



BİYOMALZEMELERİN TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Doğukan YÖNEL

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**BİYOMALZEMELERİN TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON
YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Doğukan YÖNEL

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Eylül 2023**

Doğukan YÖNEL tarafından hazırlanan “BİYOMALZEMELERİN TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilge DEMİR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 12/09/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hakan GÜRÜN (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim 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.”

Doğukan YÖNEL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİYOMALZEMELERİN TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Doğukan YÖNEL

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

Eylül 2023, 63 sayfa

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme yöntemi klasik elektro erozyon yöntemine nazaran daha etkili ve düzenli bir işleme sağladığı için hem endüstriyel uygulamalarda hem de akademik çalışmalarda ilgi çekmektedir. Yeni Ti₂₉Nb₁₃Ta_{4.6}Zr (TNTZ) biyomedikal alaşım alaşımı, toksik/alerjik içerik içermeyen, Young modülü insan kemiği kadar düşük olan ve mükemmel biyouyumluluk sağlayan yeni bir alaşımdır. Ayrıca biyomateryallerin işlenmesi bir gerekliliktir ve biyo ekosistemlerinin ve performanslarının bir parçasıdır. Elektro erozyonla işleme (EDM) son zamanlarda biyomedikal uygulamalar için bir yüzey modifikasyon tekniği olarak dikkat çeken bir yöntemdir. Bu çalışma ile son yılların popüler malzemeleri olan farklı O, C, N ve ST yeni Ti₂₉Nb₁₃Ta_{4.6}Zr (TNTZ) alaşım gruplarının PMEDM performansını ve işlenmiş yüzey kalitesi de yüzey modifikasyonları konusunda da ilham olması için değerlendirmektedir. Tepe akımı, akım, vurum süresi, gibi PMEDM parametrelerinin zaman ve malzeme üzerindeki etkileri yüzey pürüzlülüğü (SR) ve talaş kaldırma oranı

(MRR) ile araştırılmıştır. İşlenmiş yüzey beyaz katmanı ve yüzey kalitesi, 3 boyutlu mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektrometri-kimyasal (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, PMEDM'nin, yüzey kalitesi-talaş kaldırma oranı gibi deşarj enerjileriyle orantılı olarak erime-yeniden şekillenen beyaz bir katman ürettiğini göstermiştir. Beyaz tabaka geçiş bölgesinin metal bütünlüğünden farklı değerlendirilmemiştir. Ayrıca işlem yapılan yüzey ve kesitte kraterler, delikler, çatlaklar, erimiş metal kaplı döküntüler ve takviye parçacıkları gözlemlenmiş ve detaylı olarak değerlendirilmiştir. Genel değerlendirme olarak işlenmiş yüzey kalitesinin PMEDM işlem parametreleri ile orantılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler : Biyomalzemeler, İşlenmiş yüzey kalitesi, PMEDM, Ti alaşımları, TNTZ

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF BIOMATERIALS USING POWDER ADDITIVE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING METHOD

Doğukan YÖNEL

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

September 2023, 63 pages

Powder added electro discharge machining method attracts attention in both industrial applications and academic studies as it provides more effective and regular machining compared to the classical electro discharge method. The new Ti29Nb13Ta4.6Zr (TNTZ) biomedical alloy is a new alloy that does not contain toxic/allergic ingredients, has a Young's modulus as low as human bone, and provides excellent biocompatibility. Also, machinability of biomaterials is a necessity and is part of their bioecosystem and performance. Electro discharge machining (EDM) is a method that has recently attracted attention as a surface modification technique for biomedical applications. In this study, the PMEDM performance and machined surface quality of different O, C, N and ST noval Ti29Nb13Ta4.6Zr (TNTZ) alloy groups, which are popular materials of recent years, are evaluated to provide inspiration for surface modifications. The effects of PMEDM parameters such as peak current, current, pulse duration, pulse on time and material were investigated with surface roughness (SR) and metal removal

rate (MRR). The machined surface white layer and surface quality were examined using 3D microscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry-chemical (EDS), and X-ray diffraction (XRD). The results showed that PMEDM produces a white layer that melts reforms proportionally to discharge energies like SR-MRR. The white layer is not evaluated differently than the metal integrity of the transition zone. In addition, craters, holes, cracks, molten metal covered debris and reinforcement particles were observed and evaluated in detail on the machined surface and section. As a general evaluation, it appears that the machined surface quality is proportional to the PMEDM process parameters.

Keywords: Biomaterials, Machined surface quality, PMEDM, Ti Alloys, TNTZ,

Bilim Kodu: 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başlangıcı, planlanması, yürütülmesi ve sonuçlanmasında destekleri ve özel ilgilerini bir an olsun eksik etmeyerek bilim dünyasına katkı sunabilmek adına gösterdiği sonsuz emeklerden dolayı tez danışmanlarım Prof. Dr. Bilge DEMİR'e ve Prof. Dr. Hakan GÜRÜN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gazi Üniversitesi'ne laboratuvar imkanları ve vermiş olduğu destekler için teşekkür ederim.

Deney ve tez sürecinde destekleri için Hande SAĞIROĞLU'na ve ReklamUp ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenimim esnasında desteğini esirgemeyen Ali Emre CANKURT'a süreçteki manevi emekleri için teşekkür ederim.

Sevgili eşim Gamze'ye maddi ve manevi desteklerinden dolayı tüm kalbimle teşekkür ederim.

Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine KBÜBAP-22-YL-051 numaralı projeye olan desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. İMALAT YÖNTEMLERİ TARİHÇESİ.....	4
1.2. GELENEKSEL OLMAYAN İMALAT YÖNTEMLERİ.....	4
1.3. BİYOMALZEMELER	6
1.4. EDM (ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ).....	9
1.5. PMEDM (TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ).....	10
BÖLÜM 2	14
İMALAT YÖNTEMİ.....	14
2.1. GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMLERİ.....	14
2.1.1. Talaşlı İmalat	14
2.1.2. Talaşsız İmalat	14
2.2. GELENEKSEL OLMAYAN İMALAT YÖNTEMLERİ.....	15
BÖLÜM 3	16
ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ.....	16
3.1. EDM	16
3.1.1. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminde Talaş Kaldırma Mekanizması.....	17
3.1.2. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminin Temel Parametreleri	18

Sayfa

3.1.3. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminde Elektriksel Parametreler	18
3.1.3.1. Boşalım Akımı.....	20
3.1.3.2. Vurum Süresi.....	20
3.1.3.3. Vurum Ara Süresi.....	20
3.1.3.4. Vurum Çevrim Süresi	20
3.1.3.5. Polarite (Kutuplama).....	21
3.1.4. Elektriksel Olmayan Parametreler	21
3.2. PMEDM (TKEEİ)	21
 BÖLÜM 4	23
BİYOMALZEMELER.....	23
4.1. BİYOMALZEMELERİN İŞLENMESİ	23
4.2. BİYOMALZEME İMALATINDA EDM İŞLEMLERİ	24
 BÖLÜM 5	26
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
5.1. MALZEME	26
5.2. PMEDM İŞLEMLERİ.....	28
5.2.1. Elektrot	28
5.2.2. Toz Katkısı	28
5.2.3. Dielektrik Sıvı.....	28
5.2.4. Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşleme Parametreleri	29
5.2.5. Ağırlık Kayıp Ölçümleri ve TKO	31
5.2.6. İşlenmiş Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü ve Topoğrafya	31
 BÖLÜM 6	35
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35
6.1. DENEY SONUÇLARI	35
6.1.1. Elektrot	35
6.1.2. İşlenmiş Parça	35
6.2. İŞLENMİŞ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ	36
6.3. İŞLENMİŞ YÜZEYDEN İNCELEMELER.....	38
6.3.1. Vurum Süresinin Yüzey Yapısına Etkisi.....	39
6.3.2. Akımın Yüzey Yapısına Etkisi	41
6.3.3. İşlenen Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin Karşılaştırılması	42
6.3.4. Kesitten İşlenmiş Yüzey İncelemeleri.....	44

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 7	53
GENEL DEĞERLENDİRME	53
7.1. ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Toz katkılı elektro erozyon deney seti.....	1
Şekil 2.1. Elektro erozyon ile işleme prensibi.	18
Şekil 2.2. TKKEİ deney mekanizması.	22
Şekil 5.1. TNTZ (Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr) malzemesine ait mekanik özellik grafikleri.....	27
Şekil 5.2. Struers kesme cihazı.	28
Şekil 5.3. Toz katkılı elektro erozyon tezgahı görüntüsü.	29
Şekil 5.4. Toz katkılı elektro erozyon tezgahı görüntüsü (İş parçası bağlı işleme yapılırken).	30
Şekil 5.5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topoğrafya ölçüm cihazı.	32
Şekil 5.6. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	33
Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobu analizi yapılan cihaz.	34
Şekil 6.1. İşleme yapılmış elektrot görüntüsü.....	35
Şekil 6.2. İşlenen numunelerin görüntüleri.....	36
Şekil 6.3. TNTZ-0.2O materyalinin TKEEİ ile işlenmiş bir yüzey görüntüsü.....	38
Şekil 6.4. 4 Nolu yüzey analiz bölgesinin EDS analiz sonucu.	39
Şekil 6.5. Düşük vurum süresi ile işlenmiş TNTZ-ST numunesinin SEM görüntüsü.....	40
Şekil 6.6. Yüksek vurum süresi ile işlenmiş TNTZ-ST numunesinin SEM görüntüsü.....	40
Şekil 6.7. Yüksek akım ile işlenmiş TNTZ-0.2C numunesinin SEM görüntüsü.....	41
Şekil 6.8. Düşük akım ile işlenmiş TNTZ-0.2C numunesinin SEM görüntüsü.	42
Şekil 6.9. TNTZ 0.2O numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.	42
Şekil 6.10. TNTZ 0.2C numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.	43
Şekil 6.11. TNTZ ST numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.	43
Şekil 6.12. Tüm numunelerin 6ms vurum süresindeki yüzey pürüzlülüğü karşılaştırması.....	44
Şekil 6.13. Tüm numunelerin 400ms vurum süresindeki yüzey pürüzlülüğü karşılaştırması.....	44

Sayfa

Şekil 6.14. TNTZ-0.2 C numunesine ait EDS analizi.....	45
Şekil 6.15. TNTZ-ST numunesine ait EDS analizi.....	46
Şekil 6.16. TNTZ-0.2N numunesine ait EDS analizi.....	47
Şekil 6.17. TNTZ-0.2O numunesine ait EDS analizi.....	48
Şekil 6.18. TNTZ-0.2C numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	48
Şekil 6.19. TNTZ-0.2C numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	49
Şekil 6.20. TNTZ-0.2N numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	49
Şekil 6.21. TNTZ-0.2N numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	50
Şekil 6.22. TNTZ-0.2O numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	50
Şekil 6.23. TNTZ-0.2O numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	51
Şekil 6.24. TNTZ-ST numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	51
Şekil 6.25. TNTZ-ST numunesine ait Kesit SEM görüntüsü.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. TNTZ-0.2O alaşıımının kimyasal bileşimi.	26
Çizelge 5.2. TNTZ-0.2C alaşıımının kimyasal bileşimi.	26
Çizelge 5.3. TNTZ-ST alaşıımının kimyasal bileşimi.	26
Çizelge 5.4. TNTZ-0.2N alaşıımının kimyasal bileşimi.	26
Çizelge 5.5. Deney parametreleri.	31
Çizelge 6.1. Yüzey pürüzlülüğü-akım değeri-vurum süresi parametrelerine ait tablo.	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

ATK	: Artık Tabaka Kalınlığı
EEİ	: Elektro Erozyonla İşleme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
td	: Gecikme Süresi
TKO	: Talaş Kaldırma Oranı
tOff	: Ara Süresi
tp	: Vurum Süresi
YÇY	: Yüzey Çatlak Yoğunluğu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme (EDM), son zamanlarda biyomedikal uygulamalar arasında yeni bir yüzey işleme alternatifi olarak dikkat çekmiştir [1]. Elektro erozyon ile işleme (EDM), nano gözenekli biyoyumlu bir yüzey üretme potansiyelini ve insanların osteoblastik hücre biyobağlanması üzerinde olumlu etki göstermiştir [2-4].

Beyaz katmanlar, yüzey işleminde kritik faktör olarak kabul edilmektedir. Titanyum alaşımlarında biyoyumluluk ile birlikte yüksek yorulma dayanımı elde edilebileceği görülmektedir. Nanofazlar içeren beyaz tabakanın kısa bir süre için elektrik deşarjı ile TiO₂ ürettiği görülmüştür. Bu nedenle, kısa bir süre için elektrik deşarjının biyoaktif titanyumun yanı sıra nanoyapıların üretimine yol açabileceği görülmüştür [5].

Elektro erozyon işleme yöntemi (EDM), takım ve iş parçası arasında bir plazma kanalının oluşumunu içeren karmaşık bir talaş kaldırma mekanizmasına sahip elektriksel-termal bir süreçtir [6, 7].

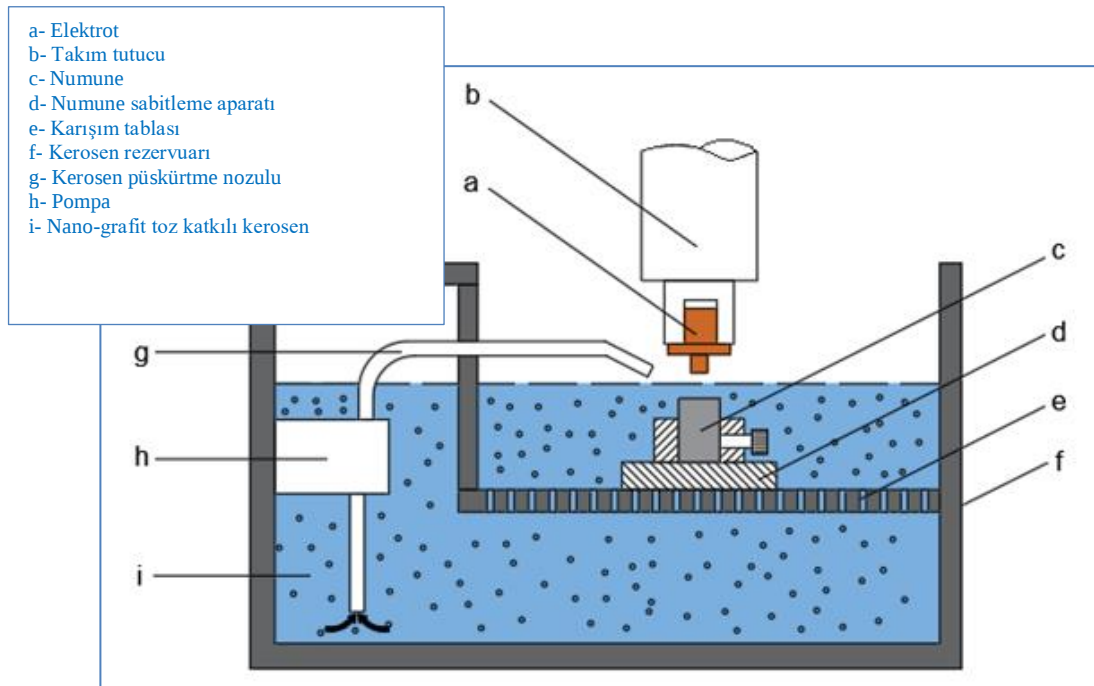
Elektro erozyon ile işleme yönteminde, katot ile anot arasında 20000 °C'ye varan sıcaklıklara ulaşmak için plazma yoluyla termal enerji üretilir. EDM, takım ve kalıp endüstrisi için ve titanyum gibi yüksek kaliteli, güvenli malzemeleri, genellikle uçaklarda ve diğer mekanik uygulamalarda kullanılan sertleştirilmiş çeliklerin süper kombinasyonlarını işlemek için önemli bir imalat yöntemi olmuştur [8].

EDM; kontrollü bir elektrik deşarjının kıvılcımını bir döngü halinde elektrottan geçen elektrik akımının iş parçasına iletilmesi olarak adlandırılabilir geleneksel olmayan bir talaş kaldırma işlemidir.

Bu tip işlemlerde elektrot sadece dikey yönde hareket eder (3 boyutlu olarak da uygulanabilir). Şekil 1, EDM'nin bileşenlerle detaylandırılmış şematik bir görünümü mevcuttur [6].

Elektro erozyon ile işleme yönteminde, işleme üzerindeki olumlu etkisinden dolayı hidrokarbon cinsi dielektrik sıvı (genellikle gazyağı) kullanılır [9, 10].

Buradaki dielektrik sıvı içerisine çeşitli katkıları yapılarak işlemedeki parametreler optimize edilebilir. Bu tekniğin avantajları şunlardır; karmaşık işlemler yapabilmeyi, son derece sert ve kırılğan malzemeleri işleyebilmeyi ve ince kalınlıkta malzemeleri imal etmeyi mümkün kılarken, daha düşük işleme performansı, düşük yüzey kalitesi, işlemin karmaşık tekniği ve yalnızca iletken malzemeler için EDM uygulaması kullanılması ile sınırlar [11, 12].



Şekil 1.1. Toz katkılı elektro erozyon deney seti [6].

Alternatif olarak, son yıllarda kullanılan toz katkılı EDM (PMEDM), klasik EDM'ye göre dielektrik malzemelerin işlenmesini bile kanıtlayabilmesi, daha yüksek yüzey kalitesi (SR), daha yüksek talaş kaldırma oranı (MRR veya TKO) gibi birçok avantaj

sağlar.[13]. Toz katkılı EDM sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. [6], [14]–[16]. Toz parçacıklarına voltaj uygulandığında, bu parçacıklar dielektrik sıvı içerisinde iletken görevi görür ve elektrik alanını arttırarak iletken bir yapı oluşturur. Bu durum, iş parçası ile elektrot arasındaki boşluğun olumsuz etkisini ortadan kaldırır. Bu tozlar, kıvılcım bölgesinin altında zincir benzeri yapılar oluşturur. Bu nedenle deşarj elektrotları arasında köprüleme sağlar. Köprüleme nedeniyle, dielektrik sıvının yalıtım yoğunluğu azalır ve basit bir kısa devreye neden olur [14, 15].

Genel itibarıyla EDM üzerindeki çalışmalar, vuruş süresi [17], pik akım değeri ve elektrot tipi [19] gibi işlem parametrelerinin işleme performansına odaklanır. Bu durum PMEDM için benzer olsa da proste karıştırılan toz ek bir parametre olarak dahil edilmiştir. Eklenen tozun ayrıca iletkenlik seviyesi ve deoksidasyon yeteneği gibi üstün özelliklere sahip olduğu bildirilmektedir [19]. Bu nedenle grafit tozu bu özellikler açısından avantajlar içerebilir [20, 21]. EDM'de bakır elektrotlar kullanıldığında, işlenmiş yüzeydeki krater boyutlarının, demir ve pirinç bazlı elektrotlarından sırasıyla 3 kat ve 2,6 kat daha az olduğu görülmüştür [22]. Ayrıca Ti-5Al-2.5Sn alaışımının işlenmesinde bakır elektrotun çinko ve pirinç elektrotlara göre daha az beyaz tabaka oluşturarak daha iyi yüzey kalitesi ile işleme yapabildiği görülmüştür [23].

