbe süresindeki EDS izleri incelendiğinde, en düşük Ag iz şiddeti %100 Ag elektrot ile işlenen numunede gözlemlenirken (Şekil 4.52), elektrottaki Ag oranı azaldıkça Ag iz şiddeti artmış ve yüzeye daha fazla Ag taşınımı gerçekleşmiştir (Şekil 4.53, Şekil 4.54). Ayrıca %10 ve %20 HA toz katkılı elektrotların EDS analizlerinde Ca ve P izleri görülmezken (Şekil 4.53, Şekil 4.54), %30 HA toz katkılı elektrotta Ca ve P iz şiddetlerinin oluştuğu, yani HA toz katkısının artması ile yüzeye apatit tozların nüfuz ettiği görülmektedir (Şekil 4.55).



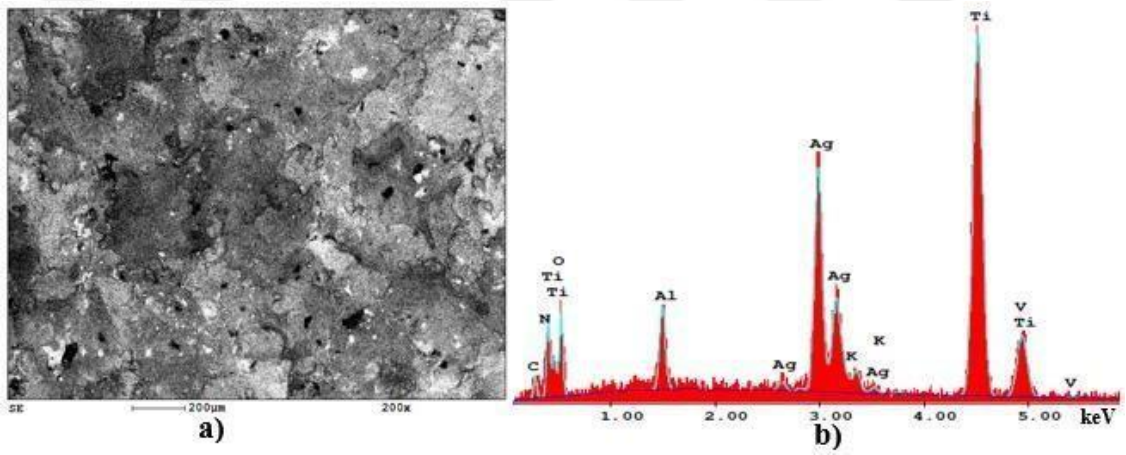
**Şekil 4.51** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki SEM-BSED görüntüleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs a) %100Ag elektrot b) %90Ag-%10HA elektrot c) %80Ag-%20HA elektrot d) %70Ag-%30HA elektrot.



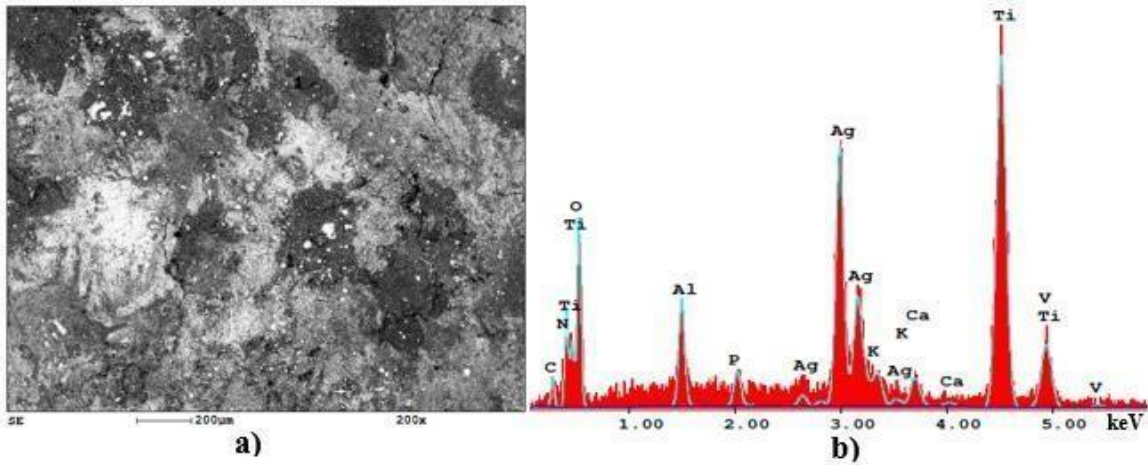
**Şekil 4.52** %100Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.



**Şekil 4.53** %90Ag-%10HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.

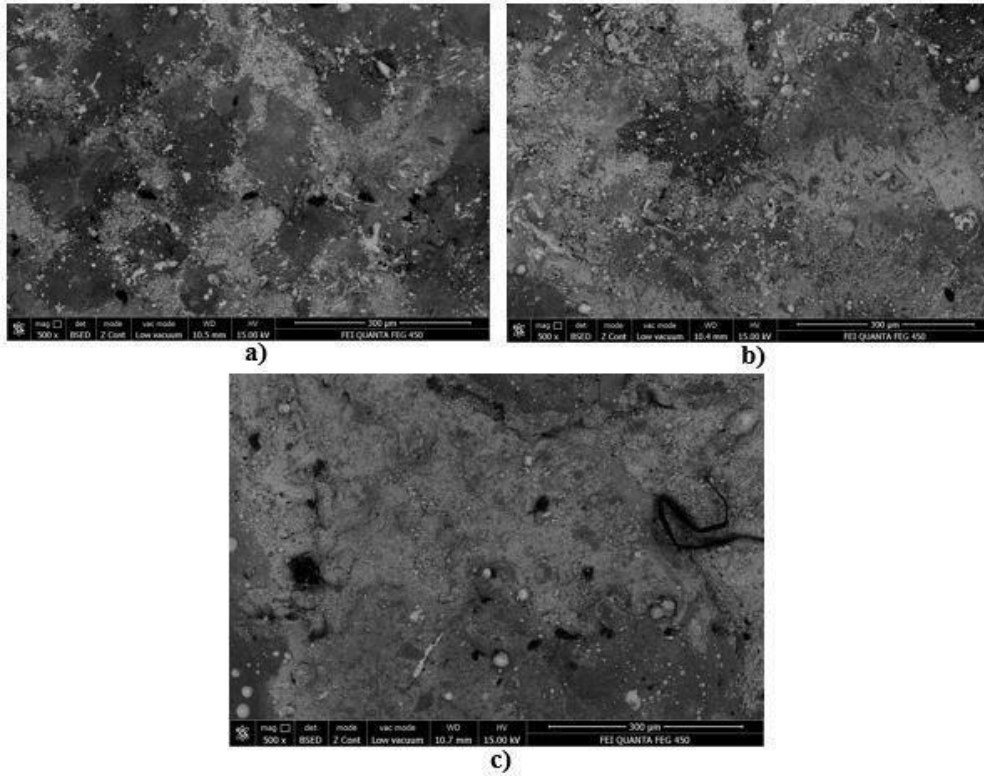


**Şekil 4.54** %80Ag-%20HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.



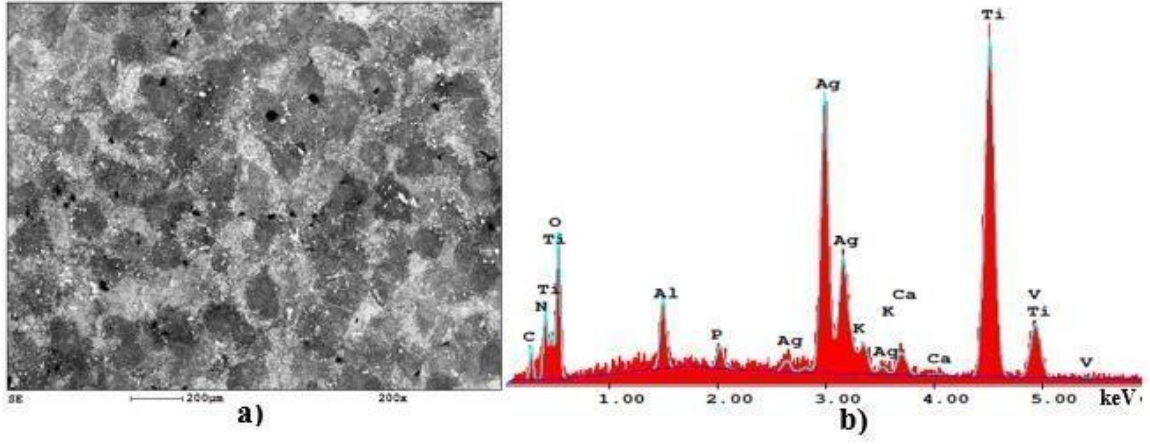
**Şekil 4.55** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:100µs.

50µs darbe süresi, deneyler sırasında yalnızca %70 Ag-%30 HA toz katkıli elektrot ile işleme sırasında kullanılmıştır. Bu darbe süresinde çok fazla ark oluştuğu ve elektrotta dağılmalara sebep olduğu için diğer elektrotlarda işleme yapılmamıştır. 7A ve 12A darbe akımı ile işlenen numunelerde, ince radyal çatlaklardan oluşan bir yüzey ile birlikte, belli bölgelerde noktasal, belli bölgelerde ise bölgesel olarak nüfuz etmiş Ag ve apatit tozları görülmektedir (Şekil 4.56a, Şekil 4.56b). Darbe akımı 22A'ye çıkartıldığında, nispeten daha eşit renk dağılımına sahip homojen bir yüzey oluşmuştur (Şekil 4.56c).

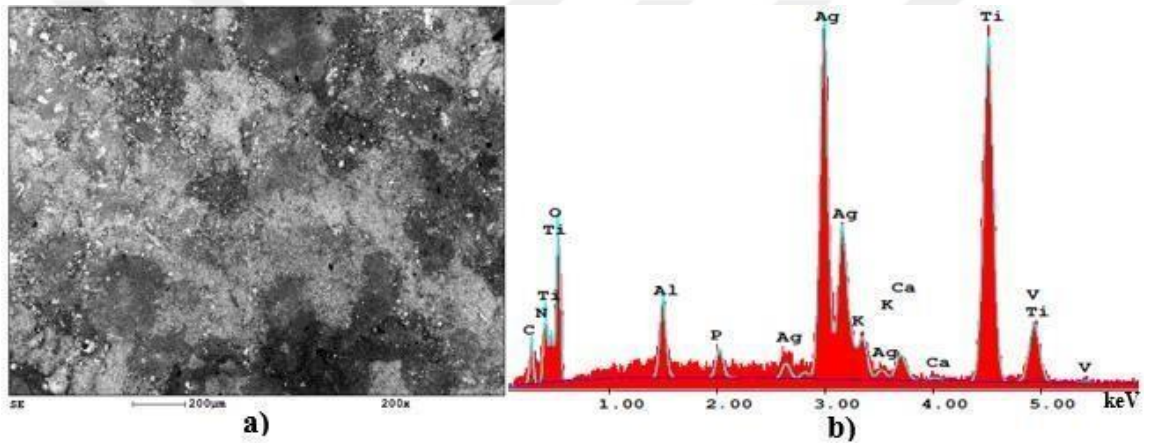


**Şekil 4.56** Hacimce karıştırılmış %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM-BSI görüntüleri, darbe süresi:50µs a)darbe akımı:7A b)darbe akımı:12A c) darbe akımı:22A.

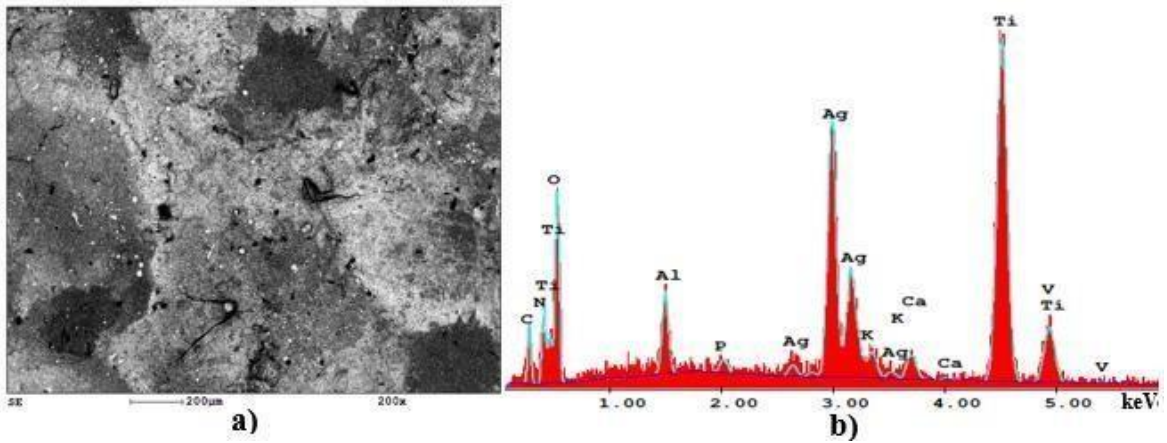
50µs darbe süresinde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunelerin EDS izleri incelendiğinde, 7A ve 22A darbe akımlarında işlenen numunelerde, Ti iz şiddetinin Ag iz şiddetine kıyasla daha baskın olduğu görülmektedir (Şekil 4.57, Şekil 4.59). 12A darbe akımında, Ti ve Ag iz şiddetlerinin nispeten eşitlendiği ve daha homojen bir yüzeyin oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.58). Her 3 akım seviyesinde de Ca ve P iz şiddetlerinin görülmesi, yüzeye apatit tozlarının da nüfuz ettiğini kanıtlamaktadır.



**Şekil 4.57** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:7A, darbe süresi:50µs.



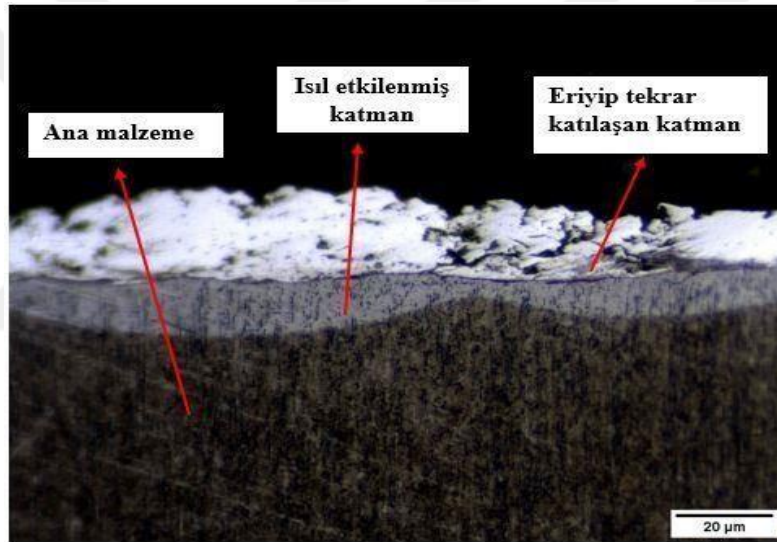
**Şekil 4.58** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:50µs.



**Şekil 4.59** %70Ag-%30HA elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeyinin a)200 büyütmedeki SEM görüntüsü b)Noktasal EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:50µs.

### 4.3 KESİT MİKRO YAPISI

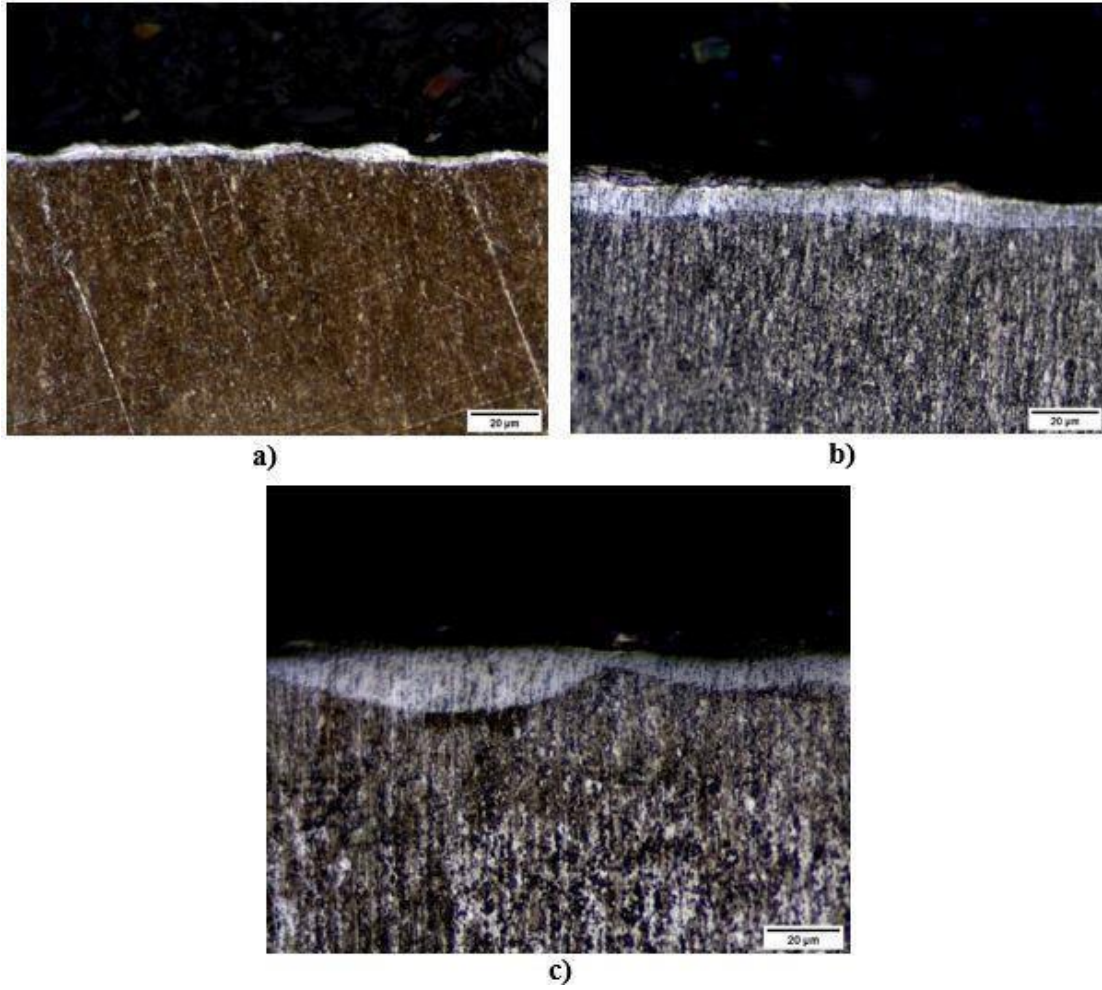
EKİ, işlemin karmaşık doğası gereği farklı metalürjik karakteristiklerin ve buna bağlı olarak alışılmamış faz değişimlerinin oluştuğunu ortaya koymuştur. İşleme sırasında yüksek noktasal sıcaklıkların etkisiyle oluşan bu faz değişimleri, mikro yapı incelemelerinde görüntülenen 3 katmanın varlığını kanıtlamıştır. Ana metalden daha sert, dağlamaya karşı dirençli olan en üst katman, beyaz renkte görünmesi sebebiyle literatürde beyaz katman olarak adlandırılmıştır. Beyaz katmanın hemen altında ısıl etkilenmiş bir tabaka ve bunu takiben ana malzeme yer almaktadır (Şekil 4.60). Dağlama sıvısı kullanılarak nispeten daha belirgin şekilde görüntülenen bu katmanların metalürjik yapısı ve kalınlıkları, darbe akımı, darbe süresi, dielektrik sıvı, toz katkısı gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.60 EKİ ile işlenmiş numunenin kesit mikro yapısının genel görünümü.

