



**ROBOTİK ELEKTROKİMYASAL İŞLEME TEZGAHI**

**TASARIMI ve OTOMASYONU**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Abdulkadir ÇEBİ**

**SAMSUN ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**Samsun 2022**



**SAMSUN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ROBOTİK ELEKTROKİMYASAL İŞLEME TEZGAHI TASARIMI VE  
OTOMASYONU**

**Abdulkadir ÇEBİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan DEMİRTAŞ**

**İkinci Danışman: Doç. Dr. Alırıza KALELİ**

**Ocak 2022**

21/01/2022

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Samsun Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Abdulkadir ÇEBİ

## ÖNSÖZ

İşlenmesi zor metallerin (titanyum ve titanyum alaşımları, nikel ve nikel alaşımları, süper alaşımlar) üretimi ve şekillendirilmesi sanayileşme ve teknolojik gelişmeler için önemlidir. Alışılmış imalat yöntemlerinin işlenmesi zor metallerin şekillendirilmesinde yetersiz kalması sebebiyle birçok alışılmamış imalat yöntemi geliştirilmiştir.

Bu çalışma işlenmesi zor metallerin işlenmesinde yeni bir imalat yöntemini sunmaktadır. İki ayrı alışılmamış imalat yönteminin birleştirilmesi sonucunda robotik elektrokimyasal işleme (REKİ) tezgahı oluşturulmuştur. Tezgahın tasarımı SolidWorks üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sisteme yapılan eklentiler, aparatlar ve takımlar için birçok varyasyon denenmiştir. Tezgah işlemeye hazır hale getirilmiş ve parça işlemesi gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamın konusunun belirlenmesinde ve hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Hasan DEMİRTAŞ'a ve Doç. Dr. Alırza KALELİ'ye; engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Bahattin KANBER'e; 119R009 numaralı projeye TÜBİTAK3501 Kariyer Geliştirme Programı kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	VII
Tablolar/Çizelgeler Listesi .....	VIII
Şekiller Listesi .....	IX
GİRİŞ .....	1

### BİRİNCİ BÖLÜM

1.LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	3
-----------------------------	---

### İKİNCİ BÖLÜM

2.ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (EKİ) .....	5
2.1.Takım Tasarımının İşlemeye Etkisi .....	6
2.2.Takım Malzemesinin İşlemeye Etkisi.....	8
2.3.İş Parçası Malzemesinin İşlemeye Etkisi .....	10
2.4.Voltajın İşlemeye Etkisi.....	11
2.5.Akım Yoğunluğunun İşlemeye Etkisi.....	13
2.6.Elektrolitin İşlemeye Etkisi .....	15
2.6.1.Elektrolit Türü .....	15
2.6.2.Elektrolit Konsantrasyonu .....	19
2.6.3.Elektrolit Debisi.....	20
2.6.4.Elektrolit Sıcaklığı.....	21
2.7.Takım İlerleme Hızının İşlemeye Etkisi.....	23
2.8.Darbenin (Pulse) ve Görev Döngüsünün İşlemeye Etkisi.....	24
2.9.Boşluk Mesafesinin İşlemeye Etkisi.....	27

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3.ROBOTİK İŞLEME (Rİ).....	29
3.1.Paralel Kinematik Robot (PKR).....	29
3.2.Seri Kinematik Robot (SKR) .....	31

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4.ROBOTİK ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (REKİ) .....	34
4.1.Konstrüksiyon .....	35
4.2.Kontrol Ünitesi .....	36
4.3.Elektrolit Akış Sistemi .....	38
4.4.REKİ’de Robot Kol .....	41
4.5.Güç Kaynağı .....	42
4.6.İş Parçası .....	42
4.7.Görüntü İşleme.....	45
4.8.Robot Kol Hareketi.....	46
4.9.Arayüz .....	48

## BEŞİNCİ BÖLÜM

5.DENEYLER ve TARTIŞMA .....	50
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	56
KAYNAKÇA .....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	62

## ÖZET

### ROBOTİK ELEKTROKİMYASAL İŞLEME TEZGAHI TASARIMI VE OTOMASYONU

Abdulkadir ÇEBİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmalat ve Konstrüksiyon Bilim Dalı

Samsun Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan DEMİRTAŞ

İkinci Danışman: Doç. Dr. Alırıza KALELİ

Medikal, otomobil, savunma, uçak ve uzay sanayisinde titanyum, inconel ve nikel bazlı süper alaşımlar gibi işlenmesi zor metaller kullanılmaktadır. Bu malzemelerin geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak işlenmesi zordur. Yüksek işleme doğruluğu ve yüzey kalitesinde parça işleyebilmek için temassız işleme yöntemi elektrokimyasal işleme kullanılmaktadır. Elektrokimyasal işlemede; işlenen malzeme miktarının belirsizliği ve matematiksel modellemelerdeki problemler sebebiyle robotik elektrokimyasal işleme tezgahı imal edilmiştir. Robotik elektrokimyasal işleme tezgahı; voltaj, akım, debi, iş parçası ile takım konumları ve sıcaklık parametrelerini kontrol etmektedir. Takım ilerleme hızı, elektrolit debisi ve tur sayısı parametreleri kullanılarak 36 deney yapılmıştır. En yüksek malzeme işleme miktarına (60 mg); en yüksek debide (4.38 lt/dk) ve tur sayısında (11 tur) ulaşılmıştır. En yüksek takım ilerleme hızında (20 mm/s) ise en düşük malzeme işleme miktarına ulaşılmıştır. Takım ilerleme hızı arttıkça işleme süresi azalmıştır, bunun sonucunda işlenen malzeme miktarı azalmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Elektrokimyasal İşleme, Robotik İşleme, Robotik Elektrokimyasal İşleme, Alışılmamış İmalat.

## ABSTRACT

### DESIGN AND AUTOMATION OF ROBOTIC ELECTROCHEMICAL MACHINING BENCH

Abdulkadir ÇEBİ

Mechanical Engineering Department  
Division of Manufacturing and Construction

Samsun University, Institute of Graduate Programs, January 2022

Supervisor: Asst. Prof. Hasan DEMİRTAŞ

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Alirıza KALELİ

Hard to cut materials such as titanium, inconel and nickel-based superalloys are used in the medical, automobile, defense, aircraft and aerospace industries. These materials are difficult to machine using traditional machining methods. In electrochemical machining; due to the uncertainty of the material removal rate and problems in mathematical modeling, a robotic electrochemical machining bench is manufactured. Robotic electrochemical machining bench is controlled parameters such as voltage, current, flow, workpiece and tool positions and temperature. 36 experiments are carried out using the parameters of feed rate, electrolyte flow rate and number of cycle. The highest amount of material removal rate (60 mg); the highest flow rate (4.38 lt/min) and the number of cycle (11 cycle) are reached. The highest feed rate (20 mm/sec), the lowest material removal rate amount is reached. As the feed rate increases, the machining time decreases, thus resulting in a decrease in the amount of material removal rate.

**Keywords:** Electrochemical machining, robotic machining, robotic electrochemical machining, nontraditional machining



## Tablolar/Çizelgeler Listesi

Tablo 1. Termal kamera özellikleri.....	38
Tablo 2. Malzemelere ait kimyasal özellikler.....	43
Tablo 3. Malzemelere ait mekanik özellikler.....	43
Tablo 4. Deney şartları.....	50



## Şekiller Listesi

Şekil 1. Elektrokimyasal işleme şematığı (Korkmaz, 2018).....	5
Şekil 2. Motor kanatçıklarının a) Takım optimizasyonu yapılmamış hali b) Takım optimizasyonu yapılmış hali (Yu et al., 2020).....	7
Şekil 3. Takım tasarımının işlemeye etkisi a) Dışbükey ile sapma değeri grafiği b) İçbükey ile sapma değeri grafiği c) İlk takım ile yapılan işleme d) Optimizasyonu sağlanmış takım ile yapılan işleme.....	8
Şekil 4. EKİ’de delik delme a) Pirinç takım b) Bakır takım (Devanathan et al., 2021) ....	9
Şekil 5. EKİ’de 6 farklı takıma ait aşınma analizleri a) NaCl elektrolit BeCu takım b) NaCl elektrolit CuW takım c) NaCl elektrolit Cu takım d) NaCl elektrolit Br takım e) NaNO <sub>3</sub> elektrolit BeCu takım f) NaNO <sub>3</sub> elektrolit CuW takım g) NaNO <sub>3</sub> elektrolit Cu takım h) NaNO <sub>3</sub> elektrolit Br takım (Keerthivasan et al., 2020b).....	10
Şekil 6. EKİ’de 2 farklı iş parçasının mikroyapıları a) TiAl 4822, 0.5 m/s b) TiAl 45XD, 0.5 m/s c) TiAl 4822, 0.9 m/s d) TiAl 45XD, 0.9 m/s (Y. Wang, Xu, & Zhang, 2020).....	11
Şekil 7. EKİ’de voltaj değerlerinin etkisi a) Voltaj değerlerinin etkisi b) Yanal açıklığa voltaj değerlerinin etkisi (Anasane & Bhattacharyya, 2017) .....	13
Şekil 8. Farklı akım yoğunluklarının aynı iş parçası üzerinde gösterimi (F. Wang, Yao, & Kang, 2020a) .....	14
Şekil 9. Akım yoğunluğunun Ti60 üzerine etkisi (Xu et al., 2016) a) Akım yoğunluğu ve $\eta_w$ grafiği b) 10 A/cm <sup>2</sup> c) 50 A/cm <sup>2</sup> akım yoğunluğunda işlenmiş Ti60 .....	15
Şekil 10. EKİ’de farklı elektrolit tipi işlemeye etkisi (Ao et al., 2021) a) NaCl için voltaj akım grafiği b) NaNO <sub>3</sub> için voltaj akım grafiği c) NaCl için voltaj akım grafiği .....	17
Şekil 11. EKİ’de farklı tip elektrolitin SEM görüntüsü a) NaCl elektroliti b) NaNO <sub>3</sub> (Ao et al., 2021).....	18
Şekil 12. EKİ’de zenginleştirilmiş elektrolitin işlemeye etkisi a) Oksijence zenginleştirilmiş NaCl b) NaCl (Ayyappan & Sivakumar, 2014).....	19

Şekil 13. Farklı elektrolit konsantrasyonlarının parametrelere etkisi (Tang et al., 2014) a) Takım ilerleme hızı ve malzeme işleme hızı b) Akım yoğunluğu ve akım verimliliği.....	20
Şekil 14. Takım ilerleme hızının ve boşluk mesafesinin farklı elektrolit akış hızlarında değişimleri (Zhu et al., 2019) a) $Q = 1 \text{ m}^3/\text{sa}$ b) $Q = 3 \text{ m}^3/\text{sa}$ c) $Q = 4.5 \text{ m}^3/\text{sa}$ d) $Q = 1 \text{ m}^3/\text{sa}$ e) $Q = 3 \text{ m}^3/\text{sa}$ f) $Q = 4.5 \text{ m}^3/\text{sa}$ .....	21
Şekil 15. Farklı elektrolit sıcaklıklarının işlemeye etkisi a) NaCl elektroliti b) $\text{NaNO}_3$ elektroliti (Xu et al., 2016) .....	22
Şekil 16. EKİ'de takım ilerleme hızının işlemeye etkisi a) 0.5 mm/dk b) 4 mm/dk (Guo et al., 2021).....	23
Şekil 17. EKİ'de farklı ilerleme hızlarının işlemeye etkisi (J. Wang, Xu, Wang, et al., 2021) a) 0.4 mm/dk b) 0.6 mm/dk c) 0.8 mm/dk d) 1 mm/dk e) 1.2 mm/dk f) 1.4 mm/dk g) 1.6 mm/dk h) 1.8 mm/dk i) Kanal simülasyonu.....	24
Şekil 18. EKİ'de farklı pulse sürelerinin işlemeye etkisi a) Yanal boşluk voltaj grafiği b) Farklı pulse sürelerinde etki (Skoczypiec, 2016) .....	25
Şekil 19. EKİ'de görev döngüsünün işlemeye etkisi a) 0.7 görev döngüsü b) 0.6 görev döngüsü c) 0.5 görev döngüsü d) 0.4 görev döngüsü e) 0.3 görev döngüsü f) Sıcaklık görev döngüsü grafiği g) Boşluk oranı görev döngüsü grafiği h) Malzeme işleme hızı görev döngüsü grafiği (G. Liu et al., 2020).....	26
Şekil 20. EKİ'de farklı boşluk mesafelerinin işlemeye etkisi (Natsu & Terada, 2012)...	28
Şekil 21. Çift paralel robot kullanılarak yapılan işleme (Fu et al., 2022).....	30
Şekil 22. SKR robot yapısı ve eksenleri (ABB, 2004).....	31
Şekil 23. Havacılık ürünlerini işlemek için SKR kullanımı (Kim et al., 2019).....	32
Şekil 24. Tırlamanın Rİ'de etkisi a) Tırlama ile Rİ b) Tırlama olmadan Rİ (J. Tao et al., 2019).....	33
Şekil 25. Lazer sensörlerin Rİ'de kullanımı a) Yakın mesafe ve lazer izleyici (Sabourin et al., 2010) b) Lazer sensör konumlandırma (Nubiola & Bonev, 2013).....	33
Şekil 26. REKİ şematiği.....	34

Şekil 27. REKİ konstrüksiyon tasarımı ve konstrüksiyonu .....	35
Şekil 28. Kontrol ünitesi .....	36
Şekil 29. Termal kamera ve görüntüleri.....	38
Şekil 30. Elektrolit akış sistemi.....	39
Şekil 31. Robot kol için tutucu aparat CAD modeli .....	39
Şekil 32. Robot kolun aparat ile birleşimi.....	40
Şekil 33. Elektrolit arıtma sistemi.....	41
Şekil 34. İş parçası .....	44
Şekil 35. Görüntü işlemede odaklanılan alan.....	45
Şekil 36. Robot kol, takım ve iş parçasının RobotStudio ortamındaki görünümü.....	46
Şekil 37. RobotStudio’da hedef ve takım yolu konumlandırması .....	47
Şekil 38. RobotStudio’da simülasyon.....	48
Şekil 39. Parametreler için arayüz .....	49
Şekil 40. Endüstriyel kamera için arayüz.....	49
Şekil 41. 10 mm/s takım ilerleme hızı 2.55 lt/dk elektrolit debisi a) 2 tur b) 11 tur.....	51
Şekil 42. Belirli tur sayılıları için takım ilerleme hızının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 2 tur b) 8 tur .....	52
Şekil 43. Belirli takım ilerleme hızlarında farklı tur sayıları için elektrolit debisinin işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 5 mm/sn tur b) 10 mm/sn .....	53
Şekil 44. Belirli elektrolit debilerinde farklı takım ilerleme hızları için tur sayısının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 2.55 l/dk. b) 3.52 l/dk. ve c) 4.38 l/dk. ....	54
Şekil 45. Belirli elektrolit debilerinde farklı tur sayıları için takım ilerleme hızının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 3.52 lt/dk. ve b) 4.38 lt/dk. ....	54
Şekil 46. Elektrolit debisinin iş parçası üzerindeki etkisi a) 4.38 lt/dk elektrolit debisi b) 3.52 lt/dk elektrolit debisi c) 2.55 lt/dk elektrolit debisi .....	55

## Simgeler ve Kısaltmalar Dizini

IFR	: Uluslararası Robot Federasyonu
CNC	: Bilgisayar destekli nümerik kontrol
Rİ	: Robotik işleme
EKİ	: Elektrokimyasal işleme
ROS	: Robot operasyon sistemi
DA	: Doğru akım
Pulse	: Darbe
PKR	: Paralel kinematik robot
SKR	: Seri kinematik robot
NC	: Sayısal kontrol
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
REKİ	: Robotik elektrokimyasal işleme
PLC	: Programlanabilir mantık kontrolcüsü
IP	: Koruma standardı
NURBS	: Düzgün olmayan rasyonel temelli eğri
B-spline	: Temel eğri
3B	: 3 boyutlu
Path	: Yol
m	: Metre
mm	: Milimetre
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$\frac{\partial\varphi}{\partial n}$	: Elektrik potansiyel gradyan
$k_c$	: Elektrolitin elektrik iletkenliği
$k_v$	: İş parçasının işlenebilirliği
$V_f$	: Takımın z doğrultusunda ilerleme hızı
$\theta$	: Takımın hareket doğrultusu ile iş parçasına dik olan hareket doğrultusu arasındaki açı
F	: Faraday sabiti
C	: Coulomb
n	: Elementin iyon değerliliği
$\eta$	: Akım verimi
i	: Akım yoğunluğu
I	: Akım
$\omega$	: eşdeğer elektrokimyasal hacmi
$\rho$	: Malzeme yoğunluğu
M	: Malzeme kaldırma kalitesi
S(u,v)	: Yüzey fonksiyonu
$P_{ij}$	: 3 boyutlu kontrol köşeleri
$w_{ij}$	: $P_{ij}$ 'nin ağırlığı
u	: Biparametrik olarak x doğrultusu
v	: Biparametrik olarak y doğrultusu
$T_{i,k}$	: Biparametrik u ve v doğrultularında dönmeyen temel fonksiyon
$T_{j,l}$	: Biparametrik u ve v doğrultularında dönmeyen temel fonksiyon

k	: Temel eğri tabanlı fonksiyon mertebesi
l	: Temel eğri tabanlı fonksiyon mertebesi
m <sup>3</sup>	: Metreküp
sa	: Saat
lt/dk	: Litre/dakika
mm/s	: Milimetre/saniye
JetEKİ	: Jet elektrokimyasal işleme
°C	: Celsius derece
NaCl	: Sodyum klorür
NaNO <sub>3</sub>	: Sodyum nitrat



## GİRİŞ

Sanayi Devrimi ile başlayan makineleşme ve teknolojiadaki gelişmeler sürekli olarak devam etmektedir. Gelişen teknoloji günümüzde her alanda insanların faydasına kullanılmaktadır. Teknolojinin etki ettiği en önemli alanlardan biri de imalat sanayidir. İmalat yöntemlerinde malzeme işleme yöntemi olarak geleneksel ve alışılmamış imalat yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Endüstri 4.0 ile başlayan akıllı ve çevik üretim yapan akıllı fabrikalar, robotların kullanıldığı üretim hatlarını yaygınlaştırmaya başlamıştır.

Endüstriyel robotların kullanımı her geçen gün artmaktadır. İmalat sanayisi gibi üretimin önemli bir alanını kapsayan talaşlı imalat alanında bilgisayar destekli nümerik kontrol (CNC) ile robotlar önemli bir yer tutmaktadır. CNC, bilgisayar tarafından iş parçasına sayısal veriler ve G kodları kullanılarak yapılan işlemedir. CNC, düşük esnekliğe sahiptir ve belirli bir çalışma alanında işleme yapabilmektedir. Bu durum CNC'nin maliyetini de arttırmaktadır. Robotik işleme (Rİ) yönteminde ise robot kolun ucuna bağlı bir fener mili yardımıyla işleme yapılmaktadır. Rİ; yüksek esneklik, geniş çalışma alanı, karmaşık modellerin işlenebilirliği, uygun maliyet ve yazılımla tasarım kolaylığı gibi birçok avantaja sahiptir. Rİ, bu avantajlarının yanında düşük işleme doğruluğu, düşük yüzey kalitesi ve tırlama gibi dezavantajlara da sahiptir.

Geleneksel imalat yöntemi, iş parçasının istenilen şekle, boyuta ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olması için bir takım yardımıyla kesme kuvveti ve mekanik enerji kullanılarak yapılan malzeme kaldırma işlemidir. Geleneksel imalatta takım aşınması, malzemenin takıma göre daha yumuşak olması ve yüksek kesme kuvvetleri gibi kısıtlamalar olmaktadır. Yüksek dayanıma sahip malzemelerin işlenebilmesi için elektrokimyasal işleme (EKİ), elektroerezyon, plazma ile işleme ve aşındırıcı jet ile işleme gibi birçok alışılmamış imalat yöntemi kullanılmaktadır. (Y. Wang, Xu, & Zhang, 2020)

EKİ; yüksek performans gerektiren yüksek dayanımlı malzemelerin işlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. EKİ'nin, ilk olarak 1929 yılında Gusseff tarafından patenti alınmıştır 1990 yılında ise EKİ birçok alanda kullanılmaya başlamıştır (Modi, 2017). EKİ, Faraday Yasaları'na göre titanyum, inconel gibi işlenmesi zor metallerin işlenmesi için kullanılan alışılmamış imalat yöntemlerinden biridir. İşleme sırasında takım ve iş parçasının birbirine temas etmemesinden dolayı iş parçası yüksek yüzey kalitesine sahiptir. Takım

aşınması çok düşüktür. Yapılan hassas işlemeden dolayı işlenen malzemelerde finiş frezeleme ve cilalama gibi bitirme işlemlerine gerek kalmamaktadır. Bu avantajlarının yanında EKİ; alan kısıtlaması, karmaşık şekillerin işlenememesi, düşük esneklik, düşük hız ve yüksek kurulum maliyeti gibi dezavantajlara sahiptir (Cebi et al., 2020).

EKİ’de matematiksel modellemelerde ve işlenen malzeme miktarında belirsizlikler vardır. Bu belirsizlik sonucunda EKİ’de yapılan işlemlerin yüzey kalitesi deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. 6 eksenli bir robot kol ve görüntü işleme yöntemi kullanılarak bu belirsizliklerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Ayrıca tasarlanan tezgâhta sıcaklık, debi, iş parçası ile takımın konumu, voltaj ve akım parametreleri kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Parametrelerin kontrolü için LabView ortamında bir adet arayüz kullanılmıştır. Tasarlanan tezgâh ile takım ilerleme hızı, tur sayısı ve elektrolit debi değerleri kullanılarak 36 deney yapılmıştır.