Öte yandan, yüzey pürüzlülüğü (SR) ve sertlik, beyaz tabaka oluşumu ve yüzey topoğrafyası yüzey kalitesinin belirlenmesinde önemli faktörlerdir [6], [22]. Yüzey kalitesi için yüzey pürüzlülük ölçümü ve topoğrafya analizi kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımlarının benzersiz mekanik ve metalurjik özellikleri, benzer sertlikteki çeliklerin işlenmesini karmaşık ve maliyetli hale getirir [24]. Düşük işlenebilirliğe rağmen, titanyum ve titanyum alaşımları birçok alanda tıp; diş implantları, parmak ve ayak protezleri ve kemik plakası genişleyebilir göğüs kafesleri, havacılık, denizcilik, otomobil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarını işlemek için geleneksel olmayan işleme yöntemlerinin kullanılması yaygındır. Dolayısıyla diğer geleneksel olmayan işleme yöntemleri için olduğu kadar, titanyum alaşımları ve biyomalzeme çeşitlerinin EDM ve PMEDM performansları ve ilgili

konular üzerine de bugüne kadar pek çok araştırma yapılmıştır [23, 29]. Bu araştırmalar EDM'nin pozitif etkileriyle olumsuzlukları da ortadan kaldırdığını göstermektedir. Titanyum alaşımlarının EDM işlemindeki temel yaklaşımı, bu malzemelerin yüksek erime sıcaklığı, özgül ısı ve elektrik direnci dolayısıyla buharlaşma veya erime için ek enerji gerektirmesidir [30]. Ayrıca, titanyum alaşımlarının düşük termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliği, ısı transferi işlemini daha zor hale getirebilir ve bölgesel deşarjlara, ark, kısa devre ve cihaz arızasına neden olabilir. Bu durumlar sonucunda prosesin verimini düşürebilir, talaş kaldırma oranının azalmasına ve hatta işlenmiş yüzeylerde hasarlara yol açar [31]. Erimiş taneciklerin işlenen yüzey üzerinde çarpışması veya yapışması çok belirgindir. Bunun sonucunda jöle benzeri plak oluşumu ve daha kalın beyaz bir tabaka oluşumu görülebilir [32]. İşlem sırasında oksijen ve karbonun varlığı TKO üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği ifade edilmiştir. Dolayısıyla, titanyum alaşımları için EDM işleminin optimizasyonu gereklidir. Ayrıca ifade edildiği gibi PMEDM işleminin sağladığı yararlar ile bu konuda avantajlar sağlanabilir.

Titanyum ve alaşımları, uygun bağışıklık sistemi, yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı nedeniyle çoğu biyomedikal uygulamada kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımları, yüzeylerinde oluşan kararlı oksit tabakası (TiO_2) nedeniyle agresif vücut ortamlarına karşı oldukça dirençlidir [33, 34].

Deneyisel çalışmamızda amaç toz katkılı elektro erozyon yöntemiyle işlenen numuneler üzerinden toz katkılı elektro erozyon ile işleme parametrelerinin işleme verimine olan etkilerinin somut olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Söz konusu deney malzemesi olan TNTZ biyomedikal sektöründe ağırlıklı olarak implant üretiminde kullanılmaktadır. TNTZ bir titanyum alaşımıdır. Kimyasal kompozisyonunda yaklaşık %41,38 Ti, %28,22 Nb, %13,5 Ta ve %4,65 Zr bulundurmaktadır.

Tüm bu bilgilerin ışığında söz konusu olan malzemelerin işlenebilirliklerinin araştırılması ve elde edilen parametrelerin karşılaştırılması bu çalışma kapsamında hedeflenmektedir.

1.1. İMALAT YÖNTEMLERİ TARİHÇESİ

İmalat kelime anlamı olarak işlenerek yapılan üretim anlamına gelmektedir. İmalat usulleri ise iki ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Bu iki ana başlığı geleneksel imalat yöntemleri ve geleneksel olmayan imalat yöntemleri şeklinde belirtebiliriz. Geleneksel imalat yöntemlerine tarihsel olarak baktığımızda günümüzden 5000-6000 yıl öncesinde insanlar döküm, dövme, taşlama gibi imalat yöntemlerini kullanmışlardır. Bu üretim yöntemleri zaman içerisinde gelişerek sanayi devriminin de büyük bir etkisiyle daha gelişmiş bir hal almıştır. Sanayi devrimi ile birlikte üretim yöntemleri birçok şekilde etkilenmiştir. Bu gelişim ve değişim ile birlikte hayvan ve insan gücü yerini rüzgar gücü, su gücü, buhar gücü başta olmak üzere bilumum yeni teknolojik gelişmenin ürünü olan yöntemlere bırakmıştır. Bu noktada zamanla geleneksel imalat yöntemlerinin değişmez unsurları olan tornalar, frezeler, matkaplar vs. endüstriyel olarak geliştirilip kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemler genellikle talaş kaldırmayı prensip edinmiş olan proseslerdir. Geleneksel imalat yöntemlerinin komplike olarak bir araya getirilmesi sonucunda başta Ford olmak üzere birçok sanayi oluşumu zamanla seri üretime geçiş yapmıştır. Gün geçtikçe artan ürün talepleri kompleks tasarımları ve yeni imalat yöntemleri kullanmayı ihtiyaç haline getirmiştir. Söz konusu ihtiyaç çerçevesinde zamanla geleneksel imalat yöntemlerinden daha verimli veya geleneksel imalat yöntemleriyle gerçekleştirilemeyen işlemleri daha basit olarak yapabilecek sistemler geliştirilmiştir.

1.2. GELENEKSEL OLMAYAN İMALAT YÖNTEMLERİ

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin başlıca özellikleri mekanik kuvvet kullanılarak malzeme yapısında gerilmelere yol açan klasik talaş kaldırma metodunun dışına çıkarak gerilmeleri mümkün olduğunca işleme dışında tutmasıdır. Gerilmelerin işleme parametrelerine etki etmemesi sonucunda efektif bir işleme imkanı ortaya çıkmaktadır. Söz konusu gerilmelerin proses dışında tutulmasının sebebi; genellikle takım ile iş parçası arasında fiziksel olarak bir sürtünme olmamasıdır. Geleneksel olmayan imalat yöntemlerini geleneksel imalat yöntemlerinden ayrı tutan bir diğer özellik ise iş malzemesinin yalnızca dairesel, düzlemsel veya doğrusal olarak işlenmesinin dışına çıkarak çok çeşitli işleme imkanları sunabilmesidir. Keza yine

mekanik sebeplere bağlı olarak geleneksel imalat yöntemlerinde takımda ve iş parçasında titreşimler oldukça yüksektir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri ile bu titreşim miktarları mümkün olduğunca minimize edilmiştir.

Metalurjik olarak geleneksel imalat yöntemlerinde kesme bölgesinde ani sıcaklık değişimleri görülebilmektedir. Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin birçoğu işleme esnasında ani sıcaklık değişimlerinin önüne geçecek şekilde tasarlanmıştır.

İşleme boyutunda ise geleneksel imalat yöntemleri çok küçük ve çok büyük malzemeleri işleyecek şekilde tasarlanmamışlardır. Bu hususta tolerans aralıkları da çok küçük ve çok büyük parçaların işlenmesinde ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunlara yol açarak geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin gerçekleşmesini sağlamışlardır.

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerini başlıca sınıflandırmak gerekir.

1. Aşındırıcı Jet ile İşleme
2. Ultrasonik İşleme
3. Aşındırıcı Akış ile İşleme
4. Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme
5. Aşındırıcı Su Jeti ile Tornalama
6. Basıncılı Su ile Kesme
7. Toz Parçacık ile İşleme
8. Elektrokimyasal İşleme
9. Telli Elektrokimyasal İşleme
10. Isıl Kimyasal İşleme
11. Elektro Erozyon ile İşleme
12. Dalma Erozyon ile İşleme
13. İyon Işını ile İşleme
14. Plazma ile İşleme
15. Elektro Erozyon Testereleme
16. Dönel Elektro Erozyon ile İşleme

şeklinde genel bir biçimde sınıflandırılabilirler.

1.3. BİYOMALZEMELER

Biyomalzemeler tanım olarak tıbbi sistemler ile entegre bir şekilde çalışmaya tasarlanmış veya üretilmiş materyallerin tamamı olarak tanımlanmaktadır. Bu malzeme türleri polimer, sentetik, metal alaşımları ve kompozit olarak örneklenebilmektedir.

Polimer biyomateryaller genellikle esnek yapıdaki tıbbi sistemleri ikame edecek şekilde kullanılmaktadır. Örneğin kalp kapakçığı, kırık dokular vs. metal biyomalzemeler ise yüksek mukavemet değerleri sebebiyle genellikle kemik ve diş yapılarını ikame edecek şekilde kullanılmaktadır. Seramik biyomateryaller ise metaller ile benzer mukavemet değerlerini sağlayabilmektedir. Metal biyomateryallerden farklı olarak kompozit yapıdaki biyomalzemeler yüksek korozyon dirençleriyle ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple kompozit biyomateryaller diş implantlarında ve birçok kemik yapıda kullanılmaktadır.

Biyomalzemeler tıp ve sağlık sektöründe çok önemli bir yerdedir. Bu nedenle biyomalzemeler alanı multidisipliner bir yaklaşım gerektiren sürekli güncel olan bir alandır. Uygulamalardan temel noktalar ise şunlardır :

Biyokompatibilite: Biyomalzemelerin en önemli özelliklerinden biri, biyokompatibilite olarak adlandırılan özelliktir. Bu özellik malzemenin vücutla uyumlu olması, toksik olmaması ve enfeksiyon riskini minimize etmesi anlamına gelir.

Biyomalzeme Türleri: Biyomalzemeler, birçok farklı türde olabilir. Bunlar arasında metaller (örneğin titanyum), polimerler (örneğin polietilen), seramikler (örneğin hidroksiapatit), biyoaktif kaplamalar ve daha birçok malzeme türü bulunur.

Uygulamalar: Biyomalzemeler, tıbbi cihazlar (örneğin implantlar ve protezler), doku mühendisliği, ilaç taşıyıcıları, diş hekimliği malzemeleri ve daha birçok alanda kullanılır. Örneğin, kalp kapakları ve kemik implantları gibi tıbbi cihazlar titanyum gibi malzemelerden yapılabilir.

Doku Mühendisliği: Biyomalzemeler, doku mühendisliği alanında büyük bir öneme sahiptir. Bu alanda, canlı dokuların ve organların yeniden oluşturulması veya hasarlı dokuların onarılması için biyomalzemeler kullanılır. Hücreler ve biyomalzeme kombinasyonları, vücut içinde yeni dokuların büyümesini teşvik etmek için kullanılır.

Kontrollü İlaç Salımı: Bazı biyomalzemeler, ilaçların kontrollü bir şekilde vücuda salınmasını sağlamak için kullanılır. Bu, hastalıkların tedavisinde ve ilaçların etkinliğini artırmak için önemlidir.

Biyoaktif Kaplamalar: Biyomalzemelerin yüzeylerine uygulanan biyoaktif kaplamalar, malzemenin vücutta daha iyi entegrasyonunu teşvik edebilir veya enfeksiyon riskini azaltabilir.

Gelişen Teknolojiler: Biyomalzemeler alanı sürekli olarak gelişmektedir. Nanoteknoloji, 3D baskı, biyobaskı gibi yeni teknolojiler, biyomalzemelerin tasarım ve üretimini daha hassas ve özelleştirilebilir hale getirmiştir.

Biyomalzemeler, tıbbi uygulamalarda kullanılan ve vücutla uyumlu olan çeşitli malzeme türlerini içerir. Bu malzeme türleri genellikle biyokompatibilite, mekanik dayanıklılık ve işlevsellik açısından özel olarak tasarlanır. Metaller arasında titanyum, çelik ve kobalt-krom alaşımları, kemik implantları ve diş protezleri gibi uygulamalarda kullanılır. Polimerler, yumuşak doku protezleri, dikiş malzemeleri ve ilaç taşıyıcıları gibi birçok alanda önemlidir. Seramikler, özellikle kemik rejenerasyonu ve diş restorasyonu için biyoaktif kaplamalar veya implantlar olarak kullanılır. Biyoaktif kaplamalar, biyomalzemelerin yüzeylerine uygulandığında vücutla daha iyi etkileşime girmelerini sağlar ve kemik büyümesini teşvik edebilir. Bu farklı biyomalzeme türleri,

tıbbi ihtiyaçlara göre özelleştirilebilir ve sağlık sektöründe çeşitli uygulamalar için kullanılırlar.

Biyomalzeme türleri arasında titanyum alaşımları da bulunmaktadır. Titanyum alaşımlarının önemli noktaları ise şunlardır :

Titanyumun Biyolojik Uyumluluğu: Titanyum, biyolojik olarak uyumlu bir malzeme olarak kabul edilir. Vücut tarafından kolayca tolere edilir ve genellikle implantlar, protezler ve diğer tıbbi cihazların yapımında kullanılır.

Kemik İmplantları: Titanyum, kemik implantlarının üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu implantlar, kemikle iyi bir şekilde entegre olabilirler ve uzun vadeli kullanım için uygun bir seçenek sunarlar.

Diş Protezleri: Diş implantları ve diş protezlerinde titanyum kullanımı da oldukça yaygındır. Titanyum implantlar, diş köklerini taklit etmek için kullanılır ve doğal dişlere benzer bir görünüm ve fonksiyon sağlar.

Biyoaktif Kaplamalar: Titanyum yüzeylerine uygulanan biyoaktif kaplamalar, kemik büyümesini teşvik etmek veya enfeksiyon riskini azaltmak gibi özellikler eklemek için kullanılır.

Doku Mühendisliği: Titanyumun 3D baskı ile şekillendirilmesi, özel tasarlanmış implantların üretilmesine olanak tanır ve bu, doku mühendisliği alanında önemli bir gelişmedir.

Uygun Yapısal zellikler: Titanyum, yüksek mukavemeti ve hafifliği sayesinde birçok tıbbi uygulama için uygun bir malzeme olarak kabul edilir.

β -tipi bir Ti alaşımı olan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (bundan sonra TNTZ olarak adlandırılacaktır), Niinomi ve araştırma grubu tarafından geliştirilmiştir [35]. TNTZ, toksik olmayan ve alerjik olmayan alaşım elementleri Ti, Nb, Ta ve Zr'den oluşur ve

nispeten düşük bir Young modülü (~60 GPa) sunar; bu, geleneksel Ti alaşımlarına (~110 GPa), göre kortikal kemiğe (~30 GPa) daha yakındır. Ayrıca TNTZ, yüksek mekanik dayanımı, sertliği ve uzun yorulma ömrü nedeniyle CP Ti ve Ti6Al4V alaşımlarının yerini almak için iyi bir adaydır. Ek olarak, biyomedikal bir alaşımın işlenebilirlik performansı ve biyoekosistem üzerindeki etkisi, mekanik ve toksik/korozif özellikleri kadar önemlidir [36-37]

Aslantaş ve diğerleri, TNTZ alaşımlarının mikro işlemlerini; diğer titanyum alaşımları olan CP (Pure Ti) ve Ti6Al4V alaşımları ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak TNTZ alaşımlarını mikro frezeleme işlemlerinin diğer alaşımlara göre oldukça düşük performansa sahip oldukları bildirilmektedir. Bu performansın sebebinin, TNTZ-ST alaşımının deformasyon nedeninin özellikleri ile tıkanma, titanyum alaşımlarının düşük ısı geçişleri ile genel kabul gören düşük işleme kapasitesi ve işleme sırasında deformasyon nedeniyle oluşan betadan martenzite dönüşümü olarak değerlendirmişlerdir [37]. Bu nedenle, düşük talaşlı işleme performansı yerine EDM ve PMEDM kullanımı ile bu alaşımlar için önemli bir alternatif işleme tekniği olarak değerlendirilmiştir.

1.4. EDM (ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ)

EDM (Elektro Erozyon ile İşleme), elektrik deşarjıyla işleme yöntemi olarak adlandırılan, geleneksel olmayan bir elektro-termal işleme tekniğidir. İş parçası ve elektrot birbirine zıt olacak şekilde pozitif ve negatif olarak yüklenerek iş parçası üzerinden deşarj sağlanır. Bu işleme yönteminde başta kesme gerilmesi gibi mekanik gerilimler oluşmadığından dolayı mukavemetli ve işlenebilirliği düşük olan malzemeleri işlemek elektrik deşarjı ile mümkün hale gelmiştir. İşleme yönteminde devre voltajı, çalışma voltajı, tepe akımı, polarite, dielektrik sıvı ve katkı, elektrot cinsi, iş parçası cinsi gibi birçok farklı parametre mevcuttur. Bu parametrelerin artış veya azalışı işleme verimliliğini olumlu veya olumsuz şekilde etkilemektedir.

Elektro erozyon tezgahında devreden gelen akım önce elektrotu ardından iş parçasına geçmektedir. Bu akım geçişi esnasında elektrot ile iş parçası arasında elektrik deşarjı

oluşturarak iş parçası üzerinde deşarj olan bölgelerden talaş kaldırılması şeklinde bir işleme döngüsü dizayn edilmiştir. Bu işleme döngüsünde elektrik direnci kullanılarak mevcut iş parçası ile elektrot arasında bir termal enerji oluşması sağlanmıştır. Termal enerji parametresi ise elektro erozyon ile işleme yönteminde son derece önemli bir yerdedir.

Elektro erozyon ile işleme yönteminde işlenen iş parçası ve elektrot arasına çok yüksek bir elektrik potansiyel farkı uygulanır. Bu nedenle iş parçası üzerinde oluşan elektriksel deşarjlar, yüksek sıcaklık ve yoğun enerji ile noktasal olarak iş parçasını eritir veya buharlaştırır. Erozyonun olduğu bu noktalar, malzemenin istenilen şekil ve ölçülere sahip olmasını sağlamak için hassas bir şekilde kontrol edilir. Elektro erozyon işleminin bir avantajı, malzemenin sertlik veya karmaşıklığına bakılmaksızın kullanılabilmesidir. Bu nedenle, hassas parçaların üretimi ve detaylı yüzey işlemleri için ideal bir yöntem olarak kabul edilir.

1.5. PMEDM (TOZ KATKILI ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ)

Elektro erozyon ile işleme yöntemi son yüzyıl içerisinde tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Elektro erozyon ile işleme yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve elektro erozyon ile işleme limitini yükseltmek için en önemli ve yaratıcı süreçlerden biridir [38]. Toz katkılı elektro erozyon ile işleme, iş parçası boşluğunu ve elektrot boşluğunu artırarak talaş kaldırma oranını yükselterek ve yüzey pürüzlülüğü ile standart elektro erozyon ile işleme arasındaki kontrastı azaltmak için kullanılır. Toz parçacıklarına voltaj uygulandığında, parçacıklar iletken hale gelir ve elektrik alanı güçlendirir [39]. Toz katkılı elektro erozyon ile işlemede kullanılan yüklü parçacıklar hızlandırılır ve elektrik alanı nedeniyle talaş kaldırmayı destekleyen iletkenler gibi davranırlar. Bu durum, iş parçası ile elektrot arasındaki elektriksel boşluğu iyileştirir. Bu parçacıklar kıvılcım bölgesi altında birbirine yaklaşır ve zincir benzeri yapılar şeklinde organize olur. Mevcut akış yönünde, Toz parçacıkları birbirine kenetlenir. Zincir oluşumu, deşarj elektrotları arasındaki mesafeyi köprülemeyi sağlar. Köprülemenin etkisi

nedeniyle, dielektrik sıvının yalıtım yoğunluğu azalır ve basit bir kısa devreye neden olur.

Bu şekilde oluşan kıvılcımlar, iş parçasının yüzeyinde daha hızlı aşınma oluşturur ve böylece TKO'yu iyileştirir. TKEEİ, daha iyi bir işlenmiş yüzey pürüzlülüğü elde edilmesiyle elektro erozyon ile işlemeye göre işleme verimliliğinin %70 oranında iyileştirilmesini sağlamıştır [40]. Toz katkılı elektro erozyon ile işleme uygun parametreler ile yapıldığında standart EEİ yöntemine göre çok daha iyi yüzey kalitesi ve daha yüksek bir talaş kaldırma oranı sağladığından dolayı standart elektro erozyon ile işleme yöntemine bir alternatif olarak kullanılmaktadır.