7A darbe akımı, 6μs darbe süresinde, % 100 Ag elektrot ile işlenen numunenin 200x büyütmede kesit mikro yapısı incelendiğinde, yeniden katılmış malzemenin özellikle krater çeperlerin de öbekler halinde yığıldığı göze çarpmaktadır. Isıl etkilenmiş katman kalınlığı ince bir tabaka şeklinde kesit boyunca devam etmiştir (Şekil 4.61a). Aynı elektrot ile aynı akım seviyesinde (7A), darbe süresi 100μs'e çıkarıldığında, ısıl etkilenmiş katman kalınlığının arttığı görülmektedir. 6μs darbe süresi ile işlenen numunede öbekler şeklinde yığılan yeniden katılmış malzemenin, 100μs darbe süresinde süreksizlikler şeklinde oluştuğu dikkat çekmiştir (Şekil 4.61b). Elektriksel kıvılcımla işlemede yüksek noktasal sıcaklığın etkisiyle farklı çaplarda ve derinliklerde kraterlerin oluştuğu bilinmektedir. Bu krater oluşumu, özellikle 7A

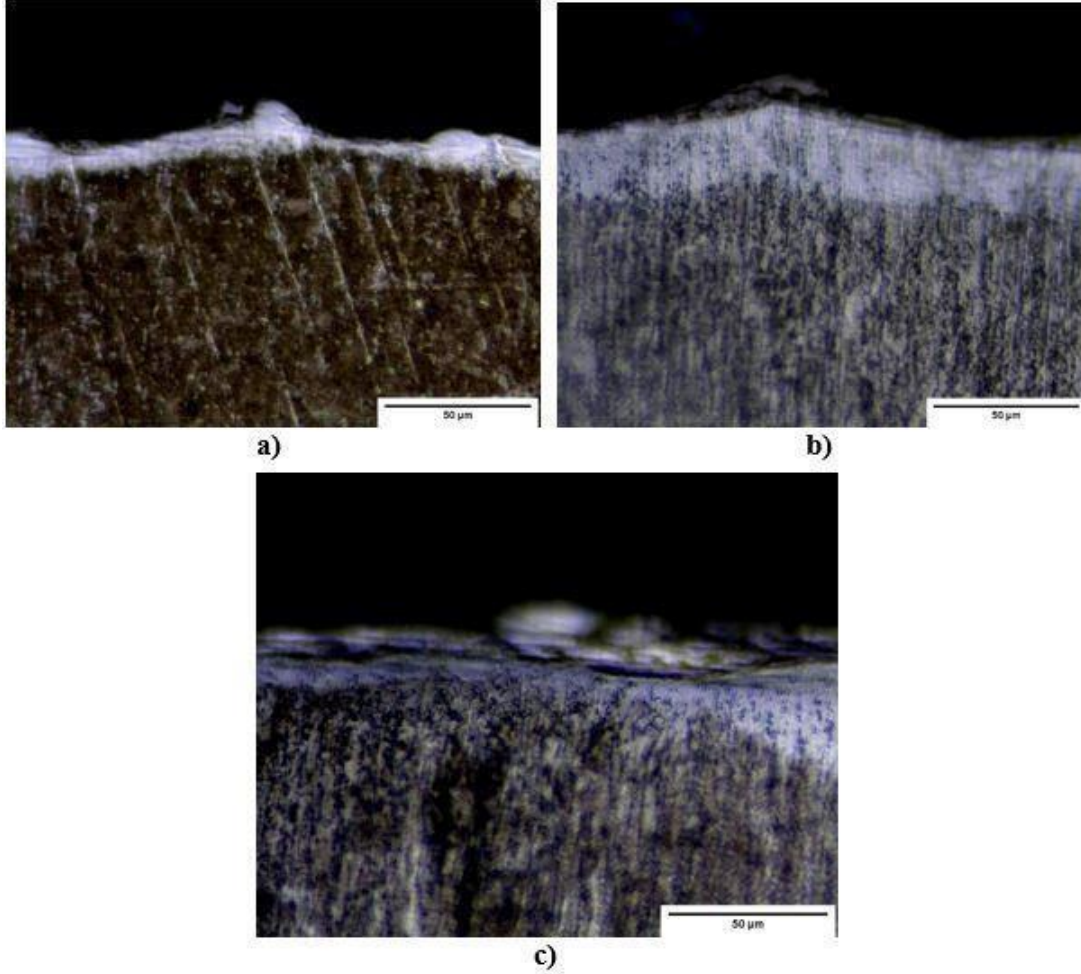
darbe akımı, 6µs darbe süresinde, %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede görülebilmektedir (Şekil 4.61c).



**Şekil 4.61** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı  
a) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %100Ag elektrot b) darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs, %100 Ag elektrot c) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %90Ag-%10HA elektrot.

Numuneler yüksek büyütmede tekrar incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede öbekler hâlinde yığılan yeniden katılmış malzemenin küresel formlarda yığıldığı daha net görülmektedir (Şekil 4.62a). 100µs darbe süresinde işlenen numunede, süreksizliklerden oluşan yeniden katılmış katman ile ısıl etkilenmiş katman arasında oyuklardan oluşan boşluklu yapı dikkat çekmiştir (Şekil 4.62b). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısı incelendiğinde, bir miktar malzemenin ergidiği ve hızla tekrar katılaştığı görülmektedir. Isıl etkilenmiş katman kalınlığının belli bölgelerde kalınlaştığı, belli bölgelerde ise incelendiği dikkat çekmektedir (Şekil 4.62c). Bunun sebebi, elektrottaki HA toz katkısının işleme sırasında

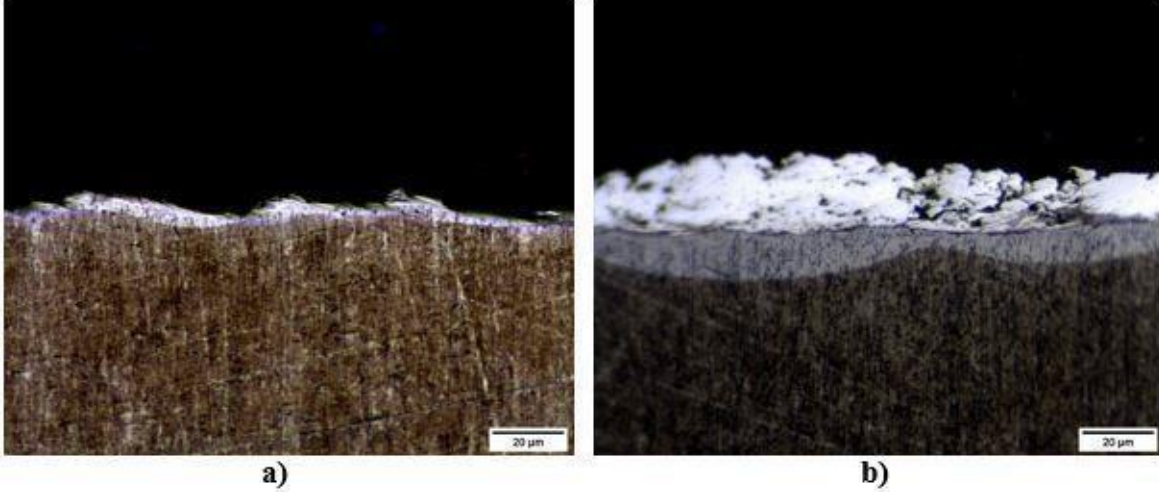
Ag ile birlikte belli bölgelerde ergiyip tekrar katılaşması ve darbe enerjisinin yüzeyde farklı büyüklüklerde etkimesine neden olmaktadır. Darbe enerjisinin her bölgeyi farklı etkilemesi, krater derinliğini ve dolayısıyla ısıl etkilenmiş katman kalınlığını değiştirmiştir.



**Şekil 4.62** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı  
a) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %100Ag elektrot b) darbe akımı:7A, darbe süresi:100µs, %100 Ag elektrot c) darbe akımı:7A, darbe süresi:6µs, %90Ag-%10HA elektrot.

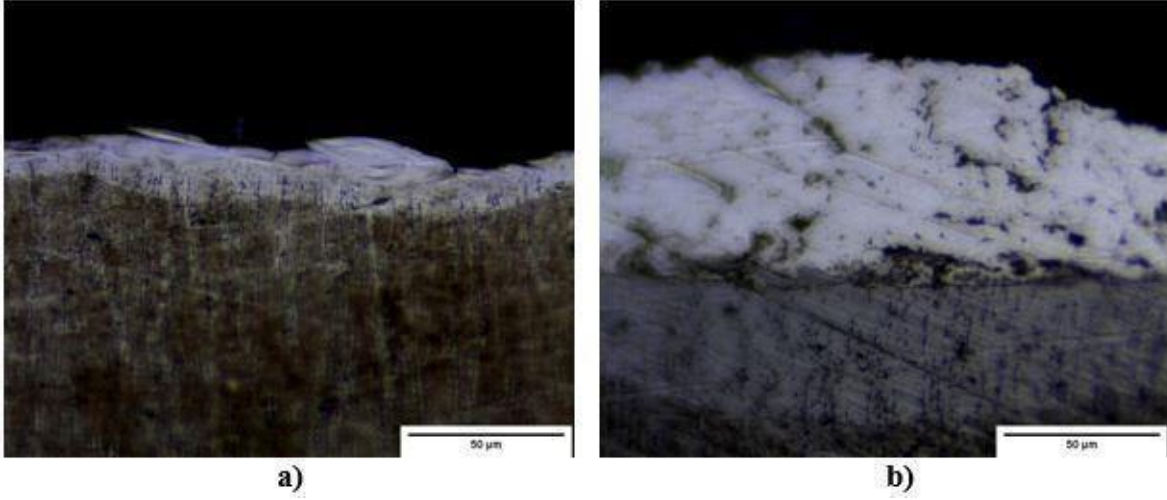
12A darbe akımı, 6µs darbe süresinde, işleme sırasında elektriksel boşalmalar sonucu oluşan krater geometrilerinin ısıl etkilenmiş katmanda belirgin şekilde görüldüğü dikkat çekmektedir. Aynı darbe süresinde (6µs), %100 Ag elektrot ile işlenen numunelerin kesit mikro yapıları karşılaştırıldığında (Şekil 4.61a), beyaz katmanda oluşan yeniden katılaşmış malzeme geometrisinin küresel formdan daha keskin geometrilere dönüştüğü görülmüştür (Şekil 4.63a). Her iki numunede de ısıl etkilenmiş katman kalınlığının nispeten aynı kalınlıkta oluştuğu görülmektedir. Aynı elektriksel parametrelerde, elektrota ilave edilen HA toz katkısı ile farklı bir mikro yapı oluşumu gözlenmiştir. %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede en üst

katman kalınlığında gözle görülebilir seviyede artış yaşanmıştır (Şekil 4.63b). Katman içerisinde görülen boşluklar, yüzey topografyasında karşılaşılan küçük çaplı kraterlerin ve gözenekli yapıların varlığına işaret etmektedir.



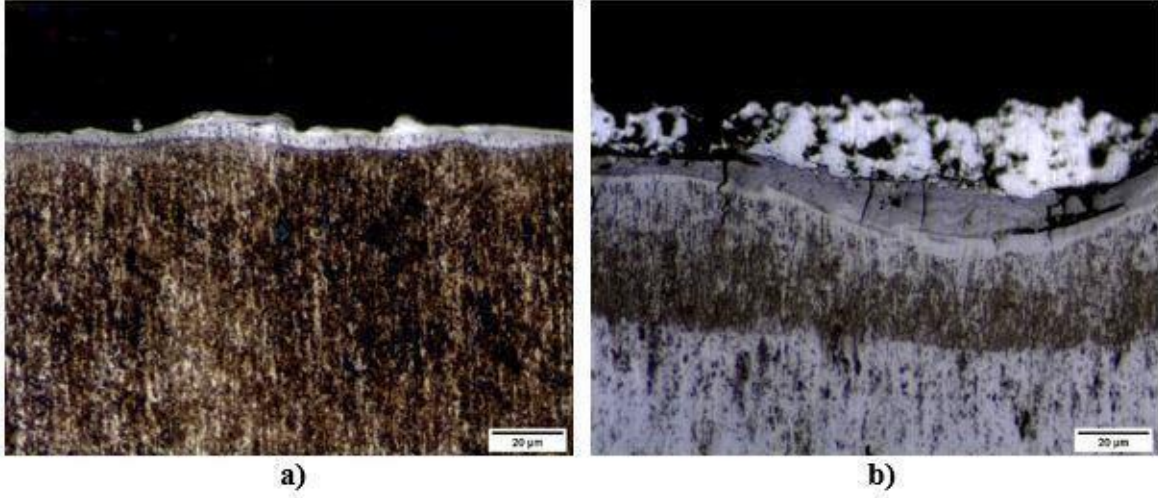
**Şekil 4.63** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı: 12A, darbe süresi: 6µs a) %100Ag elektrot b) %90 Ag -%10 HA elektrot.

Aynı numuneler 500x büyütmede daha detaylı incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede keskin geometrilere oluşan yeniden katılmış malzemenin özellikle, kıvrımların ısı etkileri sonucu oluşan kraterlerin iç kısımlarında yığıldığı görülmektedir (Şekil 4.64a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede beyaz tabakanın gözle ayırt edilebilir şekilde artmış olması, ikincil kıvrımların etkilerini doğrulamıştır. İşleme sırasında ardışık elektriksel boşalmaların yüzeye dağılarak etkimesi, yüzeyde daha fazla malzeme birikmesine ve dolayısıyla di-elektrik sıvı ile yoğun etkileşime giren beyaz tabaka kalınlığının artışına sebep olmuştur (Şekil 4.64b).



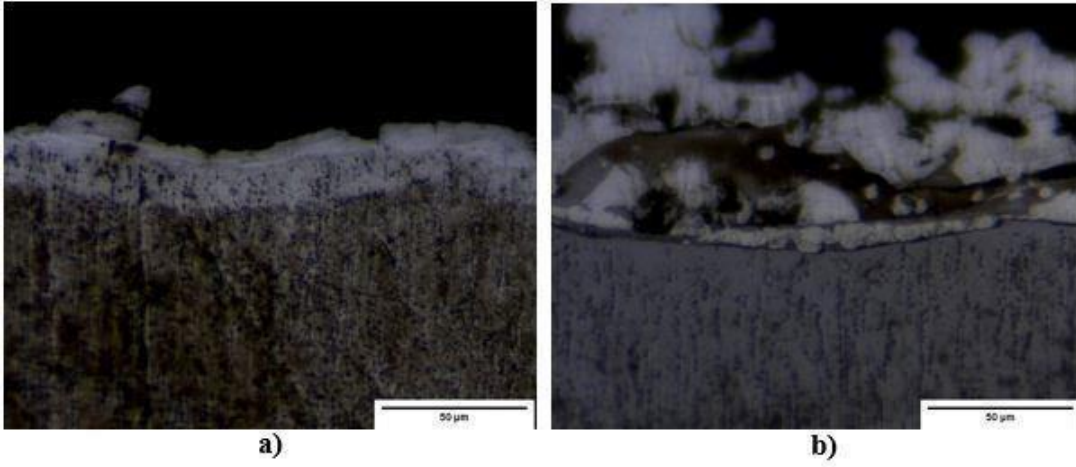
**Şekil 4.64** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı: 12A, darbe süresi: 6µs a) % 100Ag elektrot b) % 90 Ag -% 10 HA elektrot.

22A darbe akımı, 6µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, 12A darbe akımında işlenen numuneye benzer bir görüntü elde edilmiştir. İnce bir tabaka şeklinde devam eden ısıl etkilenmiş katman ile belli bölgelerde daha fazla yığılarak yükseltile oluşturmuş yeniden katılmış tabaka oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.65a). Aynı elektriksel parametrelerde, elektrotta %10 HA toz katkısının ilave edilmesiyle farklı bir mikro yapı oluşumu görülmüştür. Yeniden katılmış katman ile ısıl etkilenmiş katman arasında daha koyu renkte farklı bir katmanın varlığı dikkat çekmiştir (Şekil 4.65b). Üst üste binmiş bu katmanlarda, daha önceki kesit mikro yapılarında görülmeyen çatlak oluşumları gözlenmiştir. Bu çatlak yapılarının bazıları beyaz katman boyunca ilerleyerek ara katman yüzeyinde son bulurken, bazıları ise beyaz tabakayı geçerek ısıl etkilenmiş katmana kadar uzanmıştır. Penetrasyon derinliği daha fazla olan ve ana malzemeye kadar uzanmış bu ortogonal çatlakların, elektrotta ilave edilen HA toz katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir.



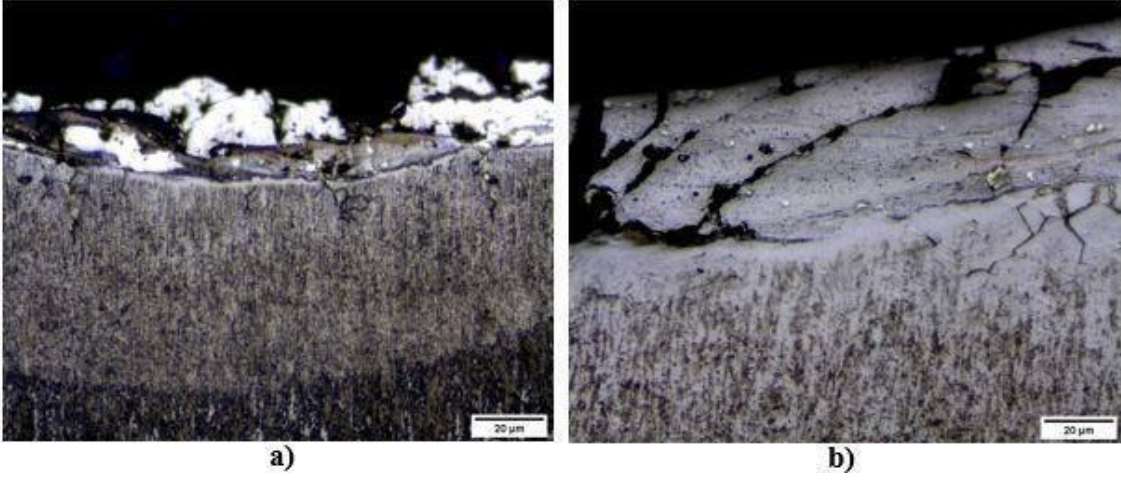
**Şekil 4.65** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)% 100Ag elektrot b) %90 Ag -% 10 HA elektrot.

Numuneler daha yüksek büyütmede tekrar incelendiğinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, darbe akımının arttırılmasıyla keskin geometrilerde ve yer yer kırılarak düzensiz bir görüntü sergileyen yeniden katılmış katman oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.66a). %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, boşluklardan ve üst üste binmiş katmanlardan oluşan karmaşık bir mikro yapı oluşumu görülmektedir (Şekil 4.66b). Yüksek sıcaklıktaki üst katmandan ana faz malzemeye doğru ısı çekilirken, daha düşük sıcaklıktaki ana faz malzeme ısıl etkilenmiş katmandan yüzeye doğru ısı çekilmesine sebep olmuştur. Bu ısıl iletim sonucu koyu renkte görünen yapısı değişmiş katmanlar oluşmuştur. Koyu renkte oluşan bu katmanın içerisinde küresel formda beyaz taneciklerin olduğu dikkat çekmektedir. Ergimiş malzeme katılmadan önce, elektrotta bulunan toz tanecikleri yeniden katılmış katman içerisine saplanmış ve beyaz katman di-elektrik sıvının etkisiyle üzerine kapanarak toz taneciklerini hapsedmiştir. Darbe akımının artmasıyla ısıl etkilenmiş katman kalınlığının da kesit yüzeyi boyunca arttığı görülmektedir.

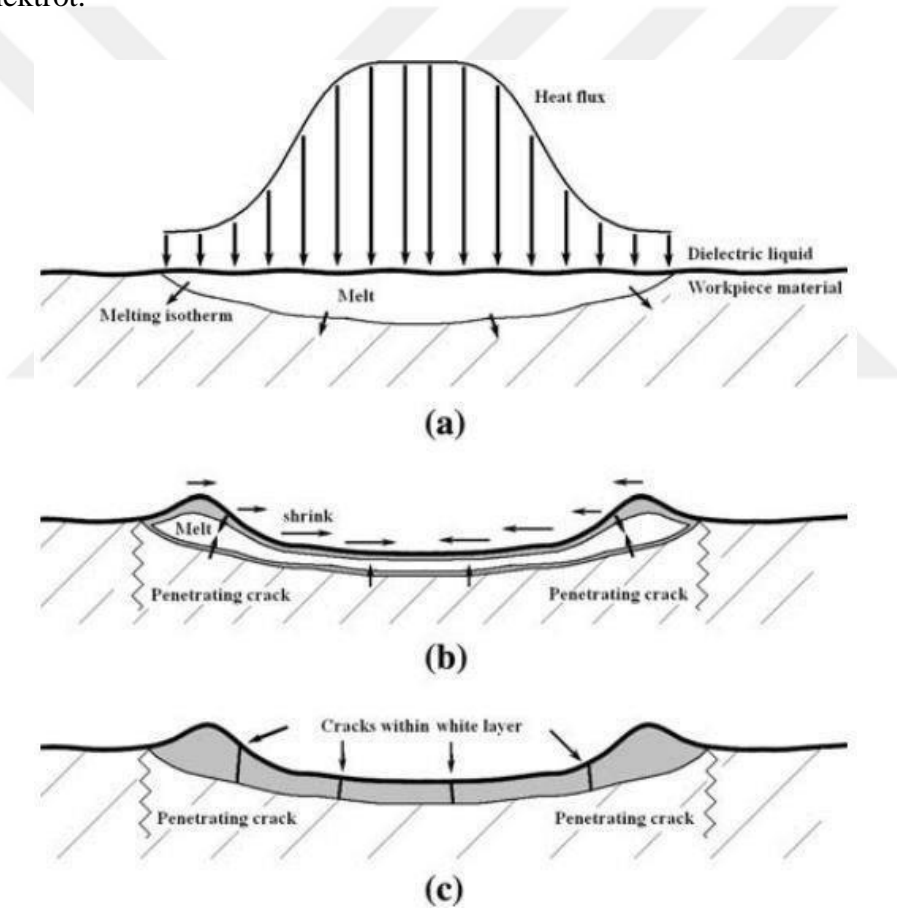


**Şekil 4.66** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)% 100Ag elektrot b) %90 Ag -% 10 HA elektrot.

22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %90Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, yeniden katılmış katmanda üst üste binmiş farklı tabakaların olduğu görülmektedir (Şekil 4.67a). Birbirini dik kesen ortogonal çatlakların yeniden katılmış katmandan ısıl etkilenmiş katmana doğru uzandığı gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar (Ekmekci 2009), EKİ sırasında iki farklı çatlama mekanizmasının etkin olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.68.). Bunlardan birincisi, yeniden katılmış katmanda oluşan faz dönüşümleri ve dönüşümlerle birlikte malzemenin kopma mukavemetini aşan yüksek gerilmelerin sebep olduğu çatlaklardır. Bu çatlaklar genellikle beyaz katman boyunca ilerler ve ara katman yüzeyinde sonlanır. İkinci çatlama mekanizması ise, krater çeperleri boyunca oluşur ve ana faz malzemeye nüfuz ederek malzemenin yorulma mukavemetini düşürür (Şekil 4.67). Bu çatlama türü en tehlikeli olandır. %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, çubuksu yapılar şeklinde ayrılmalara maruz kalmış ve dentritik şekillerden oluşan yeniden katılmış katman dikkat çekmektedir (Şekil 4.67b). Bu katman içerisindeki beyaz taneciklerin, daha önce benzer şekilde görülen (Şekil 4.66b), elektrottan ayrılarak beyaz tabaka içerisinde hapsolmuş toz tanecikleri olduğu düşünülmektedir.