EKİ ve robot kolun optimizasyonu sağlandığı takdirde birbirlerini tamamlayabilecek sistemlerdir. EKİ’deki dezavantajların Rİ sistemi ile giderilmesi mümkündür. Tez kapsamında tasarlanan tezgâhta EKİ ve Rİ sistemlerinin birleştirilip robotik elektrokimyasal işleme (REKİ) sisteminin oluşturulması hedeflenmiştir. Tezin ilk bölümünde literatürdeki çalışmalardan, ikinci bölümünde elektrokimyasal işlemeden ve üçüncü bölümde robotik işlemeden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümünde ise robotik elektrokimyasal işleme tezgâhından, tasarımından, kullanılan ekipman detaylarından bahsedilmiştir. Beşinci bölümde yapılan deneylere ait bilgiler verilmiştir.



## BİRİNCİ BÖLÜM

### 1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

EKİ alanında literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Neto vd. (2006) 2 farklı elektrolit ve voltaj değeri ile takım ilerleme hızının malzeme işleme hızına etkisini incelemiştir.  $\text{NaNO}_3$  elektroliti ile yaptığı çalışmalarda takım ilerleme hızı arttıkça malzeme işleme hızının arttığını gözlemlemiştir.  $\text{NaCl}$  elektroliti ile yaptığı çalışmalarda ise bir durumda sabit kalıp diğer iki durumda artış gözlemlemiştir. Kozak ve Zybura-Skrabalak (2016a) yaptığı çalışmada hidrodinamik düzensizliğin iş parçasındaki sınır tabakasına etkisini ve iş parçasındaki heterojen yapıyı incelemiştir ve bunun için bir matematiksel model oluşturmuştur. Yüzey topografisinde oluşan kusurların farklı elektrolit akışlarıyla ilgili olduğunu göstermiştir. Mayank vd. (2018) yaptığı çalışmada pulse (darbe) özelliğini kullanılarak işleme üzerindeki etkiler yarı iletken bir tabaka yardımıyla incelemiş ve gaz analizleri yapmıştır. Bu çalışma için ayrı bir düzenek kurmuştur. Kullanılan elektrolitlerde uygulanan darbe süresinin artışının akım verimliliğini bir düzeye kadar artırdığı, sonrasında ise akım verimliliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Hizume ve Natsu (2018) titanyum alaşımları, inconel ve paslanmaz çelikte işleme sonrası düzensiz yüzeylerde ve işleme miktarındaki azalışlarda akım yoğunluğu ve voltajın ilişkisini araştırmıştır. Çalışmada elektroliti temizlemek için ek bir aparat tasarlanmıştır. Inconelde voltaj miktarı arttığında işleme artarken titanyumda voltaj miktarındaki artış ile işleme miktarı arasında düzenli bir bağlantı olmadığını göstermiştir. J. Wang vd. (2021) yaptıkları çalışmada takım ve iş parçasının bir matematiksel modele bağlı olarak birbirlerine ters yönde belirli hızlarda döndürülerek süper nikel alaşımlar, titanyum alaşımlar gibi malzemelere sahip blisklerin EKİ ile işlenmesini modellemiştir. Van der Velden vd. (2021) yaptıkları çalışmada elektrolitin anodik çözünmesini incelemiştir. Faraday Yasası'nı temel olarak yapılan çalışmada giriş ve çıkış hacimleri, elektrik yükleri ve malzeme yükü gibi değişken parametreler kontrol edilip analiz edilmiştir.

Rİ alanında literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Li vd. (2020) füzyon reaktöründe vakum tüpü montajı, kesmesi ve kaynağını yapacak mobil paralel kinematik robot tasarlamış ve simülasyonu yapılmıştır. Robot parçalarındaki eşdeğer gerilmeler ve deformasyonların kabul edilebilir düzeyde olduğu ortaya çıkmıştır. Lu vd. (2020) yaptıkları

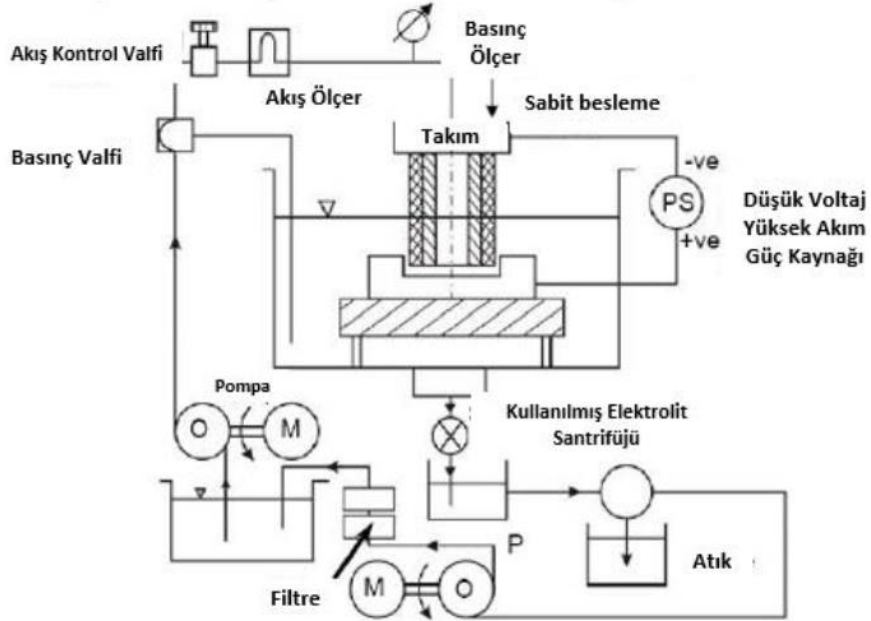
çalışmada robotların hareket planlarındaki kısıtlayıcıları (takım tipi kinematiği, joint space) engellemek için ROS (robot operating system) adında bir algoritma geliştirmiştir. Yüzey işlemedeki robotik hareketteki karmaşıklığı azaltmıştır. Klimchik ve Pashkevich (2018) tarafından endüstriyel robotların akıllı kontrolü ve yüksek sertlik modellemesiyle ilgili çalışma yapılmıştır. Hata payını düşürmek yani doğruluğu arttırmak için harici yüklerin ve yerçekiminin etkisi önemli oranda azaltılmıştır. Doğruluğu arttırmak için çift kodlayıcı sistem kullanılmıştır ve uyum hataları %80 oranında azalmıştır. Chen vd. (2019) robotun hareket komutlarını sağlayan programlardaki uyumluluğu ile robotun yörüngesinde yaptığı hataları incelemiştir. Tahmin edilen konum ve yörünge hatalarını azaltmak için MATLAB ve Visual Studio ortamlarında bir robot kol üzerine kodlama yapılmıştır. Kullanılan tümleşik kodlamanın doğruluğu için bir lazer kullanılmıştır. Yapılan kontrollerde konum için %85'in üzerinde iyileşme, yörünge sapmasında ise %75'in üzerinde bir iyileşme görülmüştür. Lin vd. (2017) robotik performans indekslerine göre bir robotik duruş metodu üzerine çalışma yapmışlardır. Üzerine kuvvet uygulanmış robotun deformasyon ve kinematik performans indeksleri hazırlanmıştır. Kullanılan takımın konumu için indekslerden yararlanılmıştır ve ilk iş parçası bu verilere göre yerleştirilmiştir. Bir robot kol üzerinde yapılan çalışmalar uygulanacak metodun işlevselliğini göstermiştir. Susemilh vd. (2017) robotların konumlama ve referans noktalarının doğrulaması ve hata paylarını azaltmak için sistem kullanımları üzerine bir derleme yapmıştır. Büyük parçalarda sürekli oluşan yeniden konumlandırma süreci incelenmiştir. Birçok çevrimi içeren kendi kendine çalışan bir sistemin üzerine robot kol ve kamera eklentileri yapılmıştır. Çok noktalı uyum stratejisi kullanılmış ve 0.17 mm konumlandırma hatası yapmıştır. Cordes vd. (2019) yaptıkları çalışmada alüminyum ve titanyum parçaların robot kola bağlı bir fener mili yardımıyla işlemlerini incelenmiştir. Yüksek hızlı işlemede robot kolda tırlama olduğu belirlenmiştir.

## İKİNCİ BÖLÜM

### 2. ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (EKİ)

Elektrokimyasal işleme (EKİ), kimyasal reaksiyonlar sonucunda anodun yüzeyindeki metal atomlarının katot üzerinden aktarılan doğru akım (DA) ile parçalanarak iyon forma dönüştürülmesi ve bu iyonların elektrolit çözeltisi yardımıyla metal iyonu şeklinde işleme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlayan alışılmamış bir işleme yöntemidir.

EKİ'nin temelinde bir DA güç kaynağına, bir takıma, bir sabitleyiciye/mengeneye, bir pompaya, bir tank/havuz ve işlenecek bir iş parçasına ihtiyaç vardır. Güç kaynağının anot ucuna iş parçası, katot ucuna takımın bağlanır. Takım ile iş parçası arasında belirli bir işleme boşluğu vardır. Elektrolit temiz elektrolit tankında hazırlanır. Elektrolit, hızı frekans inventörü tarafından ayarlanabilen bir pompa yardımıyla iş parçası ve takım arasındaki boşluktan geçirilir. İşleme sırasında oluşan elektrolit, atık elektrolit tankına gönderilir ve pres filtre yardımıyla temiz elektrolit tankına iletimi sağlanır. Şekil 1'de EKİ'nin şematığı gösterilmiştir.



Şekil 1. Elektrokimyasal işleme şematığı (Korkmaz, 2018)

Türbin kanatçıklarında, motorların yüksek performans gerektiren bölümlerinde, uçak motorlarında, rulman kafeslerinde, dişlilerde, silah namlularında ve cerrahi implantlar gibi birçok endüstriyel uygulamada EKİ kullanılmaktadır (Rajurkar et al., 2013). EKİ işlenmesi zor malzemeler için düşük maliyetli bir alternatif olabileceği ve yakın gelecekte giderek daha önemli hale gelebileceği düşünülmektedir.

EKİ'de takım aşınması ile mekanik kuvvet olmaması, malzeme sertliğinden bağımsız olarak yüksek malzeme işleme hızına sahip olması ve mikro çatlakların olmamasından dolayı yüksek yüzey kalitesi elde edilmektedir (Y. Wang, Xu, & Zhang, 2020). EKİ yöntemi; takım aşınmasının düşük miktarda olması, eş zamanlı birçok delik delme, düşük takım maliyeti, iş parçasında termal bozunma olmaması, artık stres oluşturmaması ve mekanik çatlakların oluşmaması gibi avantajlara sahiptir.

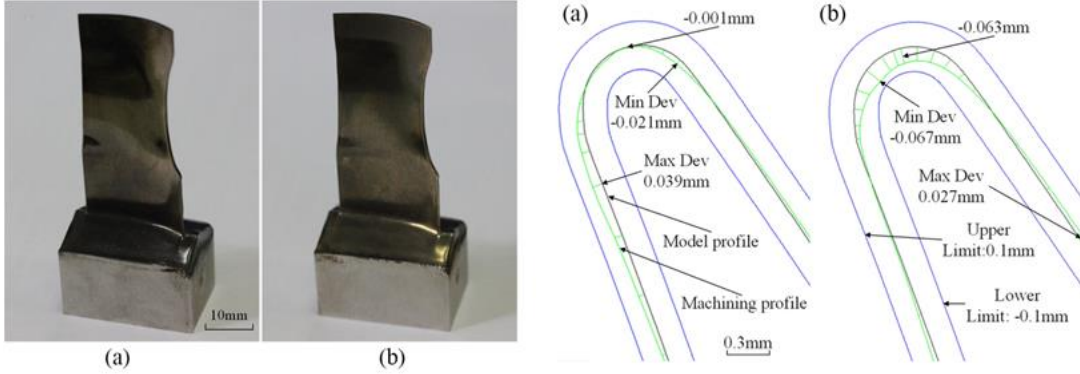
EKİ'de deneme yanılma yöntemi kullanılarak parametrelerin optimizasyonun sağlanması ve yüksek kurulum maliyeti sanayide tercih edilmesini azaltan faktörlerdir. Çalışma alanının belirli boyutlarla sınırlandırılması büyük parçaların işlenmesinde karşılaşılan problemlerden biridir. Büyük parçaların işlenebilmesi için gerekli çalışma alanlarının arttırılması gerekmektedir.

EKİ'de işleme doğruluğunu ve yüzey kalitesini arttırmak için takım tasarımı, takım malzemesi, takımın yüzey kalitesi, iş parçası malzemesi, voltaj değeri, akım yoğunluğu, işleme süresi, elektrolit konsantrasyonu, elektrolit akış hızı, elektrolit türü, sıcaklık, takım ilerleme hızı, güç kaynağının darbe süreleri ve boşluk mesafesi önemli bir yer kaplamaktadır (Skoczypiec, 2016).

### **2.1. Takım Tasarımının İşlemeye Etkisi**

EKİ'de en önemli parametrelerden biri takım tasarımının etkisidir. Takım tasarımı için kullanılan yöntemler arasında geometrik tasarım, sonlu elemanlar yöntemi ve düzeltme yöntemi bulunmaktadır. Takım tasarımlarının iyileştirilmesiyle sapma miktarları, hata payları, işleme doğruluğu gibi parametrelerde olumlu gelişmeler sağlanmıştır. Ayrıca takım tasarımında elektrik alan simülasyonunun kullanılması ile birlikte tasarım süresi kısalmaktadır (Tang et al., 2016). Takım tasarlanırken tüm parametreler için optimizasyonun sağlanması gerekmektedir. Takım tasarımı için kullanılan matematiksel model, Faraday ve Ohm yasalarına bağlıdır. Yu vd. (2020) yaptığı çalışmada takım tasarımının işleme doğruluğu

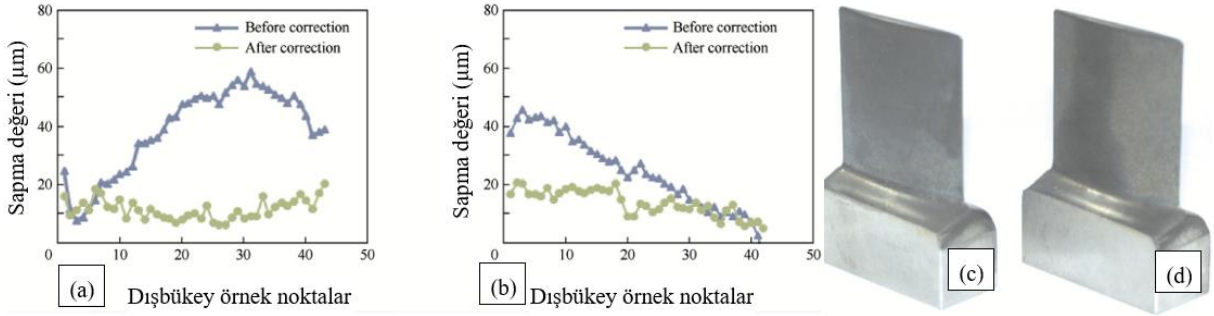
üzerine etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada motor kanatçıklarının üretiminde kullanılan takım tasarımlarının parametrelere göre optimize ederek iş parçasının oluşan boyutsal hata miktarları azaltılmıştır. Şekil 2(a) optimize edilmiş takım ile işlenmiş iş parçasını, Şekil 2(b) optimize edilmemiş takım ile işlenmiş iş parçasını göstermektedir. Yapılan incelemede Şekil 2(a)'nın teorik modele çok daha yakın olduğu, Şekil 2(b)'de ise malzeme işleme hızının artması sonucu teorik modelden uzaklaştığı sonucu çıkmıştır. Ayrıca ön kenar tepe noktaları baz alınarak yapılan ölçümlerde hassasiyetin 0.062 mm arttığı gözlemlenmiştir. İki iş parçasının ön kenarına yakın ve gövde profil yüzeyinin yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle, her iki iş parçasının da iyi yüzey kalitesine sahiptir. Ön kenara yakın nokta ile gövde profil yüzeyi karşılaştırıldığında ön kenara yakın noktaların yüzey kalitesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, akım yoğunluğunun motor kanatçıklarının ön kenarına yakın bir noktada yoğunlaşmış ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesidir.



Şekil 2. Motor kanatçıklarının a) Takım optimizasyonu yapılmamış hali b) Takım optimizasyonu yapılmış hali (Yu et al., 2020)

Zhu vd. (2016) yaptığı çalışmada kompresör kanatçıkları gibi karmaşık parçalar için EKI'de profil hatalarının yinelemeli düzeltilmesine dayanan yeni bir takım tasarım yöntemi önermiştir. Faraday ve Ohm Yasaları'nı kullanarak matematiksel bir model oluşturulmuş ve ANSYS yazılımı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Dinamik bir işleme süreci ile simülasyon yapılmıştır ve boşluk dağılımları analiz edilmiştir. Tasarlanan takım çok eksenli bir freze kullanılarak oluşturulmuştur. Dışbükey ve içbükey profillerindeki kesit çizgilerinin sapmalarının engellenmesi için takım üzerinde düzenleme yapılmıştır. Şekil 3a ve Şekil 3b'de

dışbükey ve içbükey kesitler için tasarım öncesi ve sonrası sapma değerleri gösterilmiştir. Takım tasarımının optimizasyonu sonrası içbükey ve dışbükey sapmalarının 20  $\mu\text{m}$  değerinden az olduğu belirlenmiştir. EKİ’de işlenen iş parçaları (Şekil 3c ve Şekil 3d) incelendiğinde; işleme sürecinde akım değerlerinin kademeli olarak arttığı belirlenmiştir. İş parçası ve takım arasında, işleme boşluğunun eşit olmaması akım değerlerinin ilk takımda düşük olmasına neden olmuştur. Yeni takıma göre işleme sonuna doğru boşluk mesafesinin denge durumuna ulaştığı ve hedeflenen takım değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Optimizasyonu sağlanan takım için işleme doğruluğu, ilk takım ile karşılaştırıldığında belirgin şekilde iyileştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yeni yöntemin uygunluğunu ve difüzörler gibi diğer karmaşık motor bileşenlerine de uygulanabileceğini göstermektedir.



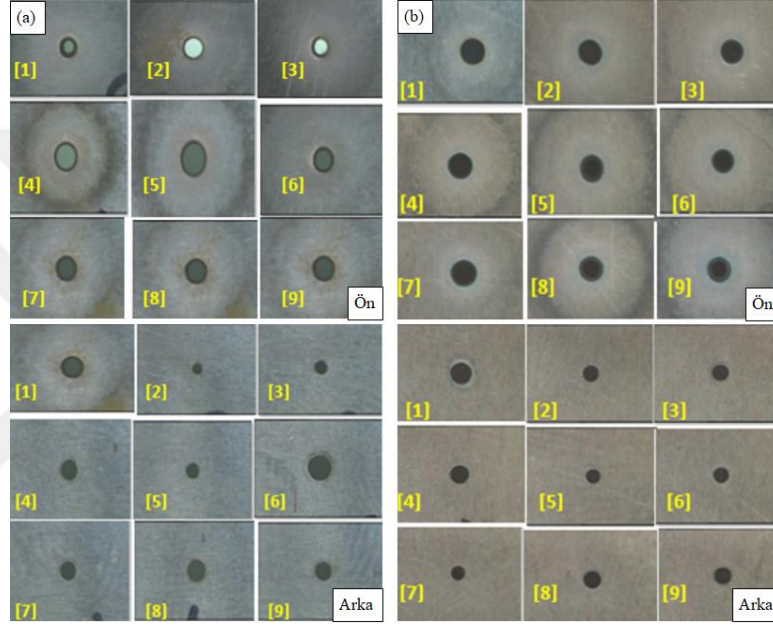
**Şekil 3.** Takım tasarımının işlemeye etkisi a) Dışbükey ile sapma değeri grafiği b) İçbükey ile sapma değeri grafiği c) İlk takım ile yapılan işleme d) Optimizasyonu sağlanmış takım ile yapılan işleme

## 2.2. Takım Malzemesinin İşlemeye Etkisi

EKİ’de takım malzemeleri yüksek termal iletkenliğe, yüksek basınçlı elektrolite, yüksek elektrik iletkenliğine ve iyi dirence sahip olmalıdır (Kumar & Pabla, 2021). Takım malzemelerinin çeşitliliği malzeme işleme hızı için gerekli olan iş parçasına özgü elektrokimyasal özelliklere bağlıdır. EKİ’de genel olarak kullanılan takım malzemeleri; paslanmaz çelik (J. Guo et al., 2021; Y. Wang, Xu, Hu, et al., 2020), karbon, bakır, pirinç ve tungstendir (Keerthivasan et al., 2020b).

Devanathan vd. (2021) yaptığı çalışmada EKİ’de SAE 304 paslanmaz çelik iş parçasına, bakır ve pirinç takımlarla, NaCl elektroliti kullanılarak delik delme işlemi yapmıştır. Farklı voltaj değerleri ile  $T_{on}$  ve  $T_{off}$  değerleri kullanılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4’te gösterilmiştir. İki takım malzemesi için de voltaj, pulse açık ve pulse kapalı değerleri arttıkça

konik kesimde şekil bütünlüğü azalmıştır. Voltaj değerinin artırılması ile bakır takımın malzeme işleme hızı azalırken, pirinç takımın malzeme işleme hızı artmıştır. Bakır takımında tüm parametreler malzeme işleme hızına eşit miktarda etki etmektedir. Pirinç takımında ise voltaj ve darbe açık değerleri daha yüksek etkiye sahiptir. Elektriksel iletkenliği sebebiyle bakır pirince göre daha stabil bir işleme yolu izlemiştir. Aynı şartlar altında pirinç takım ile elips haline gelen delikler, bakır takım ile istenilen şekle yakın bir şekilde işleme yapmıştır.