1.6. TİTANYUM BAZLI BİYOMALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Titanyum, gezegenimizde en çok bulunan element sıralamasında dokuzuncu, gezegenimizde en çok bulunan metal sıralamasında ise dördüncü sıradadır [41]. Titanyum, tabiatta mineral formundadır. Birçok farklı titanyum minerali türü vardır. Kimyasal tepkimelere dirençli olan başta titanyum mineral formları olan rutil, anataz ve brakittir [42]. Üretim maliyeti birçok metal türünden fazladır. Cevherinden direkt elde edilmeleri uygun değildir. Üretimde kompleks ergitme yöntemleri kullanılması gerektiği için üretim maliyeti oldukça fazladır. Yüksek reaktifliği sebebiyle titanyum hidrojen, oksijen, azot ve karbon gibi elementler ve bileşikleriyle tepkimeye girmeye yatkındır. Bundan dolayı saf titanyum üretimi oldukça maliyetli ve kompleks bir işlemdir [43]-[44].

Titanyum alaşımlarının son gelişmelere ve yaygın kullanımına rağmen, titanyum alaşımlarının işlenmesi hala önemli bir endüstriyel sorun olmaya devam etmektedir. Titanyum alaşımlarının halen geleneksel işlenmesiyle ilgili genellikle yaşanan sorunlar; düşük takım ömrü, düşük talaş kaldırma oranları, daha yüksek kesme kuvveti ve sıcaklığı ve düşük yüzey kalitesi olarak tanımlanabilir.

Titanyum tabiatta kristal yapıda bulunan bir elementtir. Oda sıcaklığında hekzagonal bir yapıdayken α fazı 882 °C'de hacim merkezli kübik (HMK) bir yapıya

dönüşmektedir. Alüminyum, Oksijen, Azot, Galyum ve Karbon gibi α dengeleyicileri sıcaklıkta artışa neden olur. Molibden, Vanadyum, Tantal, Bakır, Krom, Demir, Mangan, Nikel, Kobalt ve Hidrojen gibi β dengeleyicileri dönüşüm sıcaklığını düşürür [42].

Protez ve implant malzemeleri akma ve çekme dayanımı, korozyon direnci, süneklik, tokluk, elastisite modülü gibi mekanik olarak üstün davranışlar sergilemelidir. Söz konusu malzemelerden biri olan Ti6Al4V bu mekanik şartları sağlayan Titanyum alaşımlarından biridir. Söz konusu olan Titanyum alaşımı ülkemizde ve dünyada eklem protezlerinde sıkça kullanılmaktadır. TNTZ bir Titanyum alaşımı olmakla birlikte kimyasal kompozisyonunda yaklaşık %41,38 Ti, %28,22 Nb, %13,5 Ta ve %4,65 Zr bulundurmaktadır.. Söz konusu deney malzemesi olan TNTZ biyomedikal sektöründe ağırlıklı olarak implant üretiminde kullanılmaktadır. Birçok ısıtıl işlem yöntemine uygun olmakla birlikte biyomedikal malzemeler içerisinde işlenebilirlik ve verimlilik açısından uygun görülen bir malzeme olarak öne çıkmıştır. Düşük Young modülünün getirdiği avantajlar da söz konusu malzemeyi yeni bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır.

1.7. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Elektro erozyon prosesi geleneksel olmayan bir işlem olarak tanımlanmaktadır. Bunun sebebi elektriği ileten bütün malzemeler sertliğinden ve talaşlı işlenebilirlik özelliğinden bağımsız olarak işlenebilmesinin yanında seri üretime uygun olmayan uzun işleme süreleridir. Uygulama alanı olarak sertleştirilmiş çeliklerde, dayanıklı metallerde ve üretimi zor olan alıştırma ve geçme parçalar için özellikle faydalı çözümler sunmaktadır. Bu çalışma konusu olan toz katkılı elektro erozyon ile işlemenin temel çalışma prensibi, iş parçasına uygulanan kıvılcımın, erime ve buharlaşmaya yol açması ve bir miktar talaş koparmasının yanında iletken partiküllerin dielektrik sıvı içerisine enjekte edilmesi elektro erozyon işleminin etkinliğini ve hatta iletkenlik sorunu bulan malzemelerde de kullanılabilirliğini sağlamaktadır. Bu işleme prosesinde işleme sırasında mekanik kesme kuvveti ortaya çıkmaz. Elektriksel deşarj ile elektro termal enerji oluşturularak iş parçası üzerinden

talaş kaldırma işlemi EEİ olarak tanımlanmıştır. Elektrik akımını ileten materyaller EEİ yöntemiyle işlenebilmektedir.

Çeşitli toz katkıları ile elektro erozyon işlemine pozitif yönde etki eden sonuçlar alındığı görülmüştür. Söz konusu toz katkıları grafit, alüminyum ve titanyum alaşımlarından oluşabilmektedir. Toz halinde her malzemenin talaşlı imalatı farklı şekilde etkilediği görülmüştür. Elektro erozyon ile işlemede etkili olan parametreler ise iş parçası malzemesi, elektrot malzemesi, vurum süresi, dielektrik sıvısı, işlemeye katkı olarak eklenen metal veya metal olmayan tozlar, uygulama basınçları, kutuplaşma, devre gerilimi, işleme derinliği, elektrot boyutu ve elektrot tipi olarak sıralanabilir.

Deneyisel çalışmada söz konusu parametrelerin işleme verimine olan etkilerinin somut olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Deney malzemesi olarak başlıca TNTZ olmak üzere Titanyum alaşımları planlanmıştır.

TNTZ bir Titanyum alaşımı olmakla birlikte kimyasal kompozisyonunda yaklaşık %41,38 Ti, %28,22 Nb, %13,5 Ta ve %4,65 Zr bulundurmaktadır. Söz konusu deney malzemesi olan TNTZ biyomedikal sektöründe ağırlıklı olarak implant üretiminde kullanılmaktadır.

Tüm bu bilgilerin ışığında söz konusu olan malzemelerin işlenebilirliklerinin araştırılması ve karşılaştırılması bu deney kapsamında hedeflenmektedir.

BÖLÜM 2

İMALAT YÖNTEMİ

2.1. GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMLERİ

2.1.1. Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat yöntemleri geleneksel imalat yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, iş parçası üzerinden bir takım yardımıyla talaş kaldırılmasıdır. Bu metod eksiltmeli bir imalat yöntemi olarak tanımlanmaktadır. En yaygın talaşlı imalat yöntemleri ise şu şekildedir:

1. Torna
2. Freze
3. Delik Delme
4. Vargel
5. Planya
6. Taşlama
7. Broşlama
8. Raybalama

2.1.2. Talaşsız İmalat

Talaşsız imalat yöntemleri bir iş parçasının kuvvet etkisi altında şekil değiştirmesine yönelik imalat yöntemleri olarak tanımlanır. Bu yöntemde herhangi bir talaş oluşumu gözlemlenmez. Genellikle ani sıcaklık ve şekil değişimine yönelik yöntemler uygulanır. En yaygın talaşsız imalat yöntemleri ise şu şekildedir:

1. Kaynak
2. Döküm
3. Sinterleme

4. Tel çekme
5. Kesme
6. Bükme
7. Dövme
8. Ekstrüzyon

2.2. GELENEKSEL OLMAYAN İMALAT YÖNTEMLERİ

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri olarak bilinen ve genellikle 2. Dünya savaşından sonra gelişerek uygulama alanı bulmuş imalat yöntemleri, işleme mekanizması olarak geleneksel imalat yöntemlerinden farklı özelliklere sahip imalat yöntemleridir. Bu imalat yöntemlerinin bir çoğu temelinde geleneksel imalat yöntemlerini barındıran fakat işleme tekniği konusunda farklılaşmış yöntemlerdir. En yaygın olarak kullanılan geleneksel olmayan imalat yöntemleri şu şekildedir:

1. Aşındırıcı Su Jeti İle İşleme
2. Elektro Erozyon İle İşleme
3. Elektro Kimyasal İşleme
4. Ultrasonik İşleme
5. Isıl Kimyasal İşleme
6. Lazer Işını İle İşleme

BÖLÜM 3

ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ

Elektro erozyon ile işleme, iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik deşarjlarının kontrollü olarak uygulanması ve bu yöntem ile iş parçasından parçacıkların eritme ve buharlaştırma yoluyla koparılması tekniğine dayanan geleneksel olmayan bir imalat metodudur. Elektro erozyon ile işleme yöntemi günümüz teknolojisinde havacılık, diş ve biyomedikal imalatında hızla kullanımı artan bir imalat yöntemidir. Yüksek dayanımlı, kompleks geometrili ve sert malzemelerin işlenebilmesiyle elektro erozyon ile işleme yöntemi modern imalat yöntemleri arasında önemli bir yer almıştır. Elektrik deşarjları, gerilim vurumlarının uygulanması neticesinde elektrot ile iş parçası arasında oluşur. Dielektrik sıvı içerisinde olan iş parçası ve EDM elektrodu 0.01-0.5 mm'lik bir boşlukla birbirinden ayrılmıştır. Deşarj gerilimi işleme boşluğunun büyüklüğüne ve dielektrik sıvının yalıtkanlık rezistansına göre değişiklik gösterir. Gerilim vurumunun uygulanmasının ardından elektrot ve iş parçası arasındaki en yakın yerde bir kanal iyonlaşır. Bu durum, elektrik deşarjının temas ettiği elektrot ve iş parçası yüzeylerinin erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Bu işlem sonucunda, iş parçası yüzeyinde kraterler oluşacak şekilde malzemeler yüzeyden kopar ve dielektrik sıvı döngüsüyle işleme bölgesinden uzaklaştırılır. Elektro erozyon ile işleme yönteminde oluşan yüzeyler kratersi yapıdadır. Bu nedenle krater boyutları ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü vurumların boşalım enerjileri ile ilgilidir [46].

3.1. EDM

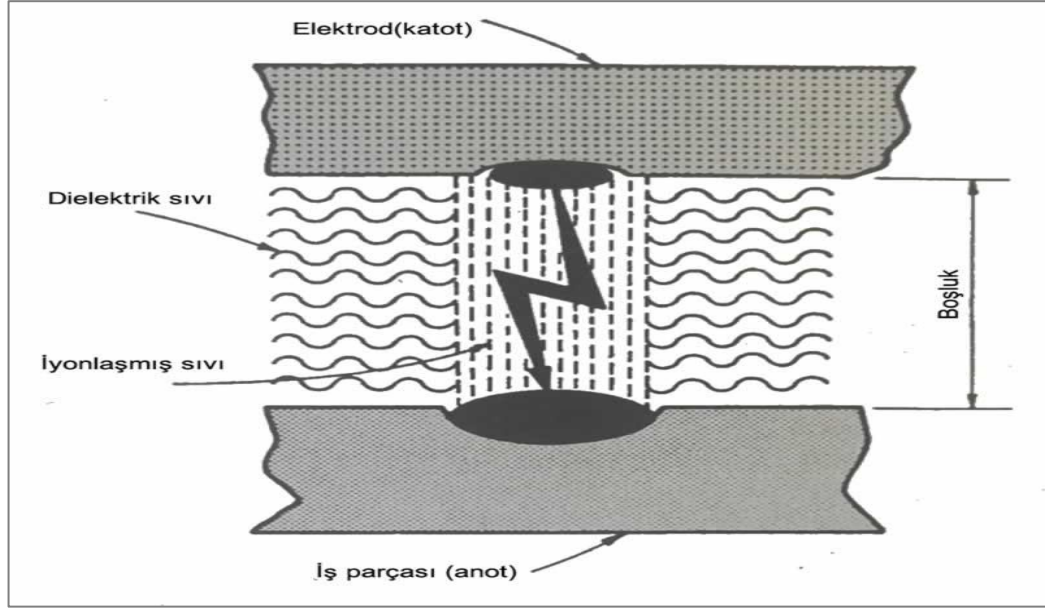
Elektro erozyon ile işleme (EDM), geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Takım ile iş parçası arasında mekanik bir temas olmadan EDM prosesi ile kıvılcım ile iş parçası yüzeyini aşındırması şeklinde termoelektrik geleneksel olmayan bir işleme olarak bilinir [47]. Uçak motoru endüstrisi gibi karmaşık şekillerin işlenmesinde,

geleneksel işleme prosesinde işleme maliyeti yüksek olup, yüzey kalitesi de değer elde edilememektedir [48]. EDM, iş malzemesini kıvılcım erozyonu yoluyla işler. İş parçası (anot) ve elektrot (katot) arasında kıvılcım oluşturur. Dielektrik sıvısı elektrik akımını iletmez. Petrol bazlı, sentetik ve bitkisel bazlı olmak üzere çeşitli dielektrik sıvı türleri vardır. Dielektrik sıvısı; düşük viskozite, yüksek dielektrik direnci ve etkili temizleme gibi şartları sağlamalıdır. Aksi durumda iş parçası ve elektrot arasında birikintiler kalmasına sebep olarak kısa devre oluşmasına neden olur. Ayrıca, EDM’de iş parçasının işlenme türüne bağlı olarak çeşitli tipleri vardır. Mikro EDM, dalma erozyon ve tel erozyon gibi türler mevcuttur [49]. EDM sürecinde, yüzey modifikasyonu performansını artırmak için çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları elektrota dönme hareketi veya yörüngesel hareket vermektir [50]-[51]. Ayrıca, ultrasonik titreşim destekli [52]-[53] ve EDM dielektrik sıvısına toz katkı maddesi eklenerek EDM süreci için iyileştirme çalışmaları yapılmıştır [54]-[58].

3.1.1. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminde Talaş Kaldırma Mekanizması

EDM doğası gereği karmaşık ve stokastiktir [59]. Her ne kadar EDM’de kullanılan malzeme erozyonu yöntemi hala tartışılabilir olsa da yaygın olarak kabul edilen iş parçası erozyonu mekanizması, elektrot ve iş parçası arasında meydana gelen bir dizi ayırık elektrik deşarj yoluyla elektrik enerjisinin termal enerjiye dönüştüğü termoelektrik modele dayanmaktadır [60]-[61]. Elektrotlara, elektrik akımı uygulandığında dielektrik sıvı bir plazma kanalı oluşturur ve sıcaklığı 20000 C’ye kadar yükseltir. Bu durum hem elektrodun hem de iş parçasının erimesini ve buharlaşmasını sağlar [62]. Vurum süresi bittiğinde plazma kanalı bozulur ve dielektrik sıvı erimiş elektrot ve iş parçası kalıntılarını yüzeydeki sirkülasyon yoluyla uzaklaştırır [63]. Elektro erozyon ile işleme yönteminde kullanılan dielektrik sıvısının birçok amacı bulunmaktadır. Elektrottan gelen akımı iş parçası yüzeyine taşıyarak akışta önemli bir rol oynamaktadır. İşleme bölgesindeki ara bölgede kalan işleme boşluğunu sabit tutarak, sürekli kıvılcım boşalmalarının oluşmasına yol açmaktadır. İşleme ara bölgesindeki açığa çıkan yüksek sıcaklıkları soğutarak elektrotu ve iş parçasını aşırı sıcaklıklardan koruyarak verimli bir işleme süreci oluşturmaktadır. Kaldırılan talaşın işleme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlar. Elektro erozyon ile işleme yönteminde dielektrik sıvı genellikle hidrokarbon türü malzemeler

kullanılmaktadır. Dielektrik sıvı, takım ile iş parçası arasındaki sirkülasyonu sağlayarak soğutma, elektrik iletkenliğinin sağlanması gibi parametreleri etkin kılar. Yetersiz basınç ile iş parçası üzerine dielektrik sıvı transfer edildiğinde yüzey pürüzlülüğü, işleme süresi gibi parametreler artış gösterir ve ara bölgede talaş birikimine yol açar.



Şekil 2.1. Elektro erozyon ile işleme prensibi [64].

3.1.2. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminin Temel Parametreleri

Elektro erozyon ile işleme yönteminde işlemenin etkinliğini belirleyen parametreler talaş kaldırma oranı (TKO), yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınma oranı olarak belirtilebilir. Söz konusu parametrelerin haricinde elektriksel parametreler ise işlemeyi etkileyen çok önemli faktörlerdir.

3.1.3. Elektro Erozyon İle İşleme Yönteminde Elektriksel Parametreler

Elektro erozyon ile işleme yönteminde bir kıvılcım için gerilim kontrolünde olan bir vurum jeneratörü tarafından akım ve gerilim dalga akımları üretilmektedir. Talaş kaldırma oranı değerinde etkili olan en önemli elektrik parametreleri, boşalım enerjisi (E_d) ve vurum sayısı (F_p)'dır. Boşalım enerjisi tek vurumdaki elektrik enerjisinin

düzeyini belirtir ve söz konusu enerji yüksek oranda ısı enerjisine dönüşür. Boşalım enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [65].

$$Ed = \int u(t) i(t) dt \cong U \times I_d \times t_d \quad (3.1)$$

Denklemden t_d , U ve I_d sırasıyla boşalım süresi, voltaj ve akım değerlerini göstermektedir. $U(t)$ ve $i(t)$ parametreleri ise anlık akım ve gerilimi ifade etmektedir.

Uygun işleme koşullarının seçimi anlık elektriksel boşalımların gerçekleşmesine sebep olur ve diğer elektriksel parametrelerden bağımsızdır. Böyle bir durumda, ateşleme gecikme süresi (t_d) ihmal edilebilir ve boşalım süresi vurum süresine eşit olur. Bu durumda boşalım enerjisi değeri (Ed) değeri şu şekilde ifade edilebilir [66]:

$$Ed = U \times I_d \times t_{on} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'den görüldüğü şekilde voltaj, akım ve vurum süresi parametrelerden herhangi birinin artmasıyla yüksek boşalım enerjisi değerlerine ulaşılabilir. Dolayısıyla TKO, TAO ve YP değerleri de artmaktadır. Boşalım enerjisine ek olarak, işlemin verimliliğini etkileyen bir diğer faktör olan F_p değeri ise aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F_p = 1/t_p = 1/(t_{on} + t_{off}) \quad (3.3)$$

Burada, t_p vurum süresini, t_{off} ise vurum ara süresini ifade etmektedir. Vurum ara süresinin kısalmasıyla vurum frekansı ve dolayısıyla TKO da artmaktadır. Ancak, vurum ara süresinin belirli bir değerin altına düşmesi durumunda ise kararsız boşalımlar gerçekleşir ve ara bölgedeki talaşların süpürülmesi için yeterli zaman kalmaz. Dolayısıyla işleme daha kararsız hale gelir ve işleme süresi de artar.

3.1.3.1. Boşalım Akımı

Boşalım akımı, (I_d) boşalım aralığına uygulanan güç olarak tanımlanır. Akım değerindeki artışlar yüzeye uygulanan enerji yoğunluğunu arttırdığı için uygulanan güce bağlı olarak iş parçası yüzeyinde derin kraterler oluşmasını sağlar. Bu veriden yola çıkarak talaş kaldırma oranı (TKO) artarken, yüzey pürüzlülük değeri (YP) değeri de artmaktadır.

3.1.3.2. Vurum Süresi

Elektro erozyon ile işleme yönteminde vurum süresi içerisinde talaş kaldırılmaktadır. Vurum süresi yüzeye uygulanan elektrik zamanının uzunluğu olup, bu süre içerisinde elektrottan iş parçası üzerine elektrik akımı geçmektedir. Bu süredeki artış, elektrottan iş parçası yüzeyine kütle akışını ve talaş kaldırma oranının artmasına sebep olmaktadır.

3.1.3.3. Vurum Ara Süresi

Vurum ara süresi ($toff$) elektrot üzerinden yapılan iki vuruş arasındaki bekleme süresidir. Bu zaman aralığında elektrot üzerinden akım geçmez ve dielektrik sıvısı ara bölgeye yüksek bir basınç ile gönderilir. Bu sürede elektrotun ve iş parçasının soğuması hedeflenir. Yine bu süre içerisinde iş parçası ile elektrot arasındaki ara yüzeyde oluşan talaşlar süpürülerek işlenecek yüzeyden talaşlar uzaklaştırılır.