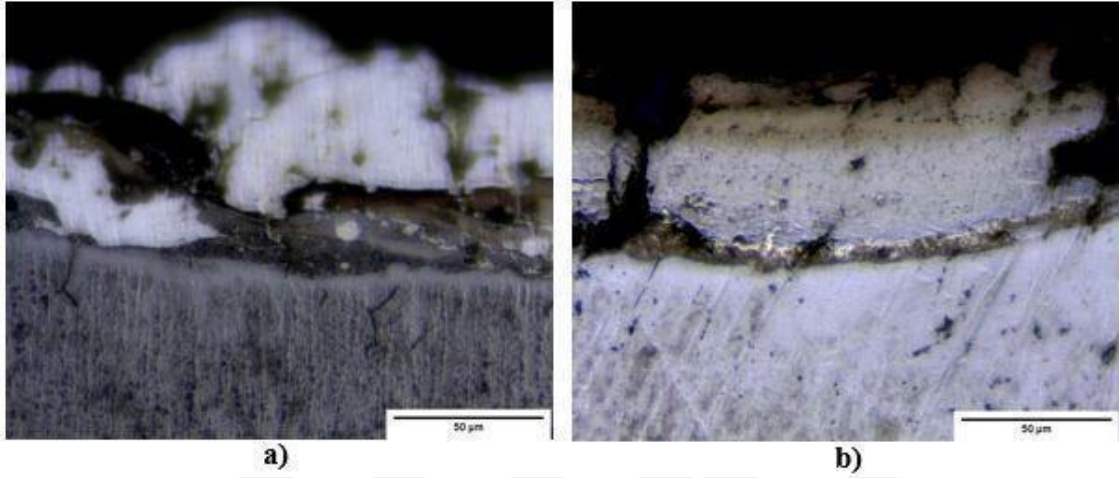
**Şekil 4.67** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 200 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %90A%10 HA elektrot b) %70 Ag -%30 HA elektrot.



**Şekil 4.68** EKİ sırasında oluşan çatlama mekanizması (Ekmekci 2009).

Kesit mikro yapıları 500x büyütmede daha detaylı incelendiğinde, 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, ardışık kıvılcımların ısı etkisi ile üst üste binmiş farklı katmanların oluştuğu dikkat çekmektedir (Şekil 4.69a). Daha önceki mikro yapılarda da görüntülenen farklı koyu tonlarda oluşan bu katmanların, elektrota ilave

edilen apatit tozlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzemenin yorulma mukavemetini olumsuz etkileyen ortogonal çatlak yapıları, 500x büyütmede ısıl etkilenmiş katman bölgesinde daha net şekilde görüntülenmiştir. %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunede, eriyip yeniden katılmış katmanda büyük oyuklar ile kesit yüzeyi boyunca süreksizliklerden oluşan yapılar görülmüştür (Şekil 4.69b). Isıl etkilenmiş katman kalınlığında gözle ayırt edilebilir seviyede artış yaşanmıştır.



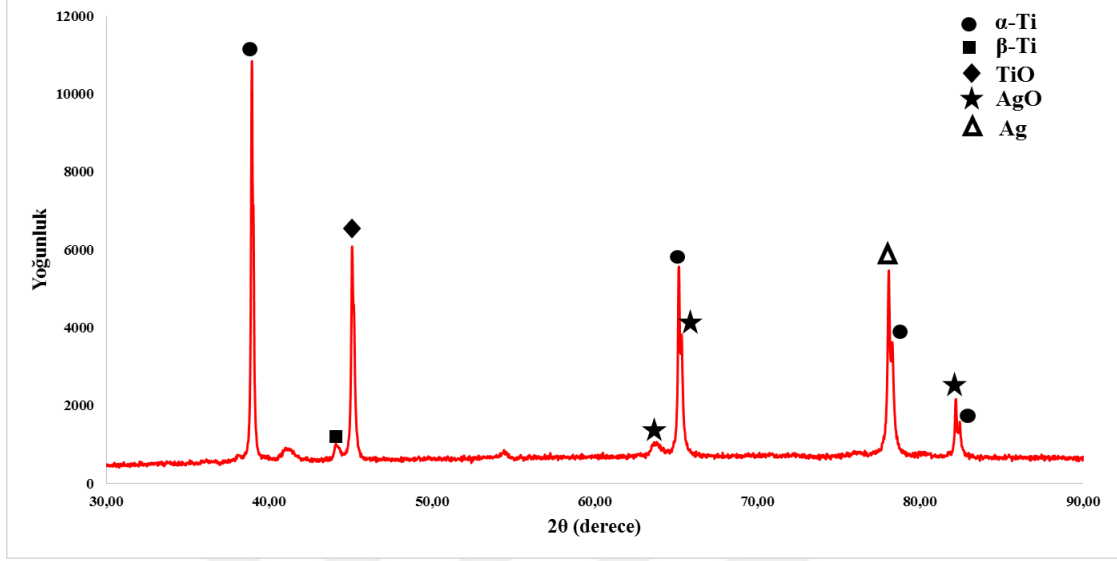
**Şekil 4.69** EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin 500 büyütmedeki kesit mikro yapısı, darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs a) %90A%10 HA elektrot b) %70 Ag -%30 HA elektrot.

#### 4.4 X-IŞINI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ

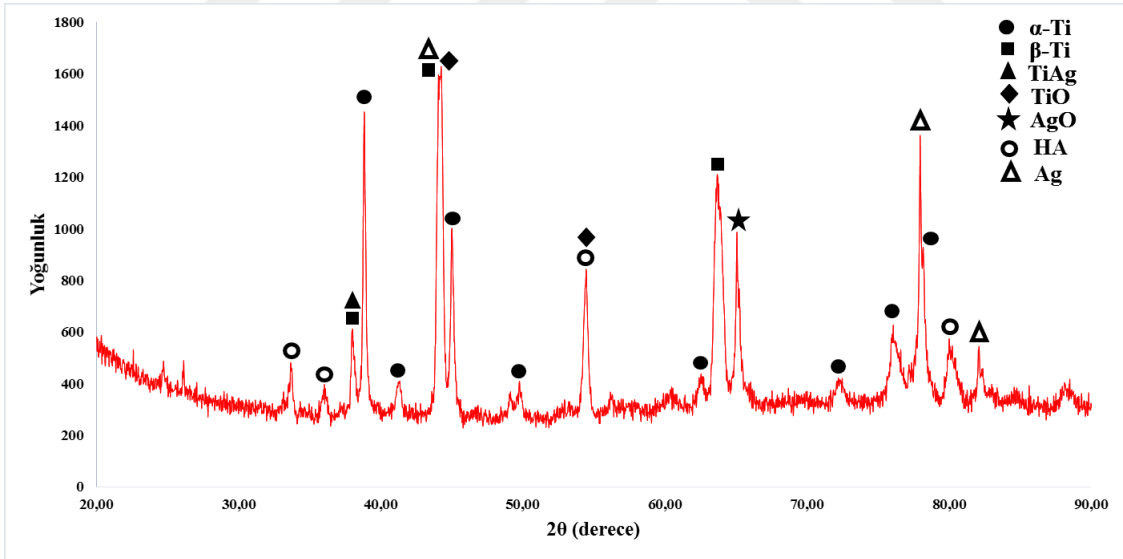
X-Işını Kırınım Analizi (XRD), katı ve toz formdaki malzemelerin kendine özgü kristal fazları ve yapı özellikleri hakkında bilgi veren bir yöntemdir. Kendine özgü atomik dizilime sahip olan her bir fazın, X-ışınlarını bu dizilime bağlı olarak belli bir düzen içinde kırması esasına dayanır. İçerdiği fazlar hakkında yeterli bilgiye sahip olunmayan numuneler, analiz sonucu elde edilen veriler ile eşleştirilmek üzere çeşitli programlar kullanılarak fazlar hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Farklı yüzey topografisi ve kesit mikro yapısına sahip olan 2 adet numune belirlenerek XRD analizi yapılmıştır. 22A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %90 Ag-%10 HA ve %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen iki numunenin XRD izlerinde, Ti-6Al-4V ana faz malzemeye ait  $\alpha$ -Ti ve  $\beta$ -Ti pikleri görülmektedir. Elektrottaki Ag toz katkısının iz şiddeti her iki numune de oluşurken, elektrottaki toz yoğunluğuna ve elektriksel parametrelere bağlı olarak değişen kırılma mekanizmaları nedeniyle HA toz katkısı yalnızca %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen

numunede görülmüştür. İşleme sırasında deiyonize su kullanıldığından TiO ve AgO bileşikleri oluşmuştur. Ayrıca %30 apatit toz katkıli elektrot ile işlenen numunede TiAg bileşik oluştuğu dikkat çekmiştir (Şekil 4.70, Şekil 4.71).



Şekil 4.70 %90 Ag-%10 HA elektrot ile 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde işlenen numunenin XRD izleri.



Şekil 4.71 %90 Ag-%30 HA elektrot ile 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde işlenen numunenin XRD izleri.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

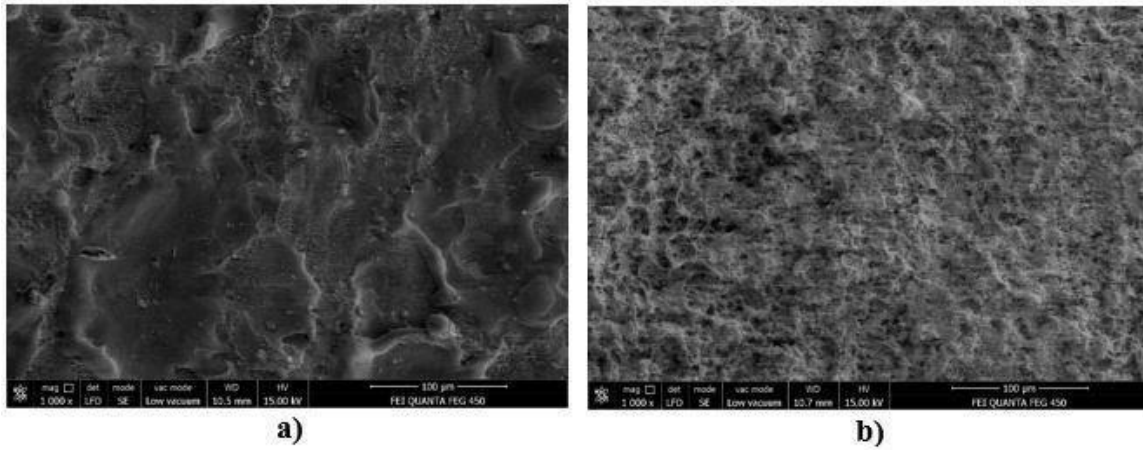
Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular, EKİ uygulamalarında belirlenen darbe süresi, darbe akımı, elektrottaki toz katkısı gibi parametrelere bağlı olarak yüzey topografisi, mikro yapı, iş parçasına malzeme transferi ve işleme sırasında oluşan kıvılcım mekanizmasının değiştiğini göstermiştir. Özellikle aynı darbe akımı ve darbe süresinde, farklı toz oranlarında elektrotlar ile işlenen numunelerdeki topografik ve elementel farklılıklar, EKİ sırasında oluşan işleme mekanizmasının rastlantısal olmadığını göstermiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, titanyum alaşımları üzerinde farklı kaplama teknikleri denenmiştir. Bu tekniklerin avantaj-dezavantajlarına karşılık elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi ile Ag-HA kaplamanın kullanılabilirliğini araştırmak için bu tez çalışması hazırlanmıştır. Bu bölümde elde edilen bulgular, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak irdelenmiştir. Biyouyumlu yüzeylerin elde edilmesine yönelik yapılan çalışmalarda elde edilen deneysel sonuçlar, bu çalışmada ki verilerle kıyaslanarak yöntemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bölüm sonunda ileriye dönük olası çalışmalar önerilmiştir.

#### 5.1 SONUÇLAR

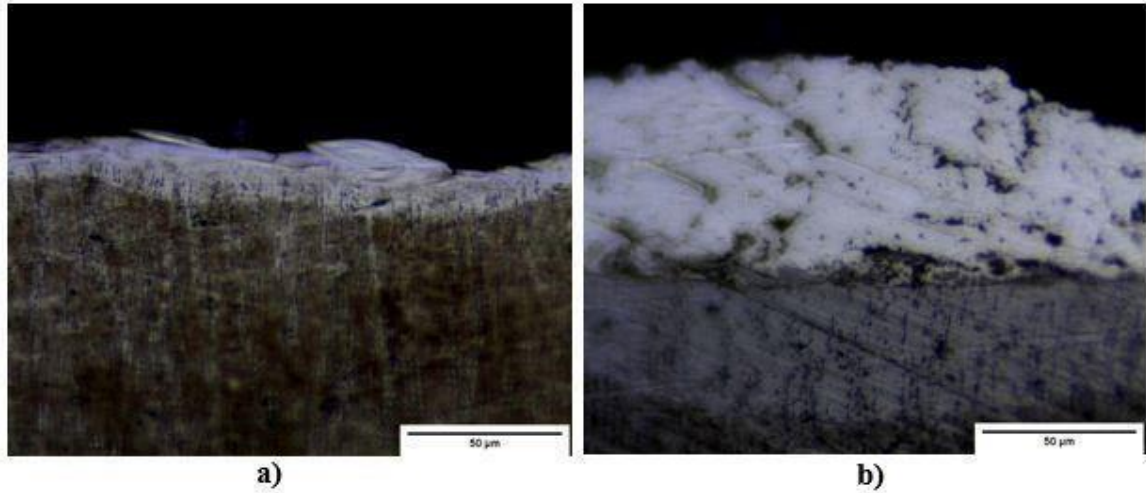
Elektriksel kıvılcımla işlemede, açık aralık gerilimi ile yüklenmiş elektrot iş parçasına yaklaştırıldıkça düzgün şekilde yayılmış bir elektriksel alan oluşur. Elektriksel alanın şiddetlenmesi ile birlikte di-elektrik sıvı polarize olur. Elektrot ile iş parçası arasındaki mesafe kritik bir değere düştüğünde ( $\sim 15\mu\text{m}$ ), di-elektrik sıvı üzerindeki elektriksel alanı taşıyamaz ve yalıtkan ortamın kırılmasına sebep olur. Açık aralık gerilimi hızla düşer ve plazma kanalı açılır. Elektronlar ve iyonlar bu plazma kanalından hızla akmaya başlar. Elektriksel alanın şiddeti giderek artar, gerilim düşer ve elektrotların yüzeyinde yüksek noktasal sıcaklıklar oluşur. Sonuç olarak ardışık boşalım kanallarının ısıl etkileri ile işlenen yüzeyde farklı boyutlarda krater geometrileri oluşur. Bu krater geometrileri darbe akımı, darbe süresi, di-elektrik sıvı, elektrottaki toz katkısı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, elektrottaki toz katkısının ve elektriksel parametrelerin boşalım kanalını ne şekilde değiştirdiğini ortaya koymaktadır. 12 A darbe akımı, 6  $\mu$ s darbe süresinde, %100 Ag elektrot ve %90 Ag-%10 HA elektrotlar ile işlenen numunelerin yüzey topografileri karşılaştırıldığında sonuç gözle ayırt edilebilir şekilde farklıdır (Şekil 5.1). Elektrota %10 apatit toz katkısının eklenmesi ile birlikte çok küçük boyutta kraterlerin oluştuğu göze çarpmaktadır. Böyle bir sonuç elde edilmesinin asıl sebebi, ana kıvılcım kanalının tek bir kol üzerinden boşalımından daha çok ana kanalın elektrottan salınan malzemelerin etkisiyle bütünlüğünü kaybederek dağılmış bir boşalım kanalının (ikincil kıvılcımlar) oluşmasıdır.

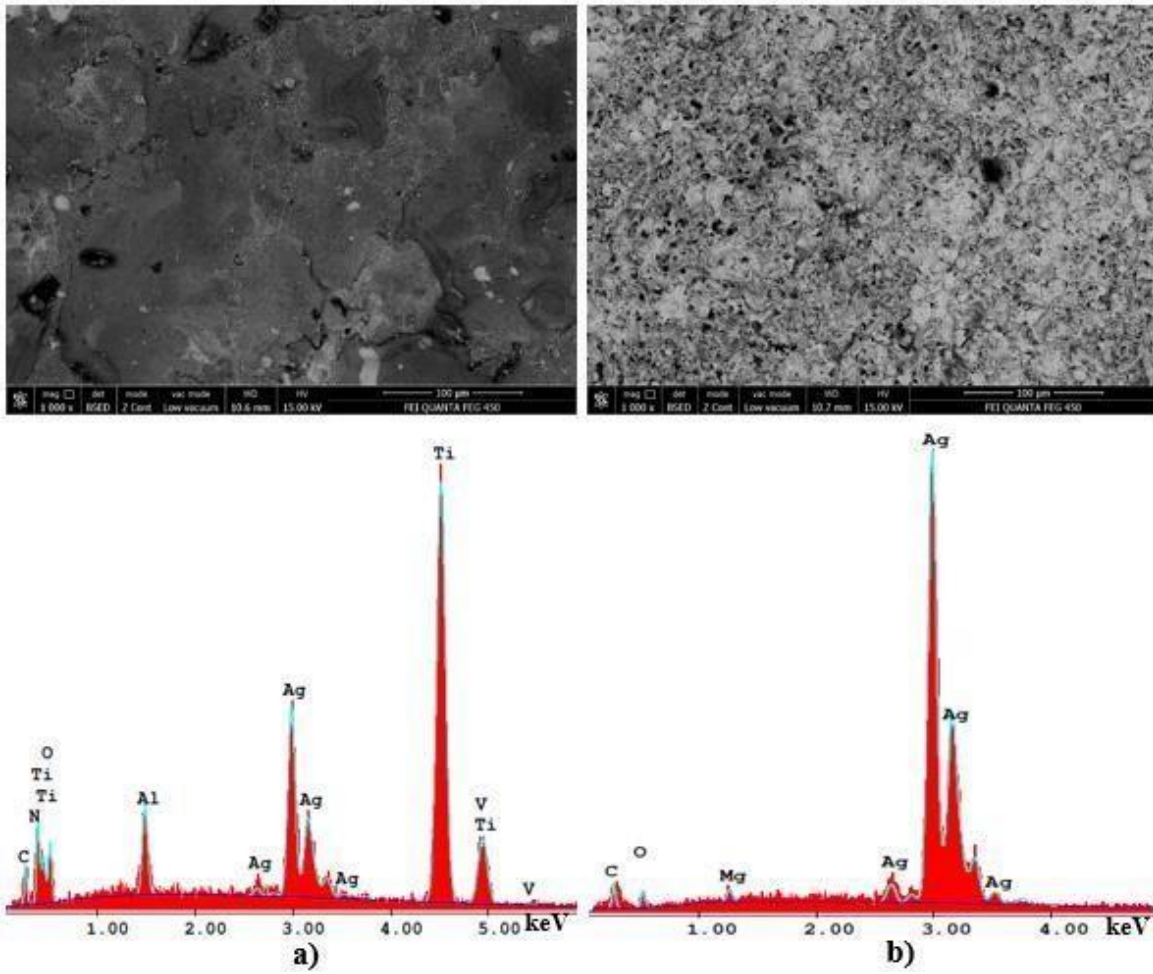


**Şekil 5.1** Numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM görüntüleri darbe akımı:12A, darbe süresi:6 $\mu$ s a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot.

Numunelerin kesit mikro yapıları incelendiğinde, elektrota %10 apatit toz katkısının ilave edilmesi ile yeniden katılmış katman kalınlığı artmış ve ikincil kıvılcımların etkilerini doğrulamıştır. Ardışık elektriksel boşalımların yüzeye dağılarak etkimesi, yüzeyde daha fazla malzeme birikmesine ve dolayısıyla di-elektrik sıvı ile yoğun etkileşime giren yeniden katılmış katman kalınlığının artmasına sebep olmuştur (Şekil 5.2). %100 Ag elektrot ile işlenen numunede yüzeye daha fazla Ag taşınımı ve nüfuziyeti olması beklenirken, elektrottaki gümüş toz katkısı yoğunluğu azaldıkça yüzeye daha fazla Ag taşınımı olduğu dikkat çekmiştir. Enerji dağılım spektrometresi analizleri de bu sonucu desteklemektedir (Şekil 5.3).