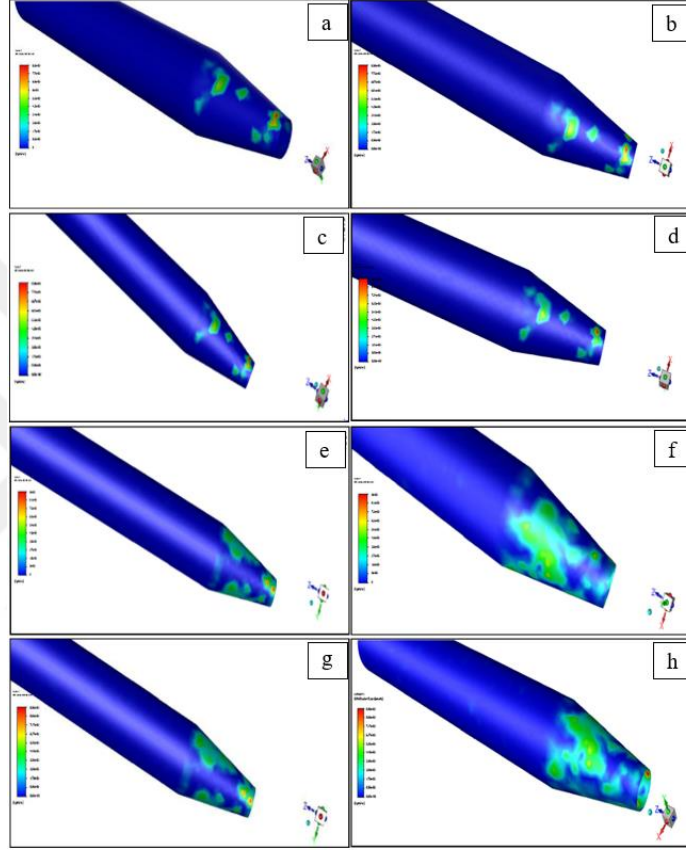
**Şekil 4.** EKİ’de delik delme a) Pirinç takım b) Bakır takım (Devanathan et al., 2021)

Shivesh vd. (2016) yaptığı çalışmada 3 farklı NaCl elektrolit konsantrasyonu ile yaptığı çalışmada paslanmaz çelik, alüminyum ve bakır takımları kullanmıştır. 5A ve 10A akım değerinde aynı elektrolit konsantrasyonları ile yaptığı çalışmalarda malzeme işleme hızının en yüksekten en küçüğe sırasıyla bakır, alüminyum ve paslanmaz çelikte elde etmiştir. Takım malzemelerinin üçü birbiriyle kıyaslandığında elektriksel iletimlerinin en yüksek olanının bakırda, en düşük olanının ise paslanmaz çelikte olduğu belirlenmiştir. Malzeme işleme hızı ile malzemenin elektriksel iletkenliği arasında doğru orantı olduğu belirlenmiştir.

Keerthivasan vd. (2020b) yaptığı çalışmada birçok farklı takım malzemesinin NaCl ve NaNO<sub>3</sub> elektrolitlerindeki erozyona bağlı aşınma durumlarını analiz programlarında incelemiştir. Bakırın, pirincin, berilyum bakırın ve bakır tungstenin NaCl ve NaNO<sub>3</sub> elektrolitleri ile reaksiyona girip erozyon oluşturma ihtimalinin düşük olduğu ve bu yüzden daha yüksek takım ömrüne sahip olduğu belirlenmiştir. NaCl elektrolitine göre erozyon



oranları yüksekten düşüğe pirinç, bakır tungsten, bakır ve berilyum bakır; NaNO<sub>3</sub> elektrolitine göre erozyon oranları düşükten yükseğe sırasıyla berilyum bakır, bakır tungsten, pirinç ve bakır olarak sıralanmıştır. Belirtilen malzemeler için analiz görüntüleri sırasıyla Şekil 5'te gösterilmiştir.



**Şekil 5.** EKİ'de 6 farklı takıma ait aşınma analizleri a) NaCl elektrolit BeCu takım b) NaCl elektrolit CuW takım c) NaCl elektrolit Cu takım d) NaCl elektrolit Br takım e) NaNO<sub>3</sub> elektrolit BeCu takım f) NaNO<sub>3</sub> elektrolit CuW takım g) NaNO<sub>3</sub> elektrolit Cu takım h) NaNO<sub>3</sub> elektrolit Br takım (Keerthivasan et al., 2020b)

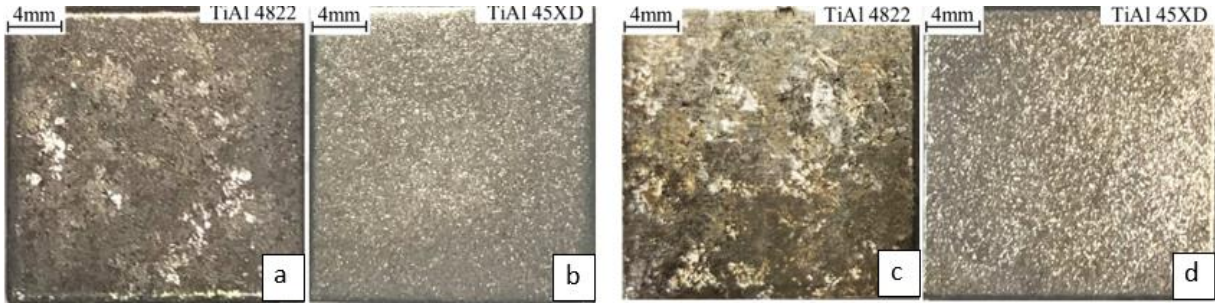
### 2.3. İş Parçası Malzemesinin İşlemeye Etkisi

İş parçasının elektrokimyasal ve mekanik özellikleri işlemedeki voltaj ve akım yoğunluğu, elektrolit tipi ve konsantrasyonunu etkilemektedir. İş parçalarına göre parametreler belirlenirken deneme yanılma yolu ile parametre seçimi yapılmaktadır. Sakamoto ve Natsu (Sakamoto & Natsu, 2020) yaptığı çalışmada dökme olarak MGA1400DS ve IN-738LC ile nikel bazlı dövme olarak hazırlanmış süper alaşım U-520 iş parçalarını EKİ'de işlemiştir. Bu alaşımların mikroyapılarındaki yer alan  $\gamma'$  (gama asal) fazlarını incelemiştir. Yapılan deneyler



sonucunda daha büyük  $\gamma'$  fazına sahip iş parçalarının daha yüksek işleme hassasiyeti ile işlenebildiği belirtilmiştir.

Y. Wang, Xu ve Zhang (Y. Wang, Xu, & Zhang, 2020) yaptığı çalışmada hafif alaşımli  $\gamma$ -TiAl malzemesine ait 2 farklı tip (TiAl4822 ve TiAl45XD) iş parçasının EKİ ile işlenmesi sonucu yüzeylerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada 1Cr18Ni9Ti takım malzemesi, %20 NaNO<sub>3</sub> elektrolit konsantrasyonu, voltaj, elektrolit sıcaklığı ve takım ile iş parçası boşluğu parametrelerini sabit tutmuştur. TiAl4822 iş parçasının kaba tane boyutuna sahip katmanlı bir mikro yapısı olduğu bilinmektedir. Ayrıca farklı lamel kolonilerinde gözlemlenen lamel büyüme yönlerinin farklı olması sebebiyle iş parçası yüzeyinde açık ve koyu renk değişimleri olabileceği belirtilmiştir. Şekil 6(a) ve Şekil 6(c) incelendiğinde yüzeylerdeki renk değişimleri açıkça gözlemlenmiştir. TiAl45XD mikroyapısal olarak incelendiğinde, rafine lamel yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kimyasal yapısında bulunan bor elementinin TiAl içerisinde çözülmemesi sonucu TiB<sub>2</sub> oluşturarak hem koloni sınırlarında hem de içinde küresel veya iğne şeklinde düzensiz yapıya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6(b) ve Şekil 6(d) incelendiğinde yüzeyde TiB<sub>2</sub>'nin neden olduğu iğne veya küresel yapılar olduğu belirlenmiştir. İki yüzey karşılaştırıldığında TiAl45XD'nin daha iyi yüzey kalitesine sahip olmasının nedeni mikroyapısının rafine lamel bulundurması olduğu belirlenmiştir.

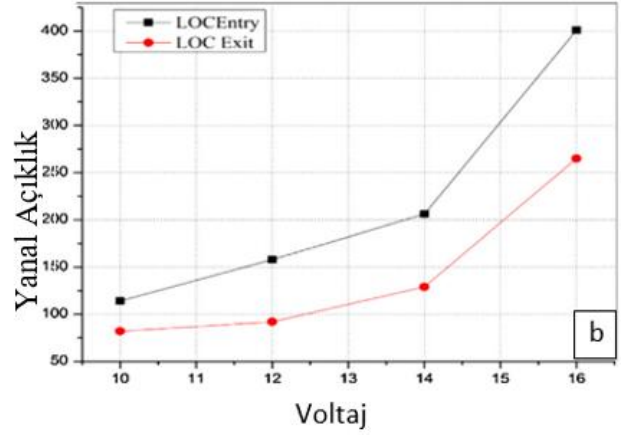
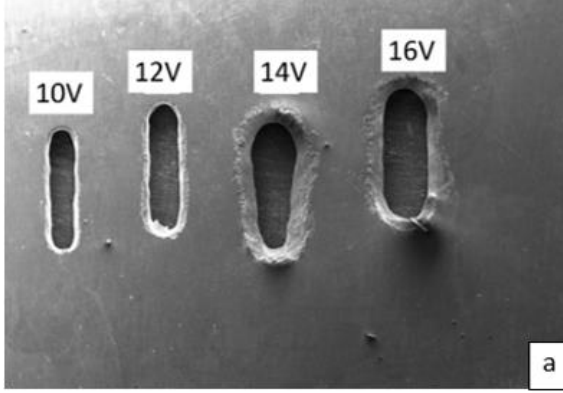


Şekil 6. EKİ'de 2 farklı iş parçasının mikroyapıları a) TiAl 4822, 0.5 m/s b) TiAl 45XD, 0.5 m/s c) TiAl 4822, 0.9 m/s d) TiAl 45XD, 0.9 m/s (Y. Wang, Xu, & Zhang, 2020)

#### 2.4. Voltajın İşlemeye Etkisi

Voltaj, EKİ'de yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kalitesine etki etmektedir. EKİ'de voltaj parametresi baz alınarak yapılarak çalışmalarda 10-20 V aralığında (Natsu et al., 2020) ile 20 V ve üstü değerlerde (J. Guo et al., 2021) çalışmaktadır.

Xu vd. (2016) uçak motorlarında kullanılan Ti60 ile yaptığı çalışmalarda %13 NaCl elektrolit konsantrasyonu kullanmıştır. Bununla birlikte, 20 V, 23°C sıcaklık, takım ilerleme hızı 0.5 mm/dk ve güç kaynağı frekansını 0.4 kHz olarak ayarlamıştır. Güç kaynağı frekans aralığının yüzey pürüzlülüğüne yüksek miktarda etki ettiği sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca optimum değerler sağlandığında işleme kalitesinin arttığını göstermiştir. Anasane ve Bhattacharyya (2017) yaptığı çalışmada EKİ'de titanyum iş parçasındaki voltaj değişimlerinin etkilerini incelemiştir. Şekil 7(a)'da gösterildiği gibi voltaj arttıkça enine/boyuna olan genişliğin ve istenmeyen işlemenin arttığı gözlemlenmiştir. İşleme voltaj değerindeki artış, akım değerinde de artış eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Faraday Yasası'na göre malzeme işleme hızı, akım değerinin artmasıyla birlikte artmaktadır. Belirtilen 2 şarttan dolayı daha yüksek işleme geriliminde daha fazla malzeme işleme hızı oluşmaktadır. İşleme boşluğunun kısa/dar olması, akım değerinin artmasına ve bundan dolayı elektrolit sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Bu durum, elektrolit iletkenlik değerini değiştirmektedir ve homojen olmayan akım dağılımı oluşturmaktadır. Bunun sonucu olarak daha yüksek istenmeyen işleme ve malzeme işleme hızına neden olmaktadır. Bu nedenle, mikro işleme bölgesindeki düzensiz akım dağılımları, iş parçasının yüzeyinde daha geniş alandan daha fazla malzeme kaldırılmasına ve aşırı kesmede bir artışa neden olmaktadır. Şekil 7(a)'da gösterilen fotoğraf, voltaj değerinin artışında oluşan durumları göstermiştir. Şekil 7(b), voltaj değerinin artışının giriş ve çıkış yanal açıklık değerlerinde neden olduğu değişimi göstermektedir. 10 V için 79 µm değerinden; 16 V için 270 µm değerine çıkmaktadır. Tüm voltaj değerleri kıyaslandığında istenilen işleme şekline en yakın değer 10 V olduğu ve voltaj arttıkça işleme doğruluğunun da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7. EKİ’de voltaj değerlerinin etkisi a) Voltaj değerlerinin etkisi b) Yanal açıklığa voltaj değerlerinin etkisi (Anasane & Bhattacharyya, 2017)

## 2.5. Akım Yoğunluğunun İşlemeye Etkisi

Akım yoğunluğu; iş parçası yüzeyindeki belirli bir alana etki eden akım miktarı anlamına gelmektedir. Akım seviyesinin düşük seviyede olması malzeme işleme hızını düşürmekte ve yüzey kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir (Cao et al., 2021)

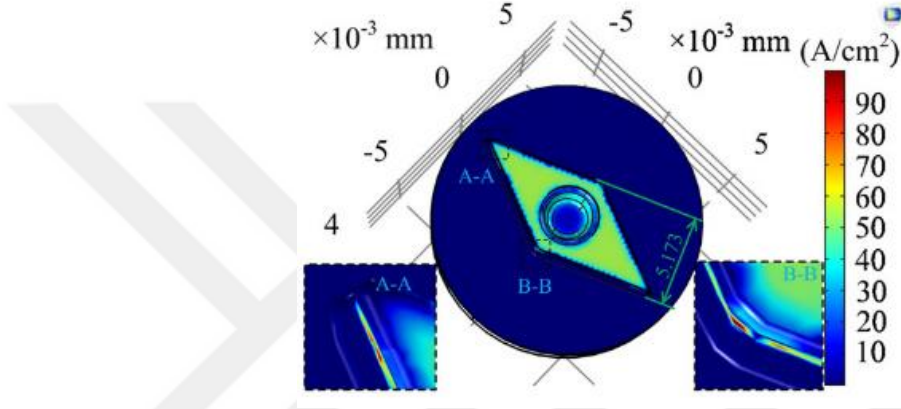
$I$ , akımı (A);  $t$ , çözünme süresini;  $\eta$ , akım verimini;  $j$ , akım yoğunluğu;  $\omega$ , eşdeğer elektrokimyasal hacmini;  $\rho$ , malzeme yoğunluğunu;  $S$ , iletkenin kesitini ve  $M$ , malzeme işleme hızını göstermektedir. Bölüm 1.5’teki Denklem 1’de akım verimliliği ve Denklem 2’de akım yoğunluğu gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{M}{\omega \rho I t} \quad (1)$$

$$j = \frac{I}{S} \quad (2)$$

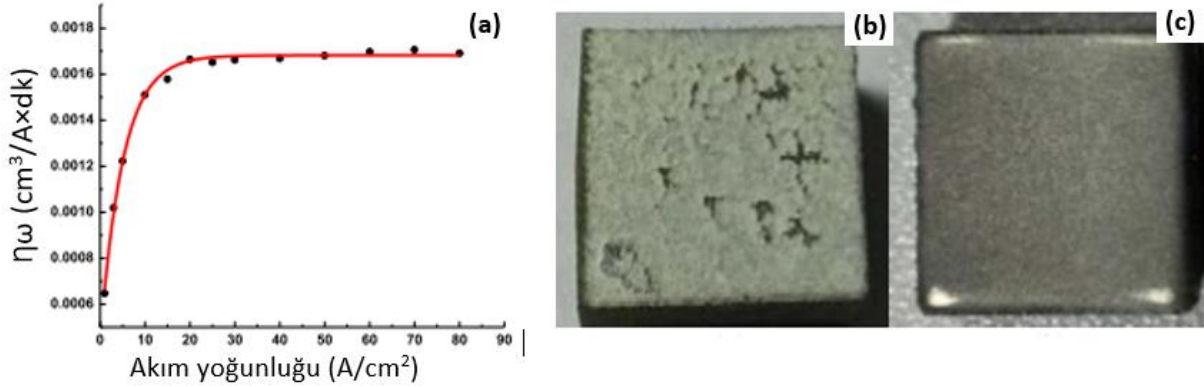
Wang, Yao ve Kang (2020a) yaptıkları çalışmada; sabit voltaj, frekans, takım ilerleme hızı, görev döngüsü, elektrolit giriş ve çıkış basınçları, elektrolit konsantrasyonu ve saf elektrolit iletkenliğini kullanarak paslanmaz çelik 304 iş parçasını eşkenar ortası 3.4 mm delik bir takım kullanarak EKİ’de işlemiştir. Eşkenar dörtgen takımda bulunan deliğin alt yüzeyinde ve yan duvarlarında akım yoğunluğu yüksektir (Şekil 8). Uzun kenarlarında ve keskin

köşelerinde akım yoğunluğu diğer bölgelerine göre düşüktür. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre akım yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde malzeme işleme hızı düşük, akım yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde malzeme işleme hızı yüksektir. Ayrıca keskin kenarlarda oluşan düşük akım yoğunluğu kısa devrelere neden olmaktadır ve bu yüzey kalitesini olumsuz şekilde etkilemektedir.



Şekil 8. Farklı akım yoğunluklarının aynı iş parçası üzerinde gösterimi (F. Wang, Yao, & Kang, 2020a)

Xu vd. (2016) yaptığı çalışmada yüksek sıcaklık titanyum alaşımı olan Ti60 (Ti-5.6Al-4.8Sn-2Zr-1Mo-0.35Si-0.7Nd) iş parçasını 1Cr18Ni9Ti takım ile sabit elektrolit, voltaj, giriş ve çıkış basınçları ve boşluk mesafesinde EKİ’de işlemiştir (Şekil 9 b ve c). 0 – 20 A/cm<sup>2</sup> arasındaki değerlerde reel eşdeğer elektrokimyasal hacmi ( $\eta\omega$ ) keskin bir şekilde artmıştır (Şekil 9a). Bu durum, akım yoğunluğu arttıkça elektrokimyasal çözünmenin artmasına yol açmaktadır. Akım yoğunluğu 20 A/cm<sup>2</sup> değerinin üstüne çıktığında  $\eta\omega$  değeri sabit kalmaktadır.  $\eta\omega$  değerinin sabit kalması işlemenin kararlı duruma geldiğini göstermektedir. Ayrıca EKİ teorisine göre iş parçasının çözünme hızı  $\eta\omega$  ve  $i$  değerleri ile orantılıdır. Bu nedenle, akım yoğunluğunun artırılması çözünme hızını artırırken  $\eta\omega$  değerini de arttırmaktadır. Şekil 9c’de gösterilen iş parçası 50 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ile elektrokimyasal çözünmenin düzenli olması nedeniyle yüzey kalitesi düzgün bir şekilde işlenmiştir. Şekil 9b’de 10 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda işlenen iş parçasının, elektrokimyasal çözünmenin düzensiz olması nedeniyle yüzeyde korozyon gözlemlenmiştir. Bu durumda Ti60 iş parçası için EKİ’de yüzey kalitesi, işleme doğruluğu ve verimlilik açısından en az 20 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu kullanılması gerekmektedir.



Şekil 9. Akım yoğunluğunun Ti60 üzerine etkisi (Xu et al., 2016) a) Akım yoğunluğu ve  $\eta\omega$  grafiği b) 10 A/cm<sup>2</sup> c) 50 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda işlenmiş Ti60

## 2.6. Elektrolitin İşlemeye Etkisi

Elektrolit genel olarak, elektriksel iletkenliğe ve serbest iyonla sahip çözeltiler olarak bilinmektedir. EKİ’de elektrolitin; iş parçası ve takım arasındaki iletimi sağlamak, oluşacak yüksek sıcaklığı azaltmak ve boşluktan işlemede çıkan malzeme kaldırmak üzere 3 önemli işlevi vardır. Elektrolit; işleme doğruluğuna, yüzey kalitesine ve işleme hassasiyetine doğrudan etki etmektedir. Elektrolit, malzeme kaldırmaya etki etkisinin yanında takım aşınmasının engellenmesinde de önemlidir. Genel olarak tercih edilen elektrolitler; düşük aşındırıcı yapıya ve toksisiteye, yüksek iletkenliğe, yüksek elektrokimyasal stabiliteye sahip olmalıdır (K. G. Saravanan et al., 2021).

### 2.6.1. Elektrolit Türü

Elektrokimyasal işlemede işleme performansı seçilen elektrolit ile doğrudan bağlantılıdır. Elektrolit seçilirken polarizasyon eğrisi kullanılarak elektrolitin özellikleri kontrol edilmektedir. Elektrolit aynı zamanda takımın aşınmayı ve malzeme birikimini engelleyecek şekilde seçilmelidir. Takımda oluşacak birikim ve aşınma; takım şekli deformasyonuna ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olabilir (K. G. Saravanan et al., 2021).

Seçilen elektrolit, takım ve iş parçası arasında kimyasal tepkimeye sebep olabilir. Kimyasal reaksiyona göre pasifleştirici ve pasifleştirici olmayan elektrolit olarak 2 ayrı grupta incelenebilir. Pasifleştirici elektrolit, iş parçası yüzeyinde pasif tabaka oluşumunu sağlamaktadır. Pasif filmler elektriksel olarak yalıtılabilir ve bu nedenle kimyasal aşındırma ve

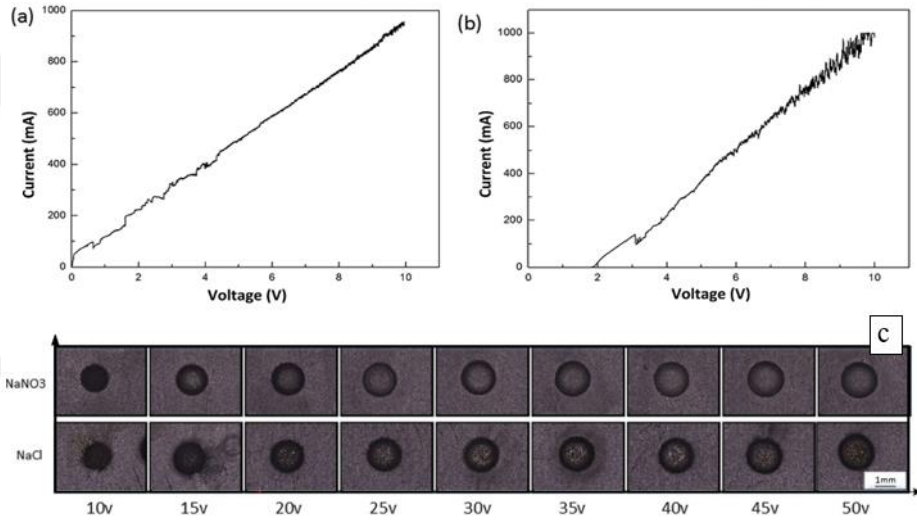
çözünme sürecini engelleyebilecek olmasına rağmen işleme çözünürlüğünü iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. Pasifleştirici olmayan elektrolitler ise iş parçası üzerinde film oluşturmaz. Pasifleştirici elektrolit ile kıyaslandığında daha yüksek işleme hızına sahiptir (K. G. Saravanan et al., 2021).