3.1.3.4. Vurum Çevrim Süresi

Vurum süresi ile vurum ara süresi değerlerinin toplamıdır. Vurumun çevrim süresini ifade eder.

$$tp=ton+toff \quad (3.4)$$

3.1.3.5. Polarite (Kutuplama)

Elektro erozyon ile işleme yönteminde kutuplama yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını etkileyen çok önemli faktörlerden biridir. Takım kutuplaması işleme şartları, elektrot özellikleri ve iş parçasının özelliklerine bağlı olarak pozitif veya negatif olarak seçilebilmektedir. Genellikle elektrot negatif (-) iş parçası pozitif (+) seçilmektedir. Bazı durumlarda ise ters kutuplama yapılmaktadır. Kutuplama elektro erozyon ile işleme esnasında elektron akışının yönünü belirlemektedir.

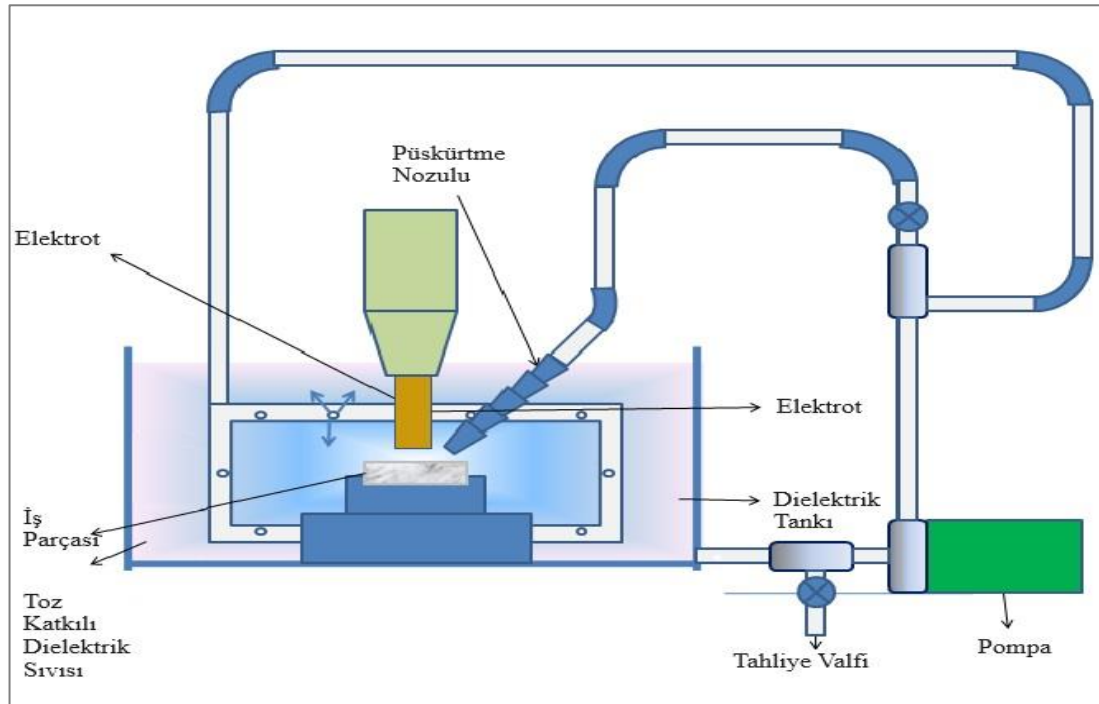
3.1.4. Elektriksel Olmayan Parametreler

Elektro erozyon ile işleme yönteminde elektriksel parametrelerin haricinde ek olarak, işleme performansını etkileyen ve elektriksel parametrelere dahil olmayan birçok faktör bulunmaktadır. Dielektrik sıvının cinsi ve uygulanma çeşidi, takım elektrotunun malzemesi ve özellikleri, elektrot dönme hareketi ve iş parçasına uygulanan vibrasyon hareketleri gibi uygulamalar elektriksel olmayan parametreler olarak nitelendirilebilir.

3.2. PMEDM (TKEEİ)

PMEDM, EDM işleminin performansını arttırmak için dielektrik sıvısına iletken tozların eklenerek işleme yapılmasıdır [67]. Bir yüzey modifikasyon tekniği olarak PMEDM, son yıllarda işlenebilirlik verimliliği ve yüzey kalitesi açısından dikkat çekmiştir [68]. Ayrıca, PMEDM ile işlenen yüzey, korozyon ve aşınmaya karşı dayanım göstermektedir. PMEDM’de işleme, ana işleme tankının içerisinde ayrı bir tankta gerçekleştirilir. Ana tankın içerisinde ayrı bir tank ile işleme yapmanın amacı, farklı tozlarla ve farklı konsantrasyonlarda karıştırılan dielektrik sıvının israfını önlemektir. Bu durumda, toz karışımli dielektrik sıvının sirkülasyonu için ayrı bir karıştırma sistemi prosese dahil edilmiştir [69]. EDM işlemi esnasında yüksek termal enerji üretilir ve ardından ani soğuma ergimiş materyallerin yeniden katılaşmasına neden olur. Bu durum, işlenmiş yüzeyde beyaz tabaka olarak da bilinen “recast” tabakasının oluşmasına sebep olur [70]. Beyaz tabaka, işlenmiş yüzeyin yorulmasını ve korozyon direncini azaltan mikro çatlaklar içerir. Bu yüzeyin ortadan kaldırılması

için ikincil operasyonlar zorunlu hale gelir [71]. PMEDM uygulamasında dielektrik sıvısına toz katkısı ilave edilmektedir. Bu durum, dielektrikteki toz parçacıkları enerjilendirilir ve elektrotlara voltaj uygulandığında zikzak tarzında hareket eder ve boşlukları dolduran kıvılcım zincire benzer bir yapı üretir. Bu zincir benzeri yapı deşarjı başlatır ve bu durum dielektrik dayanımını ve aralık voltajını da azaltır. Kalıntılar, verimli bir şekilde işleme bölgesinden uzaklaştırılarak kıvılcım frekansı arttırılır. Termal iletkenliğin artması, kıvılcım bölgesi altında aktif deşarj geçirgenliğine sebep olmaktadır. Bu sebeple de toz karışımlı dielektrik sıvı ile yapılan işlemlerde talaş kaldırma oranının standart EDM işlemlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür [72]



Şekil 2.2. TKKEİ deney mekanizması [73].

BÖLÜM 4

BİYOMALZEMELER

4.1. BİYOMALZEMELERİN İŞLENMESİ

Biyomalzemeler geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle işlenebilmektedir. Geleneksel işleme yöntemleri arasında tornalama, frezeleme, tel çekme, haddeleme, dövme, planya ve vargel tezgahı ile işleme gibi yöntemler biyomalzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesine birer örnek teşkil etmektedir. Biyomalzemelerin geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle işlenmesi ise mikro frezeleme, mikro tornalama, elektro erozyon ile işleme (toz katkılı veya toz katkısız fark etmeksizin), su jeti ile işleme, ısıl işlem yardımcı işleme ve elektrokimyasal işlemler ile mümkün olabilmektedir.

Biyomalzemelerin mikro frezeleme yöntemiyle işlenmesinde yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerinin ve çapak genişliğinin arttığı görülmüştür [74]

Biyomalzemelerin işlenmesinde elektro erozyon ile işleme yöntemi kullanıldığında ise akım değeri ve vurum süresi arttığında yüzeydeki çatlak yoğunluğunun arttığı görülmüştür [75]. Ayrıca, biyomalzemelerde işlemler üzerine yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine yönelik ikincil işlemler yapılmaktadır. Bu iyileştirme işlemlerinden biri olan manyetik aşındırma yöntemi uygulandığında %96 oranlarına kadar yüzey pürüzlülüğünün iyileştirildiği görülmüştür [76]. Geleneksel veya geleneksel olmayan yöntemler de göz önünde bulundurulduğunda biyomalzeme türlerinin geneli için işlenmesi kolay olmayan malzemeler olduğunu ifade ederiz.

4.2. BİYOMALZEME İMALATINDA EDM İŞLEMLERİ

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri arasında olan elektro erozyon ile işleme yöntemi, malzemeye istenilen forma getirmek için elektrik boşalması ve bu yol ile kıvılcım aracılığıyla talaş kaldırması kullanılmaktadır.

EEİ (EDM), elektrik iletken iş parçasını işlemede kullanılan termo elektrik bir yöntemdir ve geleneksel olmayan imalat yöntemleri arasında en sık kullanılan endüstriyel uygulamadır [77]. EEİ (EDM), elektriksel olarak iletken olan iş parçası ile elektriksel olarak iletken olan elektrot arasında oluşturulan kıvılcımların iş parçası yüzeyini aşındırması prensibine dayanır. Bu elektrik deşarjları yüksek miktarda ısı meydana getirir. Bu durum, lokal olarak iş parçasının erimesine ve buharlaşmasına yol açar [78]. Elektrot ve iş parçası arasında 10-500 µm aralık vardır. EEİ prosesinde elektrot ve iş parçası iletken olmayan dielektrik sıvı içerisinde batmış haldedir. İş parçası ve elektrot arasında üretilen potansiyel fark yeterli olduğunda, elektrotun iş parçasına en yakın olduğu yerde aradaki potansiyel fark dielektrik sıvıyı lokal olarak hızla iyonlaştırır ve elektrik deşarjı oluşur. Bu elektrik deşarjı kıvılcımdır. Her kıvılcımın (elektrik deşarjının) güç yoğunluğu yaklaşık 108 W/mm²'dir. Bu güç miktarı iş parçasından ve elektrottan bir miktar talaş kaldırmak için yeterli bir miktardır [79].

Elektro erozyon ile işlemede toz katkılarının etkilerini örneklemek gerekirse dielektriğe eklenen nişasta katkısıyla delik delme işlemine pozitif yönde etki ederek yüzey özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Benzer deneysel çalışmalarda, toz katkılı elektro erozyon ile işlemede dielektriğe grafit toz katkısı yapıldığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlemlenmiştir [80]-[81].

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden olan EEİ (EDM) yöntemi kullanılarak Titanyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine araştırma yapılan bir diğer çalışmada ise elektro erozyon yöntemiyle bir titanyum alaşımı olan Ti6Al4V ve Rex 734 malzemelerinin işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi sonucunda söz konusu malzemelerin Yüzey Çatlak Yoğunluğunun (YÇY) akım ve vurum süresinin

artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Yine aynı şartlar altında akım ve vurum süresinin artmasına bağlı olarak TKO ve OYP (Ra) değerlerinin arttığı görülmüştür [82].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. MALZEME

Deneylerde deneye özel olarak üretilen TNTZ-0.2C, TNTZ-0.2O, TNTZ-0.2N ve TNTZ-ST kullanılmıştır. Söz konusu malzemeler biyolojik uyumluluklarından kaynaklı olarak implant deneylerinde kullanılmaktadırlar. Kullanılan malzemelere ait kimyasal bileşimler ve mekanik özellikler Tablo 5.1. ve Tablo 5.2. de verilmiştir.

Çizelge 5.1. TNTZ-0.2O alaşımının kimyasal bileşimi.

Ti	Nb	O	Ta	Zr	N
Bal.	29.1	0.2	12.8	4.55	0.0065

Çizelge 5.2. TNTZ-0.2C alaşımının kimyasal bileşimi.

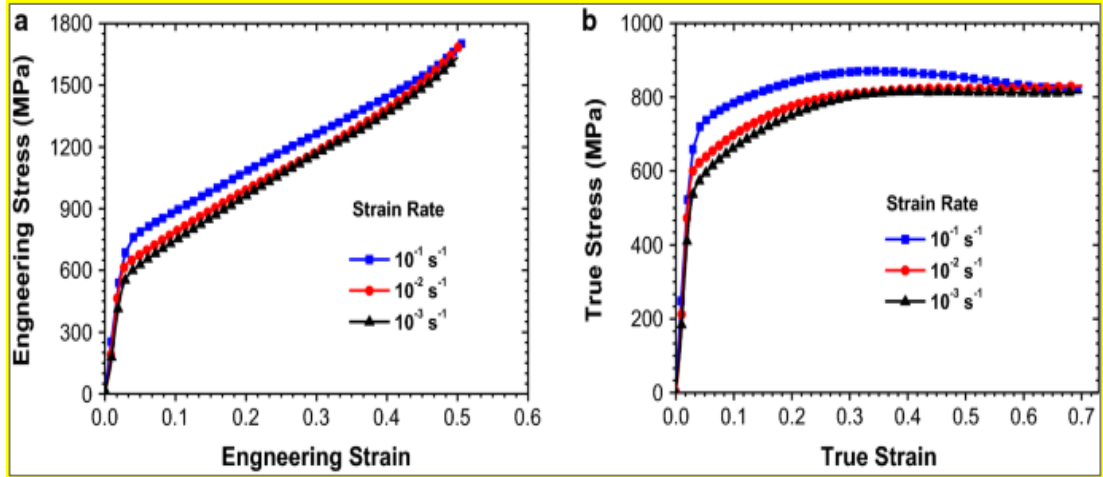
Ti	Nb	C	Ta	Zr	N
Bal.	29.19	0.211	13.1	4.67	0.0080

Çizelge 5.3. TNTZ-ST alaşımının kimyasal bileşimi.

Ti	Nb	C	Ta	Zr	N
Bal.	29.3	0.001	12.9	4.7	0.0040

Çizelge 5.4. TNTZ-0.2N alaşımının kimyasal bileşimi.

Ti	Nb	C	Ta	Zr	N
Bal.	29.20	0.001	13	4.8	0.0010



Şekil 5.1. TNTZ (Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr) malzemesine ait mekanik özellik grafikleri [83].

Biyomalzemeler geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle işlenebilmektedir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri arasında olan EEİ (EDM) yöntemi, malzemeye istenilen forma getirmek için elektrik boşalması ve bu yol ile kıvılcım aracılığıyla talaş kaldırması kullanılmaktadır. Söz konusu işleme yöntemi çok küçük malzeme parçacıklarını iş parçası üzerinden kaldırarak parça yüzeyini erozyona maruz bırakmaktadır.

Söz konusu deneyde $\varnothing 5mm \times 35mm$ boyutlarında elektrot kullanılmıştır. Numuneler ise $\varnothing 25mm \times 5mm$ boyutlarında hazırlanmıştır. Numunelerin taramalı elektron mikroskopunda kesit görüntülerine bakmak amacıyla Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Metalografi Laboratuvarında Struers marka bir kesme diskiyle numuneler kesilmiştir. Kesme işlemleri silisyum karbür diskler kullanılarak düşük devirlerde soğutma sıvısı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Kesme işlemleri sonrasında numuneler 600-800-1000-1200 meshlik zımparalardan geçirilerek elmas pasta ile parlatılmıştır.



Şekil 5.2. Struers kesme cihazı.

5.2. PMEDM İŞLEMLERİ

5.2.1. Elektrot

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme deneylerinde %99.99 saflıkta olan bakır elektrot kullanılmıştır. Bakır elektrotlar torna tezgahında $\varnothing 5mm \times 35mm$ ölçülerinde işlenmiştir. Her işleme için ayrı bir elektrot üretilmiştir.

5.2.2. Toz Katkısı

Tüm deneylerde 30-50 μm boyutunda grafit toz katkısı kullanılmıştır.

5.2.3. Dielektrik Sıvı

Tüm deneylerde dielektrik sıvısı olarak kerosen kullanılmıştır.

5.2.4. Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşleme Parametreleri

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında CHARMİLLES D20 marka bir dalma erozyon tezgahında yapılmıştır. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Dielektrik sıvısı iş parçası üzerine 5 bar basınç ile püskürtülmüştür. Toz katkısı olarak grafit kullanılmıştır. İş parçası geometrilerine bağlı olarak parçaları tezgaha bağlama gayesiyle iki farklı ayna kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Toz katkılı elektro erozyon tezgahı görüntüsü.



Şekil 5.4. Toz katkılı elektro erozyon tezgahı görüntüsü (İş parçası bağlı işleme yapılırken).

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme yönteminde vurum süresi, elektrot cinsi, kutuplama, akım değeri, dielekrik sıvı cinsi, dielektrik sıvı basıncı ve uygulama şekli gibi birçok faktör işleme efektifliğini etkilemektedir. Söz konusu parametreler arasında başlıca etkenler vurum süresi ve akım değeridir. Bu çalışmada söz konusu parametrelerin işlenen parçaya etkileri araştırılmıştır. Tablo 5.3.'te deneylere ait parametreler belirtilmiştir.

Çizelge 5.5. Deney parametreleri.

TKEİİ PARAMETRELERİ	1. BASAMAK	2. BASAMAK	3. BASAMAK
AKIM (A)	4	8	16
VURUM SÜRESİ (μs)	2	8	
DİELEKTRİK BASINCI	5 BAR		
DİELEKTRİK SIVISI	KEROSEN		
TOZ KATKISI CİNSİ	GRAFİT		

5.2.5. Ağırlık Kayıp Ölçümleri ve TKO

Tüm toz katkılı elektro erozyon ile işleme deneylerinde, işleme derinliği 1 mm olarak esas alınmış ve işleme süresi (t) ölçülmüştür. Talaş kaldırma oranı değerleri hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$TKO = (\text{gram/dakika}).$$

Tüm ölçümler deney öncesi ve sonrasında 0.001 hassasiyetli bir terazi ile yapılmıştır.

Ağırlık kayıp ölçümleri ise hem elektrot için hem de iş parçası için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

5.2.6. İşlenmiş Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü ve Topoğrafya

İşlenen yüzeylerin mikro boyutta incelenmesi hususunda birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları optik profilometre analizi, X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF), X-Işını Difraktometresi (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM) olarak

örneklendirilebilir. Söz konusu yöntemler kullanılarak numune yüzeylerini 2 ve 3 boyutlu olarak analiz edebilmektedir. Optik profilometre analizi, yüzey topoğrafyasının çıkarılıp yüzeyin tek noktalı, bir hat üzerinde veya üç boyutlu olarak ışık demetlerinin yüzeye yönlendirilmesi neticesinde yapılabilmektedir. Optik profilometre analizinde mekanik bir prob yerine ışık demetlerinin kullanılmasının sebebi yüzey morfolojisi, yüzeydeki yükselteleri ve yüzey pürüzlülüğünü hassas bir şekilde belirleyebilmektedir. Aynı zamanda yaygın kullanımda olan optik profilometre cihazları belirtildiği gibi işlem yaptığı için numune yüzeyine temas etmediği için yüzey pürüzlülüğüne de etki etmemektedir.

Toz katkılı elektro erozyon ile işlenen numunelerin yüzey pürüzlülük ve topoğrafya ölçümleri Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Malzeme ve Yüzey Analiz Laboratuvar'ında Phase View marka cihaz ile ölçülmüştür. Ölçüm yapılan cihaz Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topoğrafya ölçüm cihazı [84].

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme deneyleri sonrasında numuneler üzerinde metalurjik incelemeler yapılmıştır. Taramalı electron mikroskobu analizleri Karabük Üniversitesi Demir-Çelik Enstitüsü Margem Sem Laboratuvar’ında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri ise Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvar’ında yapılmıştır. EDX ölçümlerinde Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka cihaz kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ise Mitutoyo SJ-410 marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

5.2.7. Beyaz Tabaka İncelemeleri (SEM+EDS)

TKKEİ sonrası numunelerin yüzey görüntüleri ve yüzeydeki kimyasal değişimler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü’nde bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçülmüştür. SEM ile birlikte EDS analizleri de aynı cihaz ile yapılmıştır. TKKEİ sonrası işlenen numunelerin önce yüzey görüntüleri SEM yardımıyla alınmış olup sonrasında beyaz

tabaka incelemelerini kesit alanı üzerinden yapmak amacıyla numuneler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Metalografi Laboratuvarında Struers marka bir kesme diskiyle numuneler kesilmiştir. Kesme işlemleri Silisyum Karbür diskler kullanılarak düşük devirlerde soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Taramalı elektron mikroskobu analizi yapılan cihaz.