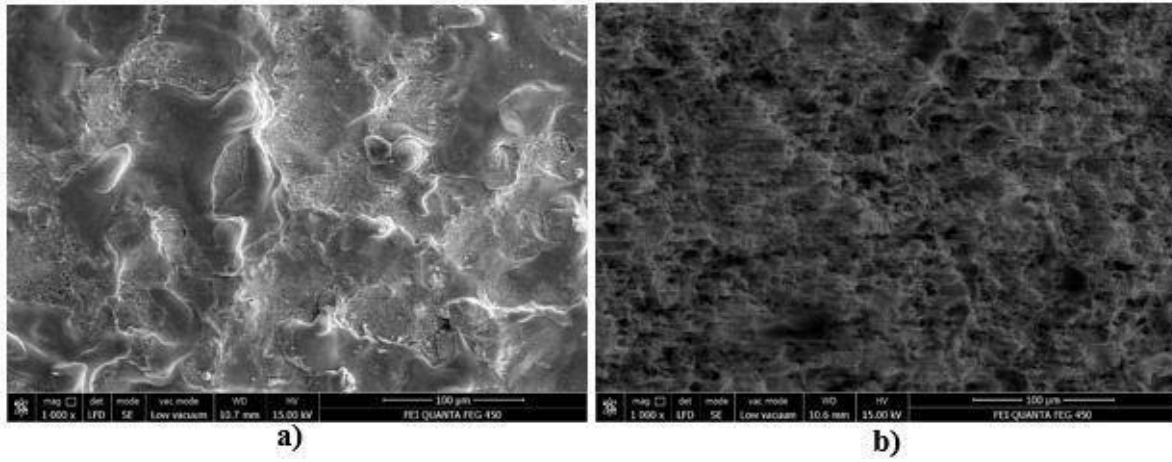
**Şekil 5.2** Numunelerin kesit mikro yapıları, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a)%100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot.



**Şekil 5.3** Numunelerin SEM-BSED görüntüleri ve EDS izleri, darbe akımı:12A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot.

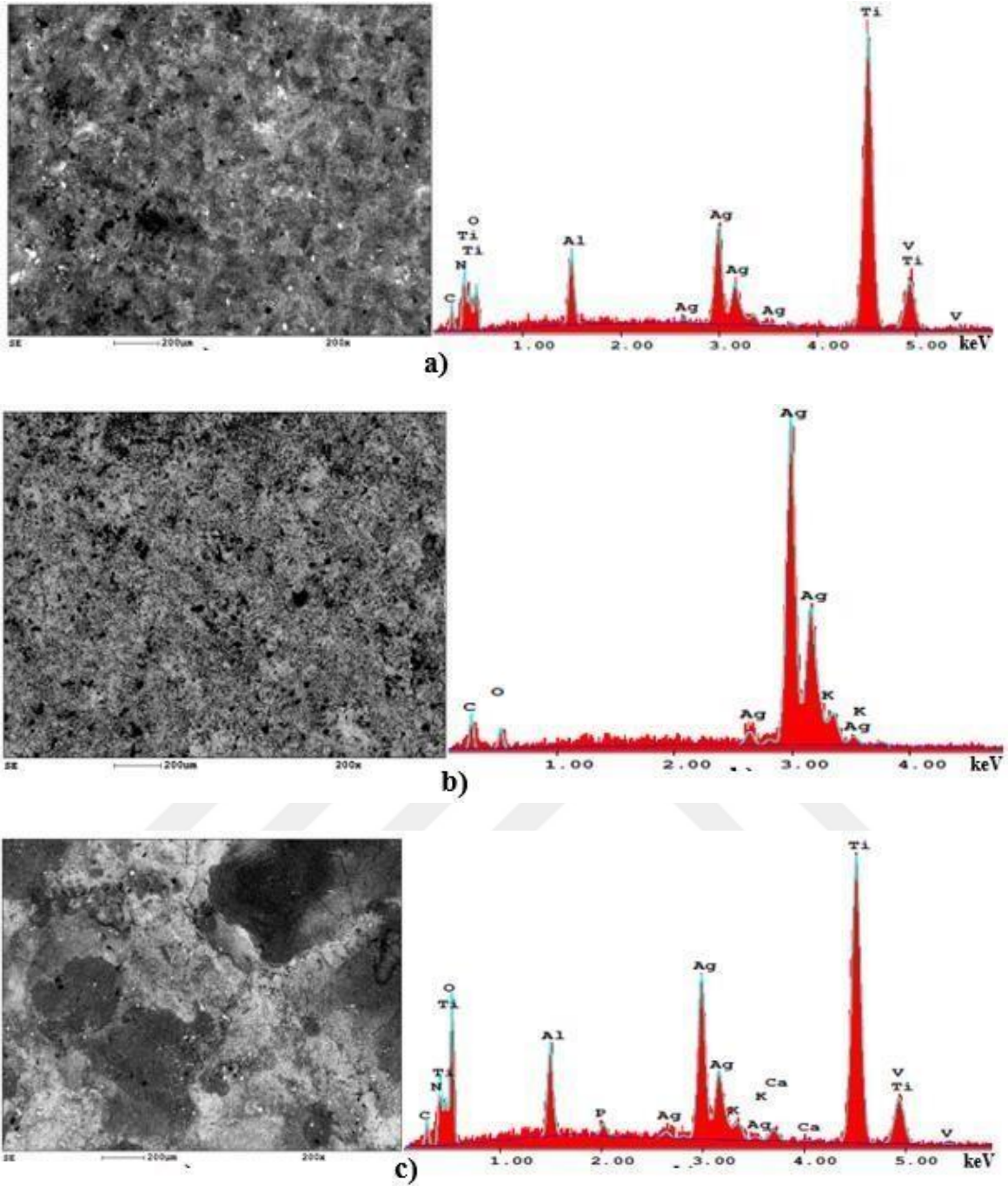
Aynı darbe süresinde (6µs), darbe akımı 22A seviyesine çıkarıldığında benzer yüzey topografisi elde edilmiştir. %100 Ag elektrot ile işlenen numunede, nispeten derin krater oluşumu

gözlemlenirken, %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede ikincil kıvılcımların etkisiyle saçılmalar şeklinde çok küçük gözeneklerden oluşan bir yüzey topografisi oluşmuştur (Şekil 5.4). İşleme sırasında açık aralık geriliminin düşmesi ile açılan ana boşalım kanalı, elektrottan ayrılarak di-elektrik sıvıya karışan toz taneleri ile karşılaşır. Ana boşalım kanalının toz tanecikleri şeklindeki süreksizliklerle karşılaşması, kanalın yön değiştirmesine veya saçılmasına sebep olur. Boşalım kanalı ile oluşan elektriksel alan, kanal etrafındaki asılı toz tanelerini de etkilemektedir. Darbe akımı, darbe süresi, toz katkılı elektrot, iş parçası, di-elektrik sıvı parametreleri göz önüne alındığında, EKİ ile elde edilecek sonuçların bilimsel bir modelleme ile tahmin edilmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple elektriksel kıvılcımla işleme yönteminin karmaşık bir doğaya sahip olduğu söylenebilir.



**Şekil 5.4** Numune yüzeylerinin 1000 büyütmedeki SEM görüntüleri darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot.

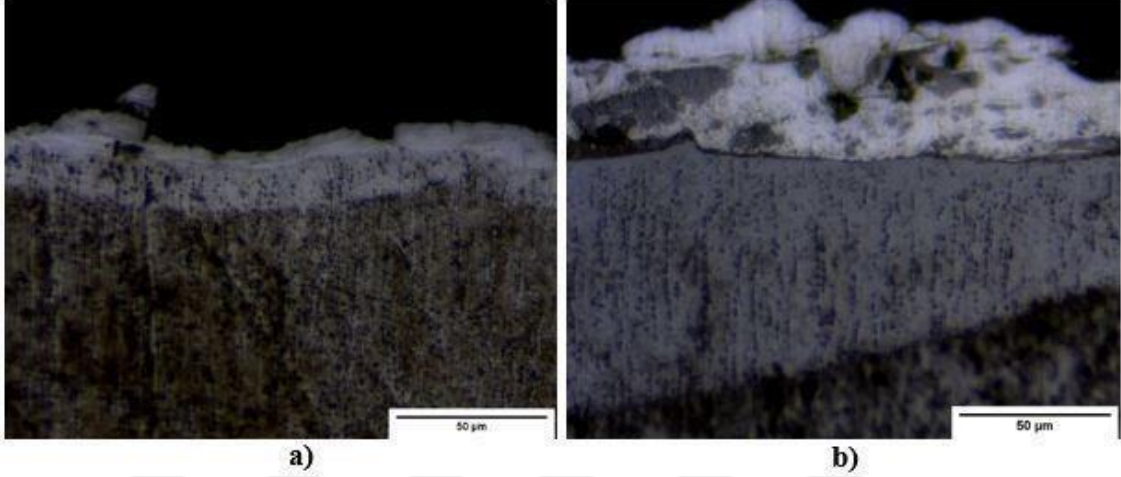
Enerji dağılım spektrometresi analizleri karşılaştırıldığında, elektrota ilave edilen apatit toz katkısı ile Ag iz şiddetinin artış gösterdiği, yüzeyin neredeyse tamamının Ag ile kaplandığı gözlemlenirken, Ca ve P iz şiddetlerinin oluşmadığı dikkat çekmiştir (Şekil 5.5). Elektrota %30 apatit toz katkısının eklenmesi ile birlikte işleme sırasında di-elektrik sıvıdan veya elektrottan numune yüzeyine HA tozlarının nüfuz ettiği EDS izleri ile doğrulanmıştır (Şekil 5.5c).



**Şekil 5.5** Numunelerin SEM-BSED görüntüleri ve EDS izleri, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a) %100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot c) %70 Ag-%30 HA elektrot.

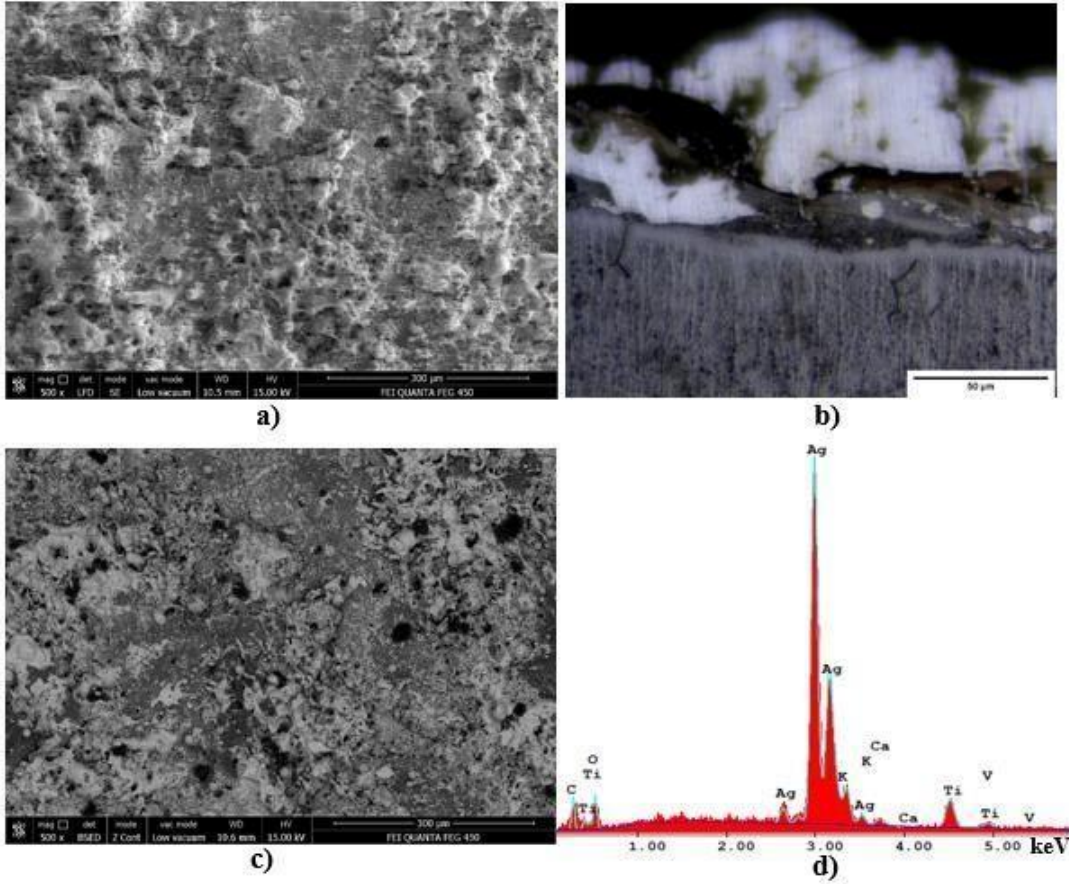
22A darbe akımı, 6µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısı incelendiğinde, keskin geometrilerde ve yer yer kırılarak düzensiz bir görüntü sergileyen yeniden katılmış katman oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 5.6a). İkincil kıvılcım mekanizmasının etkinleştiği %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunede, kesit boyunca kalınlığı artmış yeniden katılmış katman ile ısıl etkilenmiş katman oluşumu, ikincil kıvılcım

mekanizmasının rastlantısal oluşmadığını, 6µs darbe süresi ile %10 apatit toz katkısının bu mekanizmayı tetiklediğini ve yüzeyde daha fazla malzeme nüfuziyetine sebep olduğunu doğrulamıştır (Şekil 5.6b).



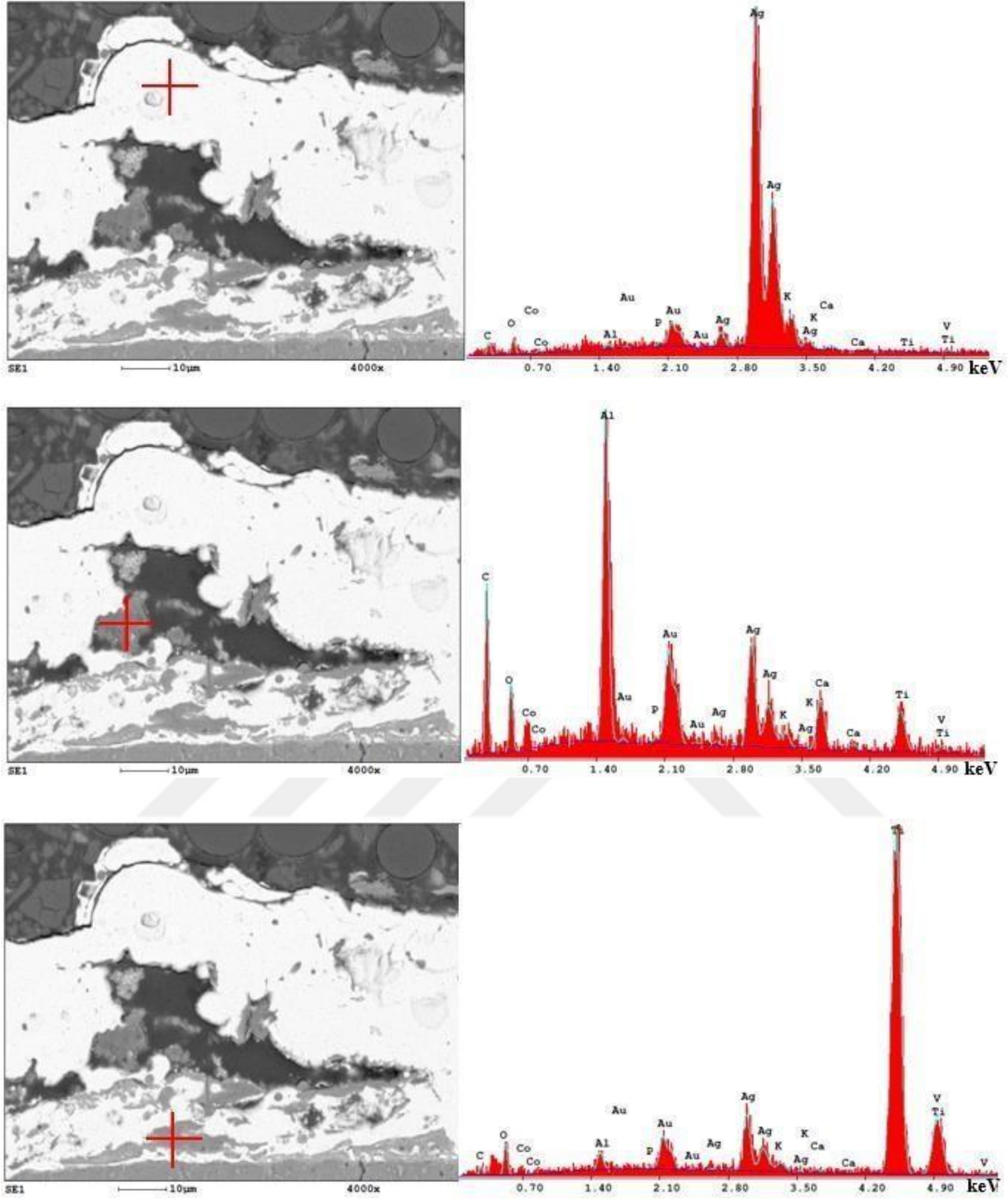
**Şekil 5.6** Numunelerin kesit mikro yapıları, darbe akımı:22A, darbe süresi:6µs a)%100 Ag elektrot b) %90 Ag-%10 HA elektrot.

22A darbe akımında, darbe süresi 25µs'ye çıkartıldığında, %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin yüzey topografisinde irili ufaklı gözenek ve boşluk içeren bir yapı oluşmuş ve kesit mikro yapısında farklı tonlarda görünen yeniden katılmış katman oluşumu gözlenmiştir (Şekil 5.7a, Şekil 5.7b). Elementel analiz sonuçları, bu işleme parametresinde yüzeyde Ag, Ca ve P elementlerinin hâkim olduğunu ve ikincil kırılcımların etkinleştiğini göstermiştir (Şekil 5.7b, Şekil 5.7c).



**Şekil 5.7** 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin a) yüzey topografyası b) kesit mikro yapısı c) SEM-BSED görüntüsü d) EDS izleri.

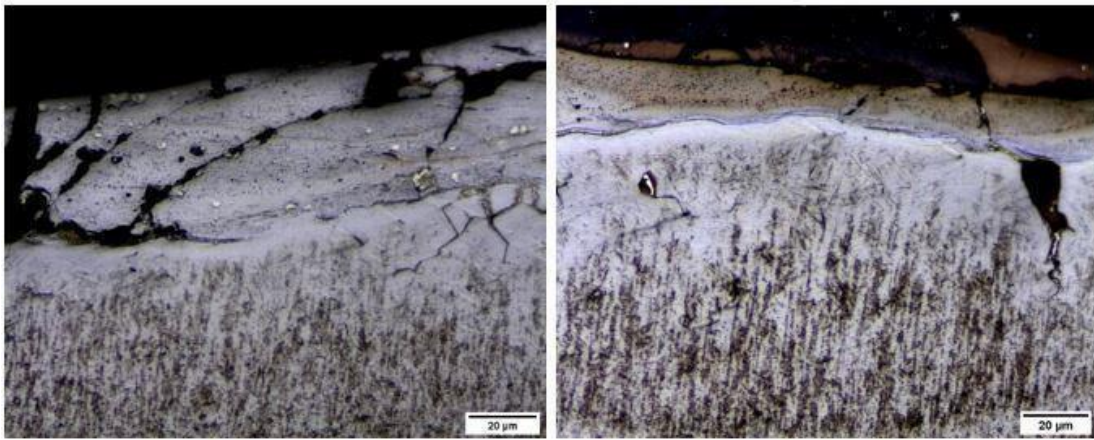
Farklı tonlarda katmanların oluştuğu %10 apatit toz katkılı numunenin kesit mikro yapısı noktasal EDAX analizi ile tekrar incelendiğinde, beyaz renkte görünen katmanda Ag iz şiddetinin baskın olduğu gözlemlenirken, koyu gri renkte görüntülenen katmanda Ti ve Al elementlerinin iz şiddetinin baskın olduğu noktasal EDS analizleri ile kesinleşmiştir (Şekil 5.8). Ayrıca Ca ve P iz şiddetlerinin de oluşması, yüzeye Ag ile birlikte eser miktarda apatit tozlarının da nüfuz ettiğini göstermiştir.



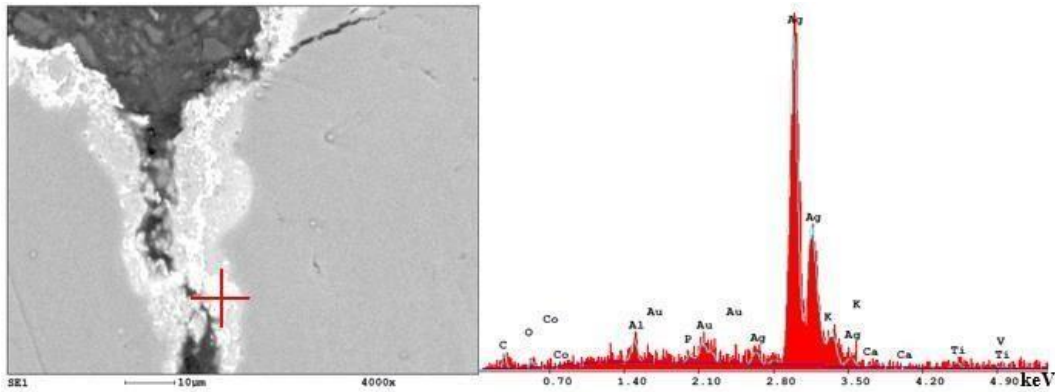
**Şekil 5.8** 22A darbe akımı, 25 $\mu$ s darbe süresinde %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısından alınan noktasal EDAX analizleri.