Elektrolitler; fiziksel ve doğal şartlarına bağlı olarak sınıflandırıldığında ise; nötr sulu tuzlar, sulu asitler, sulu alkaliler ve sulu olmayan elektrolitler olarak 4 grupta incelenmektedir. Sulu çözeltiler genellikle uygun maliyetleri sebebiyle tercih edilmektedir. Çözünmenin yetersiz olduğu durumlarda ise sulu asitler ya da alkaliler kullanılmaktadır (Kozak & Zybura-Skrabalak, 2016b). Sulu asitler ya da asidik elektrolitler işleme sırasında elektrolit içerisinde çözülmüş olarak buldukları için boşluk mesafesinin minimum şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Kozak & Zybura-Skrabalak, 2016b). NaOH gibi alkali elektrolitler işleme sırasında iş parçası üzerine pasif film tabakası oluşturmaktadır. Alkali elektrolitler kullanılarak yapılan işlemlerde takım ve iş parçasının birbirine temasını engellemek için boşluk mesafesi daha fazla bırakılmalıdır (Kozak & Zybura-Skrabalak, 2016b). Sulu olmayan elektrolitler iş parçası üzerinde oluşan pasif film tabakasına sebep olan oksijen kaynaklarını ortadan kaldırmaktadır. Sulu olmayan elektrolitlerin kullanım alanlarının kısıtlı olmasının sebebi ise iletkenliklerinin düşük olmasıdır (Kozak & Zybura-Skrabalak, 2016b).

En çok kullanılan elektrolit türü, NaNO<sub>3</sub> (sodyum nitrat) ve NaCl'dir (sodyum klorür). Paslanmaz çelik işlenirken parlak yüzey elde etmek için NaCl kullanımı uygundur. NaCl, paslanmaz çelikte tabaka oluşturmaz ve yüzey kalitesinin artmasını sağlamaktadır. NaNO<sub>3</sub> ise paslanmaz çelikte yüksek hassasiyet gerektiren işlemlerde kullanılmaktadır. İşleme sırasında oluşabilen rastgele korozyonu önleyerek işleme doğruluğunu arttırmaktadır. Ayrıca NaNO<sub>3</sub> elektrolitinde yüksek akım ile işleme yaparken iş parçasında çözünme artarken, düşük akımda film tabakası oluşumu gözlemlenmektedir (K. G. Saravanan et al., 2021).

Ao vd. (2021) yaptıkları çalışmada silikon karbür takviyeli alüminyum matris kompozitleri 2 farklı tip elektrolit ve farklı voltaj değerleri kullanarak jet elektrokimyasal işleme yöntemiyle işlemiştir. Şekil 10(a)'da NaCl ve Şekil 10(b)'de NaNO<sub>3</sub> elektrolitin voltaj ve akım polarizasyon grafiği gösterilmiştir. NaCl, pasif film tabakası oluşturmadan transpasivasyona geçtiği için voltaj değeri 0'dan yükseltilmeye başlamasıyla birlikte akım değeri artmaya başlamıştır. NaCl aktif çözünme yapmıştır. NaNO<sub>3</sub> elektroliti ise voltaj değeri

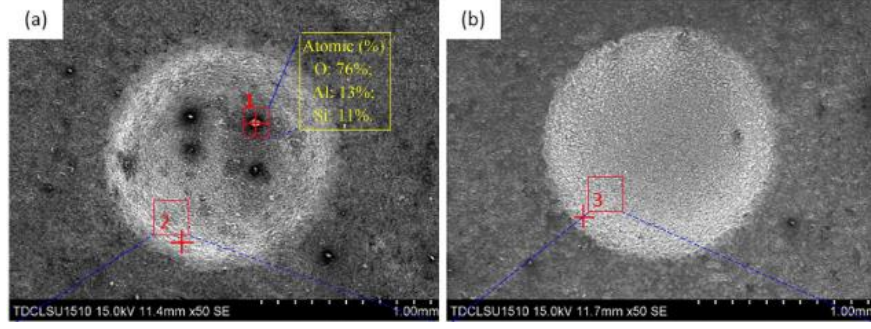
2V değere ulaşana kadar akım değerini 0 olarak sabitlemiştir. Bunun sebebi  $\text{NaNO}_3$  elektrolitinin pasivasyon nedeniyle oluşturduğu oksit tabakasıdır. Şekil 10'da  $\text{NaNO}_3$  elektrolitinin  $\text{NaCl}$  elektrolitine göre daha parlak bir çukur yüzeyi elde ettiği belirlenmiştir.  $\text{NaCl}$  ile işlenen yüzeyler incelendiği zaman çukur kenarlarına doğru istenmeyen korozyon gözlemlenmiştir. Ayrıca  $\text{NaNO}_3$  elektroliti ile yapılan işlemede çukur derinliği voltaj artışıyla daha lineer bir doğrultuda olurken,  $\text{NaCl}$  elektrolitinde lineer doğrultu voltaj artışıyla birlikte doğrultudan sapmıştır.



**Şekil 10.** EKİ'de farklı elektrolit tipi işlemeye etkisi (Ao et al., 2021) a)  $\text{NaCl}$  için voltaj akım grafiği b)  $\text{NaNO}_3$  için voltaj akım grafiği c)  $\text{NaCl}$  için voltaj akım grafiği

Şekil 11(a)  $\text{NaCl}$  elektroliti ile işlenmiş iş parçasının SEM görüntüsünde yüzey kusurları bulunmaktadır. Bu kusurlara EDS analizi yapıldığı zaman yüzey hatalarının oksijen (%76), alüminyum (%13) ve silisyum (%11) elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir.  $\text{NaNO}_3$  (Şekil 11(b)) elektroliti ile işlenmiş yüzeyler incelendiği zaman ise kusur olmadığı ve yüzeyin uniform bir şekilde oluştuğu belirlenmiştir.





Şekil 11. EKİ’de farklı tip elektrolitin SEM görüntüsü a) NaCl elektroliti b) NaNO<sub>3</sub> (Ao et al., 2021)

Ayyappan ve Sivakumar (2014) yaptığı çalışmada oksijence zenginleştirilmiş NaCl ile sulu NaCl elektrolitlerinin etkisini alüminyum çelik alaşımlı bir iş parçası üzerinde incelemiştir. Çalışmada işlenen iş parçalarına ait fotoğraflar sulu NaCl çözeltisi ve oksijence zenginleştirilmiş NaCl çözeltisi sırasıyla Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)’de gösterilmiştir. İki iş parçasının yüzeyi yüksek hızda elektrolit kullanılarak temizlenmiştir. NaCl ile işlenmiş iş parçasının yüzeyinde siyah film tabakası oluşur ve temizlendikten sonra altındaki yüzey heterojen bir yapıdadır. Yüzeyde oluşan bazı çukur noktalar oksit film (FeO) oluşturarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Fe<sup>+2</sup> elementi ise OH<sup>-</sup> iyonları ile birleşerek Fe(OH)<sub>2</sub> bileşiğini oluşturur ve yüzeyde birikir. Fe<sup>+3</sup> elementi işleme sırasında oluşur ve elektrolit ile işleme bölgesinden uzaklaştırılır. Oksijence zenginleştirilmiş NaCl ile işlenmiş iş parçasında ise yüksek anodik çözünme ve kimyasal reaksiyonlar görülmektedir. NaCl elektrolitinde olduğu gibi bu çözeltide de Fe(OH)<sub>2</sub> bileşiği oluşur fakat elektrolit oksijen içerdiği için Fe(OH)<sub>2</sub> bileşiği Fe(OH)<sub>3</sub> bileşiğini oluşturur. Fe(OH)<sub>3</sub> bileşiği ise yüzeyin temel bileşenidir ve elektrolit ile temizlenmektedir. Bu yüzden oksijence zenginleştirilmiş elektrolit ile işlenmiş parça yüzeyinde ekstra bir katman/tabaka bulunmamıştır. İki elektrolit karşılaştırıldığında oksijence zenginleştirilmiş elektrolitin malzeme işleme hızını arttırdığı ve yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki ettiği belirlenmiştir.





(a)

(b)

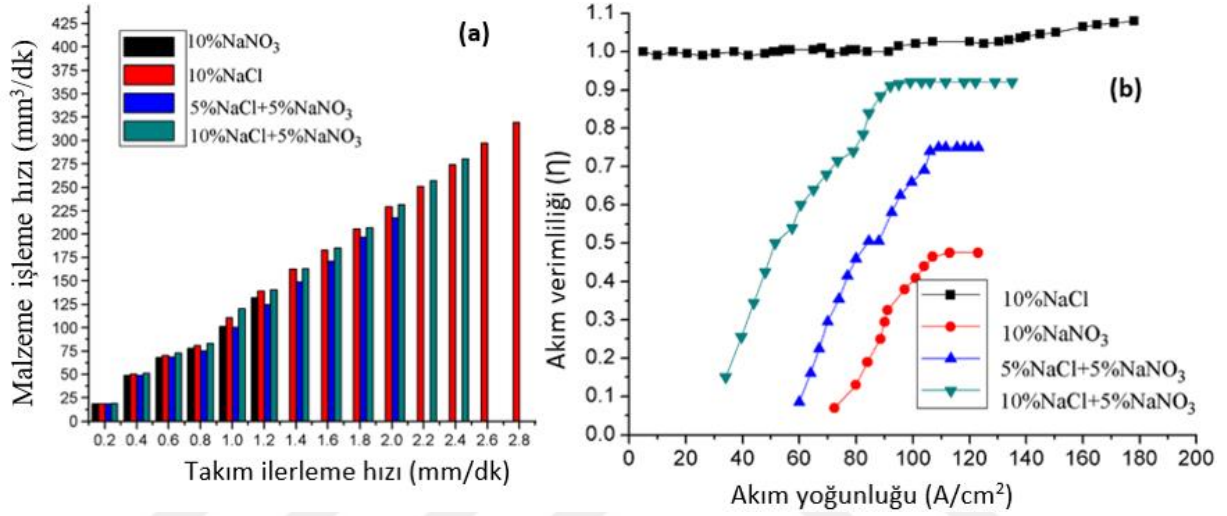
Şekil 12. EKİ’de zenginleştirilmiş elektrolitin işlemeye etkisi a) Oksijence zenginleştirilmiş NaCl b) NaCl  
(Ayyappan & Sivakumar, 2014)

### 2.6.2. Elektrolit Konsantrasyonu

Elektrolit türü ile birlikte işlemeyi etkileyecek faktörlerden biri de elektrolit konsantrasyonudur. Elektrolit konsantrasyonu, elektrolit hazırlanırken içerisine eklenen çözünen miktardır. İş parçasının kimyasal yapısında bulundurduğu elementlerin belirlenmesi ve elementlerin daha iyi çözünebilmesi için farklı tür ve konsantrasyonlarda elektrot potansiyeli gerekmektedir. Bunun için standart elektrot potansiyeli kullanılarak reaksiyonlardan elementlerin çözünme sırası belirlenir ve elektrolit seçiminde kullanılmaktadır.

Tang vd. (2014) yaptığı çalışmada S-03 özel çelik iş parçasının farklı elektrolit tür ve konsantrasyonlarında; sabit voltaj, elektrolit sıcaklığı, elektrolit basıncı altında işleyerek elektrolit konsantrasyonun işleme üzerinde etkisini incelemiştir. Takım ilerleme hızının, malzeme işleme hızı ile ilişkisini farklı elektrolit konsantrasyonlarında incelemiştir (Şekil 13 a ve b). 2 mm/dk takım ilerleme hızından daha düşük hızlar incelendiğinde %10 NaCl ve %10 NaCl + %5 NaNO<sub>3</sub> elektrolitlerinin en yüksek kaldırma hızlarına sahipken, 2 mm/dk üzeri hızlarda %10 NaCl + %5 NaNO<sub>3</sub> elektrolitinin en yüksek malzeme işleme hızına sahip olduğu belirlenmiştir. %10 NaCl + %5 NaNO<sub>3</sub> elektroliti ile %5 NaCl + %5 NaNO<sub>3</sub> elektroliti kıyaslandığında %10 NaCl içeren elektrolitin daha yüksek malzeme işleme hızına sahip belirlenmiştir. Bunun nedeni NaCl elektrolitinin lineer ve korozif bir elektrolit olmasıdır. Akım yoğunluğu artışının %10 NaCl elektroliti hariç diğer 3 elektrolit konsantrasyonunda da artışa neden olduğu belirlenmiştir. %10 NaCl elektrolitinde ise akım yoğunluğunun artması akım verimliliğini etkilememiştir hatta bazı noktalar akım verimliliği %100 değerinin üzerine

çıkılmıştır. Bu durumu açıklayabilmek için benzer çalışmalar kullanılmış ve en olası sonucun; anlık malzeme erozyon kütlelerini teorik değerden daha büyük hale getiren yüksek hızdaki elektrolit için iş parçasından bazı metal veya ametal iyonlarının çıkarılması olduğu kanısına varılmıştır.

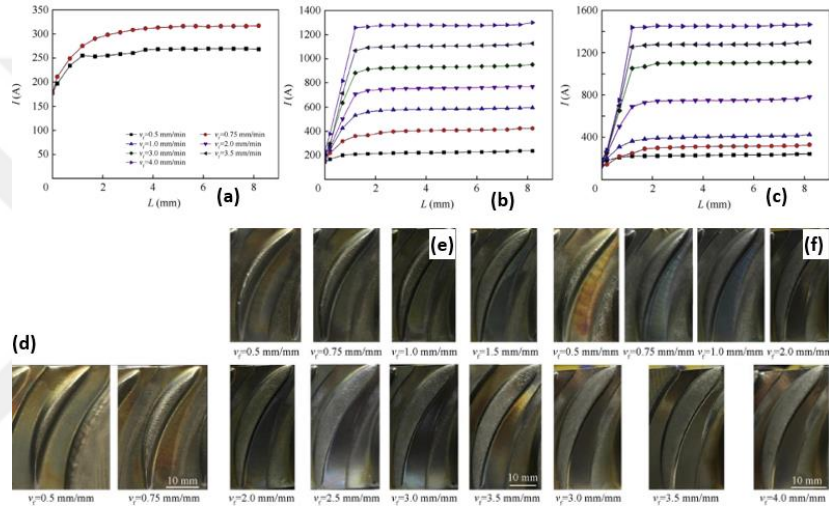


Şekil 13. Farklı elektrolit konsantrasyonlarının parametrelere etkisi (Tang et al., 2014) a) Takım ilerleme hızı ve malzeme işleme hızı b) Akım yoğunluğu ve akım verimliliği

### 2.6.3. Elektrolit Debisi

Zhu vd. (2019) yaptığı çalışmada kanatçıkların işleminde yaşanan sorunları aşabilmek için farklı takım ilerleme hızı ve elektrolit debilerinde, nikel bazlı süper alaşım kanat profillerini EKİ'de işlemiştir (Şekil 14). Debi 0,5 m<sup>3</sup>/sa değerinden 7,5 m<sup>3</sup>/sa değerine yükseltildiğinde akış alanının dağılımı daha iyi hale getirilmiştir. Deneylerde ise ekipman sınırlamaları sebebiyle en fazla 4,5 m<sup>3</sup>/sa, en düşük 1 m<sup>3</sup>/sa değerleri kullanılmıştır. 1 m<sup>3</sup>/sa değeri için takım ilerleme hızı 0,5 mm/dk değeri, 4.5 m<sup>3</sup>/sa için takım ilerleme hızı 4 mm/dk olarak belirlenmiştir. Elektrolit debisi 1 m<sup>3</sup>/sa değerinden 4.5 m<sup>3</sup>/sa değerine yükseltildiğinde takım ilerleme hızı da arttığı için akış alanını daha da kararlı hale getirmiştir ve işleme kalitesinin artmasını sağlamıştır. Debinin artması tüm değerler için akım değerini arttırmıştır. Ayrıca boşluk mesafesi 1 mm değerini geçtikten sonra işleme akım değerleri stabil olarak hareket etmiştir. Elektrolit debisini 1 m<sup>3</sup>/sa seviyesinden kademeli olarak 4.5 m<sup>3</sup>/sa seviyesine geldiği zaman kanat yüzeylerinin pürüzlülüğünün azaldığını ve koniklik açısından en verimli şeklini aldığını belirlenmiştir. 1 m<sup>3</sup>/sa debide yapılan işlemede kanatçıkların yüzey kalitesinin

düşük, yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu, işleme doğruluğunun hedeflenenden düşük olmasından dolayı bıçağın ince olduğu, ön ve arka kenarlarında aşınmaların meydana geldiği ve içbükeyinde büyük bir koniklik oluşturduğu gözlemlenmiştir. 3 m<sup>3</sup>/sa debisi yapılan işleme 1 m<sup>3</sup>/sa ile kıyaslandığında; konikliğin kademeli olarak azaldığı, takım hızı arttıkça elde edilen bıçağın ön ve arka kenarlarında hedeflenene yakın bir işleme elde edildiği belirlenmiştir. Debi 4.5 m<sup>3</sup>/sa seviyesinde olduğunda en iyi işlemenin gerçekleştirildiği belirlenmiştir.



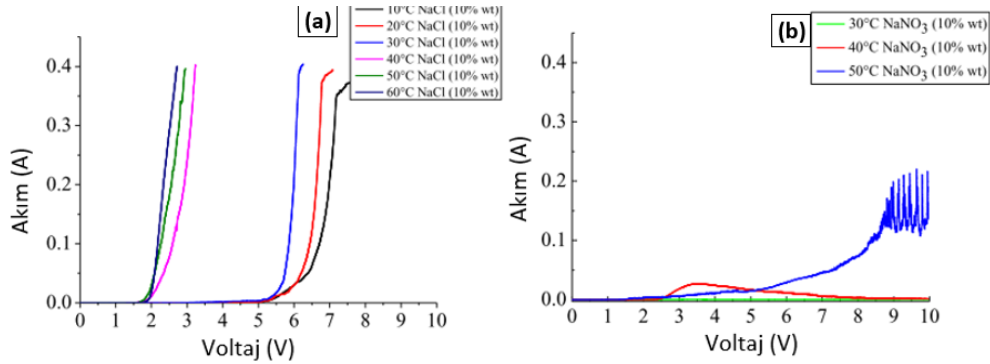
**Şekil 14.** Takım ilerleme hızının ve boşluk mesafesinin farklı elektrolit akış hızlarında değişimleri (Zhu et al., 2019) a)  $Q = 1$  m<sup>3</sup>/sa b)  $Q = 3$  m<sup>3</sup>/sa c)  $Q = 4.5$  m<sup>3</sup>/sa d)  $Q = 1$  m<sup>3</sup>/sa e)  $Q = 3$  m<sup>3</sup>/sa f)  $Q = 4.5$  m<sup>3</sup>/sa

#### 2.6.4. Elektrolit Sıcaklığı

Zhu vd. (2019) yaptığı çalışmada ayrıca elektrolit sıcaklığı da incelenmiştir. Elektrolit sıcaklığı 40°C altında olduğu durumlarda sıcaklık artışıyla maksimum takım ilerleme hızının birbirleriyle orantılı bir şekilde arttığını gözlemlemiştir. Sıcaklık 45°C üzerine çıktığı durumlarda ise malzeme kaldırma miktarı tutarlılığının azaldığını gözlemlemiştir. Dabrowski ve Paczkowski (2005) yaptığı çalışmada elektrolit sıcaklığının takıma en yakın noktada maksimum olduğunu belirtmiştir. Ayrıca yaptığı çalışmada oluşan titreşimlerin sıcaklık dağılımı üzerine etkisi olduğunu belirtmiştir.

Xu vd. (2016) yaptığı çalışmada farklı elektrolit sıcaklıklarının voltaj/akım grafiğini 2 ayrı elektrolit türü kullanarak incelemiştir. Şekil 15(a)'da gösterilen grafiğe göre 10°C, 20°C ve 30°C %10 konsantrasyondaki NaCl elektroliti için akım artışının başladığı voltaj değeri 6

V'dir. Bu durum elektrokimyasal çözünmenin düşük sıcaklıklarda devam etmesinin sınırlı olduğu belirlenmiştir. 40°C ve üstü sıcaklıklar incelendiğinde voltaj değerinin 2 V olduğu ve elektrokimyasal çözünmenin kolay gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Farklı elektrolit sıcaklıkları arasındaki elektrokimyasal çözünmede gerçekleşen farklılıklar için olası bir açıklama, kinetik ve termodinamik etkiler göz önüne alındığında reaktif iyon değişiminin hızı olabilir. Düşük sıcaklıklarda, reaktif iyon değişiminin hızının daha düşük olduğu varsayılmaktadır. Bu durum oksit tabakası ve klorür arasındaki kimyasal etkileşimi etkiler; dolayısıyla elektrokimyasal çözünmenin gerçekleşmesini sınırlandırır. Şekil 15(b)'de ise NaNO<sub>3</sub> elektrolitinin 30°C ve altı sıcaklıklarda akım tüm ölçümlerde neredeyse sıfır olarak gerçekleşmiştir. Bu durum malzemenin hala pasif olduğunu ve oksit tabakasının bozulmadığını göstermektedir. Sıcaklık 40°C olduğunda 3 V değerinde akım artışının olduğu fakat bir süre sonra akım değerinin tekrar 0 olduğu gözlemlenmiştir. Buradan elektrokimyasal bir tepkime gerçekleştiği ve bir süre sonra oksit tabakasının tekrar oluşarak tepkimeyi durdurduğu anlamına gelmektedir. 50°C elektrolit sıcaklığında akımın 2 V değerinden itibaren kademeli olarak arttığını ve 9 V değerinden itibaren testere benzeri bir yapıda hareket etmiştir. 2 V – 9 V arası akım artışında tümleşik reaksiyonlarla elektrokimyasal çözünmenin meydana geldiğini göstermiştir. 9 V üstü değerlerde NaNO<sub>3</sub> elektrolitinin kimyasal yapısından dolayı yüksek oksidasyona sahip olmasıyla çukur yapıların hemen oksitlenmesine neden olabilir ve bu durum akımın lineer olarak azalıp artmasına neden olmaktadır.