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. DENEY SONUÇLARI

6.1.1. Elektrot

İşleme yapılan elektrotlarda akım, direnç ve işleme sonucu erime sebebiyle uç kısımlarda bakır ve karbon yoğunluklu yanık bölgeler görülmüştür. Numunelerde yapılan SEM ve EDS analizlerine istinaden elektrotlarda işleme kaybı yaşanan ağırlıkların bir kısmının numune üzerine yapışarak karbonlu bileşikler oluşturduğu görülmüştür. Elektrot ve numune üzerindeki ağırlık kayıpları ise hassas terazi ile yüksek hassasiyette ölçülmüştür.



Şekil 6.1. İşleme yapılmış elektrot görüntüsü.

6.1.2. İşlenmiş Parça

Deneyde işlenmiş olan titanyum alaşımlarının yüzey kalitelerinin düşük olduğu gözle görülebilir şekilde Şekil 6.2’de belirtilmiştir. Düşük akım süresi ve vurum değerleri ile işlenen numunelerdeki yüzey kaliteleri daha yüksek, yüksek akım süresi ve vurum

değerleri ile işlenen numunelerdeki yüzey kaliteleri ise daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Tablo 6.1’de görülen veriler ile işlenmiş parça dış yüzeylerinin görsel muayenesi sonucunda akım süresi ve vurum değeri arttıkça toplam işleme süresi azalmış olup yüzey kalitesi ise işleme süresi ile ters orantılı bir şekilde değişim göstermiştir.



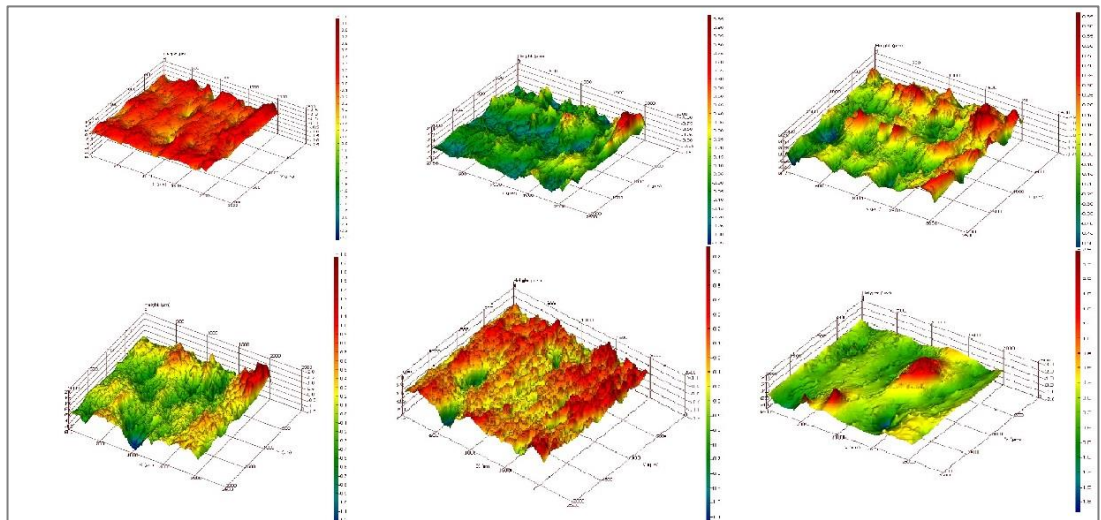
Şekil 6.2. İşlenen numunelerin görüntüleri.

6.2. İŞLENMİŞ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülük ölçümleri Düzce Üniversitesi DÜBİT Laboratuvarlarında yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinde topoğrafya ölçüm ortalamaları esas alınmıştır. Ortalama topoğrafya değerleri, vurum süreleri ve akım değeri numune numaralarına göre tablolastırılmıştır.

Çizelge 6.1. Yüzey pürüzlülüğü-akım değeri-vurum süresi parametrelerine ait tablo.

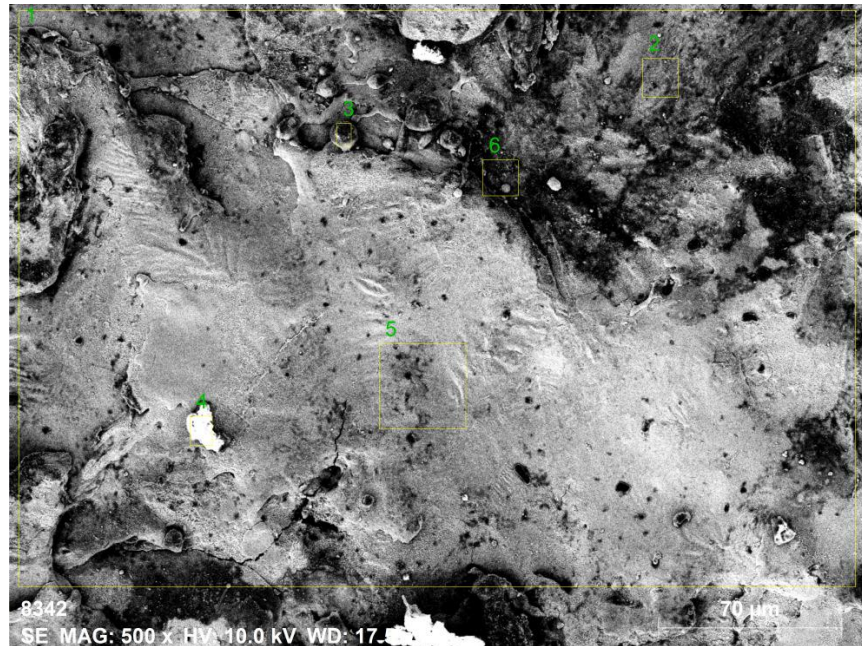
Numune No	Akım Değeri (A)	Vurum Süresi (μ s)	Topoğrafya Ortalaması (Ra)
1	16	6	0,08412
2	16	400	0,1505
3	8	400	0,3059
4	8	6	0,1357
5	4	6	0,09276
6	4	400	0,1296
7	16	6	0,1981
8	16	400	0,1268
9	8	400	0,1491
10	8	6	0,1872
11	4	6	0,07162
12	4	400	0,1268
13	16	6	0,3264
14	16	400	0,2112
15	8	400	0,1816
16	8	6	0,1587
17	4	6	0,09976
18	4	400	0,192
19	16	6	0,1431
20	16	400	0,1694
21	8	400	0,1268
22	8	6	0,103
23	4	6	0,09531
24	4	400	0,1015



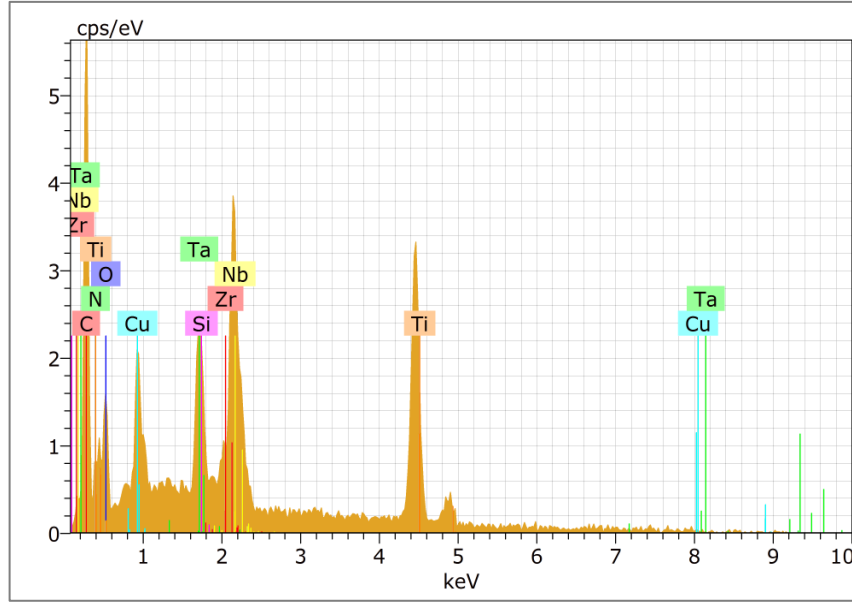
Şekil 6.2.2 Yüzey topoğrafya incelemelerine ait yüzey görselleri.

6.3. İŞLENMİŞ YÜZEYDEN İNCELEMELER

Çalışmada TNTZ materyalinin dört farklı varyasyonu kullanılmıştır. Bu materyaller TNTZ-O.2 O, TNTZ-0.2 C, TNTZ-0,2 N, TNTZ-ST olarak belirtilmiştir. Numuneler önce yüzey görüntüleriyle ardından kesit görüntüleri alınmak suretiyle incelenmiştir. Tüm numunelerin yüzey yapısı göz önünde bulundurularak net ifade edilebilecek bulgulardan birisi işleme yönteminin farklılığından kaynaklı yüzey yapısının karakteristiğinin geleneksel imalat yöntemiyle işlenen Titanyum alaşımlarından farklı olmasıdır. İşleme esnasında numunelere uygulanan kıvılcımlar numunelerin yüzeylerinde kraterler ve eriyip katılaştıran yüzeyler oluşturmuştur. Genel olarak yüzeylerde kraterlerden farklı olarak mikro boşluklar, yüzey çatlakları ve eriyerek yüzeyde yapışıp katılaştıran materyal çeşitleri ve dielektrik sıvıda bulunan fakat sıvı sirkülasyonunun uzaklaştıramadığı toz katkılı materyallerinin de yüzeyde aralıklarla bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.2’de net bir karakteristik örneği görülen dielektrik sıvı katkısının (grafit) işlenen numune üzerinde eriyip katılaşması Şekil 6.3’te net olarak görülmektedir. Şekil 6.3’te karbon yoğunluğu ortalamasının çok üzerinde bir şekilde görülmekte ve 5 numaralı EDS analiz bölgesinde ise karakteristik bir şekilde eriyip katılaştıran Ti-Nb ağırlıklı bir yüzey görülmektedir.



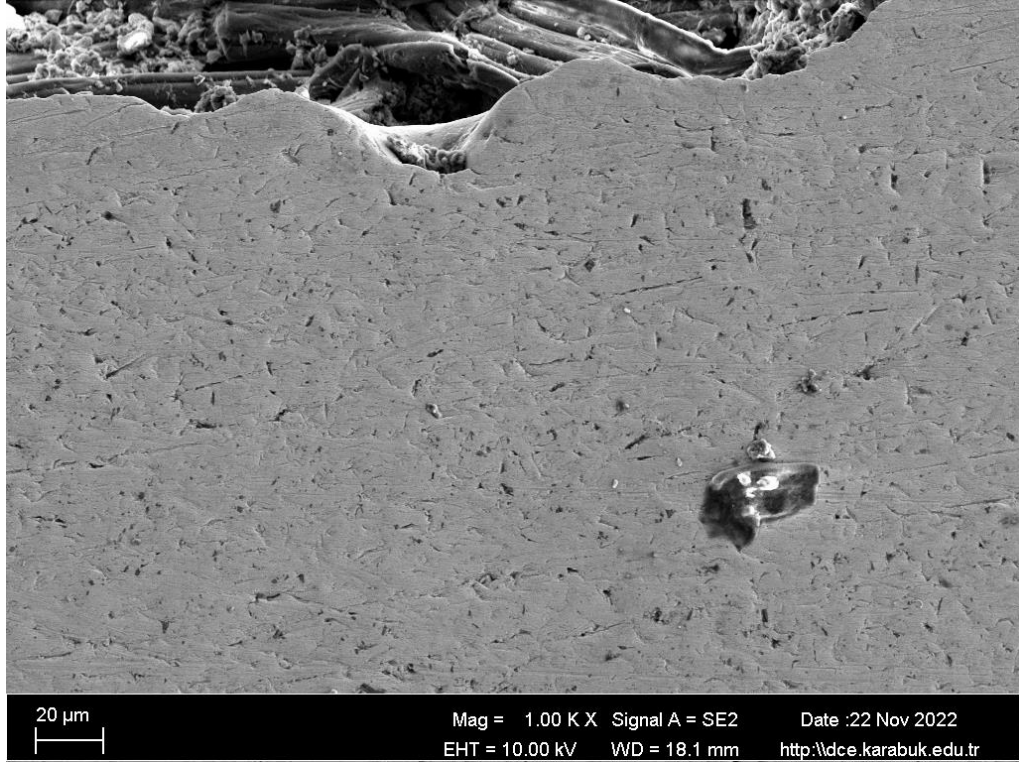
Şekil 6.3. TNTZ-0.2O Materyalinin TKEEİ ile işlenmiş bir yüzey görüntüsü.



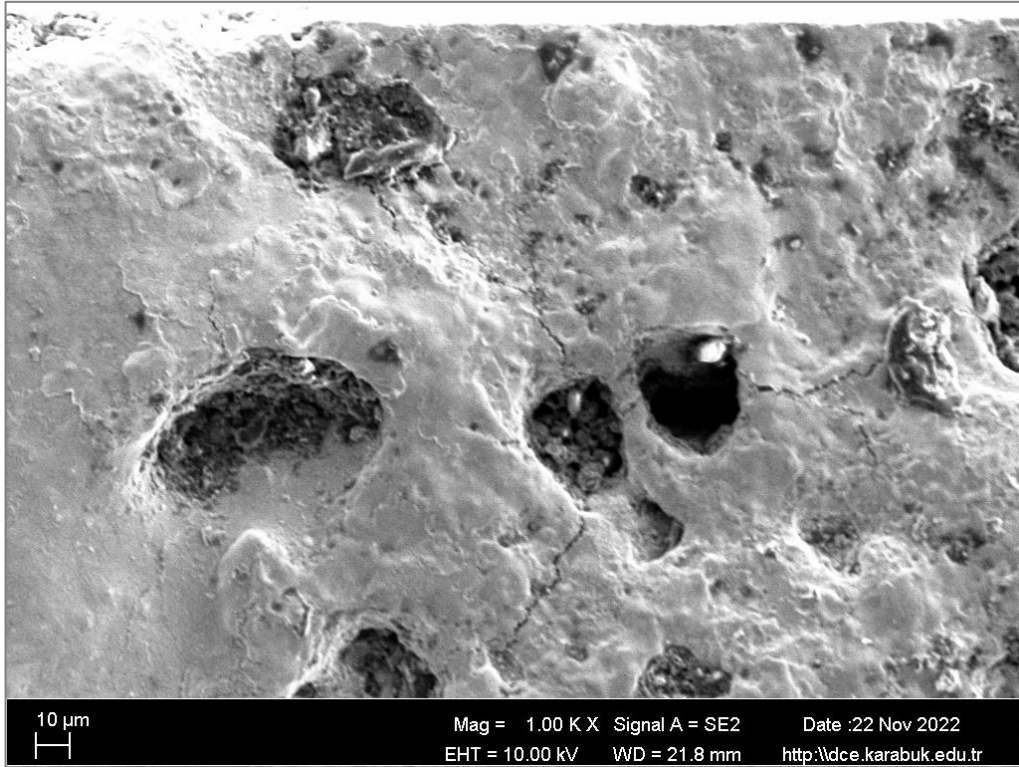
Şekil 6.4. 4 Nolu yüzey analiz bölgesinin EDS analiz sonucu.

6.3.1. Vurum Süresinin Yüzey Yapısına Etkisi

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da vurum süreleri birbirinden farklı işlenmiş yüzeylerin titanyum alaşımları ile yapılan elektro erozyon ile işleme deneylerinde uzun vurum sürelerinde yüzey pürüzlüğünün artmasına sebep olarak yüzeydeki Ti-C formlarının artmasına sebebiyet vererek yüzeydeki çatlak yoğunluğunu arttırdığı görülmüştür.



Şekil 6.5. Düşük vurum süresi ile işlenmiş TNTZ-ST numunesinin SEM görüntüsü.

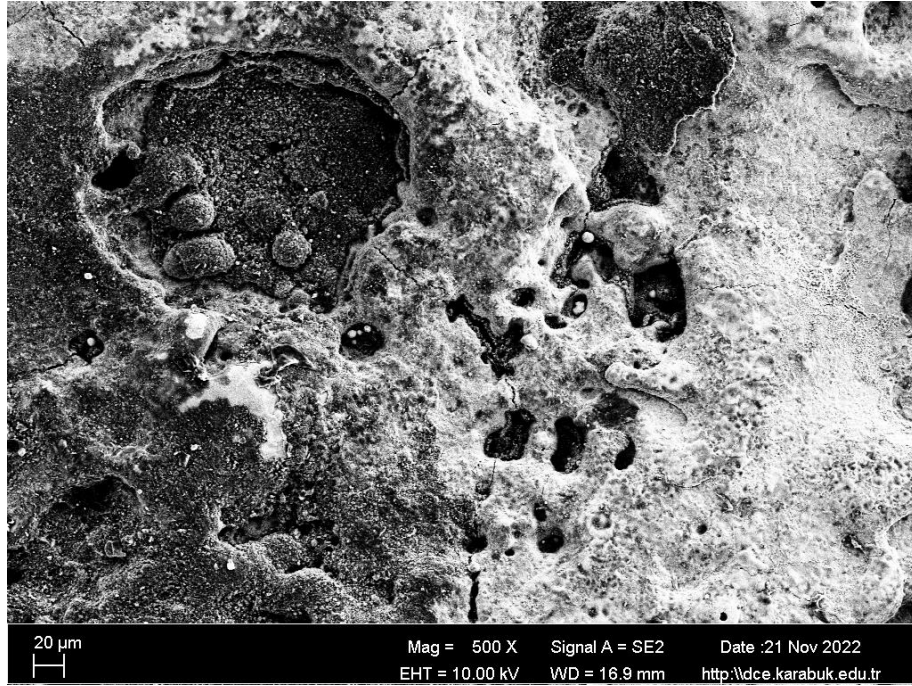


Şekil 6.6. Yüksek vurum süresi ile işlenmiş TNTZ-ST numunesinin SEM görüntüsü.

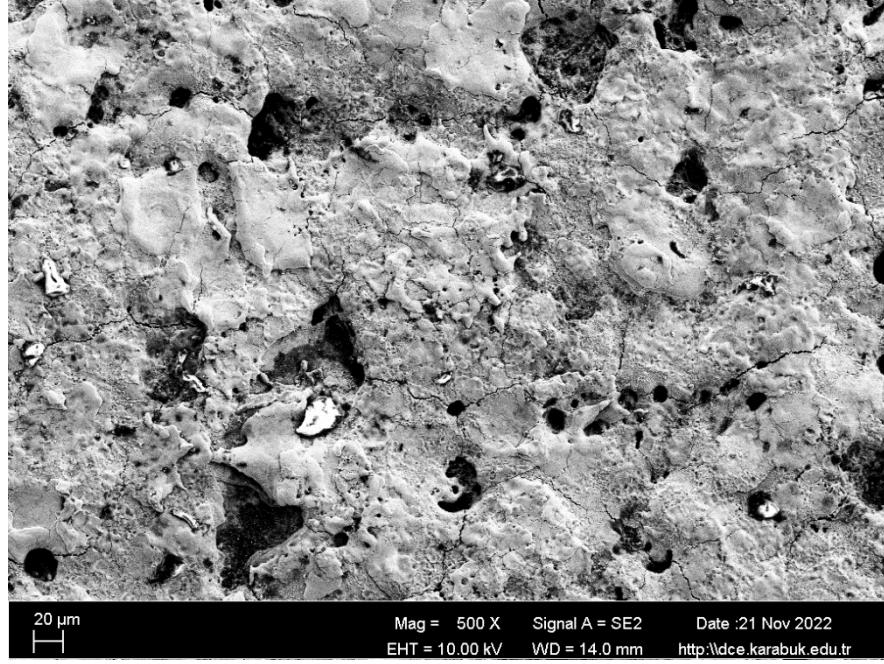
6.3.2. Akımın Yüzey Yapısına Etkisi

Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'da parametrelerinin maksimum ve minimum akım ve vurum süreleri dikkate alınarak taramalı elektron mikroskobu ile alınmış görüntülerde yüzey yapıları detaylı bir şekilde görülmektedir.