Farklı darbe akımı ve darbe sürelerinde, elektriksel kıvılcımla işlenmiş yüzeylerin topografileri ve kesit mikro yapıları dikkatli incelendiğinde, darbe süresinin artması ile birbirini dik şekilde kesen ortogonal çatlak yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. %100 Ag elektrot ile işlenen numunelerde çok belirgin olmayan çatlak ağları, elektrota apatit toz katkısının eklenmesi ile

daha belirgin şekilde görüntülenmiştir. Özellikle %30 HA toz katkıli elektrot ile işlenen numunede, 22A darbe akımı ve 25µs darbe süresinde, yeniden katılmış katmanı geçerek ısı etkilenmiş katmana ve ana faz malzemeye kadar penetre olmuş derin çatlak ağları oluşmuştur (Şekil 5.9). Bu çatlak oluşumu noktasal EDAX analizi ile tekrar incelendiğinde, elektrottaki Ag tozların sadece yüzeye değil, çatlakların içine de penetre olduğu ve nüfuz ettiği görülmüştür (Şekil 5.10). Elektriksel kıvılcımla işleme esnasında termal gerilmelerin sebep olduğu mikro çatlakların, bu tür biyouyumlu kaplamalarda gözenekli doku özelliğini desteklediği ve hücrelerin çoğalabileceği yüzey alanını genişlettiği için olumlu etki yaratabileceği düşünülebilir. Ancak malzemenin yorulma mukavemetinin de değerlendirilmesi gerekir. Yöntem kaynaklı çatlak oluşum mekanizmasının dışında, Ag tozların Ti-6Al-4V iş parçası ile temas etmesi, katı metal gevrekleşmesine ve derin çatlak yapılarının oluşmasına sebep olmuştur (Qing and Buchely 2017). İşlemin doğası gereği yüzeyde oluşan kraterli yapının da kemiğe benzer porozlar şeklinde oluşması, bu yöntemin avantajları arasında değerlendirilebilir.

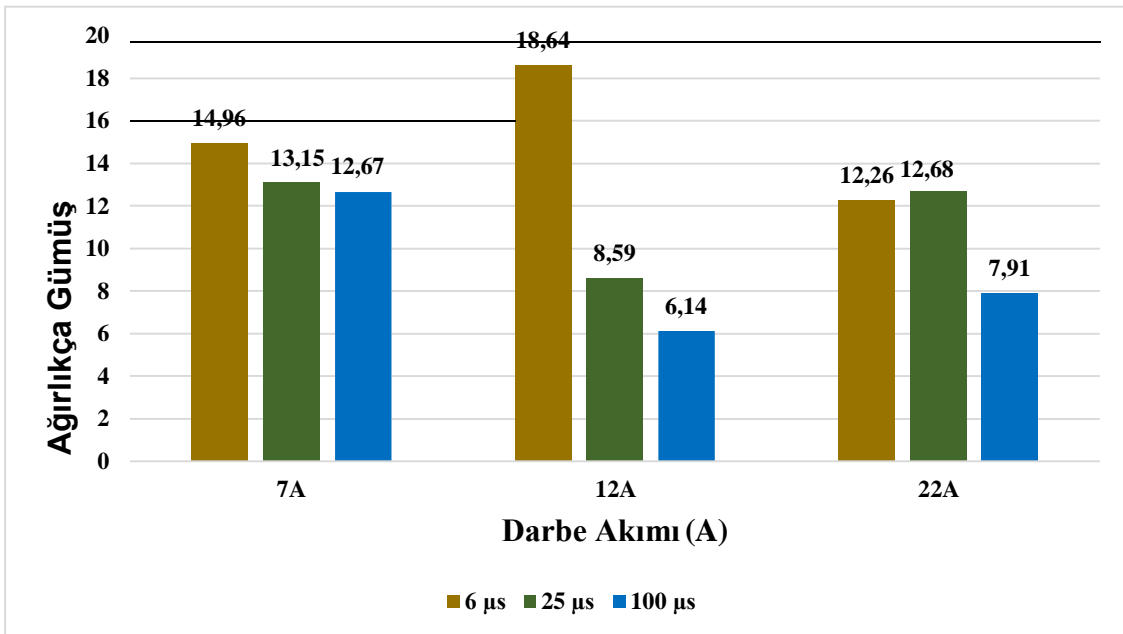


Şekil 5.9 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin kesit mikro yapısı.

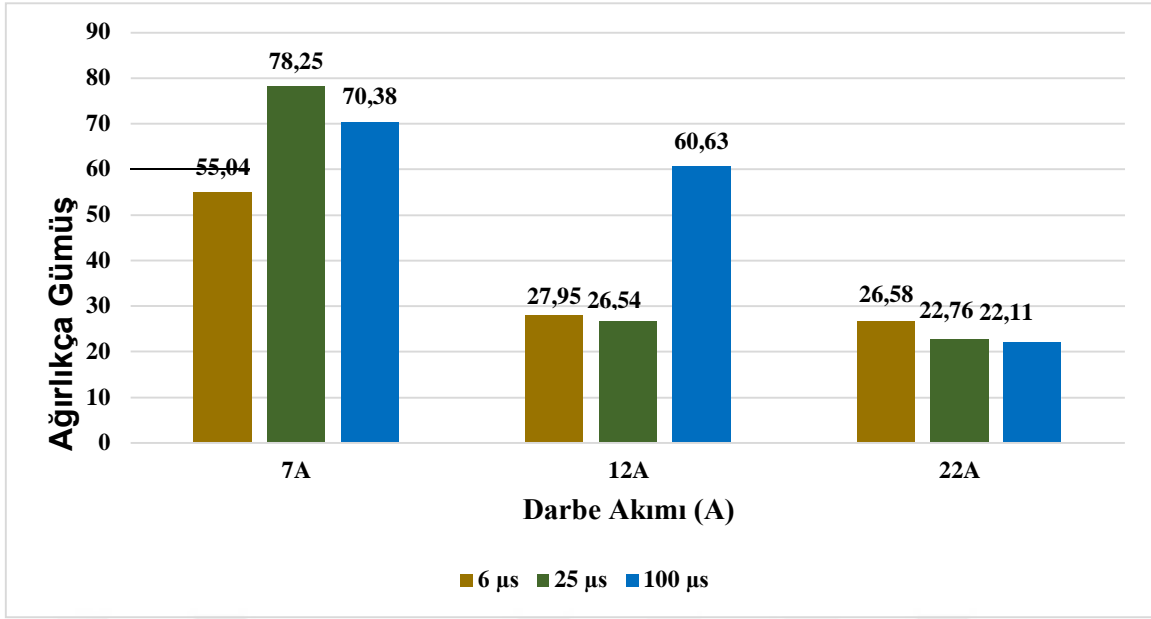


Şekil 5.10 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin noktasal EDAX analizi.

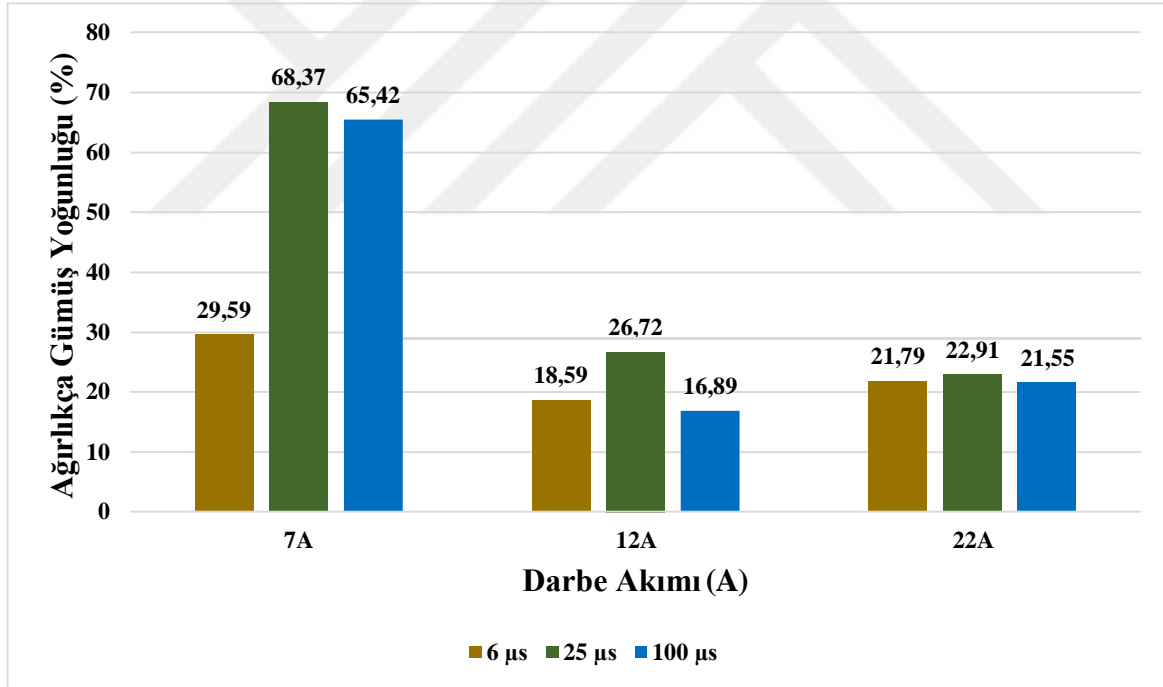
Farklı elektrot oranı, darbe akımı ve darbe süresinde işlenen 39 adet numunenin elementel analizleri değerlendirildiğinde, 12 A darbe akımı, 100 µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen numune ağırlıkça %6,14 oranında Ag nüfuziyeti ile en az kaplanan yüzey olmuştur (Şekil 5.11). Diğer elektrotlara kıyasla, %100 Ag elektrot ile işlenen tüm numunelerde her parametrede daha az kaplama tabakası oluşmuştur. Bunun asıl sebebi; işleme sırasında oluşan kıvılcımların yüzeye tek bir boşalım kanalından etkimesi ve daha az yoğunlukta malzeme birikmesine sebep olmasıdır. Elektrota %10 apatit toz katkısının ilave edilmesiyle birlikte yüzeydeki Ag yoğunluğu giderek artmış ve 12 A darbe akımı, 6 µs darbe süresinde en yüksek değer olan ağırlıkça %78,25'e ulaşmıştır (Şekil 5.12). Böyle bir sonuç, HA toz katkısının yüzeye Ag taşınımına katkı sağladığı şeklinde yorumlanabilir. Benzer şekilde, %20 apatit toz katkılı elektrot ile işlenen numunede 12 A darbe akımı, 6 µs darbe süresinde %68,37 oranında Ag kaplama tabakası oluşmuştur (Şekil 5.13). %30 apatit toz katkılı elektrotta ise 22 A darbe akımı, 25 µs darbe süresinde, %71,38 oranında Ag kaplama tabakası oluşmuştur (Şekil 5.14). Ancak yüzeyde bu kadar fazla oranlarda Ag nüfuziyeti olması, yüzeyin daha biyoyumlu olduğu anlamına gelmemektedir. Literatürde biyoyumlu Ag kaplama tabakası üzerine yapılan bir çalışmada, Ag miktarının yüzeyde ağırlıkça %4,285'in üzerinde olmasının toksik etki yarattığı, hücrelerin 5. gün sonunda canlılığını kaybettiğini, ağırlıkça %2,229 oranında Ag kaplama tabakasının, hücrelerin koloni oluşturarak büyüyüp çoğalması için daha uygun bir ortam sağladığını kanıtlamıştır (Patil et al. 2019).



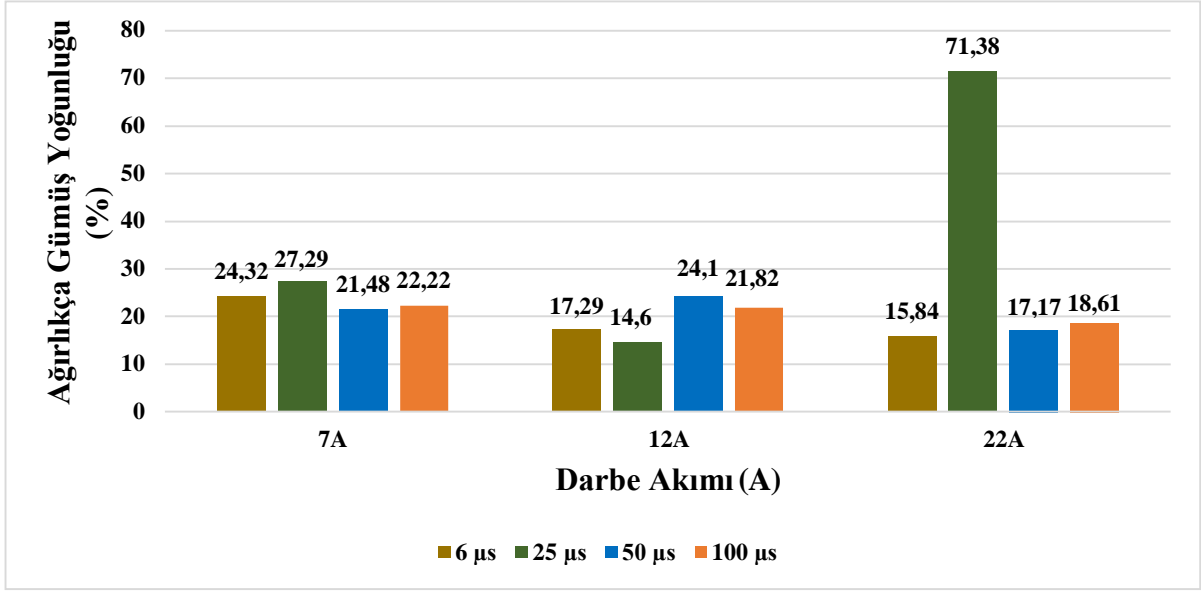
**Şekil 5.11** %100 Ag elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.



Şekil 5.12 %90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.

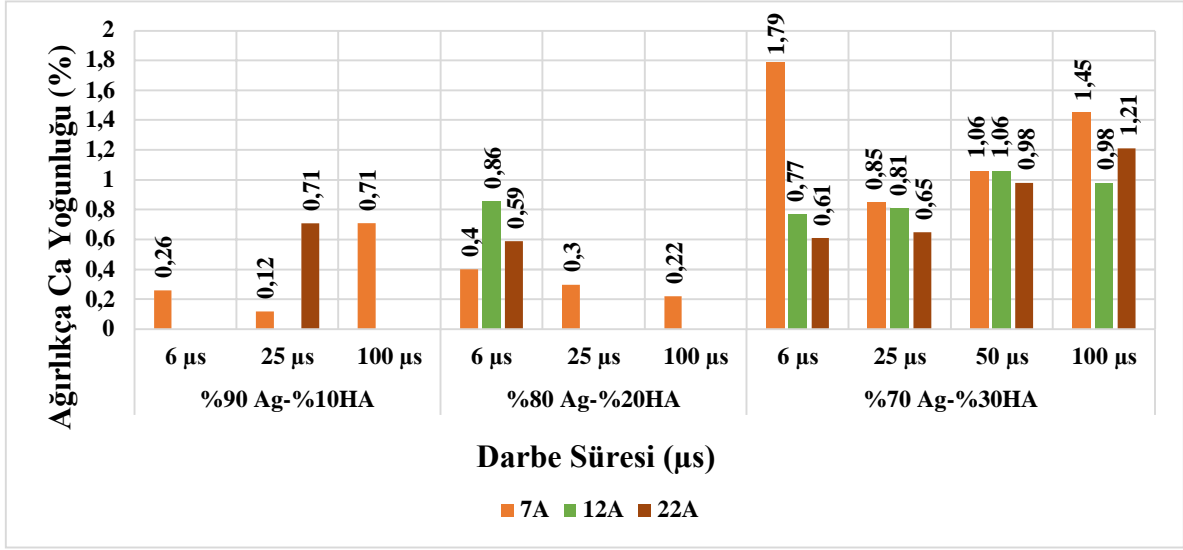


Şekil 5.13 %80 Ag-%20 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.

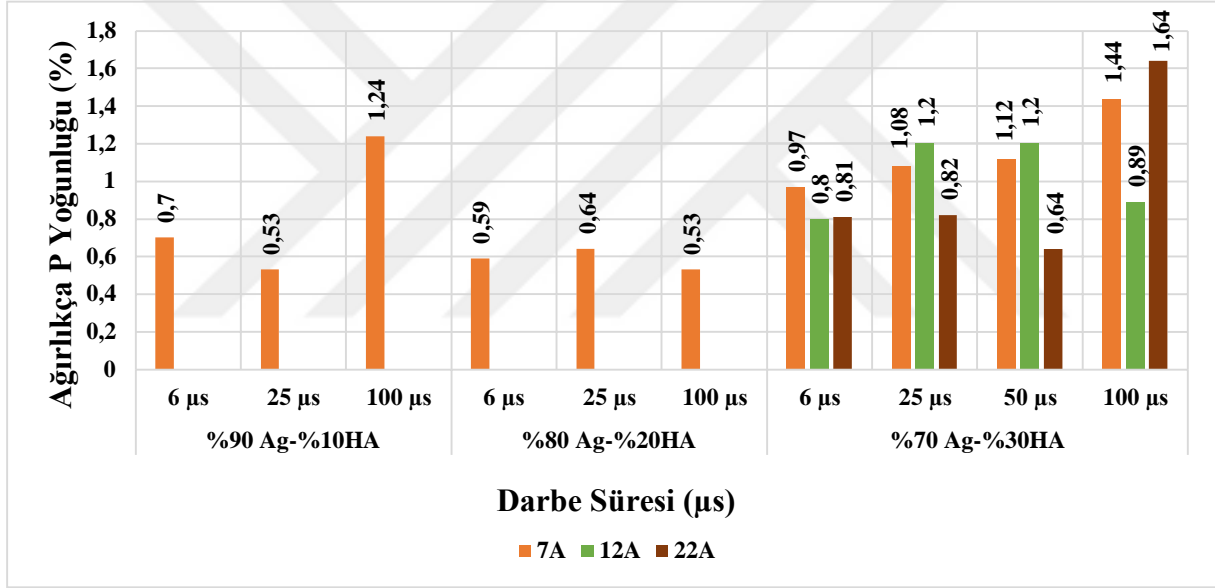


**Şekil 5.14** %70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunelerin darbe akımı ve darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ag yoğunluğu.

Elektrottaki Ag miktarı, hidroksiapatit toz katkısına kıyasla hacimce daha fazla oranda karıştırıldığından, yüzeyde oluşan kaplama tabakasında çok daha düşük miktarlarda Ca ve P izlerine rastlanmıştır. %30 apatit toz katkılı elektrot ile işlenen numunede, 7A darbe akımı, 6 µs darbe süresinde %1,79 oranında Ca yoğunluğu görülmüştür. Bu oran, yüzeyde ağırlıkça Ca yoğunluğunun en fazla olduğu değerdir (Şekil 5.15). Yine %30 apatit toz katkılı elektrot ile 22A darbe akımı, 100 µs darbe süresinde %1,64 oranında P'nin yüzeye nüfuz ettiği görülmektedir (Şekil 5.16). Grafiklerde görüldüğü üzere, bazı darbe akımı değerlerinde yüzeye hiç Ca ve P taşınımı gerçekleşmemiştir. Elektrottaki HA toz katkısı oranı arttıkça yüzeye daha fazla Ca ve P nüfuz etmiştir. Kemiğin yapısı, Ca ve P elementleri açısından oldukça zengindir. Bu nedenle elde edilen kaplama tabakasında da kemiğe benzer içeriğe sahip elementlerin oluşturulması, biyouyumluluğun artırılmasını sağlar. Bu açıdan EKİ yöntemi; elektrottaki toz katkısı, darbe akımı ve darbe süresi parametrelerinden birinin bile değiştirilmesi ile kaplama tabakasının farklılaşmasına ve dolayısıyla çok çeşitli yüzeylerin oluşturulması ile farklı oranlarda biyouyumlu kaplamaların elde edilmesine imkân sağlamıştır.



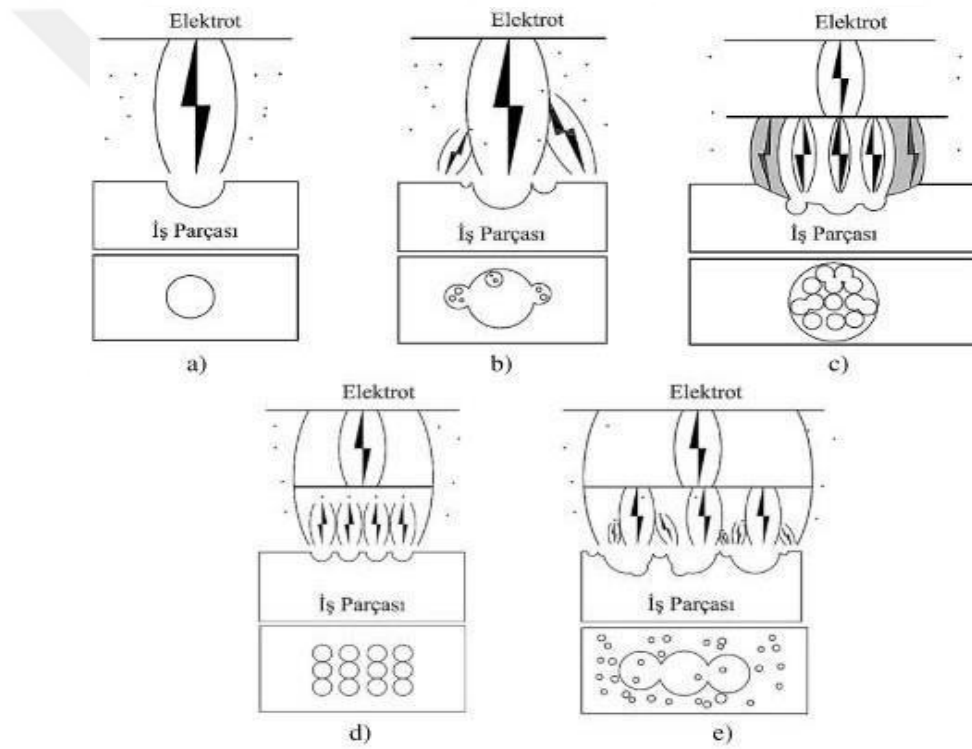
Şekil 5.15 Elektrot, darbe akımı, darbe süresi değişimine göre ağırlıkça Ca yoğunluğu.