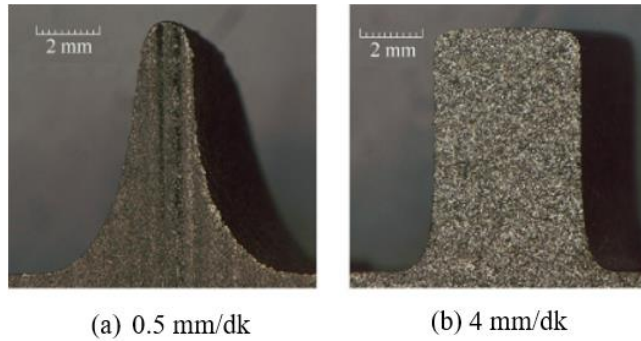
Şekil 15. Farklı elektrolit sıcaklıklarının işlemeye etkisi a) NaCl elektroliti b) NaNO<sub>3</sub> elektroliti (Xu et al., 2016)

## 2.7. Takım İlerleme Hızının İşlemeye Etkisi

EKİ'de takım ilerleme hızının düşük olması işleme süresini arttıracak için yan duvarlarda malzeme işleme hızını arttırmaktadır ve böylece işleme doğruluğu azalmaktadır (J. Wang et al., 2020). Takım ilerleme hızının artması ile takım iş parçası arası boşluk mesafesi azalmaktadır ve bundan dolayı akım yoğunluğu artmaktadır. Takım ilerleme hızı, işleme doğruluğu ile doğru orantılıdır. Takım ilerleme hızları 0-0.5 mm/dk (J. Wang, Xu, Wang, et al., 2020), 0.6-1 mm/dk (J. Wang et al., 2020) , 1-2 mm/dk (J. Wang et al., 2020) ve 2 mm/dk üzeri (Demirtas et al., 2016) olarak gruplandırılabilir. Şekil 14a, Şekil 14b ve Şekil 14c'de elektrolit akış hızlarının takım ilerleme hızı ile olduğu ilişki gösterilmiştir. Takım ilerleme hızının formülü Bölüm 1.7'de Denklem 3'te gösterilmiştir.

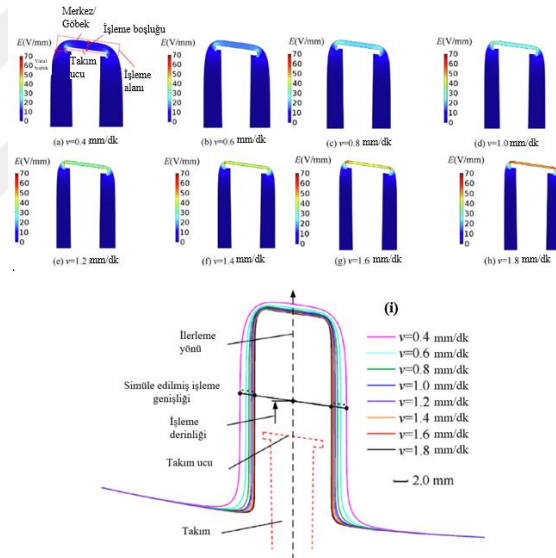
$$v = \eta \omega i \quad (3)$$

Guo vd. (2021) yaptığı çalışmada farklı takım ilerleme hızlarında nikel bazlı süper alaşım kanat profillerini EKİ'de işlemiştir (Şekil 16). Yapılan çalışma sonucunda kanadın yan duvarında yer alan duvarın korozyonun ilerleme hızının arttırılmasıyla beraber önemli ölçüde azaldığını belirtmiştir. Takım ilerleme hızının düşük olması işleme süresini arttırmış ve istenmeyen işleme miktarında önemli artış olmuştur. Bundan dolayı işleme doğruluğu önemli oranda düşmüştür. Hızlı takım ilerlemesinin olduğu durumda ise istenmeyen işleme durumu oluşmamış ve işleme doğruluğu hedeflenen seviyeye yakın olmuştur.



**Şekil 16.** EKİ'de takım ilerleme hızının işlemeye etkisi a) 0.5 mm/dk b) 4 mm/dk (Guo et al., 2021)

J. Wang vd. (2021) yaptığı çalışmada bliskleri EKİ'de 0.4-1.8 mm/dk aralığındaki ilerleme hızlarında EKİ'de işlemiştir. Takım ilerleme hızının artmasının, boşluk mesafesi ile ters orantıda olduğu belirtilmiştir. Deneylere ait analiz görüntüleri Şekil 17'da gösterilmiştir. Takım ilerleme hızının artması ile işleme süresi kısalmış ve malzeme işleme hızı azalmıştır. Bu sayede kenar boşlukları azalmıştır. İşleme alanında oluşan akım yoğunluğu, kenar boşluklarının azalması ile artmıştır. Takım ilerleme hızı ile akım yoğunluğu arasında doğru ilişki olmasından dolayı takım ilerleme hızı arttıkça iş parçasından malzeme işleme hızı da artmaktadır. Takım ilerleme hızının düşürülmesi ise kanalların genişlemesine yol açarak akım yoğunluğunu düşürmektedir. Bu durum işlemenin yavaşlamasına ve iş parçasından istenmeyen malzeme işleme hızına sebep olmaktadır.



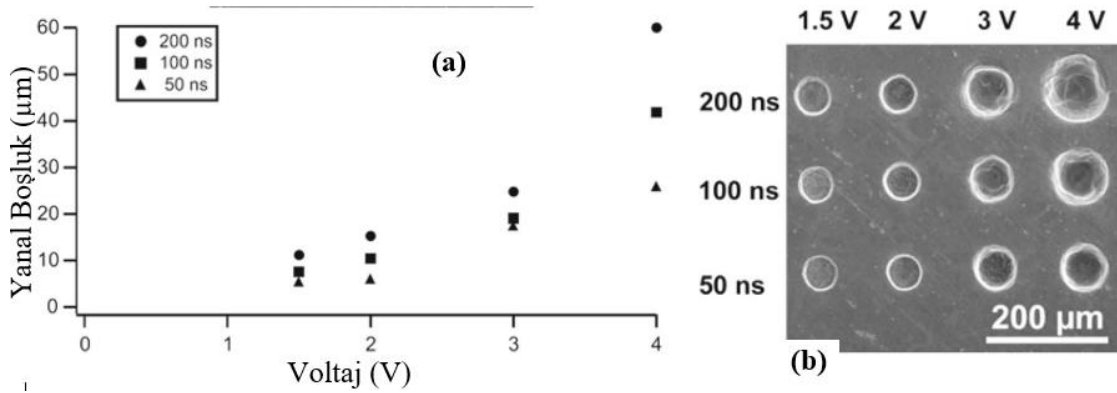
Şekil 17. EKİ'de farklı ilerleme hızlarının işlemeye etkisi (J. Wang, Xu, Wang, et al., 2021) a) 0.4 mm/dk b) 0.6 mm/dk c) 0.8 mm/dk d) 1 mm/dk e) 1.2 mm/dk f) 1.4 mm/dk g) 1.6 mm/dk h) 1.8 mm/dk i) Kanal simülasyonu

## 2.8. Darbenin (Pulse) ve Görev Döngüsünün İşlemeye Etkisi

Darbe (pulse); güç kaynağından gelen akım ve voltajın işleme süresince değil, belirli aralıklarla verilmesidir. Pulse özelliği EKİ'de son yapılan çalışmalarda sık kullanılan bir parametredir (Volgin et al., 2021). Pulse özelliği işlemede mikrosaniyelik duraksamalara neden olmaktadır. Bu duraklamalar sırasında elektrolit, işleme sırasında oluşan kimyasal parçacıkları ve aşırı ısıyı uzaklaştırırken akım yoğunluğunun düzensiz dağılmasını da engellemektedir (Volgin et al., 2021). Bundan dolayı pulse özelliği işleme doğruluğuna ve

yüzey kalitesine olumlu etki etmektedir (W. Chen & Han, 2019). Ayrıca pulse özelliğinin kullanılması işlem lokalizasyonu ve kısa devre oluşumunun engellenmesi için önemlidir (W. Chen & Han, 2019). Pulse özelliği 0-500 ns, 500-1000 ns ve 1000 ns üzeri olarak 3 farklı grup olarak incelenebilir (Skoczypiec, 2016).

0-500 ns pulse; genel olarak elektrodeşarj oluşumunu engelleyerek boşluk mesafesini kısaltmaktadır. Buna bağlı elektrolitin özelliklerini korur ve işleme sırasında oluşan hataların indirgenmesini sağlar. İşleme süresi mikrosaniyenin altına düşürüldüğü zaman işleme bölgesinde boşluk mesafesi, akım yoğunluğu ve elektrolit sıcaklığı artar. Elektrolit sıcaklığının artmasına bağlı olarak elektrolit iletkenliği artar ve işleme doğrulunun iyileştirilmesi gerçekleşmiş olur. Nanosaniye ile yapılan EKİ mikro parça imalatı için geliştirilmiş ve birçok 1  $\mu\text{m}$  altı parçanın işlenmesi gerçekleşmiştir (Skoczypiec, 2016). 3 farklı pulse süresi kullanılarak işlenmiş bir deney numunesi Şekil 18’de gösterilmiştir (Skoczypiec, 2016). Voltaj değeri arttıkça yüzeyde bozulmalar görüleceği Bölüm 1.4’te anlatılmıştır. Pulse süresinin artışı da yüzeyde bozulmalara sebep olmuştur. Şekil 18(a)’da gösterilen grafikte yanıl boşluk miktarının voltaj ve pulse süresi ile doğru ilişki de olduğu belirlenmiştir.

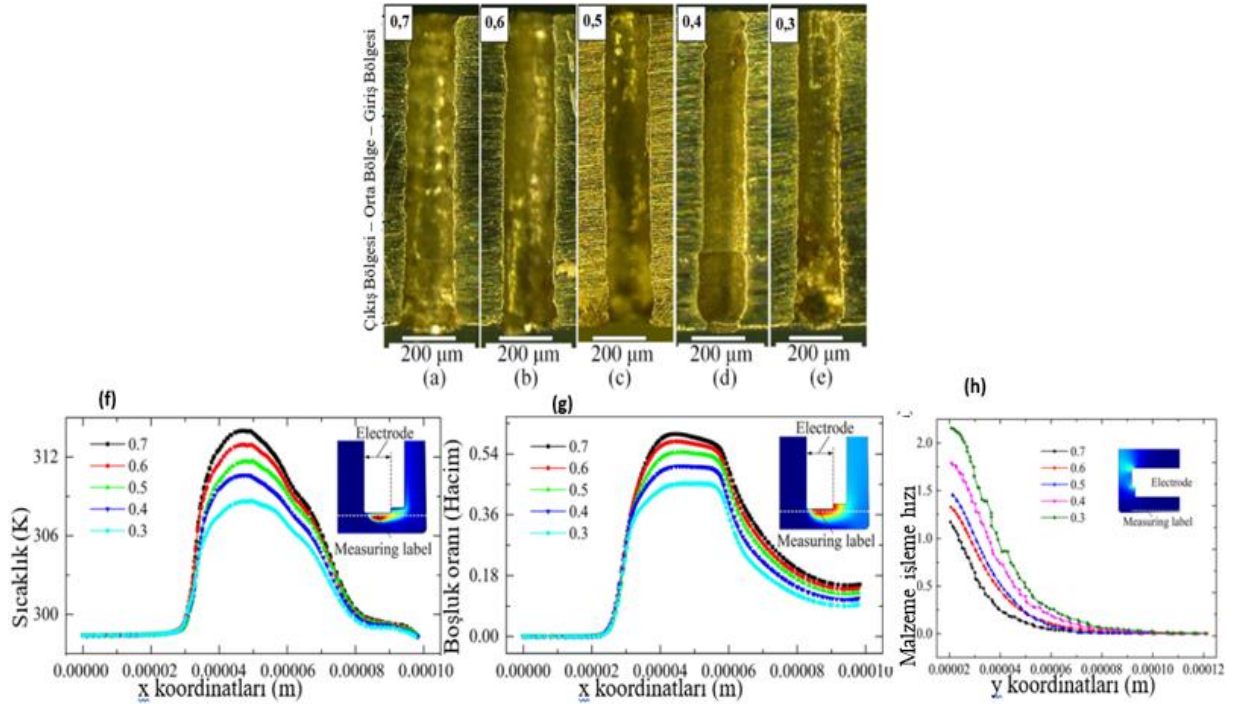


**Şekil 18.** EKİ’de farklı pulse sürelerinin işlemeye etkisi a) Yanıl boşluk voltaj grafiği b) Farklı pulse sürelerinde etki (Skoczypiec, 2016)

G. Liu vd. (2020) 18CrNi8 iş parçasını, farklı pulse sürelerinde işlemiştir. Yaptığı çalışmada pulse sürelerinin, voltaj ve elektrolit sıcaklığı üzerinde düşük bir etkisinin, görev döngüsünün ise voltaj ve elektrolit sıcaklığı üzerine etkisinin yüksek olduğunu belirtmiştir (Şekil 19). 0.3 ve 0.4 görev döngüleri kullanıldığı zaman işlemlerde kısa devre oluşmuştur. Şekil 19(f) ve Şekil 19(g)’de gösterilen grafikte sıcaklık ve boşluk değerlerinin aynı



parametreler altında görev oranı ile arttığı belirlenmiştir. Şekil 19(h)'de ise malzeme işleme hızının görev döngüsü arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, elektrolit sıcaklığı ve boşluk değerlerinin artması ile açıklanmaktadır. Görev döngüsünün artması ile yan duvarlarda gerçekleşen çözünme miktarı azalmaktadır. Bu durum için giriş bölgeleri incelendiğinde boşluk değerindeki artışın sıcaklık değerine göre malzeme işleme hızına daha fazla etki ettiği belirlenmiştir. Ayrıca görev döngüsü düşük olan (0.3, 0.4) işlemlerde, işleme verimliliğinde düşüş meydana gelmektedir. Görev döngüsü için parametreler değerlendirildiğinde ortalama değerde (0.5) bir parametre seçiminin uygun olacağı belirlenmiştir. Şekil 19(a) en yüksek görev döngüsüne sahiptir. Üretilen ısının ve gazın işleme bölgesinden uzaklaştırılamaması sonucu yan duvarlarda 21 µm yanal düzlüğe sahiptir. 0.3 ve 0.4 görev döngülerinde ise 430 µm derinlikte kısa devre meydana gelmiştir. Giriş bölgelerinde bozunmalar olmasına rağmen çıkış bölgesinde yanal düzlükler 13 µm ile 19 µm olmuştur. Şekil 19(c)'de 0.5 görev döngüsünde yanal düzlük 16 µm olmasına rağmen giriş, orta ve çıkış bölgelerinde stabil bir şekilde işleme yapılmıştır.



Şekil 19. EKİ’de görev döngüsünün işlemeye etkisi a) 0.7 görev döngüsü b) 0.6 görev döngüsü c) 0.5 görev döngüsü d) 0.4 görev döngüsü e) 0.3 görev döngüsü f) Sıcaklık görev döngüsü grafiği g) Boşluk oranı görev döngüsü grafiği h) Malzeme işleme hızı görev döngüsü grafiği (G. Liu et al., 2020)

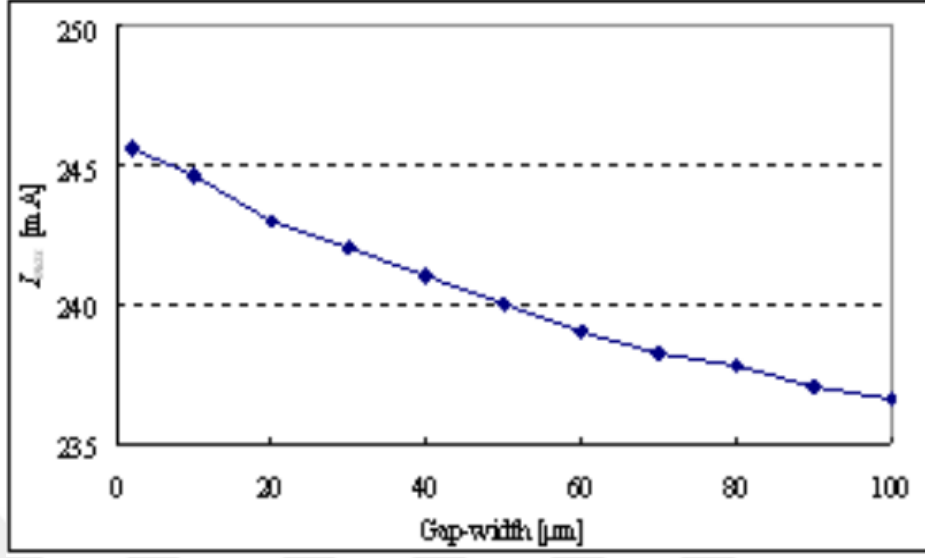


## 2.9. Boşluk Mesafesinin İşlemeye Etkisi

EKİ’de takım ile iş parçası arasındaki mesafeye işleme boşluğu ya da boşluk mesafesi denir. İş parçası ile takım arasından elektrolit geçerken güç kaynağından gelen akımın iletimi sağlanır ve işleme sağlanır. Boşluk mesafesi, işleme parametreleri ve takım katodunun tasarımı için en önemli faktördür (J. Wang, Xu, Liu, et al., 2021). Boşluk mesafesinin büyüklüğü ve varyasyonları, iş parçasının şekillendirme hassasiyetini doğrudan etkiler ve bu nedenle doğru proses kontrolü ile yüksek işleme doğruluğu sağlayabilmek için EKİ’de belirli bir boşluk mesafesinin korunması gerekmektedir (J. Wang, Xu, Liu, et al., 2021).

D. Wang et al. (2019) ters hareketli EKİ kullanarak boşluk mesafesinin teorik analizini gerçekleştirmiştir. İşlemedeki akım yoğunluğunu belirlemiş ve boşluk mesafesi için varyasyonlar oluşturmuştur. Bunun sonucunda takım ilerleme hızının artırılması ile minimum boşluk mesafesine ulaşabileceğini ve iş parçasının konikliğinin iyileştirebileceğini belirtmiştir. W. Liu vd. (2019) EKİ üzerine yaptığı çalışmada 4 farklı boşluk mesafesi kullanmıştır. Boşluk mesafesinin az olduğu durumlarda yapılan işlemin daha geniş ve daha derin mesafelere ulaştığını göstermiştir. Ayrıca boşluk mesafesi azaldıkça korozyonun zayıfladığı belirtilmiştir.

Natsu ve Terada (2012) boşluk mesafesinin genişliği ve işleme akımı arasındaki ilişkiyi analiz etmek için pulse özellikli EKİ’yi online sistem olarak kullanmıştır. 500 µm kalınlığında paslanmaz plaka, 1 mm çapında titanyum takım, %10 NaNO<sub>3</sub> elektroliti, 10 ms darbe periyodunda kabarcık oluşumunun engellenmesi için en fazla 2 V ile işleme yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda işleme doğruluğunu artırılmıştır. Şekil 19’da gösterilen grafikte olduğu boşluk mesafesinin azalması ile akım değerinin artmasına neden olmaktadır. Boşluk mesafesinin azalması elektrotlar arasındaki elektrolitin elektrik direncini azaltarak ani akım değerlerini arttırmaktadır. Akım değerinin artmasının önemi Bölüm 1.5’te anlatılmıştır. Akım değerinin artması ile işleme doğruluğu ve yüzey kalitesi artmaktadır.



Şekil 20. EKİ’de farklı boşluk mesafelerinin işlemeye etkisi (Natsu & Terada, 2012)

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### 3. ROBOTİK İŞLEME (Rİ)

Dünya’da gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde sanayi ekonominin temelini oluşturmaktadır. Sanayileşmeyle birlikte oluşan üretim sanayisi ülkeler için önemli bir gelir kaynağıdır. Sanayileşmeyle birlikte torna, freze gibi cihazların yerine daha kontrol edilebilir sistemler olan CNC cihazları almıştır. CNC ile birlikte bilgisayar kontrollü sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. CNC cihazlarında torna ve freze gibi cihazlara göre daha yüksek işleme doğruluğu ve yüzey kalitesi sağlanmaktadır. CNC cihazlarının bu avantajlarına rağmen, takım her zaman işlenen malzemeden daha sert olması ve çalışma alanının kısıtlamaları gibi dezavantajlara da sahiptir.