Genel bilinene paralel olarak, akım ve vurum sürelerinin artışı etkili periyodun yükselmesiyle birlikte döngü başına işlemeyi arttırdığı görülmüştür. Görsellerdeki kraterler ise yüksek akım ve vurum süresi ile doğru orantılı olarak sıcaklık etkisiyle eriyip yeniden katılaşmayı işaret etmektedir. Benzer şekilde vurum süresi ve akım değerleri arttıkça krater oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir ve bu kraterlerin oluşmasına bağlı olarak kraterler yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır.



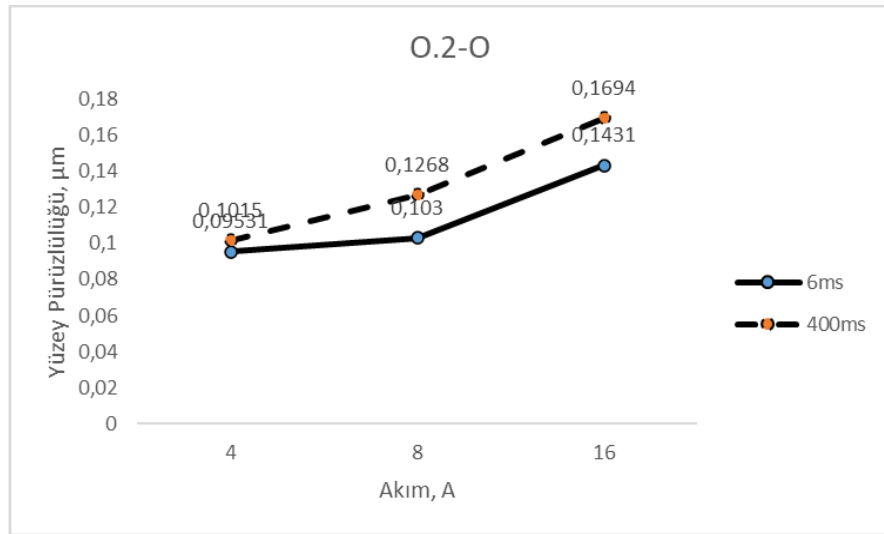
Şekil 6.7. Yüksek akım ile işlenmiş TNTZ-0.2C numunesinin SEM görüntüsü.



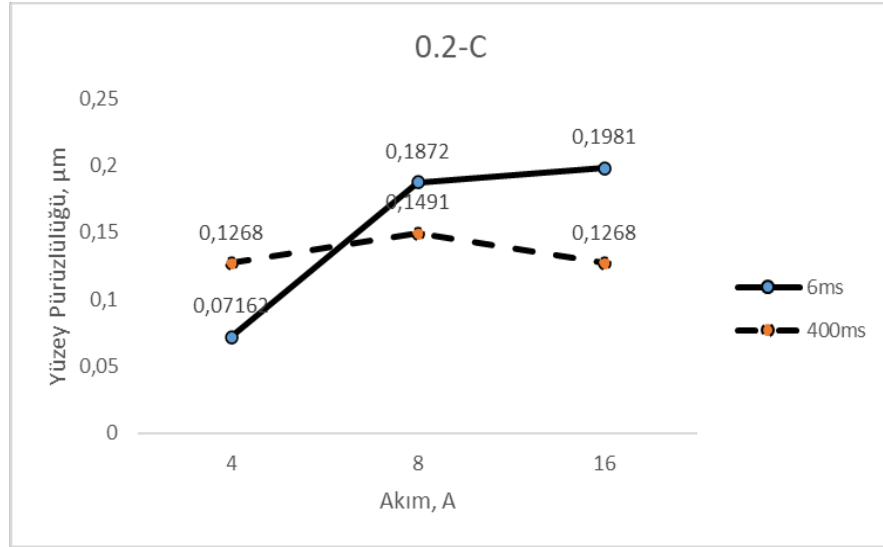
Şekil 6.8. Düşük akım ile işlenmiş TNTZ-0.2C numunesinin SEM görüntüsü.

6.3.3. İşlenen Numunelerin Yüzey Pürüzlülüklerinin Karşılaştırılması

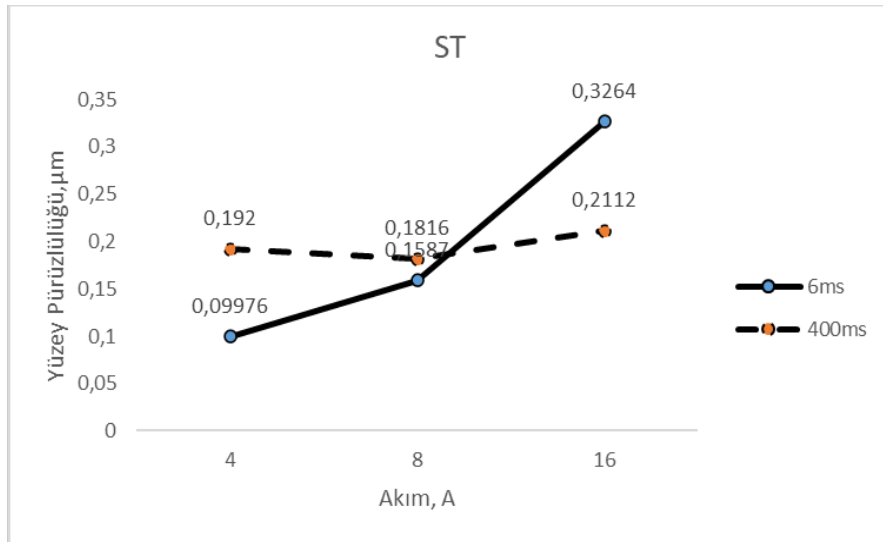
Deneyssel çalışmalarımızda kullanılan TNTZ-0.2C, TNTZ-0.2O ve TNTZ-ST adlı numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri tablolastırılmıştır ve tablodaki veriler ışığında karşılaştırmalı grafikleri oluşturulmuştur. Söz konusu karşılaştırmada akım değeri, vurum süresi ve yüzey pürüzlülük değeri kullanılmıştır.



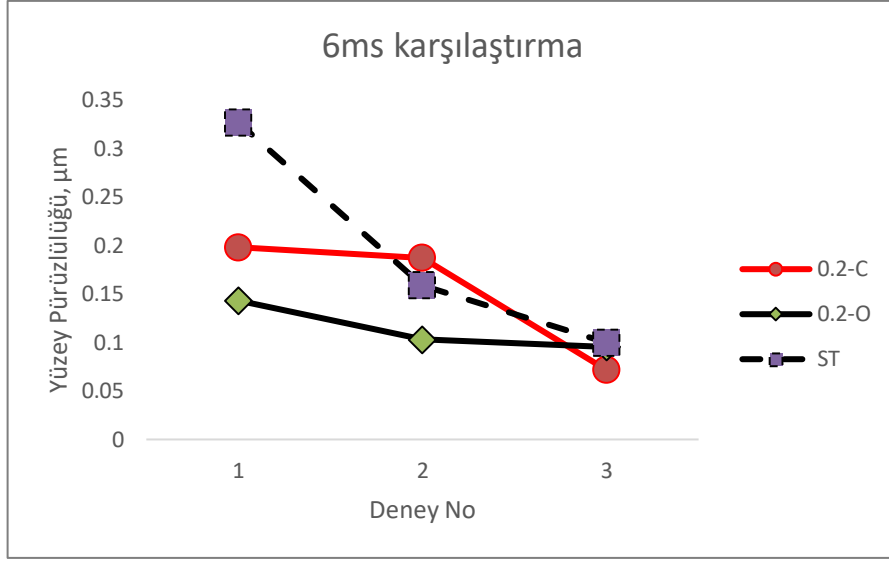
Şekil 6.9. TNTZ 0.2O numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.



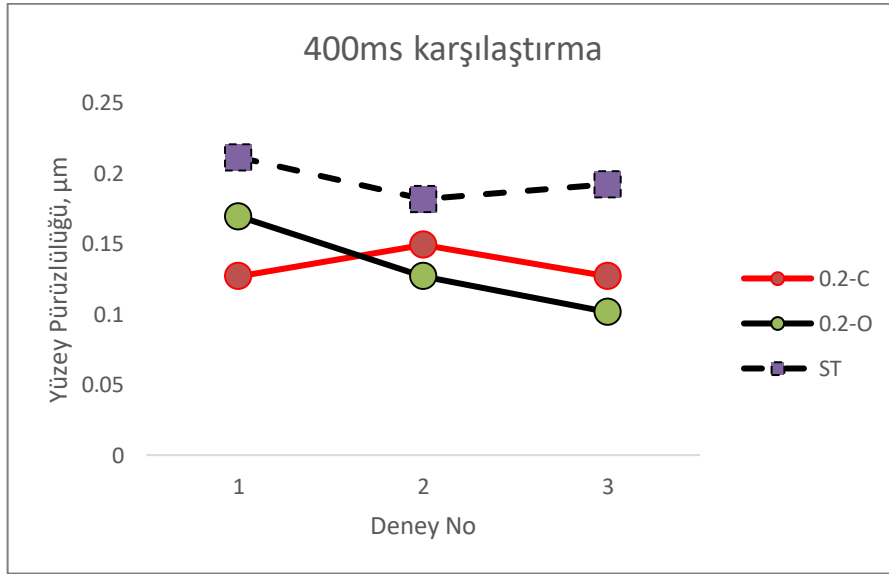
Şekil 6.10. TNTZ 0.2C numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.



Şekil 6.11. TNTZ ST numunesinin akım süresine bağlı karşılaştırmalı grafiği.



Şekil 6.12. Tüm numunelerin 6ms vurum süresindeki yüzey pürüzlülüğü karşılaştırması.

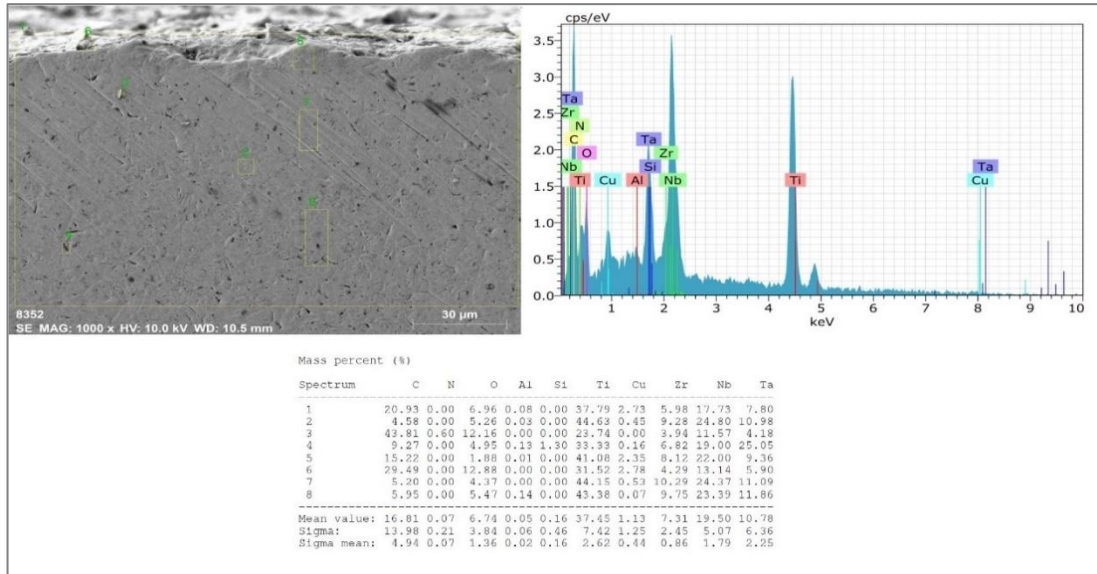


Şekil 6.13. Tüm numunelerin 400ms vurum süresindeki yüzey pürüzlülüğü karşılaştırması.

6.3.4. Kesitten İşlenmiş Yüzey İncelemeleri

Şekil 6.14, 6.15, 6.16 ve 6.17’de işlenen numunelerin kesit EDS analizler verilmiştir. Şekil 6.14’te verilen TNTZ-0.2C EDS analizinde kesit alınmış yüzeyde işleme yüzeyinde C ve Cu kütlelerinin yüzdesel olarak pikler oluşturduğu görülmüştür. Söz konusu C piklerinin sebebi elektro erozyon ile işleme esnasında dielektrik sıvısının

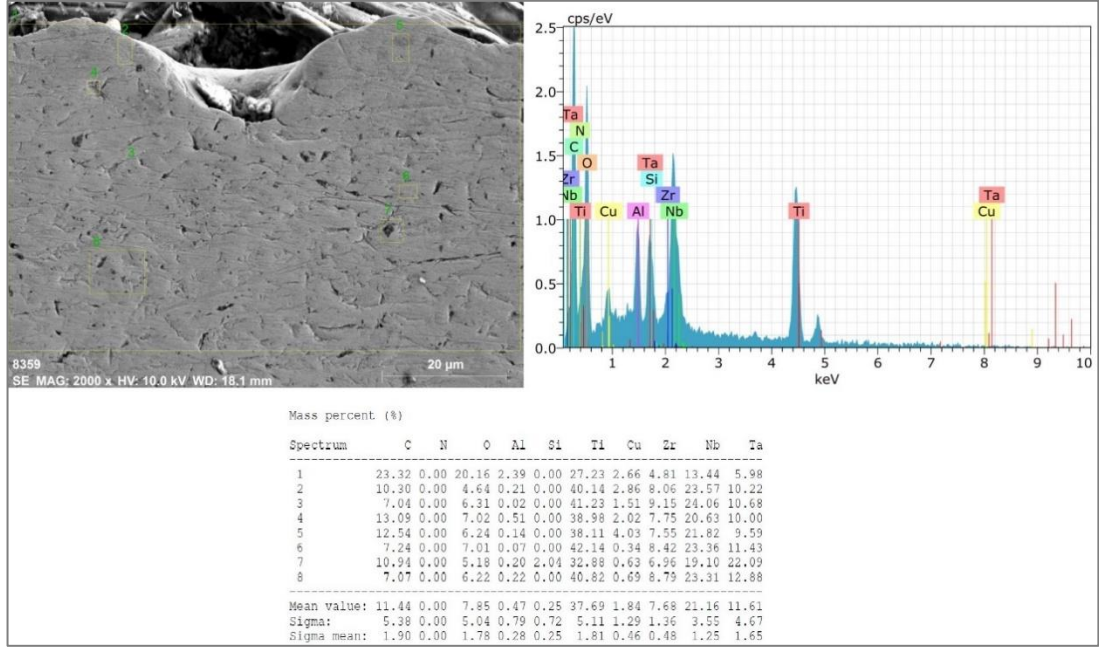
elektriksel boşalma esnasında yüzeyde eriyerek yüzeye yapışmasıdır. Dielektrik sıvısının içerisinde grafit katkısı sebebiyle kerosen ve grafit parçacıkları işleme esnasındaki yüksek sıcaklık oluşumu sebebiyle erimiş ardından yüzeyde tutunarak katılmıştır. Tablo ve grafiklerde görülen Cu pikleri ise Cu pikinin yalnız yüzeyde görülmesi ve söz konusu kütlece yükselişin sebebi deneyde kullanılan bakır elektrotun elektriksel boşalmaya aracı olarak akım-iş parçası arası geçişi sağlarken yüksek sıcaklıklara ulaşarak elektrot yüzeyinden iş parçası yüzeyine erimiş bakır yoğunluğu olan kütlelerin yapışması ile açıklanmaktadır. Deneysel çalışmalarda yüksek akım ve vurum değerlerinde işlenen TNTZ-0.2C numunesinde çarpılmalar görülmüş ve bu durum işlenen elektrodun kütlesinden de teyit edilerek TNTZ-0.2C numunesinin yüksek akım ve vurum değerlerinde işlenmesinin elektrottan eriyik bakır alaşımlarının daha yoğun bir şekilde işparçasına yapıştığı gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan TNTZ-0.2O, TNTZ-0.2N, TNTZ-ST numunelerine kıyasla 8 kat daha yoğun bir elektrot kütle kaybı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.14. TNTZ-0.2 C numunesine ait EDS analizi.

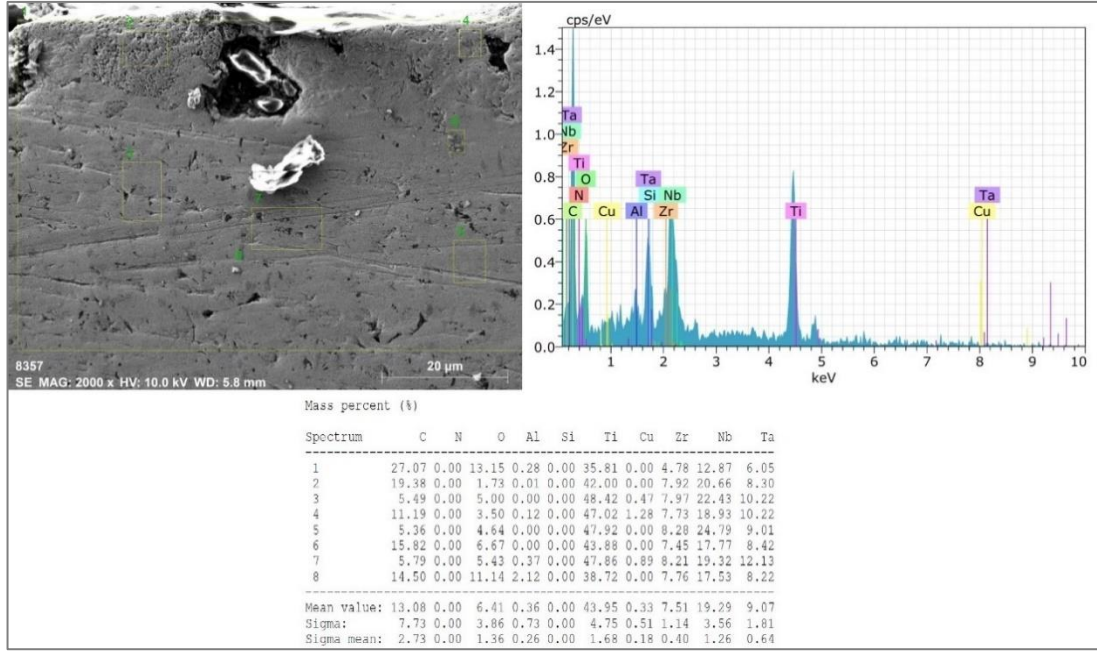
Şekil 6.15’de görülen analizlerde işleme yüzeyinde C ve Cu yoğunlukları görülmekle birlikte kesit analizlerde yüzeyde derin çukurluklar görülmüştür. Söz konusu numunenin işlenmesinde TNTZ-ST numunelerinde diğer 3 varyasyonda olduğu gibi işleme yüzeyinde yanıklar C ve Cu yoğunlukları mevcuttur. TNTZ-ST numunelerinin deneysel çalışmada diğer numunelerden farklı olarak işleme süreleri işleme süresi

ortalamasının altında görülmektedir. İşleme süresine paralel olarak işparçalarının ve elektrotların işleme öncesi ve sonrası ağırlık ölçümlerinde de ağırlık farkı deney ortalamalarının altında görülmektedir.