Şekil 5.16 Elektrot, darbe akımı, darbe süresi değişimine göre ağırlıkça P yoğunluğu.

Elektrottan kopan Ag ve HA tozların yüzeye nüfuz etmesi ile elde edilen farklı yoğunluklardaki kaplama tabakaları, kesit mikro yapı analizlerinde de görüldüğü üzere yeniden katılmış ve ısıl etkilenmiş katman kalınlıklarında ciddi farklılıklara yol açmıştır. Bu farklılıkların daha net anlaşılabilmesi için, her numunenin kesit mikro yapısında belirgin görünüme sahip birer adet fotoğrafı seçilmiş ve her fotoğraftan kesit boyunca toplam 20 kalınlık ölçümünün ortalaması alınarak grafik üzerinde işaretlenmiştir. Elektrot oranı, darbe akımı ve darbe süresi parametrelerinin değişimi ile oluşturulan grafikler incelendiğinde, katman kalınlıklarının işleme sırasında oluşan kıvılcım mekanizmasına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

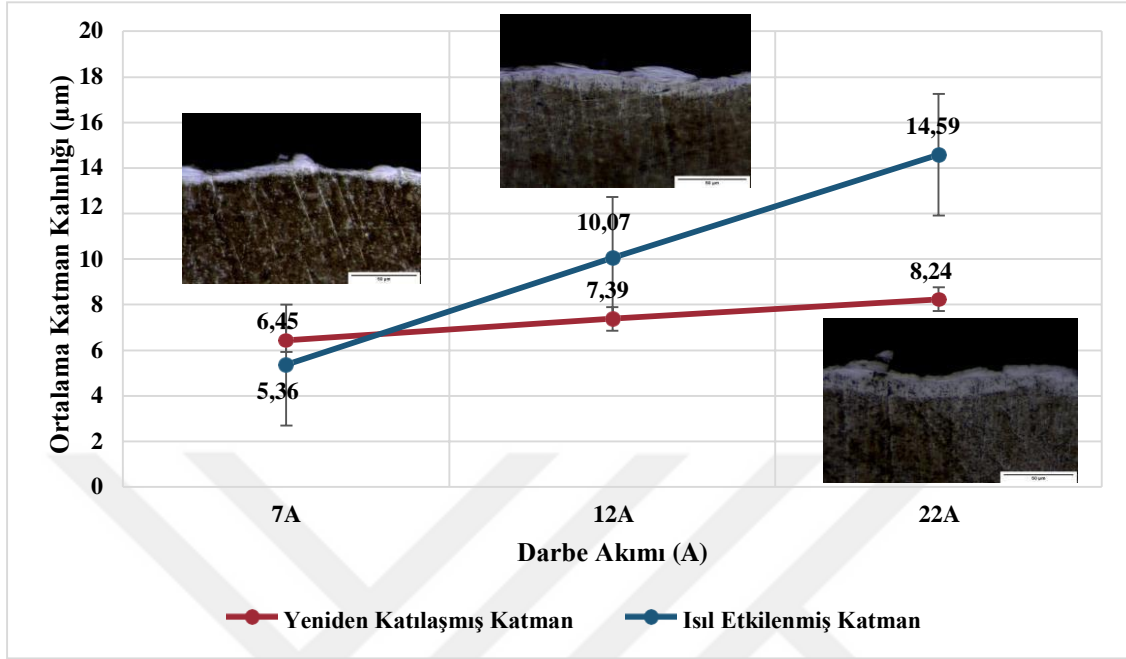
Literatürde daha önce yapılan bir çalışmada, elektriksel kıvılcımla işleme yönteminde işleme sırasında oluşan boşalım kanalı için 5 farklı kıvılcım formu önerilmiştir. Birinci kıvılcım formu tekil kıvılcımlardır (Şekil 5.17a). İkinci kıvılcım formu, tekil kıvılcımlardan az sayıda ve düşük enerji seviyelerinde ayrılan ikincil kıvılcımlardır (Şekil 5.17b). Üçüncü formda ise tekil kıvılcım kanalının dış çeperleri korunmakta, kanal merkezinden başlayarak çok sayıda ve birbirine yakın enerji seviyelerinde ikincil kıvılcımlar ayrılmaktadır (Şekil 5.17c). Dördüncü kıvılcım formu üçüncü kıvılcım formuna benzemektedir. Tekil kıvılcımların tamamı birbirine yakın enerji seviyelerinde çok sayıda ikincil kıvılcımlara ayrılmıştır (Şekil 5.17d). Beşinci kıvılcım formunda ise ikincil kıvılcımlardan ayrılan az sayıda üçüncül kıvılcımlar etkin olmaktadır (Şekil 5.17e) (Ekmekci vd. 2016).



**Şekil 5.17** Elektriksel kıvılcımla işlemede farklı formlardaki kıvılcım mekanizmaları (Ekmekci et al. 2016).

%100 Ag elektrot ile işlenen numunelerde 6  $\mu$ s darbe süresinde, darbe akımının artmasıyla birlikte ısıl etkilenmiş ve yeniden katılaşmış katman kalınlıklarında artış görülmüştür. Darbe akımı 22 A seviyesine çıkartıldığında, ısıl etkilenmiş katman kalınlığı ortalama 14,59  $\mu$ m seviyesinde iken, yeniden katılaşmış katman kalınlığı ortalama 8,24  $\mu$ m olarak en yüksek pik değerine ulaşmıştır (Şekil 5.18). Bu katman kalınlıkları, apatit toz katkılı elektrotlar ile işlenen numunelerde ki değerlere kıyasla oldukça düşüktür. %100 Ag elektrot ile işlenen numunelerde,

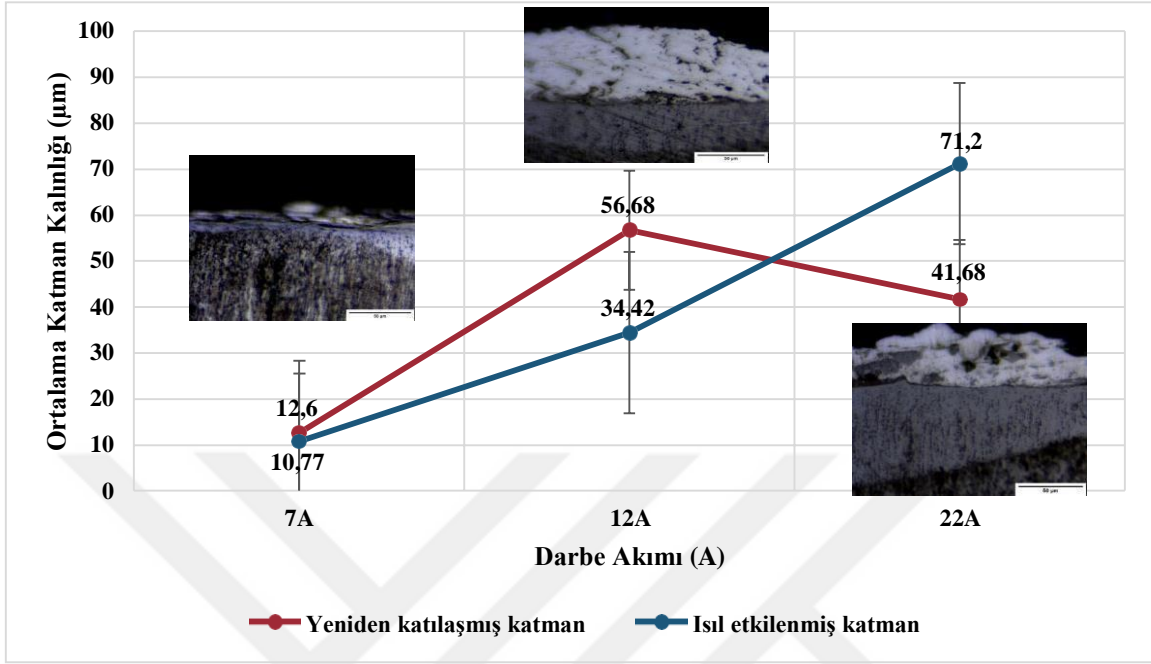
işleme sırasında tekil kıvılcımlar ile tekil kıvılcımlardan az sayıda ve düşük enerji seviyelerinde ayrılan ikincil kıvılcımların etkin olduğu söylenebilir.



**Şekil 5.18** Darbe akımı değişimine göre ortalama katman kalınlıkları (%100 Ag elektrot, darbe süresi:6µs).

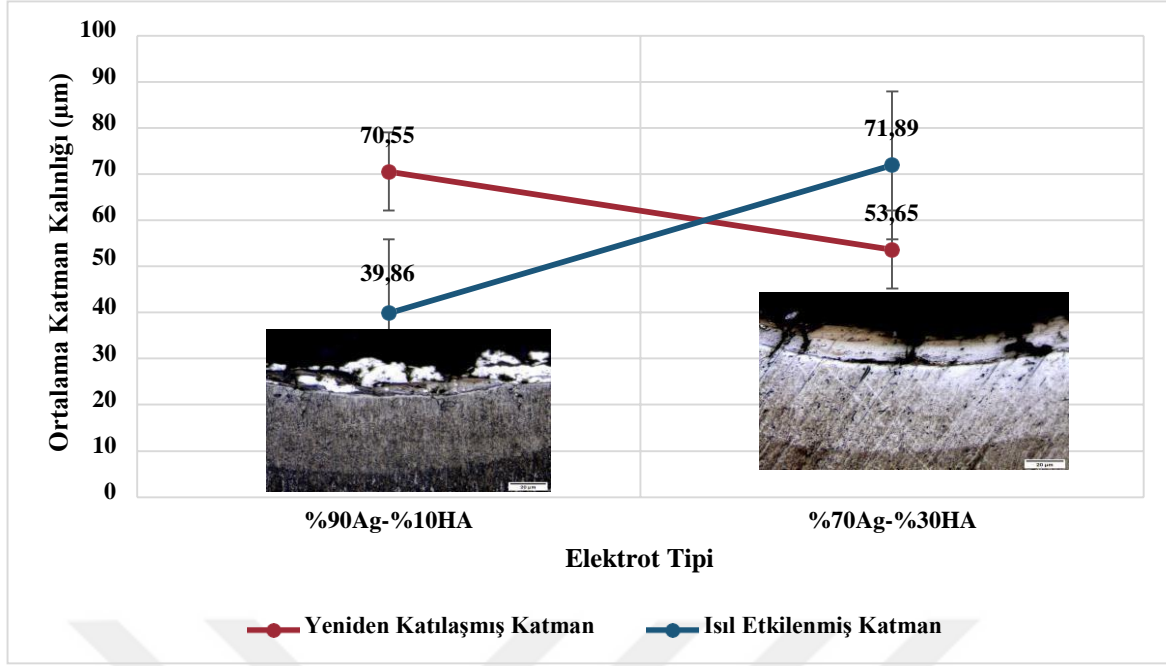
Elektrota %10 apatit toz katkısının ilave edilmesiyle, yeniden katılmış ve ısıl etkilenmiş katman kalınlıklarında ciddi artış görülmüştür (Şekil 5.19). 7 A darbe akımında yeniden katılmış katman kalınlığı ortalama 12,6 µm iken, darbe akımı 12 A seviyesine çıkartıldığında ortalama 56,68 µm'ye yükselmiş ve maksimum değere ulaşmıştır. 22 A darbe akımında tekrar düşüşe geçerek ortalama 41,68 µm kalınlığında yeniden katılmış katman oluşumu gözlenmiştir. Burada katman kalınlığındaki düşüşün asıl sebebi, ana boşalım kanalının yüzeye tekil kıvılcımlar şeklinde etki etmesidir. Isıl etkilenmiş katman kalınlığı ise darbe akımı arttıkça artmaya devam etmiş ve 22 A darbe akımında ortalama 71,2 µm'ye ulaşmıştır. Katman kalınlıklarının akımın yükselmesiyle birlikte artması beklenen bir sonuçtur. Yüksek akım değerlerinde daha yüksek enerji oluşacağından, işleme sırasında di-elektrik sıvı ile sürekli temas eden yüzeyde daha fazla malzeme ergiyip tekrar katılacaktır. Benzer şekilde elektrota ilave edilen apatit toz katkısı arttıkça, di-elektrik sıvının direnci zamanla düşer. Böylece numune yüzeyine düşen toplam ısıl enerji ve ısıl etkilenmiş katman kalınlığı artar. Elektrota %10 apatit toz katkısının eklenmesi ile artan katman kalınlıkları, tekil ve ikincil kıvılcımlardan ziyade üçüncül kıvılcımların devreye girdiğine işaret etmiştir. İşleme sırasında tekil kıvılcım

kanalının merkezinden başlayarak çok sayıda ve birbirine yakın enerji seviyelerinde ikincil kıvrımların oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 5.19 Darbe akımı değişimine göre ortalama katman kalınlıkları (%90 Ag-%10 HA elektrot, darbe süresi:6 µs).

22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %10 apatit toz katkılı elektrot ile işlenen numunede, ortalama 70,55 µm ölçülen yeniden katılmış katman kalınlığı, elektrota %30 apatit toz katkısının eklenmesi ile ortalama 53,65 µm'ye düşmüştür. %10 apatit elektrot ile işlenen numunede ortalama 39,86 µm ölçülen ısıl etkilenmiş katman kalınlığı, apatit toz oranının artmasıyla ortalama 71,89 µm'ye yükselmiştir (Şekil 5.20). Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, apatit toz katkısının kıvrımlar mekanizmasını değiştirerek yüzeye daha fazla malzeme transferi sağladığı açıkça görülmektedir.



**Şekil 5.20** Elektrot toz katkıları yoğunluğuna göre ortalama katman kalınlıkları (darbe akımı:22A, darbe süresi:25µs).

## 5.2 DEĞERLENDİRME

Titanyum ve alaşımları, düşük elastisite modülü, yüksek mekanik özellik ve korozyon direncinden dolayı biyomedikal implant uygulamalarında en çok tercih edilen malzemelerdir. İyi özelliklerinin yanı sıra, içerdiği Al ve V elementleri vücut sıvısı ile uzun süre etkileşimde bulunduğu zaman oluşan iyon salınımından dolayı Alzheimer, nöropati, osteomalazi gibi çeşitli hastalıklara yol açtığı tespit edilmiştir. Bu sebeple literatürde farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler uygulanarak, titanyum alaşımlarının yüzey pürüzlülükleri, topografileri ve kimyasal kompozisyonları değiştirilerek kemik ile implant arasındaki bağlanmanın ve biyouyumluluğun artırılması ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ise elektriksel kıvılcımla işleme yöntemi ile farklı oranlarda Ag-HA toz katkılı elektrotlar kullanılarak zenginleştirilmiş biyouyumlu kaplamaların, yapılan analizler sonucunda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Katman kalınlıkları; elektrot, darbe akımı ve darbe süresine bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak uygulanan enerji yoğunluğunun yükselmesi ile katman kalınlıkları artmaktadır. Daha yüksek akım seviyelerinde daha kalın katman oluşumları gözlenmiştir.

2) Elektrotta apatit tozların ilave edilmesi, di-elektrik sıvının elektriksel yalıtım direncini düşürerek daha fazla enerjinin iş parçası yüzeyine etkimesini ve dolayısıyla katman kalınlıklarının artmasını sağlamıştır.

3) Elektriksel kıvılcımla işleme yönteminin sert ve karmaşık doğası gereği, yüzey topografisinde oluşan kraterlerin metalürjik yapıları da birbirinden farklıdır. Yüksek darbe akımlarında daha derin kraterler oluşurken, yüksek darbe sürelerinde daha sığ ve yayvan kraterlerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

4) İşlenen numunelerin kesit mikro yapıları incelendiğinde, işlem sırasında oluşan yüksek noktasal sıcaklıkların etkisiyle farklı tonlarda katmanlar ile alışılmamış faz değişimlerinin oluştuğu dikkat çekmiştir.

5) İşleme sırasında açık aralık geriliminin düşmesi ile açılan ana boşalım kanalı, elektrottan ayrılarak di-elektrik sıvıya karışan toz taneleri ile karşılaşır. Ana boşalım kanalının toz tanecikleri şeklindeki süreksizliklerle karşılaşması, kanalın yön değiştirmesine veya saçılmasına sebep olur. İkincil kıvılcım mekanizmasının etkinleştiği bu durumda, kıvılcımlar arasında sıkışan asılı toz taneleri, darbe süresinin sonlanması ile eriyik havuza hücum ederek eriyik içinde katılmıştır.

6) Elektrottaki apatit toz katkısının ve darbe akımının artmasıyla, birbirini dik şekilde kesen ortogonal çatlak ağlarının oluştuğu görülmüştür. Termal gerilmelerin veya Ag tozların ilave edilmesi ile Ti gevrekleşmesinin sebep olduğu mikro çatlakların, malzemenin yorulma mukavemetini düşürmediği sürece biyouyumlu kaplamalarda gözenekli doku özelliğini desteklediği ve hücrelerin çoğalabileceği yüzey alanını genişlettiği için olumlu etki yaratabileceği düşünülebilir.

7) Ag yoğunluğunun belirli bir değerin üzerinde olması, vücutta toksik etki yaratır. Bu tez çalışmasında elde edilen veriler literatürde yapılmış diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, kaplama tabakasındaki Ag yoğunluğunun çok yüksek pik değerlerine ulaştığı görülmüştür.

8) XRD analizlerinde elde edilen fazlar değerlendirildiğinde, de-iyonize sudan kaynaklanan oksit tabakalarının (TiO, AgO) oluştuğu görülmüştür. Korozyon direnci yüksek olan bu oksit

tabakaların, literatürde yapılan çalışmalarda biyouyumluluğu desteklediği ile ilgili veriler bulunmaktadır.

Genel olarak bu çalışma açısından EKİ yönteminin avantajını değerlendirecek olursak; işlem sırasında çok yüksek noktasal sıcaklık değerlerine ulaşılır ve oluşan yüksek enerji yoğunluğu sayesinde yüzeyde farklı büyüklüklerde krater geometrileri elde edilir. İnsan kemiği poroz olarak adlandırılan gözenekli bir yapıya sahip olduğundan, EKİ ile elde edilen krater geometrileri avantaj sağlayacaktır. Yüzeyin Ca-P içerikli biyoseramik malzeme olan HA ile kaplanması ile biyouyumluluk ve osseointegrasyon artacaktır. Bu sebeple EKİ yönteminin bu tür medikal implant uygulamaları için avantaj sağlayacağı söylenebilir.

EKİ yönteminin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle sinterlenmiş elektrottaki Ag toz katkısı yoğunluğunun çok yüksek pik değerlerinde olması, yöntemin medikal implant uygulamalarında kullanılabilirliğini azaltacaktır. Gümüş yoğunluğunun vücutta yüksek oranlarda bulunması toksik etki yaratacağından, elektrotun farklı toz oranları ve toz katkıları ile tekrar üretilmesi gerekmektedir. Bunun dışında; iş parçaları düşük darbe akımı ve darbe sürelerinde işlendiğinde, işleme süreleri uzamaktadır. Yöntemin ticari uygulamalarda seri üretimde kullanılabilirliğinin artırılması için işleme sürelerinin kısaltılması gerekmektedir.