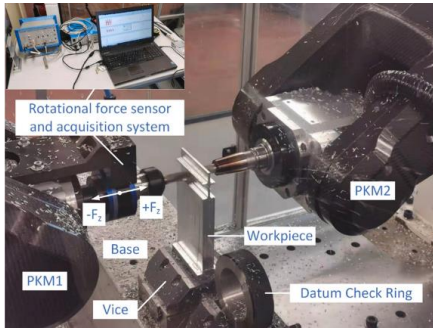
İnsan gücü ve yeteneğine bağlı olarak yapılan üretim, giderek daha esnek, entegrasyonu ve kullanımı kolay robotlar kullanılarak daha verimli bir şekilde yapılabilmektedir. Son yıllarda insanların endüstriyel alandaki verimliliği arttırmak istemesi robotik mekanizmaların dünyada yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Robotik işlemenin önemini fark eden endüstriyel robot üreticileri bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim yazılım paketlerini çevrimdışı özellikleriyle bilgisayar destekli üretim yapan robotik işleme mekanizmalarına dâhil etmişlerdir. Robotik tabanlı sistemlerin programlanabilirliği, uygulanabilirliği, esnekliği ve düşük maliyeti; robotik mekanizmaları ve robotik işlemeyi yaygınlaştırmıştır. DIN 8580’e göre üretim süreci robotu olarak tanımlanan robotik işlemede kullanılan robotlar, üretim robotlarının bir alt kümesi olarak düşünülmesi gerekmektedir (Verl et al., 2019). Robotlar; mobil ve endüstriyel robotlar olarak 2 grupta incelenebilmektedir.

#### 3.1. Paralel Kinematik Robot (PKR)

PKR, birbirine paralel olacak şekilde bağlanan uzuvların, biri sabit diğeri hareketli iki ya da daha fazla bağımsız kinematik bağ içeren ve bu bağlar sayesinde gövde hareketini sağlayan robotlardır (Merlet, 2006). PKR’de, her uzuv kendi üzerine gelen yükü kaldırmakta olduğu için rijitlikleri ve atalet kuvvetleri yüksektir. PKR, yüksek lokasyon bilgisi, yük taşıma sınırlarının yüksek olması ve yüksek hız kapasiteleri gibi çeşitli avantajları vardır. PKR; uçuş ile uçuş parçaları test ve simülatörleri (Merlet, 2006), işleme tezgâhları, nükleer reaktörler (Li et al., 2020), tıp ve cerrahi ve vakum tüpleri (Li et al., 2020) gibi geniş kullanım alanına sahiptir.

PKR'ler kuvvet gerektiren yerlerde geniş bir kullanım alanına sahip olmalarına rağmen düşük çalışma alanı, tasarım karmaşıklığı, kinematik denklem hesaplamalarının zorluğu, uzayda tekillikler ve kontrol algoritması problemleri gibi dezavantajlara sahiptir. Ayrıca bütün uzuvların gövdeye bağlantılı olmaları sonucunda montaj konumlandırmaları ve kontrolü ile tolerans kontrolünde engeller oluşmaktadır. Yerçekimi veya statik rijitlik modelindeki sapmalar elastik deformasyon ihmaline neden olmakta ve bu durum işleme doğruluğunun iyileştirilmesine engel olmaktadır. PKR ile SKR konumlama hassasiyeti karşılaştırıldığında; kinematik yapısından dolayı PKR daha hassas bir konumlama sağlayabilmektedir.

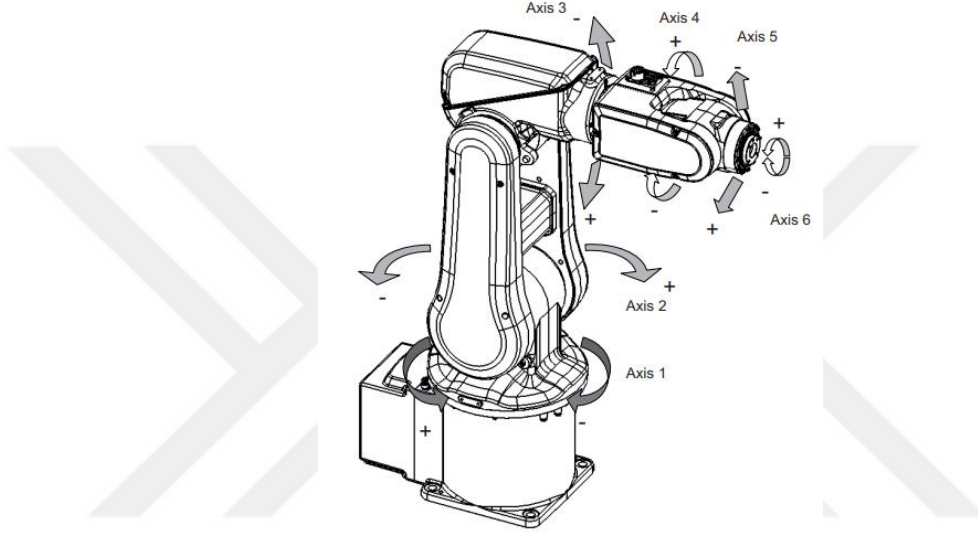
Darvekar vd. (2021) 2 eksenli bir PKR tasarımını ve optimizasyonu alanında, uzuv boyu ve uzuvlar arası mesafe parametrelerini kullanarak çalışmışlardır. Üretilen prototip ile yüksek mukavemete sahip alüminyum parçalarda parmak frezeleme ve hassas delme gibi işleme operasyonlarının SKR ile kıyaslandığında yakın sonuç verdiği belirtilmiştir. Li vd. (2020) füzyon reaktörü vakum tüplerinde çalışabilecek bir mobil PKR tasarlamıştır. Tasarlanan robot; tarama, işleme, ekleme plakası taşıma, kaynak, tahribatsız muayene, kusurlu kaynak noktası kesme ve yeniden kaynaklama gibi füzyon reaktörü birleştirme görevlerinde istenilen doğrulukta başarılı olmuştur. Fu vd. (2022) yaptığı çalışmada ince duvarlı iş parçalarını çift taraflı paralel robot kullanarak senkronize bir şekilde işlemiştir (Şekil 21). Tek taraflı işlemeye göre rijitlik, dinamik performans ile sapmaların dengeli dağılımından dolayı boyutsal doğruluğun ve yüzey kalitesinin artırıldığı belirtilmiştir.



Şekil 21. Çift paralel robot kullanılarak yapılan işleme (Fu et al., 2022)

### 3.2. Seri Kinematik Robot (SKR)

SKR; birbirine seri olarak bağlanan, tek eksenli (kayar veya dönel) eklem kullanılan, her uzuv birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen robotlardır. Robot yapısı olarak insan koluna benzemekte ve kinematik modelleri basite indirgenmiştir (Şekil 22 (ABB, 2004)).



Şekil 22. SKR robot yapısı ve eksenleri (ABB, 2004)

SKR, dünya genelinde en çok kullanılan robot türüdür. SKR; her uzvun bağımsız hareketinin sağladığı geniş çalışma alanları, tasarım ve yazılım kolaylığı, yüksek hareket kabiliyeti, düşük maliyet, yüksek tekrarlanabilirlik, yüksek esneklik avantajları ile birçok alanda kullanılmaktadır (B. Tao et al., 2019). Bu avantajlarından dolayı medikal, endüstri ve havacılık gibi neredeyse her alanda kullanılabilir.

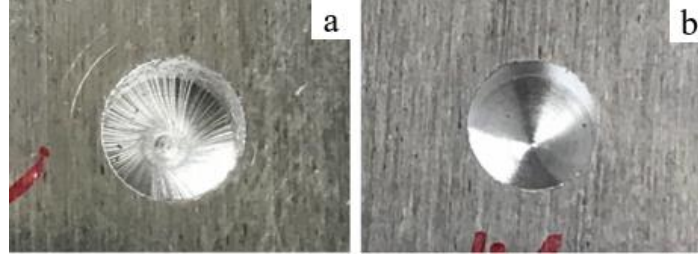
Takım tezgâhlarına göre SKR, ek bölümlerin veya mobil platformların eklenmesiyle kolayca ayarlanabilen geniş çalışma alanlarına sahiptir. Havacılık ve uzay alanındaki büyük parçaların işlenmesi için otomatik yönlendirmeli bir platform üzerine monte edilmiş, hassasiyeti artırılmış SKR, Şekil 23’de gösterilmiştir (Kim et al., 2019).



**Şekil 23.** Havacılık ürünlerini işlemek için SKR kullanımı (Kim et al., 2019)

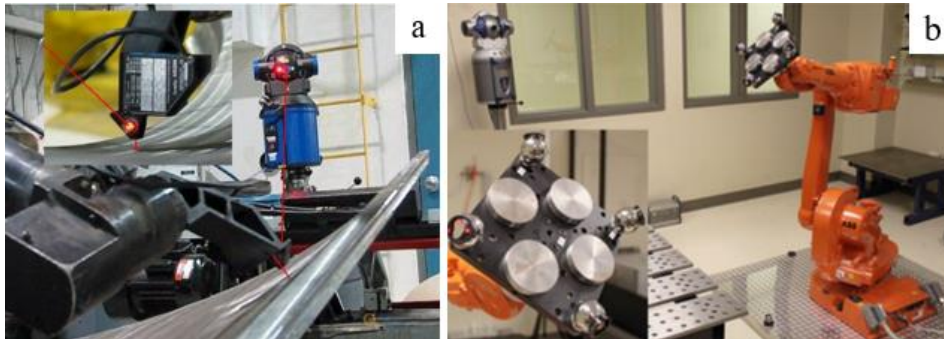
Takım tezgâhlarına benzer şekilde, işleme stratejisi ve yörünge CAD/CAM (bilgisayar destekli tasarım ve imalat) sistemi tarafından oluşturulduğundan, işleme robotunun hareketi sayısal numerik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilebilmektedir. İşleme operasyonlarının verimliliği ve doğruluğu, çalışma alanındaki robot davranışıyla birlikte sayısal kontrol (NC) programlarının hazırlanmasına, robot yolu planlamasına, hareket stratejisine ve dinamik optimizasyonuna bağlıdır (Verl et al., 2019). Lin vd. (2017) hata oranını en aza indirgeyebilmek için kinematik ve rijitlik performanslarının en iyi olduğu bölgelerde işleme yapmanın daha uygun olduğunu belirtmiştir.

SKR, geniş bir alanda kullanılmasına rağmen tırlama, titreşim, kesme derinliği, kesme kuvvetleri, konumlandırma, sapma ve mukavemet problemleri gibi RI'de birçok engel vardır. Tırlama, RI'de karşılaşılan en önemli problemdir. Geleneksel takım tezgâhları ile karşılaştırıldığında, SKR'nin daha düşük sertlik nedeniyle tırlama yapma olasılığı daha yüksektir. Tırlama; takım aşınmasının daha hızlı olmasına, işleme kalitesinin düşmesine ve robotun güvenliğini (eksen hareketleri) tehlikeye atmak gibi işleme sürecine çeşitli olumsuz etkileri sebep olmaktadır (J. Tao et al., 2019) (Şekil 24). Tırlamanın başlangıç ile bitiş zamanı arasında uygun parametre ve algoritma kullanılarak tırlamanın etkilerini engellenebilmektedir. Tırlamayı engellemek için; tırlama olmaksızın kesme parametrelerinin seçimi, değişken takım hızı, pasif tırlama kontrolü ve aktif tırlama kontrolü gibi birçok parametre üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca tırlamanın otomatik olarak algılanabilmesi için; titreşim sinyali, tork sinyali, motor akımı sinyali ve ses sinyali kullanılarak tırlama ile ilgili çeşitli sinyaller alınabilir (J. Tao et al., 2019).



**Şekil 24.** Tırlamanın Rİ’de etkisi a) Tırlama ile Rİ b) Tırlama olmadan Rİ (J. Tao et al., 2019)

Yan vd. (2019) yaptıkları çalışmada seri kinematik robot kullanarak Ti-6Al-4V alaşımına robotik aşındırma yöntemiyle taşlama işlemi uygulamıştır. Yapılan çalışmada belirlenen optimizasyon değerleriyle enerji verimliliği sağlanabileceği ve iş parçası işleme sonrası yüzey kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Rİ’de takım ucuna etki eden kuvvetler işlemenin doğruluğunu azaltmakta ve konumlandırma hatalarına neden olmaktadır. Oluşan kesme kuvvetleri sırasında robot kola periyodik olarak titreşim gönderilmektedir. Böyle durumlarda sisteme verilecek zararlardan kaçınabilmek adına robotun ve işlemenin durdurulması gerekmektedir. Mousavi vd. (2017) yaptığı çalışmada SKR doğal frekanslarının, sürekli değişen robot konfigürasyonları nedeniyle takım yolu boyunca önemli ölçüde değişebileceğini belirtmiştir. Sabourin vd. (2010) yaptığı çalışmada türbin yüzeylerini geliştirmek için lazer izleyici ve yakın mesafe sensörü kullanarak Rİ’de işlemiştir (Şekil 25a). Yapılan işlemede yüzey pürüzlülüğün iyileştirildiği belirtilmiştir. Nubiola ve Bonev (2013) yaptığı çalışmada lazer sensörlerin konumlarını değiştirip işleme doğruluğunu %60 oranında arttırmıştır (Şekil 25b).



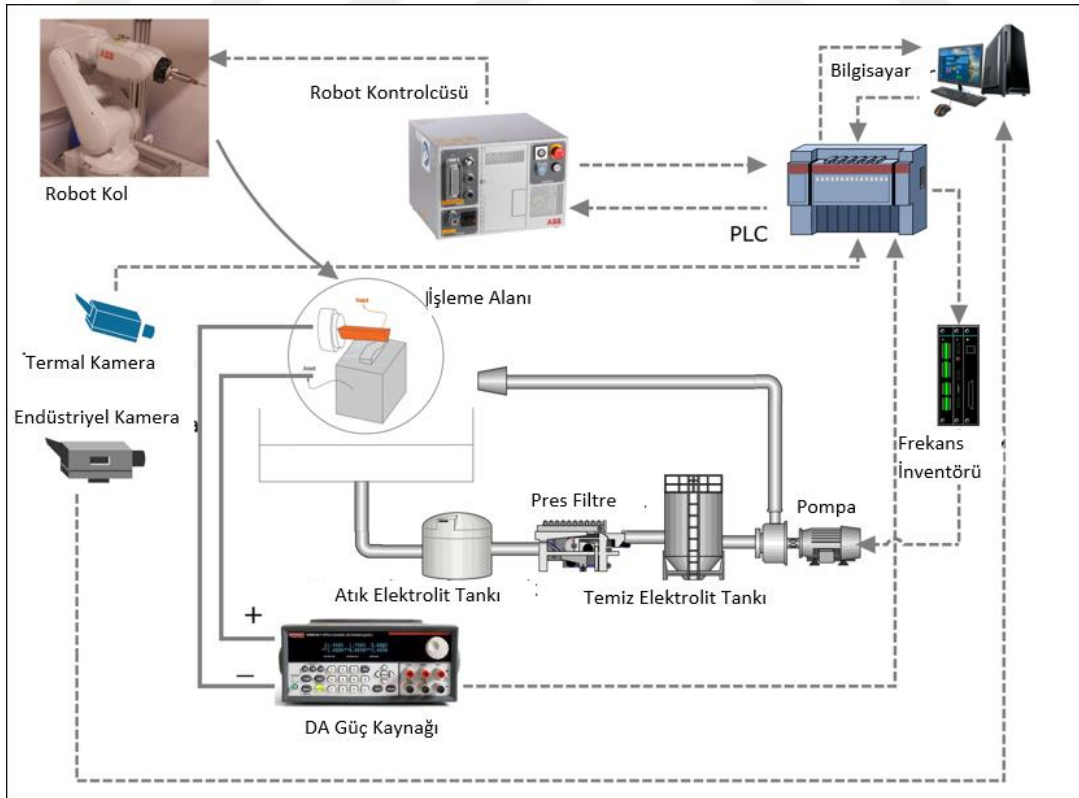
**Şekil 25.** Lazer sensörlerin Rİ’de kullanımı a) Yakın mesafe ve lazer izleyici (Sabourin et al., 2010) b) Lazer sensör konumlandırma (Nubiola & Bonev, 2013)



## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### 4. ROBOTİK ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (REKİ)

Robotik elektrokimyasal işleme (REKİ); robotik işlemenin (Rİ) yüksek esneklik, yüksek hareket kabiliyeti ve geniş çalışma alanı avantajlarını elektrokimyasal işlemenin (EKİ) işlenmesi zor metallerin yüksek yüzey kalitesinde ve yüksek doğrulukta işleyebilme özellikleriyle bir araya getiren yeni bir tümeşik işleme yöntemidir. REKİ’de serbest form yüzeye sahip işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi hedeflenmiştir. Temel olarak iki farklı işleme yönteminin avantajlarını kullanarak oluşturulmuş bir yöntemdir. İşleme doğruluğunun artırılması, yüksek yüzey kalitesinin sağlanması, çok eksenli rahat hareketin sağlanması, takım yolu kontrolü, işleme sırasında oluşabilecek kısa devrelerin işleme bölgesinde sıcaklık kontrolü sağlanarak engellenmesi, görüntü işleme kullanarak iş parçasının konumlandırılması ve işleme kontrolünün sağlanması REKİ’de parça işlenmesinin en önemli avantajlarıdır. REKİ’ye ait tasarım şematiği Şekil 26’te gösterilmiştir.



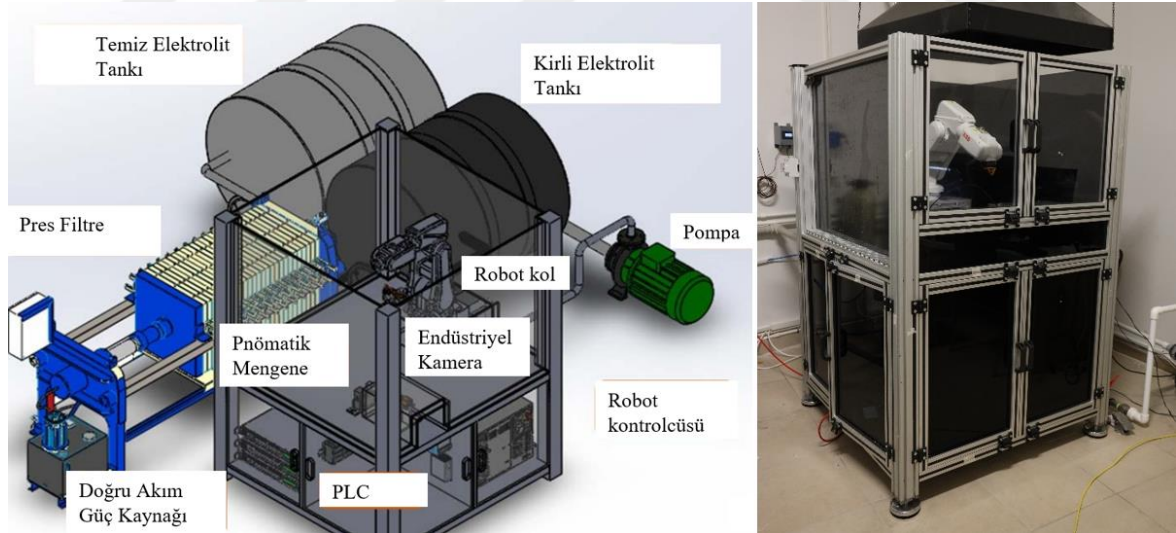
Şekil 26. REKİ şematiği



REKİ; makine kurulumu, konstrüksiyon, DA güç kaynağı, PLC, robotik kol ve ara yüzünden oluşur. Bu bölümler detaylı olarak alt başlıklarda açıklanmıştır.

#### 4.1. Konstrüksiyon

REKİ tezgahının boyutları 1 m × 1 m, yükseklik ise 90 cm'dir. REKİ tezgahının temelini korozyon ve oksidasyon etkilerini engellemek için alüminyum sigma profiller oluşturmaktadır. Sigma profiller elektrik iletmeyen özel bir yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır (Şekil 27). Zeminin hepsi 8 mm kalınlığında pleksiglass ile kaplanmıştır. Endüstriyel kamera ve robot kolun bulunduğu yerler ise alüminyum sigma profil desteklerinin üzerine pleksiglass ile kaplanmıştır. Çalışma alanının 3 kenarı, işleme sırasında oluşabilecek elektrolit sıçramalarını engellemek için 3 mm kalınlığında siyah pleksiglass malzeme ile kaplanmıştır. Tüm bağlantı noktalarının silikon ve epoksi ile sızdırmazlığı sağlanmıştır. Diğer kenara ise işlemeye hazırlık ve müdahale durumları için 2 adet pencere eklenmiştir. Pencereleer pleksiglass zeminden 20 cm yüksekte bulunmaktadır.

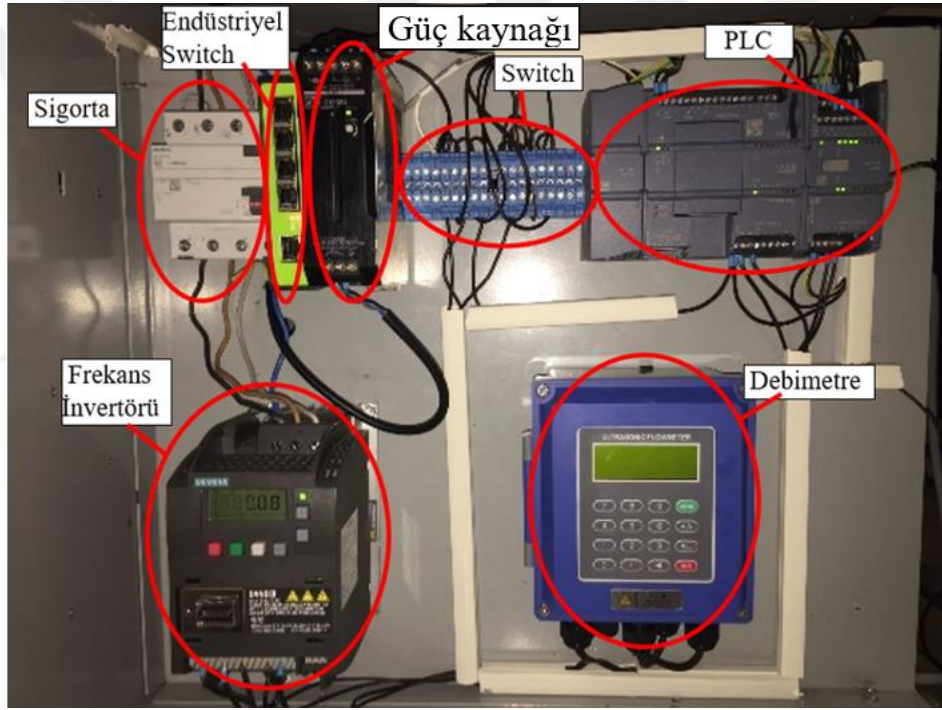


Şekil 27. REKİ konstrüksiyon tasarımı ve konstrüksiyonu

Pnömatik mengene, endüstriyel kameranın görüş açısında yer alacak şekilde zemine sabitlenmiştir. 25 mm strok mesafesine sahiptir. 6 barlık bir kompresör yardımıyla aç-kapa işlemini gerçekleştirmektedir. Operatör kullanım kolaylığı olarak pedal zemine sabitlenmiştir.