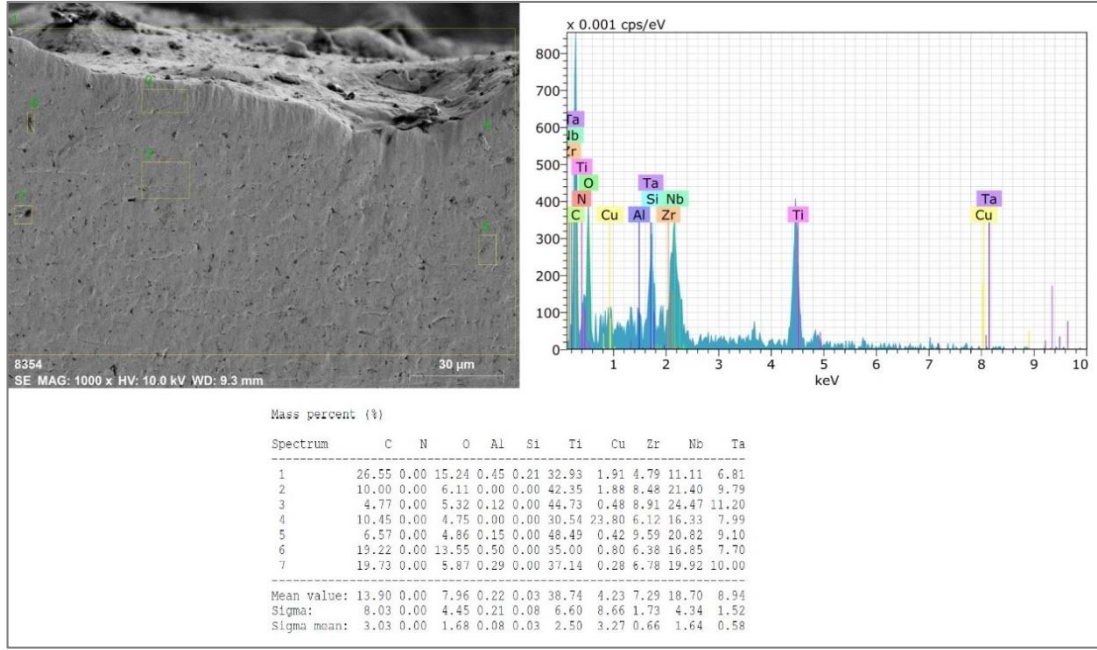
Şekil 6.15. TNTZ-ST numunesine ait EDS analizi.

Şekil 6.16’da görülen TNTZ-0.2N numunesine ait SEM görüntüsünde işleme yüzeyinde ve işleme yüzeyine yakın bölgelerde eriyip katılmış parçacıkların yine deneydeki diğer üç numunedeki ile paralel olacak şekilde yoğunlaştığı görülüyor. Bu yoğunlaşmanın içeriği ise C ve Cu ağırlıklıdır. İşleme süresi azaldıkça elektrottaki ağırlık kaybı arttığı görülmektedir.

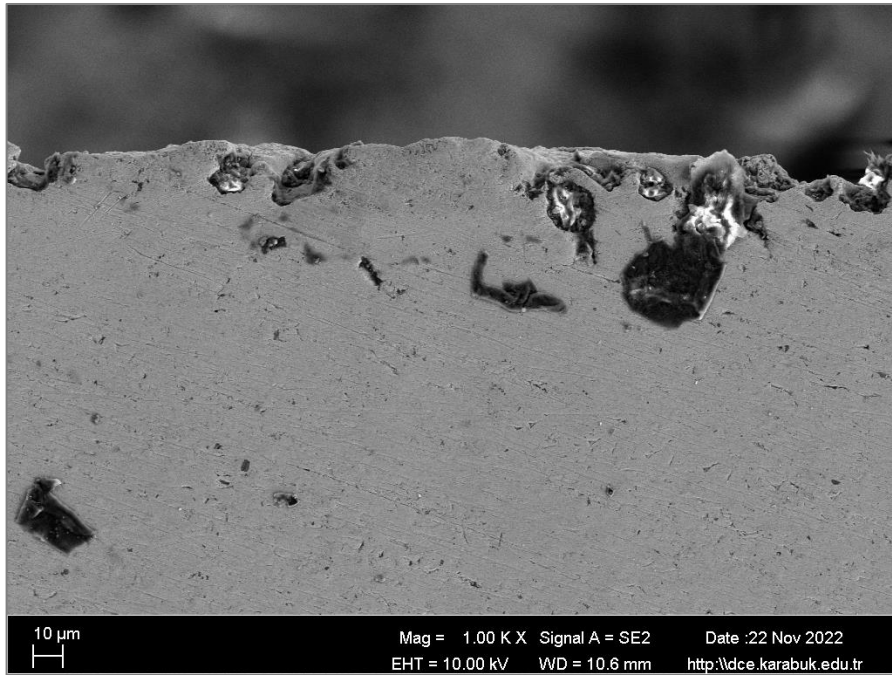


Şekil 6.16. TNTZ-0.2N numunesine ait EDS analizi.

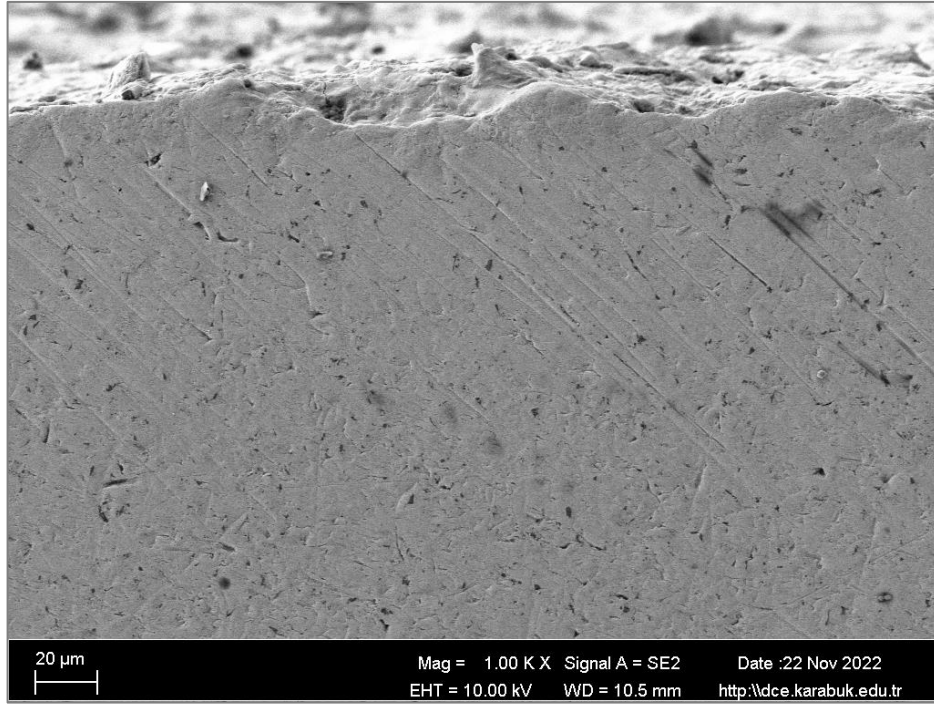
TNTZ-0.2O numunesinde diğer 3 varyasyonda görüldüğü gibi elektrot ile işparçası arasındaki akım geçişi sebebiyle yüzeyde yanıklar ve yeniden katılaşmış bir bakır tabaka görülmektedir. Deneysel çalışmalardaki sayısal veriler TNTZ-0.2O numunesinin işleme sürelerinin diğer numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. İşleme süresi verisine paralel olarak TNTZ-0.2O numunesinde elektrotların işleme öncesi ve sonrası ağırlık ölçümlerinde ortalama ağırlık kaybının en yüksek olduğu numune olduğu görülmektedir.



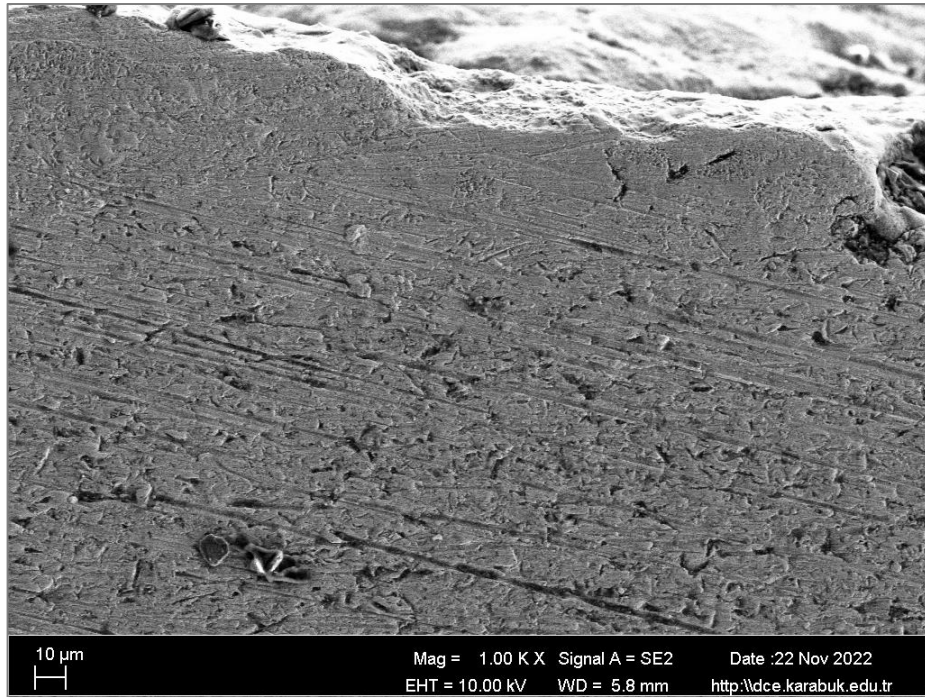
Şekil 6.17. TNTZ-0.2O numunesine ait EDS analizi.



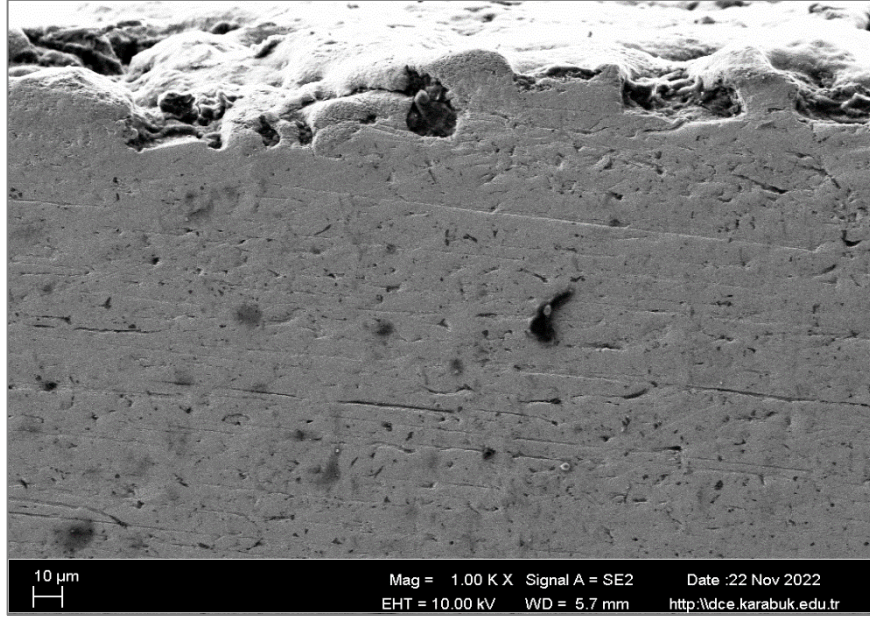
Şekil 6.18. TNTZ-0.2C numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



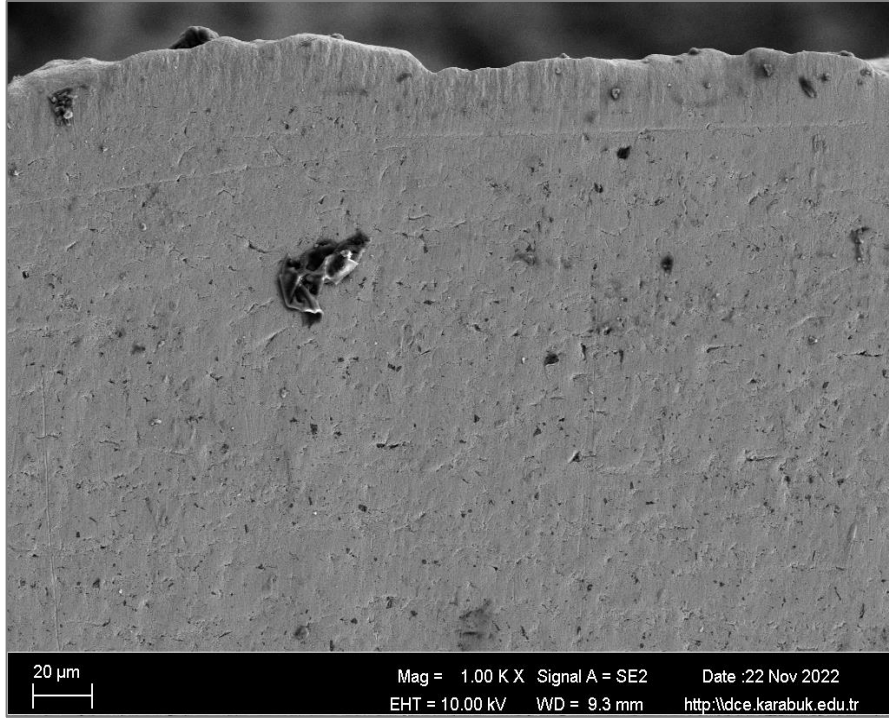
Şekil 6.19. TNTZ-0.2C numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



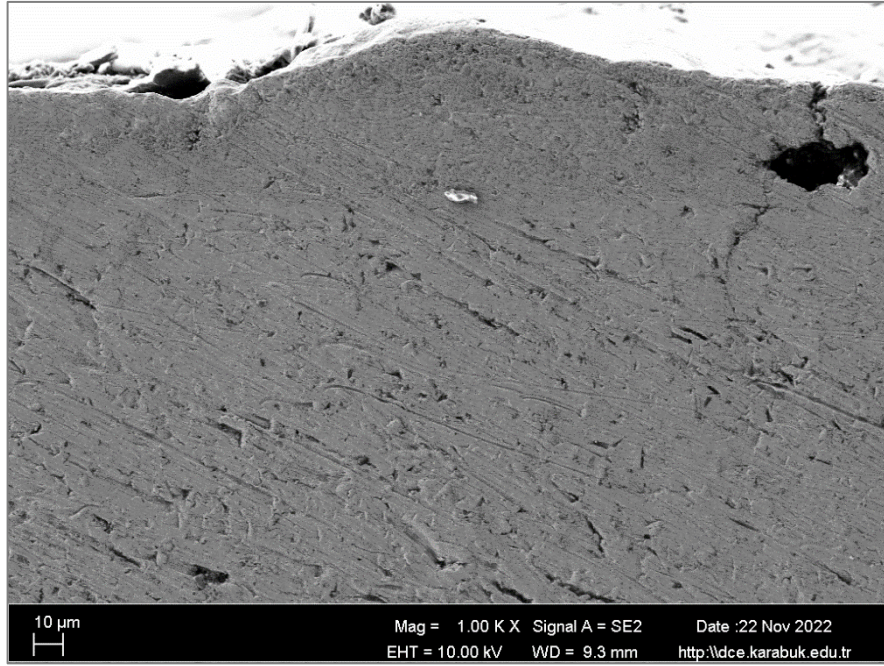
Şekil 6.20. TNTZ-0.2N numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



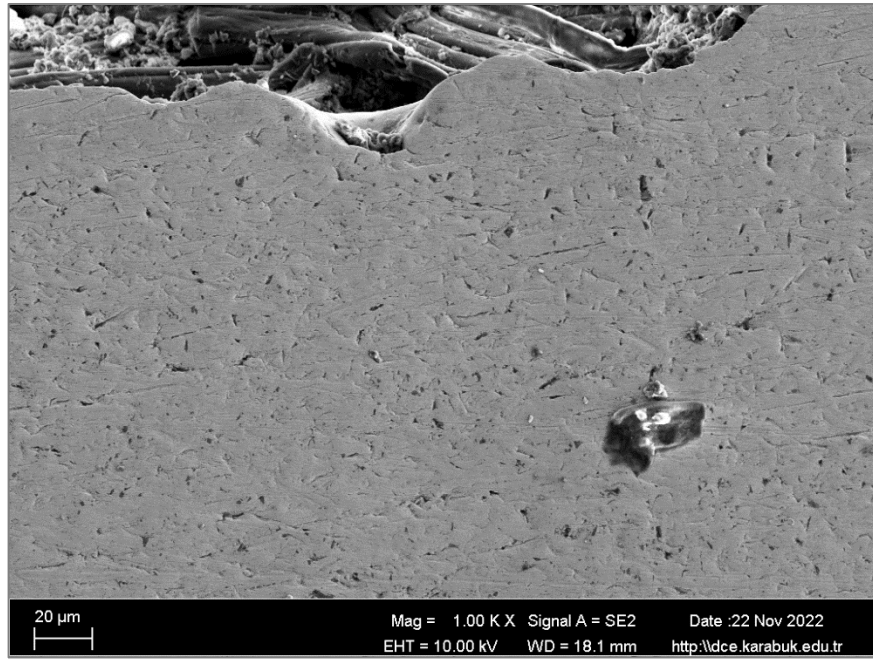
Şekil 6.21. TNTZ-0.2N numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



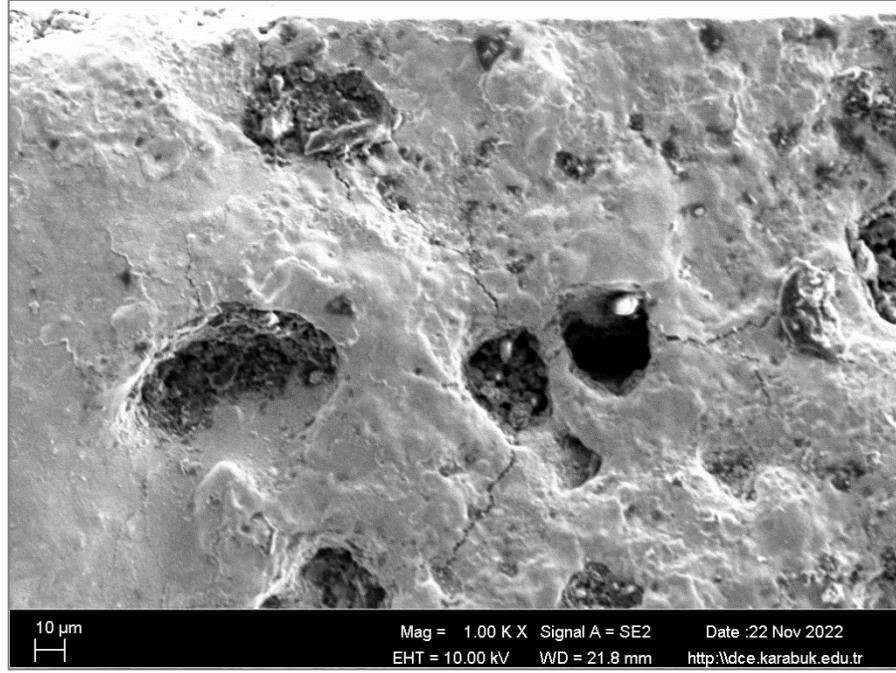
Şekil 6.22. TNTZ-0.2O numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



Şekil 6.23. TNTZ-0.20 numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



Şekil 6.24. TNTZ-ST numunesine ait kesit SEM görüntüsü.



Şekil 6.25. TNTZ-ST numunesine ait kesit SEM görüntüsü.