### **5.3 İLERİYE DÖNÜK OLASI ÇALIŞMALAR**

Elde edilen bulgular, EKİ yöntemi ile işlenmiş yüzeyler elde edilebilmesinin dışında, işleme sırasında pozitif kutuplama seçildiğinde yüzeyin hem işlendiği hem de kaplandığını göstermiştir. Elektrottan veya di-elektrik sıvıdan ayrılan toz tanelerinin yüzeye farklı yoğunluklarda hücum ederek kaplama tabakası oluşturduğu yapılan analizler sonucunda kesinleşmiştir. Bu çalışmada, farklı boyut ve yoğunlukta toz katkıları ile medikal uygulamalarda kullanılacak çeşitli yüzey özelliklerine sahip implantların EKİ yöntemi ile üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Tüm bu avantajların dışında, her defasında aynı şekilde ve homojen olarak işlenebilen fonksiyonel yüzeylerin elde edilebilmesi için belirli parametrelerde matematiksel bir modelin oluşturulması, ileriye dönük bir çalışma alanı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca analizler sonucunda elde edilen bulgular, yüzeyde çok fazla Ag biriktiğini ve toksik etki yaratabileceğini göstermiştir. Bu değerlerin daha düşük seviyelere indirilmesi için elektrotun farklı toz katkıları ile seyreltilmesi veya farklı elektriksel parametreler belirlenmesi, ileride yapılacak çalışmalar için önem arz etmektedir. Elde edilen

yüzeylet üzerinde, laboratuvar ortamında hücre canlılık testlerinin yapılması ile hangi parametrelerde biyouyumlu kaplamaların elde edildiği farklı bir araştırma alanı olarak değeriendirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Abdel H and El-Hofy G** (2005) *Advanced Machining Process*, McGraw-Hill, New York, 115-139.
- Abdul-Rani A M, Nanimina A M, Ginta T L and Razak M A** (2017) Machined Surface Quality in Nano Aluminum Mixed Electrical Discharge Machining. *SMPM Conference*, 23-25 January 2017, Kruger National Park, South Africa, *Procedia Manufacturing*, Vol.7, 510-517.
- Ahmed A** (2016) Deposition and Analysis of Composite Coating on Aluminum Using Ti-B<sub>4</sub>C Powder Metallurgy Tools in EDM Deposition and Analysis of Composite Coating on Aluminum Using Ti- B<sub>4</sub>C Powder Metallurgy Tools in EDM. *Material and Manufacturing Processes*, 31(4): 467-474.
- Algoji S J, Murray J W, Brown P D and Clare A T** (2018) Wear performance of TiC/Fe cermet electrical discharge coatings. *Wear*, 402-403: 109-123.
- Arun I, Yuvaraj C, Selvarani P, Senthilkumaar J S, Thamizhmanii S and Muruganandam P** (2019) Synthesis of electrical discharge metal matrix composite coating through compacted semi-sintered electrode and its tribological studies. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(5): 213.
- Bui V D, Mwangi J W and Schubert A** (2019) Powder mixed electrical discharge machining for antibacterial coating on titanium implant surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, 44:261-270.
- Chen Q and Thouas G A** (2015) Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R*, 87:1-57.
- Chen S, Lin M, Huang G and Wang C** (2014) Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized water mixed with titanium powder as dielectric solvent. *Applied Surface Science*, 311:47-53.
- Clemente A I, Ortega Domínguez Crespo M A, Torres-Huerta A M and Bustamante E O** (2011) Development of Corrosion Coatings by Controlled Chemical Precipitation Method for Biomedical Applications Using AISI 316 L Stainless Steel. *XXVI Congress of the Mexican Society of Electrochemistry and 4th Meeting of the ECS Mexican Section*, January 2011, Mexican, *ECS Transactions*, 36 (1): 187-196.
- Cogun C, Esen Z, Genc A, Cogun F and Akturk N** (2015) Effect of powder metallurgy Cu-B<sub>4</sub>C electrodes on workpiece surface characteristics and machining performance of electric discharge machining. *Engineering Manufacture*, 230 (12): 2190-2203.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- D Tijo, Kumari S and Masanta M** (2018) Ceramic-metal Composite Coating on Steel Using a Powder Compact Tool Electrode by the Electro-Discharge Coating Process. *Silicon*, 10:1625–1637.
- Das S, Das S, Raman R K, Devarani N and Joshi S N** (2019). Surface Alloying of Titanium Di-boride (  $TiB_2$  ) and Silicon Carbide Surface Alloying of Titanium Di-boride (  $TiB_2$  ) and Silicon Carbide (  $SiC$  ) on Aluminium using Discharge Processing 2016 , Electric (  $SiC$  ) on Aluminium using Electric Discharge Process. *Procedia Structural Integrity*, 14: 119–126.
- Ekmekci B** (2009) White Layer Composition , Heat Treatment , and Crack Formation in Electric Discharge Machining Process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 40(1): 70–81.
- Ekmekci B, Yaşar H and Ekmekci N** (2016) A Discharge Separation Model for Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138: 1–9.
- Ekmekci N and Ekmekci B** (2013) Hydroxyapatite Deposition onto Ti-6Al-4V Surface in Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Material Science and Engineering Technology II*, 856: 205–209.
- Ekmekci N and Ekmekci B** (2016) Electrical Discharge Machining of Ti6Al4V in Hydroxyapatite Powder Mixed Dielectric Liquid Electrical Discharge Machining of Ti6Al4V in Hydroxyapatite Powder Mixed Dielectric Liquid. *Material and Manufacturing Processes*, 31(13): 1663–1670.
- Elaiyaran U, Satheeshkumar V and Senthilkumar C** (2018) Experimental analysis of electrical discharge coating characteristics of magnesium alloy using response surface methodology. *Materials Research Express*, 5: 1–21.
- Gill A S and Kumar S** (2015a) Surface Alloying by Powder Metallurgy Tool Electrode Using EDM Process. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5): 1723–1730.
- Gill A S and Kumar S** (2015b) Surface alloying of H11 die steel by tungsten using EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78: 1585–
- Gill A S and Kumar S** (2016) Micro-hardness evaluation for surface alloying of H11 die steel with Cu – Cr – Ni powder metallurgy tool in electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 232(3): 1–13.
- Gill A S, Kumar S, Gill A S and Kumar S** (2016) Surface Roughness and Microhardness Evaluation for EDM with Cu – Mn Powder Metallurgy Tool Surface Roughness and Microhardness Evaluation for EDM with Cu – Mn Powder Metallurgy Tool. *Material and Manufacturing Processes*, 31(4): 514–521.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gill S A and Kumar S** (2018) Investigation of Micro-Hardness in Electrical Discharge Alloying of En31 Tool Steel with Cu – W Powder Metallurgy Electrode. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43 (3): 1499–1510.
- Goyal P, Kumar S and Kumar R** (2018) Effect of High Chromium Platinum steel with composite Copper- Tin material electrode on Electric Discharge Machining Performance. *Materials Today: Proceedings*, 5(14): 27726–27731.
- Goyal P, Suri N M, Kumar S and Kumar R** (2017) Investigating the surface properties of EN-31 die-steel after machining with powder metallurgy EDM electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3694–3700.
- Gülcan O, Uslan İ, Usta Y and Çoğun C** (2016) Performance and surface alloying characteristics of Cu – Cr and Cu – Mo powder metal tool electrodes in electrical discharge machining. *Machining Science and Technology*, 20(4), 523–546.
- Hallab N J, Vermes C, Messina C, Roebuck K A, Glant T T and Jacobs J J** (2002) Concentration- and composition-dependent effects of metal ions on human MG-63 osteoblasts. *Journal of Biomedical Materials Research*, 60(3), 420–433.
- Harcuba P, Bacáková L, Stráský J, Bacáková M, Novotná K and Janecek M** (2012) Surface treatment by electric discharge machining of Ti – 6Al – 4V alloy for potential application in orthopaedics. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 7: 96–105.
- Hussain M, Khan U, Jangid R and Khan S** (2017) Hardness and wear analysis of Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for application in EDM electrode. *IconAMMA 2017*, 17-19 August 2017, Bengaluru, India, *Material Science and Engineering*, Vol. 310, 1-9.
- Kumar Mathan P, Sivakumar K and Jayakumar N** (2018) Surface Modification on OHNS Steel Using Cu-CrB<sub>2</sub> Green Compact Electrode in EDM. *Materials Today: Proceedings*, 5: 17389–17395.
- Kumar S, Singh R, Singh T P and Sethi B L** (2009) Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8): 3675–3687.
- Lee B E J, Ho S, Mestres G, Karlsson M, Koshy P and Grand K** (2016) Dual-topography electrical discharge machining of titanium to improve biocompatibility. *Surface and Coatings Technology*, 296: 149–156.
- Lee W, Yang T, Wu Y and Peng P** (2013) Nanoporous Biocompatible Layer on Ti-6Al-4V Alloys Enhanced Osteoblast-like Cell Response. *Journal of Experimental and Clinical Medicine*, 5(3), 92–96.
- Mostafa N Y** (2005) Characterization , thermal stability and sintering of hydroxyapatite powders prepared by different routes. *Materials Chemistry and Physics*, 94, 333–341.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Murray J W and Clare A T** (2016) Morphology and wear behaviour of single and multi-layer electrical discharge coatings. *ISEM XVIII*, 19-22 April 2016, *Procedia CIRP*, Nottingham, UK Vol. 42, 236-239.
- Murugan R and Ramakrishna S** (2005) Development of nanocomposites for bone grafting. *Composites Science and Technology*, 65: 2385–2406.
- Oglezneva S A and Ogleznev N D** (2017) Investigation of Structure and Properties of Tool-electrode “Cu-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>” for EDM, *AIME 2017*, 27-29 July 2017, Tomsk Polytechn Univ, Tomsk, RUSSIA, *Advances in Engineering Research*, Vol.133, 567–572.
- Öpöz T T, Yaşar H, Murphy M F, Ekmekci N and Ekmekci B** (2019) Ti6Al4V Surface Modification by Hydroxyapatite Powder Mixed Electrical Discharge Machining for Medical Applications. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31(1): 1–10.
- Otsuka F, Kataoka Y and Miyazaki T** (2012) Enhanced osteoblast response to electrical discharge machining surface. *Dental Materials Journal*, 31(2): 309–315.
- Ou S and Wang C** (2016) Fabrication of a hydroxyapatite-containing coating on Ti – Ta alloy by electrical discharge coating and hydrothermal treatment. *Surface & Coatings Technology*, 302: 238–243.
- Ou S and Wang C** (2017) Effects of bioceramic particles in dielectric of powder-mixed electrical discharge machining on machining and surface characteristics of titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 245: 70–79.
- Patil D, Kaushal M, Aravindan S, Vivekanandan P and Rao P V** (2019) Antibacterial and cytocompatibility study of modified Ti6Al4V surfaces through thermal annealing. *Materials Science & Engineering C*, 99: 1007–1020.
- Patowari P K, Saha P and Mishra P K** (2015) An experimental investigation of surface modification of C-40 steel using W – Cu powder metallurgy sintered compact tools in EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80: 343–360.
- Peng P W, Ou K L, Lin H C, Pan Y N and Wang C H** (2010) Effect of electrical-discharging on formation of nanoporous biocompatible layer on titanium. *Journal of Alloys and Compounds*, 492(1–2): 625–630.
- Prakash C, Singh S, Pruncu C I, Mishra V, Królczyk G, Pimenov D Y and Pramanik A** (2019) Surface Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Electrical Discharge Coating Process Using Partially Sintered Ti-Nb Electrode. *Materials*, 12(7): 1006.
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2015) Processing and Characterization of Novel Biomimetic Nanoporous Bioceramic Surface on b -Ti Implant by Powder Mixed Electric Discharge Machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(9): 3622–3633.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

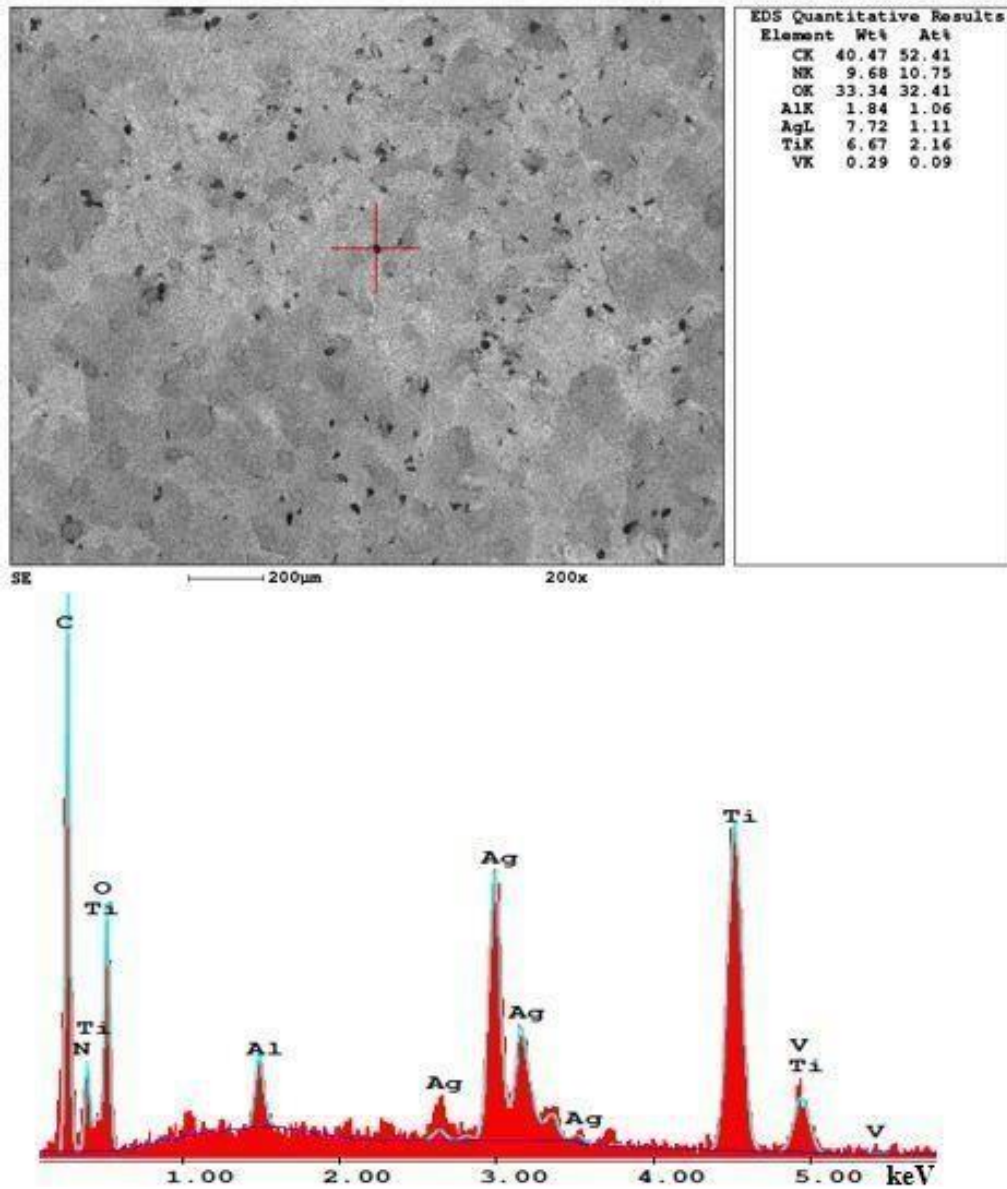
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2016a) Multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining parameters for fabrication of biocompatible layer on  $\beta$ -Ti alloy using NSGA-II coupled with Taguchi based response surface methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(9): 4195–4204.
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2016b) Powder Mixed Electric Discharge Machining: An Innovative Surface Modification Technique to Enhance Fatigue Performance and Bioactivity of  $\beta$ -Ti Implant for Orthopedics Application. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(4): 1–9.
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2017a) Experimental investigations in powder mixed electric discharge machining of Ti – 35Nb – 7Ta – 5Zr  $\beta$ -titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(3): 274–285.
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2017b) On the Influence of Nanoporous Layer Fabricated by PMEDM on  $\beta$ -Ti Implant: Biological and Computational Evaluation of Bone-Implant Interface. *ICMPC 2016*, 12-13 March 2016, Hyderabad, India, *Materials Today: Proceedings*, 4(2): 2298–2307.
- Prakash C and Uddin M S** (2017) Surface modification of  $\beta$ -phase Ti implant by hydroxyapatite mixed electric discharge machining to enhance the corrosion resistance and in-vitro bioactivity. *Surface & Coatings Technology*, 326: 134–145.
- Qing J, Buchely M, Van Aken D, Walker M, Juusola R and Goethe J** (2017) Solid Silver Embrittlement of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Alloy, *Materials Science & Technology Conference & Exhibition*, 10 November 2017, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, *Materials Science and Technology (MS&T)*, Vol. 1, 28-36.
- Rao P S, Purnima N S and Prasad D S** (2018) Surface alloying of D2 steel using EDM with WC/Co P/M electrodes made of Nano and Micron sized particles. *Materials Research Express*, 6(3): 1–46.
- Sales W F, Oliveira A R F and Raslan A A** (2016) Titanium perovskite ( $\text{CaTiO}_3$ ) formation in Ti6Al4V alloy using the electrical discharge machining process for biomedical applications. *Surface & Coatings Technology*, 307: 1011–1015.
- Senapati N P, Tripathy S and Samantaray S** (2016) A Multi-Objective Optimization using a combined approach of Principal Component Analysis and TOPSIS during Electric Discharge Machining of H-11 die steel using P / M processed Cu-Cr-Ni metal matrix composite. *ICEEOT 2016*, 3-5 March 2016, Chennai, India, *IEEE*, 1207–1212.
- Senthilvelan P B T** (2015) A Comparative study on the Performance of Different Sintered Electrodes in Electrical Discharge Machining. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(1): 51–59.
- Singh B, Kumar J and Kumar S** (2015) Optimization and surface modification in electrical discharge machining of AA 6061 /  $\text{SiC}_p$  composite using Cu – W electrode. *Materials: Design and Applications*, 231(3): 1–17.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

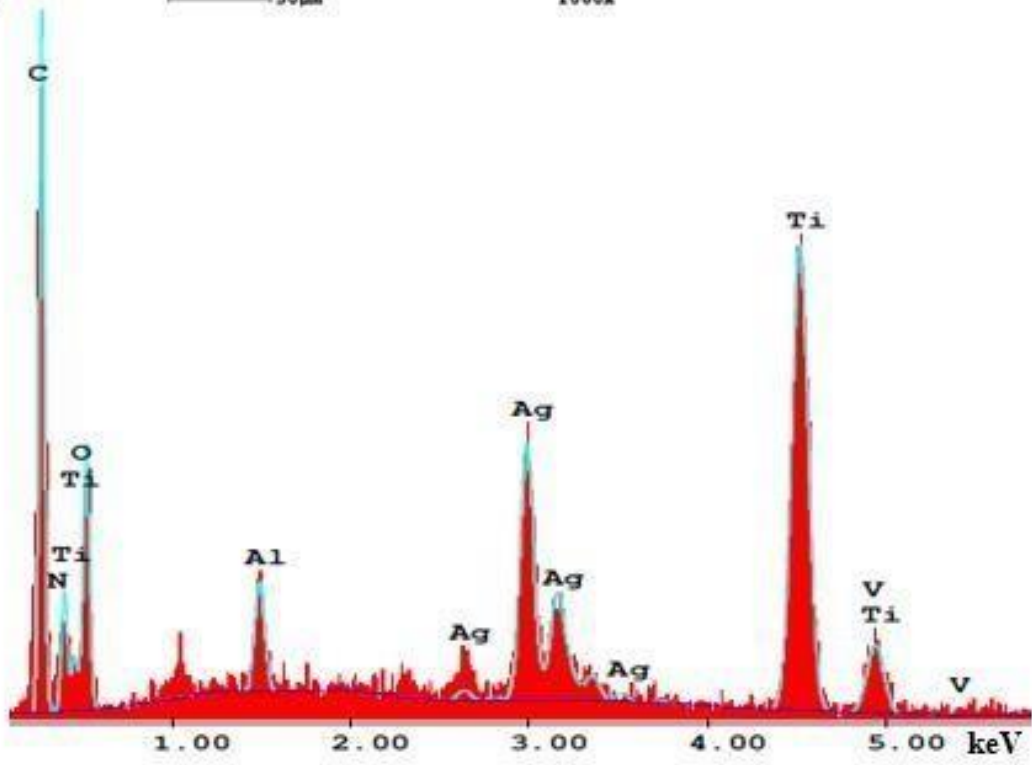
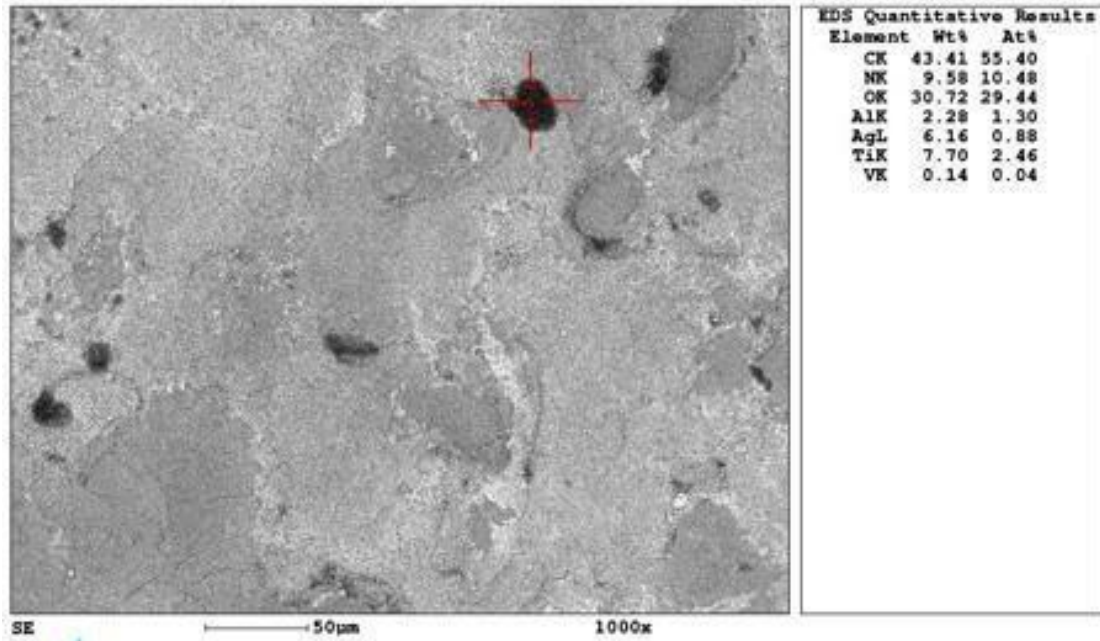
- Stanford C M** (2010) Surface Modification of Biomedical and Dental Implants and the Processes of Inflammation , Wound Healing and Bone Formation. *International Journal of Molecular Sciences*, 11: 354–369.
- Strasky J, Janecek M and Harcuba P** (2011) Electric Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy for Biomedical Use, *WDS 2011*, 31 May-3 June 2011, MATFYZPRESS, Prague, *Proceedings of Contributed Papers*, 3:127–131.
- Suchanek W and Yoshimura M** (1998) Processing and properties of hydroxyapatite-based biomaterials for use as hard tissue replacement implants. *Materials Research*, 13(1): 94–117.
- Walia A S, Jain V and Srivastava V** (2019) Development and performance evaluation of sintered tool tip while EDMing of hardened steel Development and performance evaluation of sintered tool tip while EDMing of hardened steel. *Material Research Express*, 6(8): 1–20.
- Xie Z J, Mai Y J, Lian W Q, He S L and Jie X H** (2016) Titanium carbide coating with enhanced tribological properties obtained by EDC using partially sintered titanium electrodes and graphite powder mixed dielectric. *Surface & Coatings Technology*, 300: 50–57.
- Yamaki K, Kataoka Y, Ohtsuka F and Miyazaki T** (2012) Micro-CT evaluation of in vivo osteogenesis at implants processed by wire-type electric discharge machining. *Dental Materials Journal*, 31(3), 427–432.
- Yang T, Huang M, Wang M, Lin M, Tsai M Y and Wang P Y** (2013) Effect of Electrical Discharging on Formation of Nanoporous Biocompatible Layer on Ti-6Al-4V Alloys. *Implant Dentistry*, 22(4): 374–379.
- Ying W, Han F and Wang J** (2017) Experimental investigation of fabricating diamond abrasive layers by EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(7): 2111–2122.
- Zhao W S, Meng Q G and Wang Z L** (2002) The application of research on powder mixed EDM in rough machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 129: 30–33.