## 4.2. Kontrol Ünitesi

REKİ için en önemli faktör tüm parametrelerin kontrol edilmesidir. Yüzey kalitesi ve işleme doğruluğunun en yüksek seviyede olması için tüm kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrol ünitesi, tüm birimlerin bir bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmesini sağlamaktadır. PLC, tüm birimlerin analog sinyaller kullanarak haberleşmesini sağlar. PLC aracılığıyla; frekans invertörü, DA güç kaynağı, robot kontrol ünitesi, ultrasonik debimetre ve termal kameranın bilgisayarla haberleşmektedir (Şekil 28).

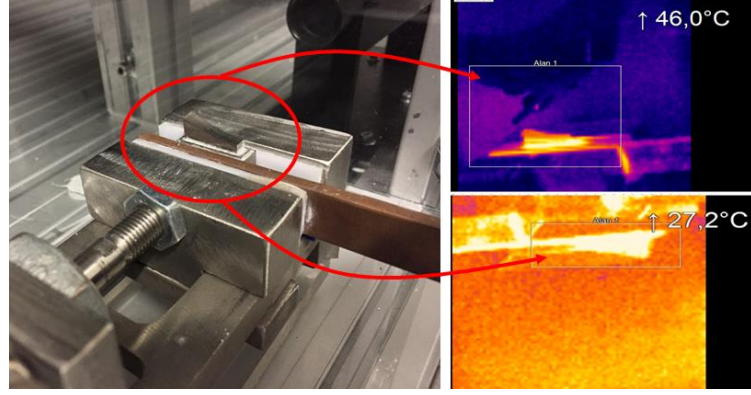


Şekil 28. Kontrol ünitesi

Şekil 28’da gösterildiği gibi sisteme bir sigorta eklenmiştir. Sistemin arıza durumunda acil müdahalesi için sigorta ve acil stop butonu kullanılmıştır. Frekans İvertörü 220 V ile çalıştığı için sigortadan direkt bağlantı yapılmıştır. Omron S8Vk C12024 model bir ray tipi güç kaynağı da sisteme eklenmiştir. Sigorta ile bağlantısı yapılarak 220 V değerini, 24 V çıkış voltaj ve 5 A çıkış akım değerlerine dönüştürmüştür. Buradan 1,5 mm antigron kablo kullanılarak switchlere bağlantılar yapılmış ve sistemin elektrik devresi tamamlanmıştır. Endüstriyel switch, PLC, debimetre ve termal kamera güç bağlantıları switchler üzerinden olmuştur. Switchler ayarlanırlarken artı ve eksi olarak ayrılmış ve bağlantılar yapılmıştır.

Siemens Sinamics v20 model bir frekans inventörü elektrolit akışını kontrol etmek için kullanılmıştır. Frekans inventörü sahip olduğu basit pompa makrosu ile programlanmıştır. Nozbar marka pompaya ait olan; voltaj, hertz, devir, güç,  $\cos\phi$ , akım ve verimlilik değerleri frekans inventörüne operatör panelinden kodlarıyla birlikte girilmiştir. Frekans inventörü ilk olarak manuel çalıştırılıp kontrol edilmiştir. Operatör panelinden uzaktan erişim modu ayarlanmış ve LabView ortamına entegre edilmiştir. Sistem üzerinden kontrolü sağlanmaktadır. Ayrıca, akış hızının kontrolü için Gentek marka ultrasonik debimetre sisteme entegre edilmiştir. Ultrasonik debimetre;  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $120^{\circ}\text{C}$  değerleri arasında, 500 ms ölçüm periyodunda, 0.01 ile 12 m/s değerlerinde  $\pm 1\%$  hata payı değerlerinde çalışmaktadır. Ultrasonik debimetrenin çalışma prensibi; kullanılan iki sensör birbirine belirli aralıklarla U borunun olduğu konumun uzağına yerleştirilmiştir. Akış sırasında iki sensör ultrasonik sinyaller göndererek akış hızını hesaplamaktadır. Böylece frekans inventörü aracılığıyla pompaya verilen güç ultrasonik debimetre ile kontrol edilmiştir. Ultrasonik debimetre, sisteme entegre bir şekilde otomatik olarak çalışmaktadır. Bu şekilde elde edilen verilerde bir hata olduğunda sistemde elektrolit akışı durmaktadır.

Sıcaklık değerleri; kimyasal reaksiyonlar, akım değişimleri gibi nedenlerle işleme sırasında değişmektedir. Takım ile iş parçası arasındaki boşluk mesafesinin kısa olması kısa devreye neden olmaktadır. Kısa devre oluşumu elektrolit sıcaklığını arttırmaktadır. Bu durumu ve iş parçası ile takımın sıcaklık değişimlerini belirlemek için termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera kullanılarak sıcaklık değişimlerinin yüksek olduğu durumlar belirlenerek kısa devrenin önlenmesi amaçlanmaktadır. Termal kameranın analog sinyal çıkışları kullanılarak robot ile termal kamera arasındaki haberleşme PLC ile sağlanmıştır. Termal kamera, motorlu odak kullanarak “sonsuz” ve “yakın” arasında yakınlaştırma yapabilmektedir (Şekil 29). Bu özellik sayesinde işleme bölgesine belirli bir mesafeden sıcaklık kontrolü yapılabilmektedir.



Şekil 29. Termal kamera ve görüntüleri

Termal kamera birçok sıcaklık aralığında yüksek doğrulukta çalışabilmektedir. Termal kameraya ait özellikler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Termal kamera özellikleri

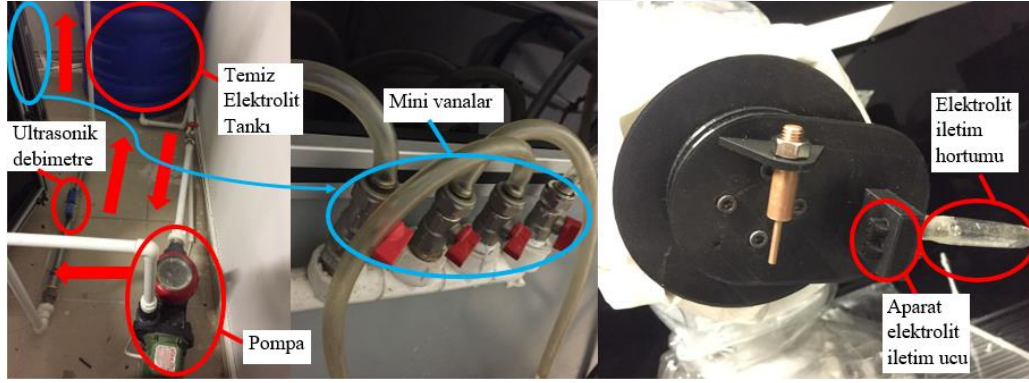
Özellikler	Değerler
Optik çözünürlük	80×80 piksel ... 2×2 piksel
Sıcaklık aralığı	-20°C...100°C, 0°C...250°C, 150°C...900°C
Doğruluk	±2°C veya ±2 % (Büyük olan değer seçilir)
Frame oranı	50 hz

#### 4.3. Elektrolit Akış Sistemi

Sıcaklık dağılımı, akımın iş parçası takım arası iletimi, işlenen malzemenin işleme alanından uzaklaştırılması, yüzey kalitesinin artırılması ve işleme doğruluğu için elektrolit kullanımı çok önemlidir. Elektrolitin hazırlanması, işleme bölgesine iletimi ve istenilen açılarda iş parçası ile takım arasına püskürtülmesi gerekmektedir.

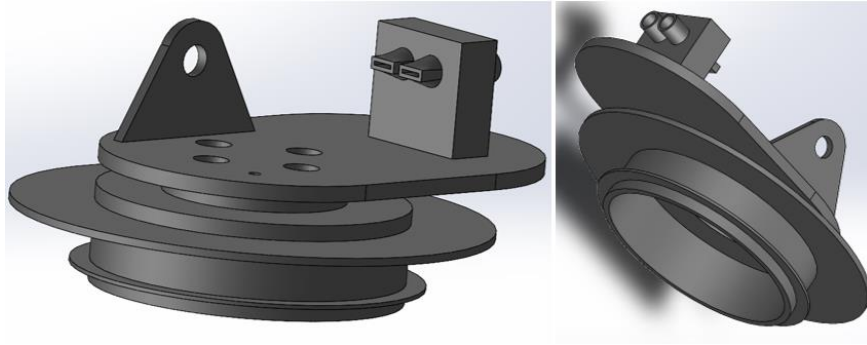
Sistemde Nozbart Hamsi ½ markalı pompa kullanılmıştır. Pompa 220/380 V, 50 Hz, 2800 dev/dk, 0.37 kW, 0,84 cosφ ve 1.73/1 A değerlerinde çalışabilmektedir. 10 m<sup>3</sup>/sa akış hızına sahiptir ve tuzlu sudan etkilenmemektedir.

Elektrolit, saf su kullanılarak temiz elektrolit tanklarında NaCl veya NaNO<sub>3</sub> tuzları kullanılarak istenilen iletkenlik seviyelerinde hazırlanmaktadır. Hazırlanan elektrolitin iletkenlik seviyesinin tankın her bölgesindeki değerleri AZ 86021 markalı iletkenlik ölçüm cihazıyla kontrol edilmektedir. Deney şartına ait elektrik iletkenliğine ulaşan elektrolit, frekans inventörü aracılığıyla mini elektrolit vanalarına iletilir. Kullanılacak elektrolit aparatına göre vanalar açılır (en fazla 4 vana). Kılıf üzerinden elektrolit iletim hortumları sabitlenerek elektrolit aparatına getirilir. Elektrolit aparatı 4 vida ile robot kola sabitlenir ve takım bağlanır. Elektrolit iletim hortumları, aparatın elektrolit iletim ucuna bağlanır ve sistem hazır hale gelir. Elektrolit akış sistemine ait fotoğraf Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 30. Elektrolit akış sistemi

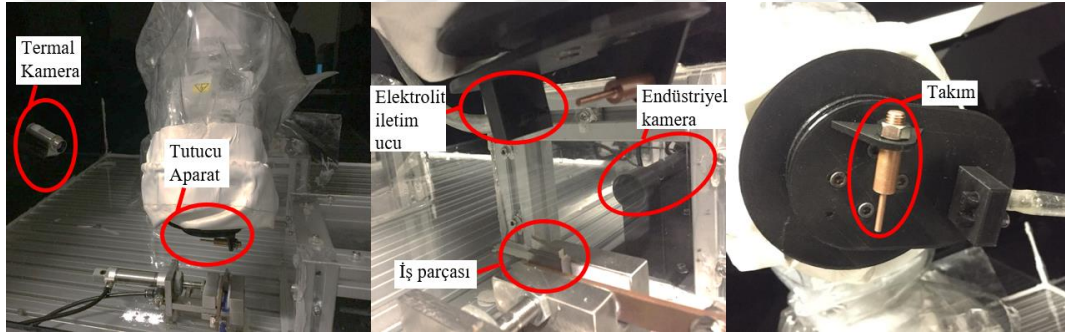
Aparatlar yapılacak işlemeye göre tasarlanmaktadır (Şekil 31). Elektrolit ile kimyasal reaksiyona girmemesi ve işleme kalitesini düşürmemesi için 3B yazıcı kullanılarak üretilmektedir. Her aparatın özel bir akış açısı ve elektrolit iletim ağzı vardır.



Şekil 31. Robot kol için tutucu aparat CAD modeli

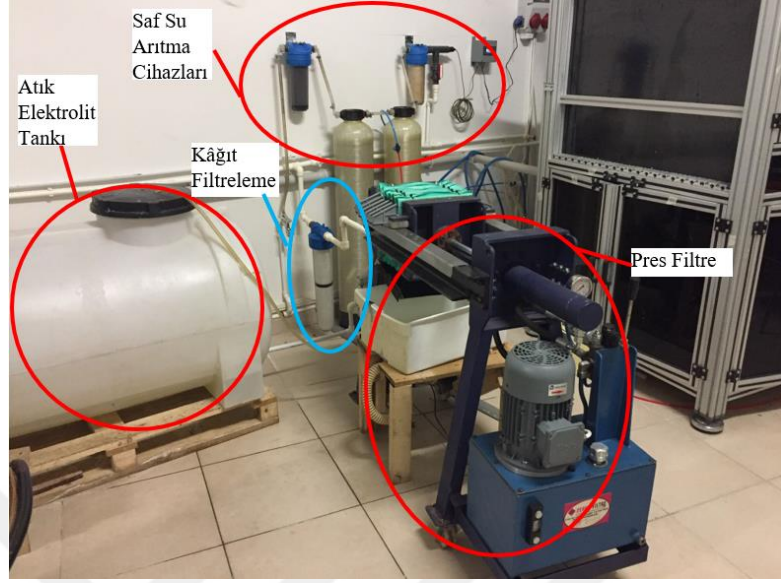


Elektrolit, içerdiği saf su ve tuz sebebiyle korozyon ve oksidasyona sebep olmaktadır. Robot kolun Ingress Protection'a göre koruma derecesi IP30'dur. Bu da katı cisimler için 2,5 mm ve üstü için korumalı; sıvılar için korumasız olduğunu göstermektedir. Robot kolun herhangi bir etkenden etkilenmemesi için kılıf yaptırılmıştır. Kılıfa oluşabilecek nem ve havasızlık durumu için cep yerleştirilmiştir. Ceplerde nem engelleyici silikalar bulunmaktadır. Ayrıca robot kolun, takım noktasından sıvı temasına maruz kalmaması için kılıf aparata bağlanmıştır (Şekil 32). 6. eksenin dönüş anında kılıfın hareketini sağlayabilmek için sıkıştırma yapılmıştır.



Şekil 32. Robot kolun aparat ile birleşimi

İşleme bölgesinden serbest yüklü iyonlar içeren malzemeler elektrolit ile işleme bölgesinden uzaklaştırılmaktadır. Atık elektrolit tankına iletimi sağlanan elektrolit tekrar kullanım için pres filtreye diafram pompa kullanılarak gönderilmektedir. Filtreler hareketli bir iticinin plakalara uyguladığı basınçla kapanmaktadır. Pres kapandıktan sonra plakalar, üniteler arası atık elektrolit girmektedir. Plakalara dolmaya başlayan elektrolit filtreden geçerken katı maddeler süzölmeye başlar. Pres süresi tamamlandığında hareketli itici geri çekilir ve plakalar manuel olarak açılarak plaka aralarında oluşan atık madde altta bulunan kovaya iletilir. Bu sayede atık elektrolit temizlenmektedir. Temizlenen elektrolit tekrar temiz elektrolit tankına iletilir ve kullanılır. Elektrolit arıtma sistemi Şekil 33'de gösterilmiştir.



Şekil 33. Elektrolit arıtma sistemi

#### 4.4. REKİ’de Robot Kol

Robot kol, saat ve saat yönünün tersine ( $\pm$ ) olarak dönebilen 6 eksenli oluşmaktadır. Her eksenin dönüş açıları (70-160 derece) ve boyutları birbirinden farklı olmaktadır (Tablo 2). Üst görünüş olarak incelendiğinde sadece robot kolun 6. ekseninin tam tersi yönünde hareket ve dönüş kısıtlaması vardır. Robot kol sağ ve sol olarak 165 derecelik (toplam 330 derece) dönüş imkânına sahiptir. Toplamda robot kol 580 mm çapında hareket alanına sahiptir. Bulunduğu konumun 112 mm altına ve 870 mm üstüne hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sayede robot kol ile her pozisyonda işleme imkânı sağlanmaktadır. Farklı açılardan yapılan işlemler ve bu işlemlerin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Pozisyon tekrarlanabilirliği 0.01 mm, maksimum nem %95 oranında ve 5-45 derece sıcaklık arasında çalışma (maksimum 70 derece sıcaklık dayanımı) özelliklerine sahiptir. Bu özellikler ile elektrolit sıcaklığının değişimlerinden ve nem durumundan etkilenmemektedir. Ayrıca eksen dönüşleri 280 derece/sn ve ivmelenme metre başına 0.07 saniyedir. Hızlanma özellikleri ile farklı hız değerlerinde işleme imkânı sağlamaktadır. Robot kolun haberleşmesi için bir robot kontrolcüsü gerekmektedir. IRB 120 modeli için IRC5 robot kontrolcüsü kullanılmaktadır. %95 maksimum nem ve 0-52 derece arası değerlerde çalışabilmektedir. Toza ve suya karşı sınırlı koruma olan IP54 koruma değerine sahiptir. Robotun, bilgisayar ve PLC ile haberleşmesi, Hubbox X1 marka endüstriyel switch kullanılarak sağlanmıştır.

#### 4.5. Güç Kaynağı

Kısa devrenin engellenmesi işlemlerin kalitesi için önemlidir. Kısa devre engellenmesi için analog sinyal ile kontrol edilebilen güç kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Güç kaynağının istenilmeyen yüksek akım değerlerine çıkmasının bir yazılım ile engellenebilmesi gerekmektedir. Bunun için REKİ’de akım ve voltaj değerlerinin sağlanması ve kısa devrenin önlenmesi için GW-Instek PSU 20-76 markalı DA güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı; 20 V, 76 A, 1520 W aralıkta güç sağlamaktadır. 3 adet kullanılmış ve 1 master, 2 slave olarak paralel bağlantıları yapılmıştır. 20 V, 228 A değerlerine ulaşılmıştır. Voltaj ve akım sırasıyla; %0.1 + 40 mV, %0.2 + 228 mA ekran doğruluk değerlerine sahiptir. Voltaj ve akım sırasıyla; %0.05 + 10 mV, %0.2 + 76 mA çıkış doğruluk değerlerine sahiptir. Tepki süresi 1 ms olarak belirtilmiştir. %90 nem ve 0-50°C değer aralığında çalışmaktadır. Güç kaynaklarında pulse özelliği kullanılabilir. İstenilen sürelerde ve voltaj/akım değerlerinde pulse özelliği aktif edilmektedir.

Artı ve eksi kutuplarından pnömatik mengene ve takım aparatına birer adet çok telli kablo kullanılmıştır. Ayrıca iletişimin sağlanması için PLC ile antigron kablo kullanılarak bağlanmıştır. Kontrolü için PLC kullanılmasına rağmen güç kaynağı üzerindeki led ekrandan da kontrol edilebilmektedir. Sistemde voltaj ve akım için belirli kısıtlayıcılar da eklenmiştir. Ayrıca voltajın iletimi için sinüsoidal, pulse gibi farklı metotlar kullanılmıştır.

#### 4.6. İş Parçası

REKİ’de deneylerde kullanılacak iş parçasının malzemesi inconel 718 olarak seçilmiştir. Malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir. Inconel 718; yüksek korozyon direnci, yüksek sertlik ve yüksek termal direnç ile uçak ve uzay sanayisinde en çok kullanılan ticari malzemedir. Nikel, krom ve molibdenden oluşmaktadır. Uçak ve uzay sanayisi dışında, nükleer reaktörlerde, roket parçalarında, tanklarda ve türbinlerde kullanılmaktadır. Kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3’te gösterilmiştir.



**Tablo 2.** Malzemelere ait kimyasal özellikler

<b>Elementler</b>	<b>Inconel 718</b>
<b>Alüminyum</b>	%0.2 - %0.8
<b>Karbon</b>	%0.08 (en fazla)
<b>Demir</b>	%12 - %24
<b>Nikel</b>	%50 - %55
<b>Titanyum</b>	%0.65 - %1.15
<b>Molibden</b>	%2.8 - %3.3
<b>Krom</b>	%17 - %21
<b>Niyobyum</b>	%4.75 + %5.5

**Tablo 3.** Malzemelere ait mekanik özellikler

<b>Özellikler</b>	<b>Inconel 718</b>
<b>Öz kütle (kg/m<sup>3</sup>)</b>	8220
<b>Akma dayanımı</b>	1172
<b>Çekme dayanımı</b>	1407
<b>Uzama miktarı</b>	%21

İş parçasının şekli; düzgün olmayan rasyonel temelli eğri (NURBS) ile oluşturulmuştur. NURBS; eğrileri ve yüzeyleri oluşturmak için bilgisayar modellemelerinde yaygın olarak kullanılan matematiksel bir hesaplama yöntemidir. Genel olarak sağladığı büyük esneklik sayesinde analitik ve modellerde yaygın olarak kullanılır. Bu özelliğinden dolayı CAD ve CAM çizimlerinde kullanılmaktadır.

NURBS yüzey fonksiyonu  $S(u,v)$  nedeniyle, serbest biçimli yüzey için normal vektörün fonksiyonunu elde etmek için birim normal teoremi Bölüm 3.6'da Denklem 1'de olduğu gibi kullanılabilir;

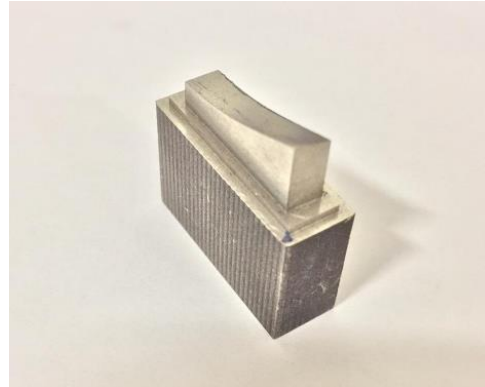
$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} P_{ij} T_{i,k}(u) T_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} T_{i,k}(u) T_{j,l}(v)} \quad (1)$$

$P_{ij}$ , 3B kontrol köşelerini,  $w_{ij}$   $P_{ij}$ 'nin ağırlığını,  $u$  ve  $v$  biparametrik doğrultularını,  $T_{i,k}$  ve  $T_{j,l}$  biparametrik  $u$  ve  $v$  doğrultularında dönmeyen temel fonksiyonları,  $k$  ve  $l$  ise temel eğri (B-Spline) tabanlı fonksiyonların mertebelerini göstermektedir.