BÖLÜM 7

GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada TNTZ biyomalzemelerin toz katkılı erozyon yöntemiyle farklı parametrelerle işlenebilirliği incelenmiştir. Hazırlanan numuneler işleme sonrasında yüzey topoğrafya ölçümü yapılmış, alın ve kesit olarak taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Yapılan incelemelerden alınan sonuçlar şu şekildedir:

1. Yapılan metalurjik incelemeler sonucunda işlenmiş yüzeylerde eriyik tabakalar, küresel tanecikler vb. yapılar görülmüştür. Yüzeylerde mikro çatlakların oluştuğu, bu çatlakların genişlik ve uzunluklarının işleme parametreleri olan vurum süresi ve akım faktörlerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği görülmüştür. Yüzeylerden ve kesitlerden alınan EDS analiz sonuçlarına göre her numunede işlenmiş yüzeylerde elektrot malzemesi olan bakır tespit edilmiştir. Yüzeylerde tespit edilen bakırın yüzde yoğunluk değeri işleme koşullarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Yüzeylerde belirlenen karbonun yüzde yoğunluk değeri de işleme koşullarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.
2. İlk maddeye bağlı olarak yüzeydeki termal enerji sebebiyle yüzeyde yüksek miktarda titanyum, bakır ve karbon yoğunluğu görülmüştür. Bu yoğunluğun sebebi EDS analizlerinin verdiği sonuçlar kapsamında elektrot, grafit tozu katkısı ve numunenin üst yüzey parçasının eriyip katılaşmasıdır.
3. Akım değeri ve vurum süresi değerleri arttıkça yüzeydeki pürüzlülüğün arttığını ve buna bağlı olarak numunelerdeki ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin yükseldiği görülmüştür.
4. Talaş kaldırma oranı akım değeri ve vurum süresine bağlı olarak artmıştır.
5. İşleme süresi azaldıkça elektrot ağırlık kaybının arttığı görülmüş, buna istinaden ağırlık kaybının artması oluşturulan elektrik arkının kontrastının kontrol altında olmadığını göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü talaş kaldırma oranının artması ile azalış göstermiştir.

6. Numunelerin içeriğinde bulunan yalıtkan yoğunluklu bölgelerde işleme süreleri artmıştır. Toz katkılı elektro erozyon ile işleminde ilerleme, yalıtkan katmanlarda daha yavaş gerçekleşmektedir.
7. Eşit şartlarda ve eşit numune ölçülerinde numunelerin işlenme süresi $TNTZ-ST > TNTZ-0.2C > TNTZ-0.2N > TNTZ-0.2O$ şeklinde olmuştur.

7.1. ÖNERİLER

Tez kapsamında yapılan deneylerin sonucunda elde edilen parametreleri göz önünde bulundurarak işlemlerin daha verimli ve daha iyi hale getirilebilmesi için öneriler şu şekildedir:

1. Yüksek yüzey kalitelerine ulaşmak için işlemin ardından ikincil işlemler uygulanabilir.
2. Elektrot için farklı malzemeler kullanılabilir.
3. Farklı toz katkıları kullanılabilir.
4. İşlemede kullanılan toz katkılarının yoğunlukları artırılabilir.
5. Katkı tozlarının boyutları küçültülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhou, D., Qiu, F., Wang, H., Jiang, Q. “Manufacture of nano-sized particle-reinforced metal matrix composites: A review”. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27 (5): 798-805 (2014).
- [2] Prakash, C., Kansal, H. K., Pabla, B. S., Puri, S. “Multi-objective optimization of powder mixed electric discharge machining parameters for fabrication of biocompatible layer on β -Ti alloy using NSGA-II coupled with Taguchi based response surface methodology”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (9): 4195-4204 (2016).
- [3] Peng, P. W., Ou, K. L., Lin, H. C., Pan, Y. N., Wang, C. H. “Effect of electrical-discharging on formation of nanoporous biocompatible layer on titanium”. *Journal of Alloys and Compounds*, 492 (1-2): 625-630 (2010).
- [4] Prakash, C., Kansal, H. K., Pabla, B. S., Puri, S., Aggarwal, A. “Electric discharge machining–A potential choice for surface modification of metallic implants for orthopedic applications: A review”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (2): 331-353 (2016).
- [5] Peng, P. W., Ou, K. L., Lin, H. C., Pan, Y. N., Wang, C. H. “Effect of electrical-discharging on formation of nanoporous biocompatible layer on titanium”. *Journal of Alloys and Compounds*, 492 (1-2): 625-630 (2010).
- [6] Mustu, M., Demir, B., Aydin, F., Gürün, H. “An investigation of the PMEDM processing and surface characterizations of AZ61 matrix composites via experimental and optimization methods”. *Materials Chemistry and Physics*, 300: 127526 (2023).
- [7] Yılmaz, D., “Metalik biyomalzemelerin EDM yöntemiyle işlenebilirliğinin incelenmesi” (Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, 2020), 6.
- [8] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method”. *Mathematical and Computer Modelling*, 47 (11-12): 1217-1237 (2008).
- [9] Abu Qudeiri, J. E., Mourad, A. H. I., Ziout, A., Abidi, M. H., Elkaseer, A. “Electric discharge machining of titanium and its alloys”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (1): 1319-1339 (2018).

- [10] Stráský, J., Janeček, M., Harcuba, P., Bukovina, M., Wagner, L. “The effect of microstructure on fatigue performance of Ti–6Al–4V alloy after EDM surface treatment for application in orthopaedics”. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4 (8): 1955-1962 (2011).
- [11] Al-Amin, M., Abdul-Rani, A. M., Danish, M., Thompson, H. M., Aliyu, A. A. A., Hastuty, S., Rao, T. V. V. L. N. “Assessment of PM-EDM cycle factors influence on machining responses and surface properties of biomaterials: a comprehensive review”. *Precision Engineering*, 66: 531-549 (2020).
- [12] Aliyu, A. A. A., Abdul-Rani, A. M., Ginta, T. L., Prakash, C., Axinte, E., Razak, M. A., Ali, S. “A review of additive mixed-electric discharge machining: current status and future perspectives for surface modification of biomedical implants”. *Advances in Materials Science and Engineering*, 8723239 (2017).
- [13] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM)”. *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (1-3): 32-41 (2007).
- [14] Jawahar, M., Reddy, C. S., Srinivas, C. “A review of performance optimization and current research in PMEDM”. *Materials Today: Proceedings*, 19: 742-747 (2019).
- [15] Long, B. T., Phan, N. H., Cuong, N., Jatti, V. S. “Optimization of PMEDM process parameter for maximizing material removal rate by Taguchi’s method”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (5): 1929-1939 (2016).
- [16] Jabbaripour, B., Sadeghi, M. H., Shabgard, M. R., Faraji, H. “Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic”. *Journal of Manufacturing Processes*, 15 (1): 56-68 (2013).
- [17] Yang, H., Chen, X., Huang, G., Song, J., She, J., Tan, J., Pan, F. “Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: review and perspective”. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10 (9): 2311-2333 (2022).
- [18] Khan, M. Y., Rao, P. S., Pabla, B. S. “WITHDRAWN: Powder mixed electrical discharge machining (PM-EDM): A methodological review”. *Materials Today Proceedings*, (2020).
- [19] Ho, K. H., Newman, S. T. “State of the art electrical discharge machining (EDM)”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (13): 1287-1300 (2003).
- [20] Marinho, B., Ghislandi, M., Tkalya, E., Koning, C. E., de With, G. “Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder”. *Powder Technology*, 221: 351-358 (2012).

- [21] Jeswani, M. L. "Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining". *Wear*, 70 (2): 133-139 (1981).
- [22] HuuPhan, N., Muthuramalingam, T., Vu, N. N., Tuan, N. Q. "Influence of micro size titanium powder-mixed dielectric medium on surface quality measures in EDM process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109 (3-4): 797-807 (2020).
- [23] Chen, S. G., Lian, M. Q., Wu, X. Y., Lei, J. G., Zhao, H., Peng, T. J., Xu, B. "Study on the micro-EDM processing characteristics of Ti-6Al-4V alloy with different electrode materials". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116: 3369-3376 (2021).
- [24] Pramanik, A., Basak, A. K., Littlefair, G., Debnath, S., Prakash, C., Singh, M. A., Singh, R. K. "Methods and variables in Electrical discharge machining of titanium alloy-A review". *Heliyon*, 6 (12): 1789-1811 (2020).
- [25] Al-Amin, M., Abdul Rani, A. M., Abdu Aliyu, A. A., Abdul Razak, M. A. H., Hastuty, S., Bryant, M. G. "Powder mixed-EDM for potential biomedical applications: A critical review". *Materials and Manufacturing Processes*, 35 (16): 1789-1811 (2020).
- [26] Mohanty, S., Das, A. K., Dixit, A. R. "Surface integrity of tribo-adaptive layer prepared on Ti6Al4V through μ EDC process". *Surface and Coatings Technology*, 429: 127922 (2022).
- [27] Al-Amin, M., Abdul-Rani, A. M., Danish, M., Thompson, H. M., Aliyu, A. A., Hastuty, S., Rao, T. V. V. L. N. "Assessment of PM-EDM cycle factors influence on machining responses and surface properties of biomaterials: A comprehensive review". *Precision Engineering*, 66: 531-549 (2020).
- [28] Philip, J. T., Mathew, J., Kuriachen, B. "Transition from EDM to PMEDM—impact of suspended particulates in the dielectric on Ti6Al4V and other distinct material surfaces: a review". *Journal of Manufacturing Processes*, 64: 1105-1142 (2021).
- [29] Al-Amin, M., Abdul Rani, A. M., Abdu Aliyu, A. A., Abdul Razak, M. A. H., Hastuty, S., Bryant, M. G. "Powder mixed-EDM for potential biomedical applications: A critical review". *Materials and Manufacturing Processes*, 35 (16): 1789-1811 (2020).
- [30] Mahardika, M., Tsujimoto, T., Mitsui, K. "A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (7-8): 746-760 (2008).
- [31] Gu, L., Li, L., Zhao, W., Rajurkar, K. P. "Electrical discharge machining of Ti6Al4V with a bundled electrode". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53 (1): 100-106 (2012).

- [32] Soni, J. S. “Microanalysis of debris formed during rotary EDM of titanium alloy (Ti 6Al 4V) and die steel (T 215 Cr12)”. **Wear**, 177 (1): 71-79 (1994).
- [33] Dikici, B., Esen, Z., Duygulu, O., Gungor, S. “Corrosion of metallic biomaterials”. **Advances in Metallic Biomaterials: Tissues, Materials and Biological Reactions**, 275-303 (2015).
- [34] Dikici, B., Niinomi, M., Topuz, M., Koc, S. G., Nakai, M. “Synthesis of biphasic calcium phosphate (BCP) coatings on β -type titanium alloys reinforced with rutile-TiO₂ compounds: adhesion resistance and in-vitro corrosion”. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, 87 (3): 713-724 (2018).
- [35] Attanasio, A., Gelfi, M., Pola, A., Ceretti, E., Giardini, C. “Influence of material microstructures in micromilling of Ti6Al4V alloy”. **Materials**, 6 (9): 4268-4283 (2013).
- [36] Aslantas, K., Hopa, H. E., Percin, M., Uzun, I., Cicek, A. “Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy”. **Precision Engineering**, 45: 55-66 (2016).
- [37] Aslantas, K., Demir, B., Guldibi, A. S., Niinomi, M., Dikici, B. “A comparative study on the machinability of β -type novel Ti₂₉Nb₁₃Ta₄. 6Zr (TNTZ) biomedical alloys under micro-milling operation”. **Journal of Manufacturing Processes**, 92: 135-146 (2023).
- [38] Kumar, A., Maheshwari, S., Sharma, C., Beri, N. “Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEDM): a state of art review”. **Materials and Manufacturing Processes**, 25 (10): 1166-1180 (2010).
- [39] Beri, N., Maheshwari, S., Sharma, C., Kumar, A. “Technological advancement in electrical discharge machining with powder metallurgy processed electrodes: A review”. **Materials and Manufacturing Processes**, 25 (10): 1186-1197 (2010).
- [40] Zhao, W. S., Meng, Q. G., Wang, Z. L. “Powder pander application blended EDM in troublesome machining”. **Journal of Materials Research and Technology**, 129: 30-33 (2002).
- [41] Dictionnaire Larousse, “Ansiklopedik Sözlük”, **Milliyet Yayınları**, İstanbul, 22: 11557 (1986).
- [42] Gültekin, A. H. “Titanyum mineral yatakları kayalarda titanyum: içeriği ve bölümlenmesi”. **İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği**, (42): 21-37 (1993).
- [43] ASM International Handbook Committee. “Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials”. **ASM International**, 2: 1143-1328 (1991).

- [44] Yalçın, B. “Toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımlı implantların temel özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, (2007).
- [45] Yang, X., Liu, C.R. “Machining titanium and its alloys”. **Machining Science and Technology**, 3 (1): 107-139 (1999).
- [46] Coğun, C., Kocabaş, B. , Özgedik, A. “Elektro erozyon ile işlemede (eei) işparçası yüzey pürüzlülük profilinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi”. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 19 (1): (2004).
- [47] Singh, G., Dhiman, D. P. “Parametric optimization of EDM machine using taghuchi & anova technique”. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 3 (4): 783-788 (2016).
- [48] Modi, Tarun, S. Sanawada, and J. Patel. “A review paper on Optimization of process parameter of EDM for air hardening tool steel”. **International Journal of Engineering Research and Applications**, 5 (1): 32-37 (2015).
- [49] Selvarajan, L., Rajavel, J., Prabakaran, V., Sivakumar, B., Jeeva, G. “A review paper on EDM parameter of composite material and industrial demand material machining”. **Materials Today: Proceedings**, 5 (2): 5506-5513 (2018).
- [50] Yan, B. H., Wang, C. C., Liu, W. D., Huang, F. Y. “Machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary EDM with a disklike electrode”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 16: 322-333 (2000).
- [51] Chattopadhyay, K. D., Satsangi, P. S., Verma, S., Sharma, P. C. “Analysis of rotary electrical discharge machining characteristics in reversal magnetic field for copper-en8 steel system”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 38: 925-937 (2007).
- [52] Abdullah, A., Shabgard, M. R., Ivanov, A., Shervanyi-Tabar, M. T. “Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co)”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 41: 268-280 (2009).
- [53] Abdullah, A., Shabgard, M. R. “Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co)”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 38: 1137-1147 (2008).
- [54] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology”. **Journal of Materials Processing Technology**, 169 (3): 427-436 (2005).

- [55] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method”. *Mathematical and Computer Modelling*, 47 (11-12): 1217-1237 (2008).
- [56] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM)”. *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (1-3): 32-41 (2007).
- [57] Ekmekci, B., Ersöz, Y. “How suspended particles affect surface morphology in powder mixed electrical discharge machining (PMEDM).” *Metallurgical and Materials Transactions B*, 43 (5): 1138-1148 (2012).
- [58] Kozak, J., Rozenek, M., Dabrowski, L. “Study of electrical discharge machining using powder-suspended working media”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217 (11): 1597-1602 (2003).
- [59] Panda, D. K., Bhoi, R. K. “Electro-discharge machining—a qualitative approach”. *Materials and Manufacturing Processes*, 21 (8): 853-862 (2006).
- [60] Schumacher, B. M. “After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed”. *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (1-3): 376-381 (2004).
- [61] Tsai, K. M., Wang, P. J. “Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(10): 1385-1403 (2001).
- [62] McGeough, J. A., Rasmussen, H. A. “Macroscopic model of electro-discharge machining”. *International Journal of Machine Tools Design and Research*, 22 (4): 333-339 1982.
- [63] Foteyev, N. K. “Electrophysical Machining-Surface quality after electric discharge machining”. *Russian Engineering Research*, 17 (8): 73-79 (1997).
- [64] İnternet: “Elektro Erozyon ile İşleme Prensipleri”: <https://www.makinaegitimi.com/elektro-erozyon-nedir/> (2023).
- [65] Çaydaş, U. “Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elâzığ, (2008).
- [66] Gostimirovic, M., Kovac, P., Sekulic, M., Skoric, B. “Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, 173-179 (2012).
- [67] Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. “Effect of silicon powder mixed EDM on machining rate of AISI D2 die steel”. *Journal of Manufacturing Processes*, 9 (1): 13-22 (2007).

- [68] Kumar, H. "Development of mirror like surface characteristics using nano powder mixed electric discharge machining (NPMEDM)". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76: 105-113 (2015).
- [69] Prakash, C., Kansal, H. K., Pabla, B. S., Puri, S., Aggarwal, A. "Electric discharge machining–A potential choice for surface modification of metallic implants for orthopedic applications: A review". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (2): 331-353 (2016).
- [70] Zhang, J. H., Lee, T. C., Lau, W. S., Ai, X. "Spark erosion with ultrasonic frequency". *Journal of Materials Processing Technology*, 68 (1): 83-88 (1997).
- [71] Ekmekci, B., Erden, A. "Remarks on surface integrity of electric discharge machined surfaces: A state of art review". *The Eleventh International Conference on Machine Design and Production, Antalya*, 1 (2): 411-428 (2004).
- [72] Kolli, M., Kumar, A. "Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi method". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18 (4): 524-535 (2015).
- [73] Ojha, K., Garg, R. K., Singh, K. K. "Experimental investigation and modeling of PMEDM process with chromium powder suspended dielectric". *International Journal of Applied Science and Engineering*, 9 (2): 65-81 (2011).
- [74] Aslantas, K., Demir, B., Guldibi, A. S., Niinomi, M., Dikici, B. "A comparative study on the machinability of β -type novel Ti₂₉Nb₁₃Ta₄. 6Zr (TNTZ) biomedical alloys under micro-milling operation". *Journal of Manufacturing Processes*, 92: 135-146 (2023).
- [75] Çaydaş, U., Yılmaz, D., Gürün, H., Köklü, U. "Metalik biyomalzemelerin elektro erozyon yöntemiyle işlenebilirliklerinin araştırılması". *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1 (1): 1-15 (2020).
- [76] Gürün, H., Çaydaş, U., Çelik, M. "Tel erozyon yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesinin manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle iyileştirilmesi". *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (1): 347-357 (2021).
- [77] Snoeys, R., Staelens, F., Dekeyser, W. J. C. A. "Current trends in non-conventional material removal processes". *CIRP Annals*, 35 (2): 467-480 (1986).
- [78] Haşçalık, A., Çaydaş, U. "Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti–6Al–4V)". *Applied Surface Science*, 253 (22): 9007-9016.

- [79] Pradhan, B. B., Masanta, M., Sarkar, B. R., Bhattacharyya, B. “Investigation of electro-discharge micro-machining of titanium super alloy”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (11-12): 1094-1106 (2009).
- [80] Erdem, O., oun, C., Urtekin, L., zerkan, H. B., Uslan, İ. “Toz katkili ve ısıtılmış dielektrik’in elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31 (3): 531-544 (2016).
- [81] Ünses, E. “Ti-6Al-4V alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde grafit tozu karışımli dielektrik sıvının işleme performansına etkisinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 2012.
- [82] aydaş, U., Yılmaz, D., Gürün, H., Köklü, U. “Metalik biyomalzemelerin elektro erozyon yöntemiyle işlenebilirliklerinin araştırılması”. *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1 (1): 1-15 (2020).
- [83] Guo, Z., Liu, R., Wang, C. T., He, Y., He, Y., Ma, Y., Hu, X. “Compressive Mechanical properties and shock-Induced reaction behavior of a Ti-29Nb-13Ta-4.6 Zr alloy”. *Metals and Materials International*, 26, 1498-1505 (2020).
- [84] İnternet: “DUBIT”: <https://dubit.duzce.edu.tr/2983-sayfa-optik-profilometre> (2023).

ÖZGEÇMİŞ

Doğukan YÖNEL. İlköğretim öğrenimini Tekirdağ'da tamamladı. Başakşehir Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2014 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne girdi. 2019 yılında mezun olduktan sonra çeşitli özel sektör kuruluşlarında makine mühendisi olarak görev aldı. 2021 yılından beri Karabük Üniversitesi'nde yüksek öğrenimine devam etmektedir.