## EK AÇIKLAMALAR

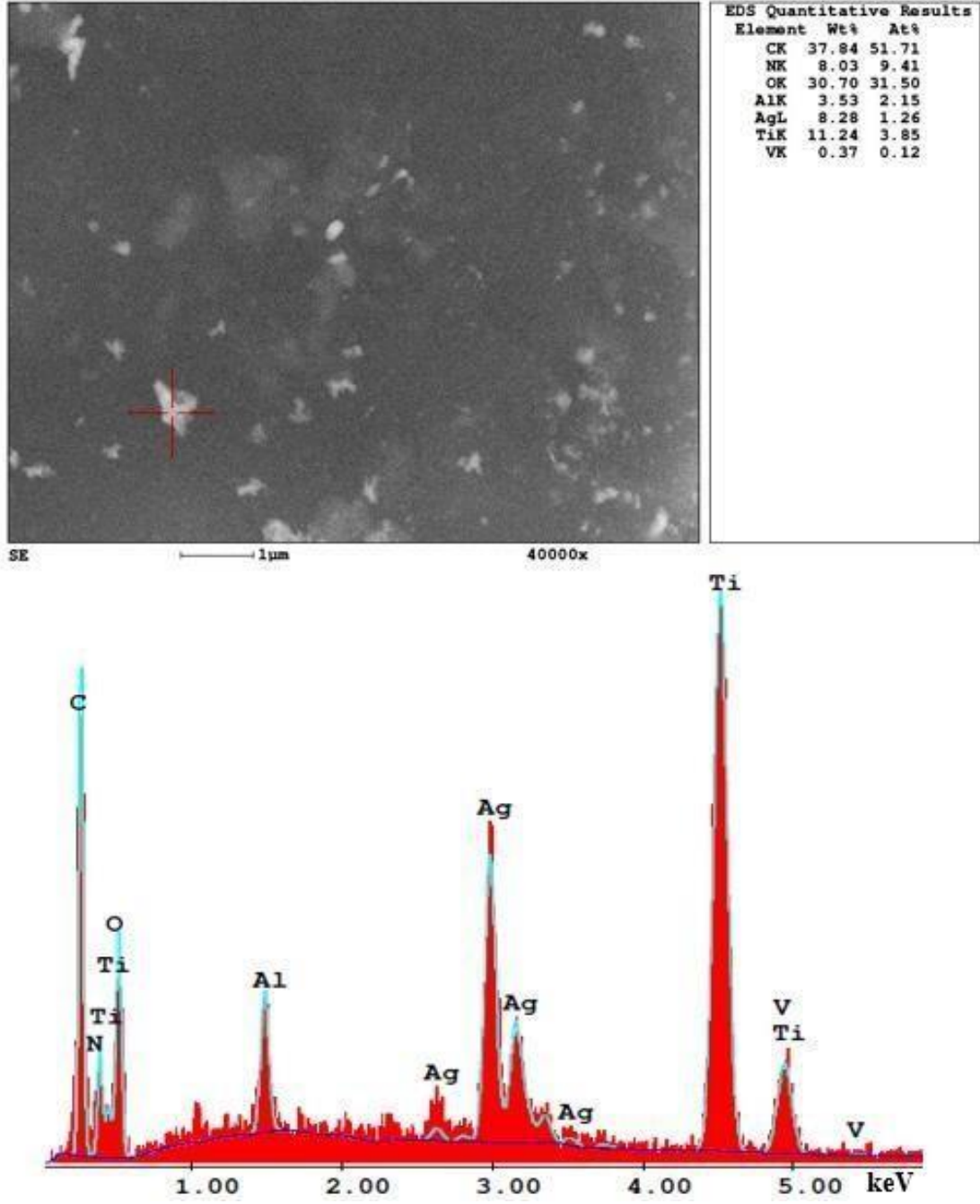
### EK A: %100 Ag Elektrot ile İşlenen Numunenin Noktasal Elementel Analiz ve Geri Saçılım Mikroskobu Görüntüleri



Şekil A.1 7A darbe akımı, 25μs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 200X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.

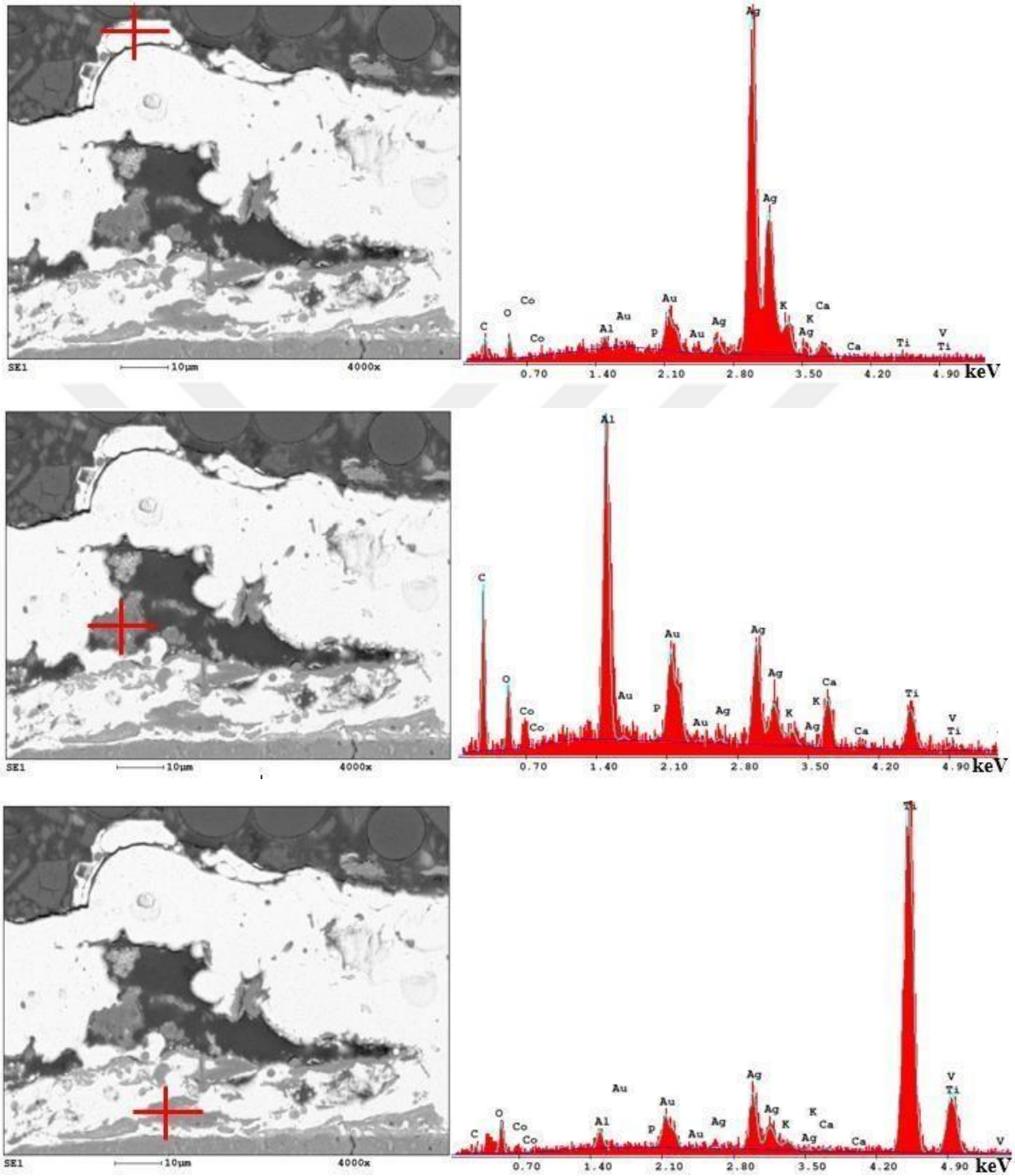


Şekil A.2 7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 1000X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.

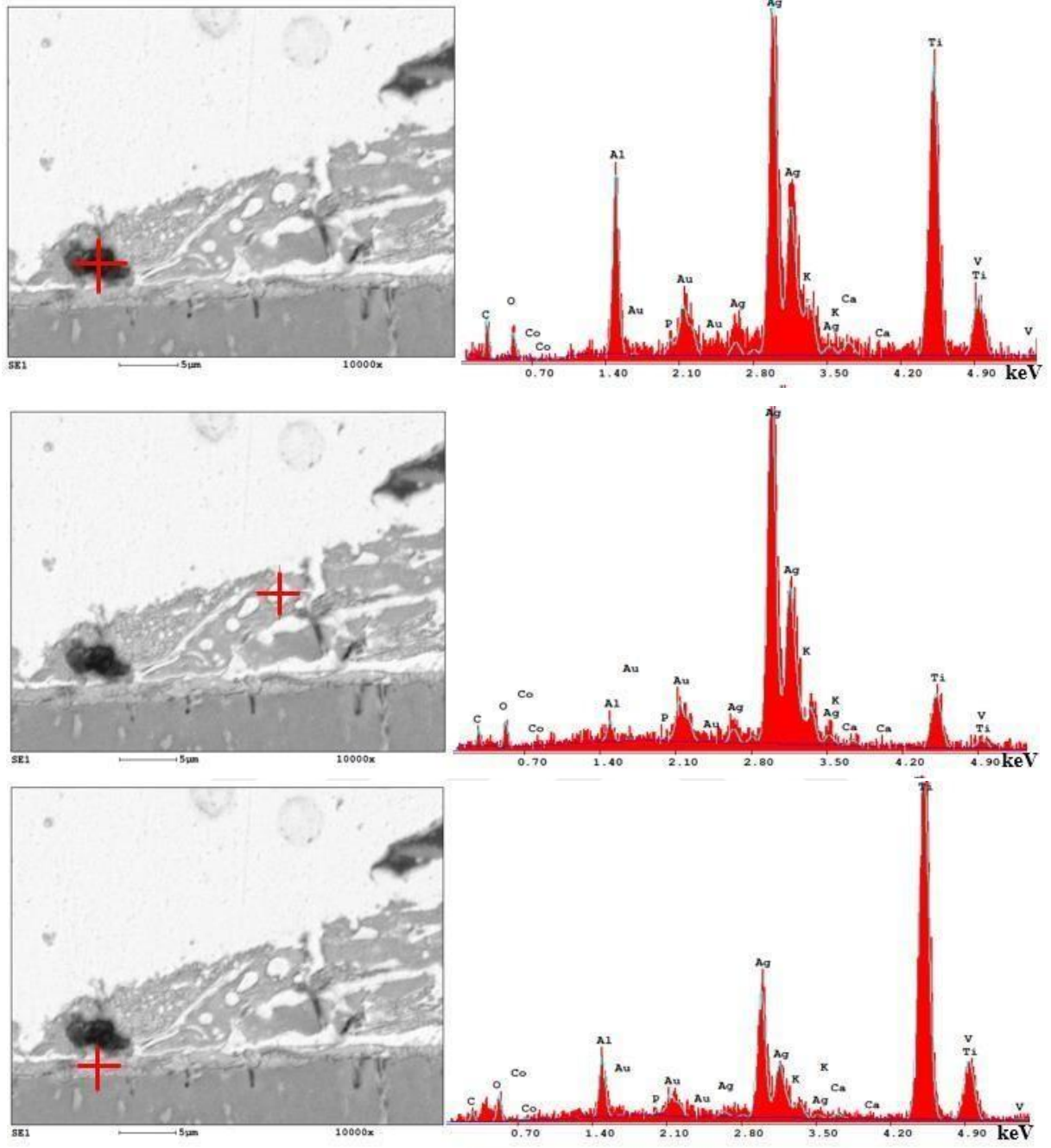


Şekil A.3 7A darbe akımı, 25µs darbe süresinde, %100 Ag elektrot ile işlenen Ti-6Al-4V alaşımının 40000X büyütmedeki noktasal elementel analizi ve EDS izleri.

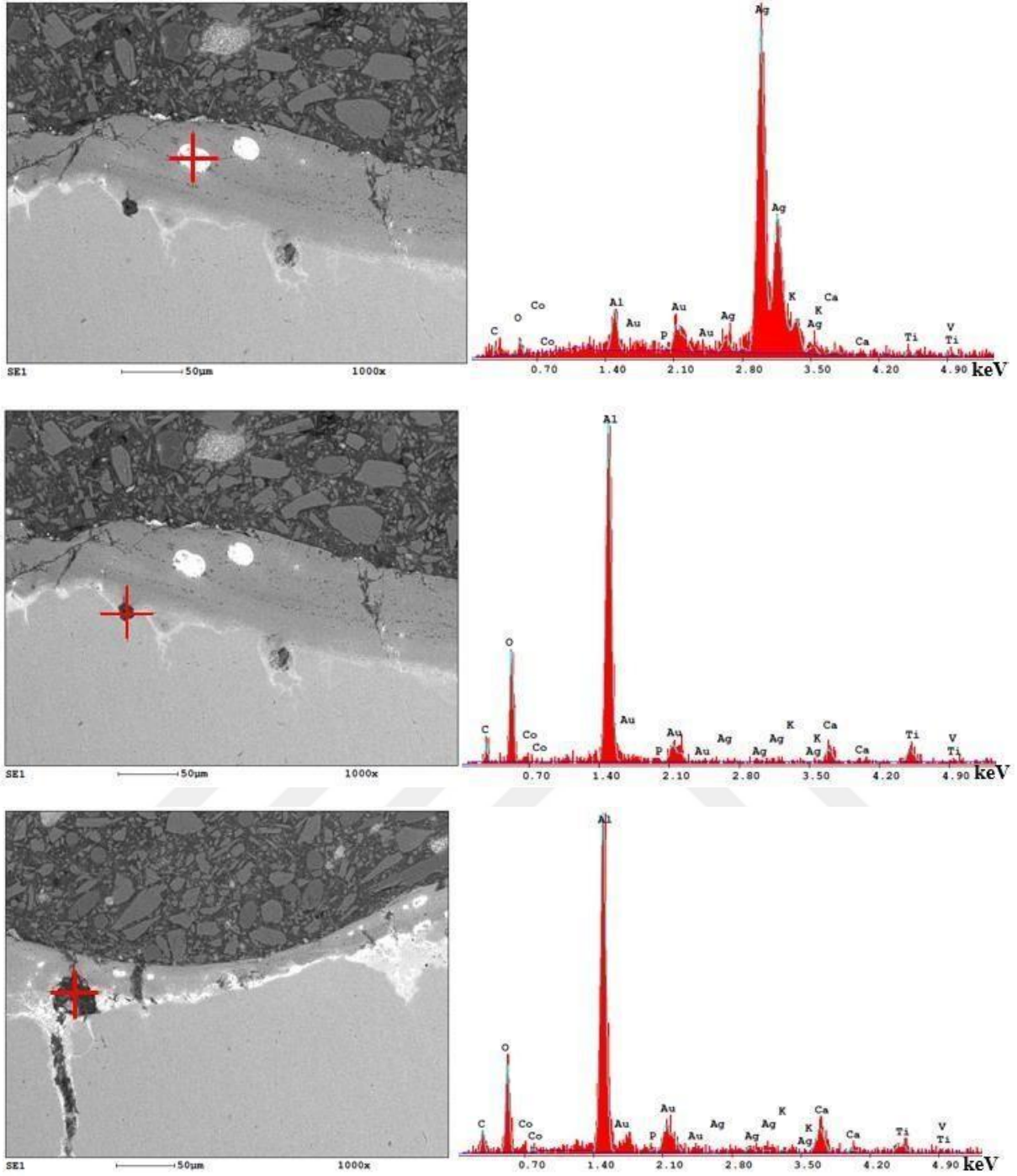
## EK B: Altın Kaplama Yapılarak İncelenen Numunelerin Yüksek Büyütmelerdeki Noktasal EDAX Analizi



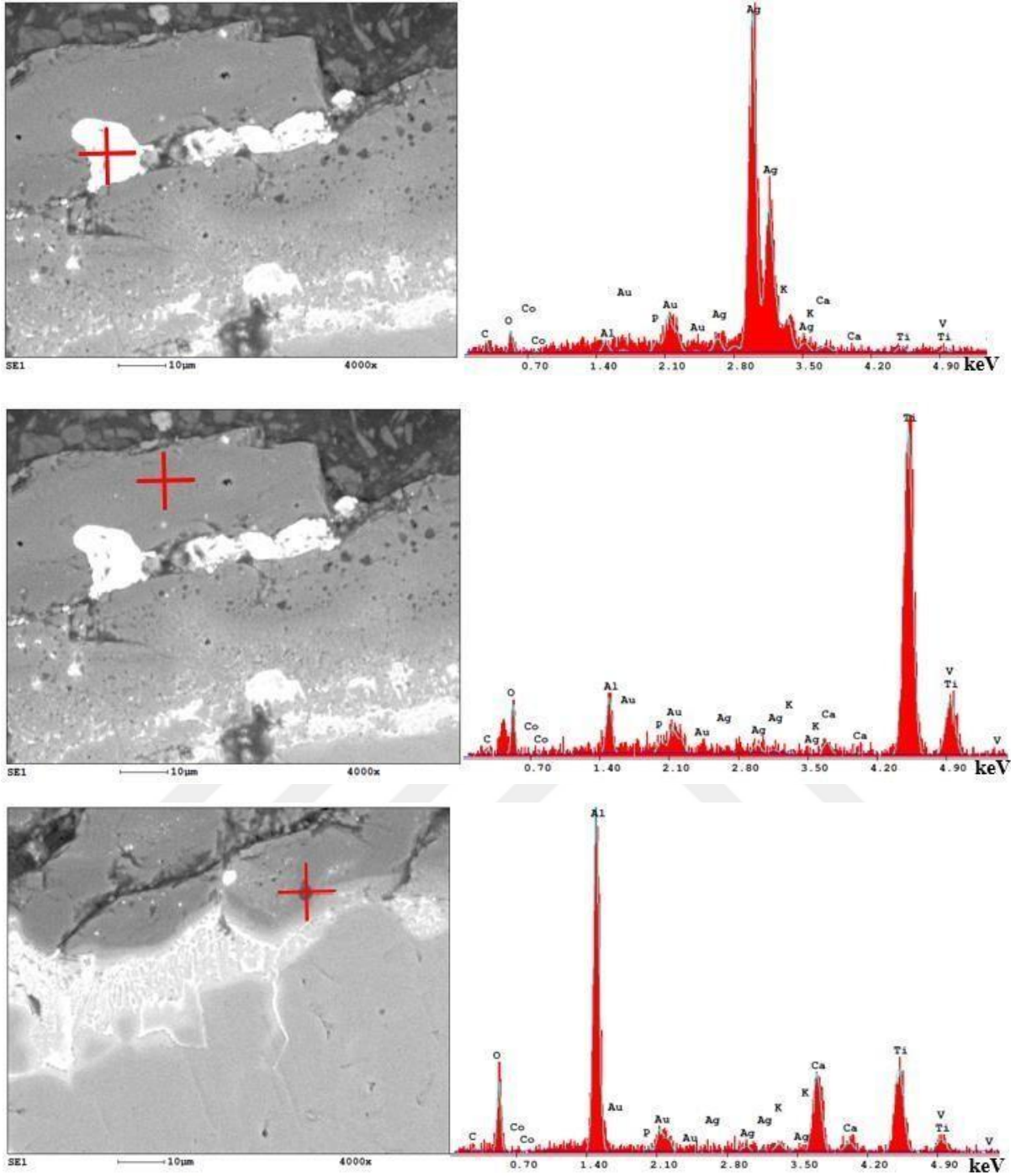
Şekil B.1 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin 4000X büyütmadaki noktasal EDAX analizi.



Şekil B.2 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%90 Ag-%10 HA elektrot ile işlenen numunenin 10000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi.



**Şekil B.3** 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin 1000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi.



Şekil B.4 22A darbe akımı, 25µs darbe süresinde,%70 Ag-%30 HA elektrot ile işlenen numunenin 4000X büyütmedeki noktasal EDAX analizi.



## ÖZGEÇMİŞ

Damla ÖZDEMİR 1994’de Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2014 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde başladığı lisans eğitimini 2018 yılında tamamlayarak Onur Öğrencisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.