Serbest forma sahip yüzeyin normal vektörünün fonksiyonu için Bölüm 3.6'da Denklem 2 kullanılabilir;

$$n(u, v) = \frac{S_u(u, v) \times S_v(u, v)}{|S_u(u, v) \times S_v(u, v)|} \quad (2)$$

İş parçası için yüzey ve ağ noktaları 3D modelleme üzerinden mesh ile belirlenip Mathematica'ya aktarılmıştır (Demirtas et al., 2017). Mesh noktaları kullanılarak;  $u$  ve  $v$  doğrultuları boyunca yüzey vektörleri, B-Spline temel fonksiyonları, NURBS yüzey modeli  $S(u,v)$  ve tüm noktalara ait normal vektörleri hesaplanır. Modellenen iş parçasının üretilmiş hali Şekil 34'te gösterilmiştir.

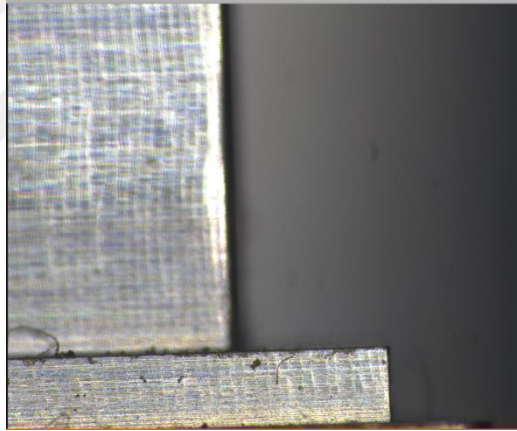


Şekil 34. İş parçası

#### 4.7. Görüntü İşleme

İşleme hassasiyetinin artırılması için REKİ’de görüntü işleme tekniği kullanılmıştır. İlk olarak referans iş parçasının ölçüleri belirlenmiştir. Referans olarak kullanılan iş parçası, 1 µm hassasiyete sahip bir lazer sensör kullanılarak pnömatik mengeneyle sabitlenmiştir. Diğer iş parçalarının konumlandırılması için referans iş parçasının konumu kullanılmıştır. Konumların belirlenmesi için endüstriyel kamera ve yakınlaştırma özelliği olmayan telesentrik lens kullanılmıştır.

LabView ortamında hazırlanan yazılımın içinde bulunan endüstriyel kameradan görüntü alınmıştır. 3B konumları görüntü işleme yöntemi kullanılarak sayısal olarak belirlenmiştir. İş parçasının 3 noktasına ait konumların koordinatları tespit edilmiştir (Şekil 35).



Şekil 35. Görüntü işlemede odaklanılan alan

İş parçasına ait yer değiştirme durumu için LabVIEW ortamında yeni görüntü elde edilerek, 2 görüntü arasındaki fark hesaplamaları ile belirlenmiştir. Koordinatlar alınan görüntülerden otomatik olarak belirlenerek iki iş parçası arasındaki mesafe değeri piksel olarak hesaplanmıştır. Mikrometre olarak değeri elde edebilmek için belirlenen kalibrasyon değeri ile çarpılmıştır. Kalibrasyon değeri, kameranın çözünürlüğü ve merceğin merkezinden iş parçasına olan uzaklığı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

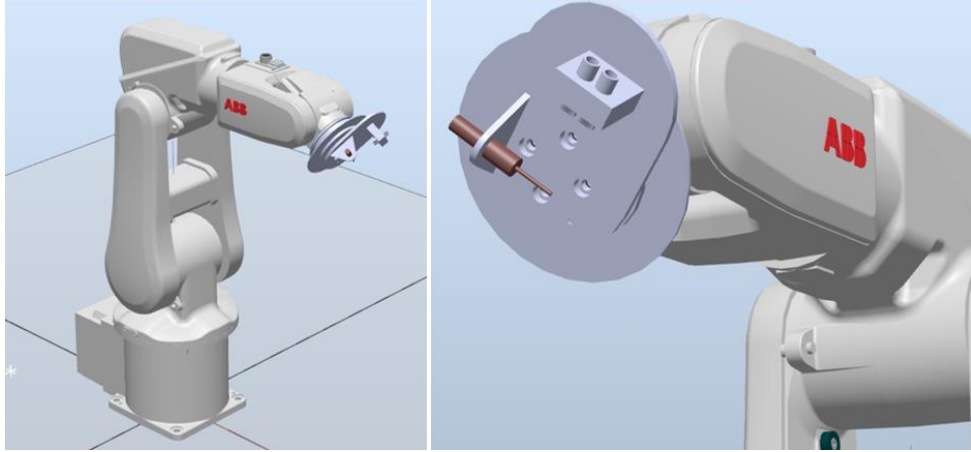
İşleme başlamadan önce mesafe mikrometre olarak hesaplanarak robot kola gönderilmiştir. Hesaplanan değer, robotik kolun işlemeye başlaması için önceden belirlenmiş hareketin başlangıç koordinatına eklenmektedir. Böylece robot kol, mikrometre hassasiyeti ile

yer değiştiren iş parçasına göre işleme hareketini yönlendirmektedir. Görüntü işleme ile tespit edilebilecek en küçük yer değiştirme 1,83  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir (Cebi et al., 2020)

#### 4.8. Robot Kol Hareketi

Robot kolun hareketi için RobotStudio<sup>®</sup> programı kullanılmıştır. RobotStudio üzerinden programlanan robot kol, flexpendant kullanılarak harekete geçirilmiştir. Sistem otomasyonu sağlandığı için direkt olarak hareket bilgisayar aracılığı ile sağlanabilmektedir. Robot kolun hareketi için; ilk olarak pnömatik mengeneye iş parçası sabitlenir ve koordinatları 3 noktadan belirlenir. Koordinatları belirlenen iş parçasının verileri PLC üzerinden endüstriyel kameraya bildirilir.

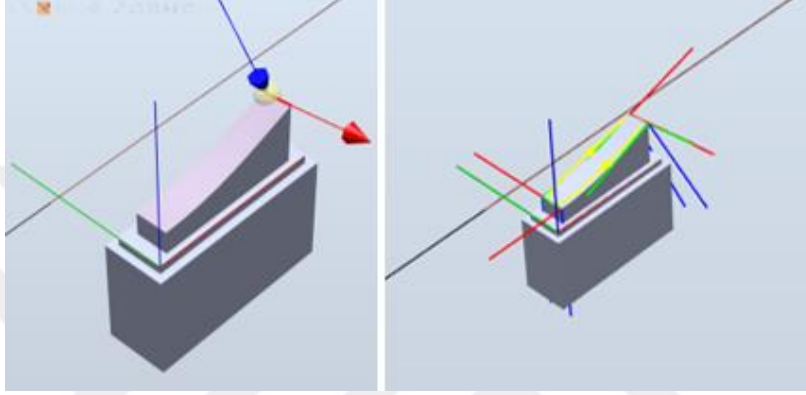
Robot kol ve aparatlarla birlikte takım RobotStudio ortamına aktarılır. Takım, tüm aparatları ve tutucu parçası ile birlikte bir bütün olarak modellenir. Takımın ağırlık merkezi ve işleme noktası belirlenir. Tüm değerler kontrol edildikten sonra iş parçası RobotStudio ortamına aktarılır (şekil 36). Robot kolun ve iş parçasının koordinatları RobotStudio'da konumlama değeri olarak yazılır. Calibdata üzerinden iş parçasının, takımın ve diğer ara elemanlarının konumları kontrol edilmektedir.



şekil 36. Robot kol, takım ve iş parçasının RobotStudio ortamındaki görünümü

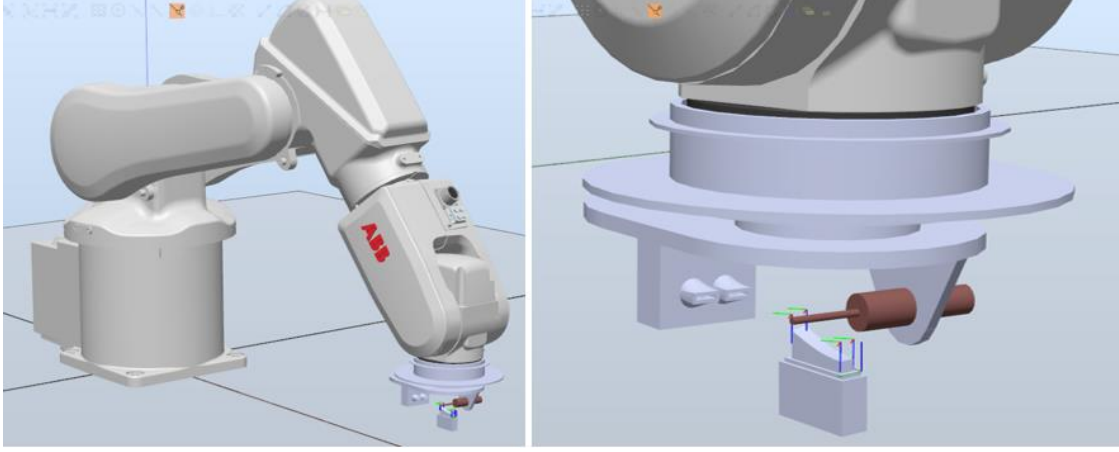
Tüm veriler yazıldıktan sonra iş parçası üzerinde işleme yoluna göre hedef oluşturulur. Hedef oluşturulurken; takım hızı, takım açısı, eksenlerin dönüşleri ve takımın konumlandırılması belirlenmesi gerekmektedir. Takım hızı için robot kola ait 5 mm/s'den başlayarak 1000 mm/s değerine kadar giden hız değerleri kullanılabilir. Takımın

yaklaşma açısı işleme kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bunun için takımın doğru konumlandırılması hem işleme kalitesi hem de robot kol eksenlerinin hareket kolaylığı açısından optimize edilmelidir. Robotun hedeflemesi ve takım yolu oluşturması Şekil 37’da gösterilmiştir.



**Şekil 37.** RobotStudio’da hedef ve takım yolu konumlandırması

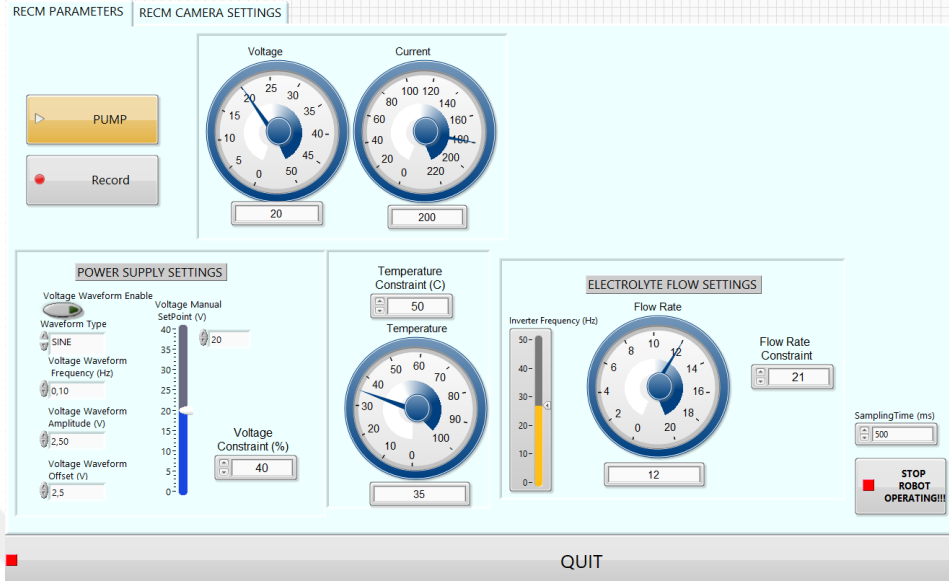
Takım yolunun simülasyonu oluşturularak hatalar kontrol edilir (Şekil 38). Rapid kodlar ile takım yolu için; takıma ait başlangıç ve acil durum konumları, yaklaşma ve uzaklaşma değerleri (mm), takım döngü süresi ve takım bekleme süresi özellikleri de kontrol edilebilmektedir. Rapid kodlarına otomasyonun kontrolü için bekleme süreleri eklenmiştir. Robot kol iş parçasına yaklaşırken otomasyonun hareketi ve iş parçasından uzaklaşırken sistemin kapatılması için bekleme süreleri konulmuştur. Rapid kod hazırlandıktan sonra flexpendant veya LabView ile robot kolun hareketi sağlanır.



Şekil 38. RobotStudio'da simülasyon

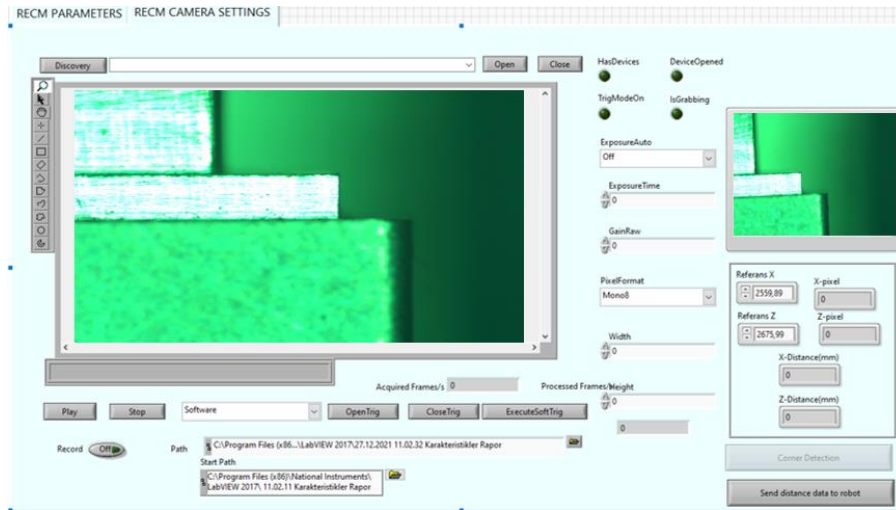
#### 4.9. Arayüz

REKİ'de parametrelerin kontrolü işleme kalitesi, yüzey pürüzlülüğü ve işleme doğruluğu için çok önemlidir. Parametrelerin kontrolü için her ekipmana göre LabView ortamında program hazırlanmıştır. Ayrıca programın içeriğinde acil durumlar için bir durdurma butonu eklenmiştir. Frekans inventörünün kontrolü için hem operatör hem bilgisayar üzerinden kullanım imkânı vardır. Frekans inventörü için LabView ortamında pompanın çalışmanın başlatılması ve durdurulması, hız ayarının yapılması ve acil durumda durdurulabilmesi için bir panel oluşturulmuştur. Termal kamera, akım ve voltaj değerleri için bir gösterim barı oluşturulmuştur. Akım değerinde sınırlandırmalar mevcuttur. Voltaj ve akım değerlerinde hata payları ve hata paylarına bağlı artış/azalış durumlarında durdurma özelliği olan bir bölüm eklenmiştir. Arayüz Şekil 39'de gösterilmiştir.



Şekil 39. Parametreler için arayüz

Endüstriyel kamera için hem görüntü alma hem de görüntü üzerinden nokta belirleme üzerine program yazılmıştır. 2. görüntü alındığı zaman ilk görüntüden yer değişimi hesaplanabilmesi için de ekstra bir sayısal değer bölümü hazırlanmıştır. İlk görüntüden elde edilen noktaların verileri girilip daha sonra çekilen görüntünün verileri ile karşılaştırılıp yeni yerleştirilen parçanın konumunun hesabı yapılmaktadır. Endüstriyel kameraya ait kullanım alanı Şekil 40'da gösterilmiştir.



Şekil 40. Endüstriyel kamera için arayüz

## BEŞİNCİ BÖLÜM

### 5. DENEYLER ve TARTIŞMA

REKİ’de birçok parametre kontrolü ile değişken parametreler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney şartları için; voltaj değeri 40 V, elektrolit iletkenliği 90 mS/cm, elektrolit türü NaNO<sub>3</sub>, elektrolit sıcaklığı 27°C, iş parçası inconel ve takım olarak bakır sabit olarak kullanılmıştır. Deney şartlarında değişken değerler; takım ilerleme hızı (mm/s), tur sayısı (parça üzerinde takımın her hareketi) ve elektrolit debisi (lt/dk) olarak belirlenmiştir. Toplamda 36 adet deney yapılmış ve yapılan deneylere ait değerler Tablo 4’te gösterilmiştir.

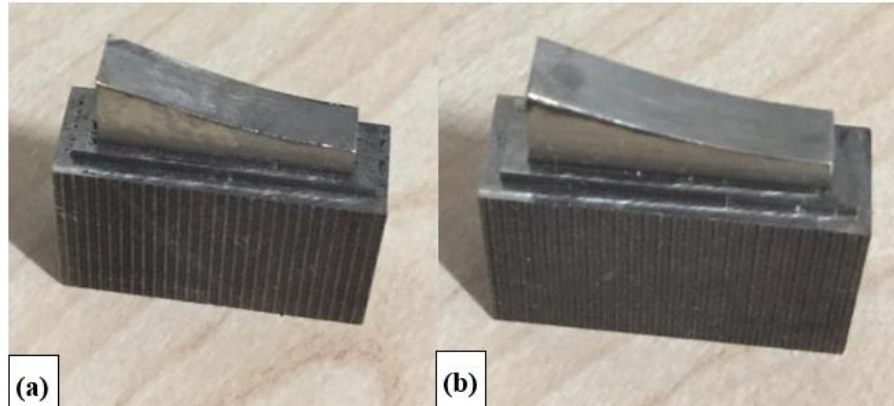
Tablo 4. Deney şartları

Parça Numarası	Takım Hızı (mm/s)	İlerleme	Tur Sayısı	Elektrolit Debisi (lt/dk)	İş Parçasının İlk Ağırlığı (mg)	İş Parçasının Son Ağırlığı (mg)	İşlenen Malzeme Miktarı (mg)	İşleme süresi (s)
1	5		2	2.55	31690	31680	10	16
2	5		5	2.55	31500	31480	20	40
3	5		8	2.55	31460	31430	30	64
4	5		11	2.55	31710	31680	30	88
5	5		2	3.52	30980	30970	10	16
6	5		5	3.52	31100	31080	20	40
7	5		8	3.52	31560	31530	30	64
8	5		11	3.52	32130	32090	40	88
9	5		2	4.38	31440	31420	20	16
10	5		5	4.38	31110	31080	30	40
11	5		8	4.38	31300	31260	40	64
12	5		11	4.38	32040	32000	40	88
13	10		2	2.55	31520	31510	10	8
14	10		5	2.55	31350	31330	20	20
15	10		8	2.55	31350	31330	20	32
16	10		11	2.55	32060	32010	50	44
17	10		2	3.52	31510	31510	0	8
18	10		5	3.52	31530	31510	20	20
19	10		8	3.52	31540	31510	30	32
20	10		11	3.52	32170	32140	30	44
21	10		2	4.38	32860	32850	10	8
22	10		5	4.38	31450	31430	20	20
23	10		8	4.38	31910	31870	40	32



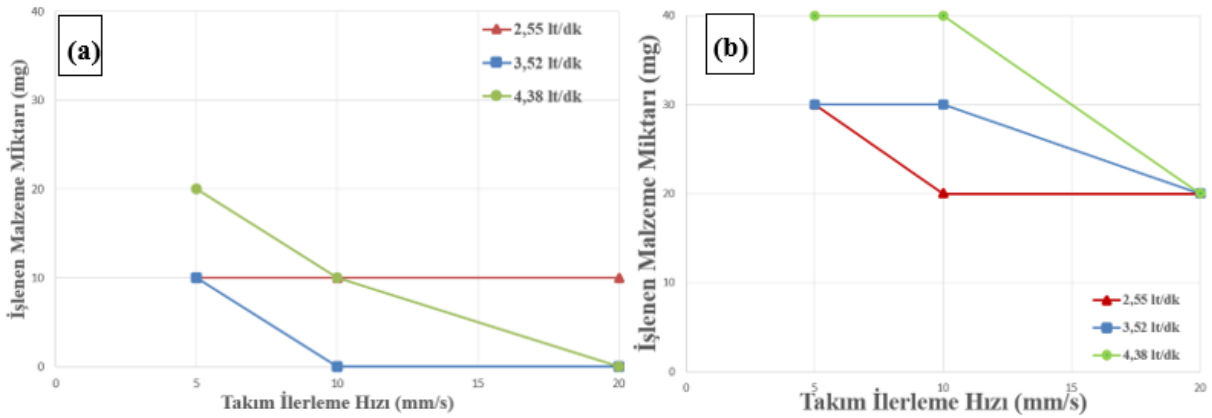
24	10	11	4.38	32200	32140	60	44
25	20	2	2.55	32250	32240	10	4
26	20	5	2.55	31370	31350	20	10
27	20	8	2.55	32170	32150	20	16
28	20	11	2.55	32190	32160	30	22
29	20	2	3.52	32030	32030	0	4
30	20	5	3.52	31100	31080	20	10
31	20	8	3.52	31810	31790	20	16
32	20	11	3.52	31100	31070	30	22
33	20	2	4.38	31780	31780	0	4
34	20	5	4.38	31970	31960	10	10
35	20	8	4.38	31690	31670	20	16
36	20	11	4.38	31010	30980	30	22

Tablo 4’te elde edilen sonuçlar incelendiğinde tur sayısının 2 olduğu durumlarda işlenen malzeme miktarının sadece 1 deney şartı için 20 mg olduğu, 3 deney şartında ise 0 mg olduğu belirlenmiştir. Bu durum deneyler için 2 tur sayısının yetersiz olduğunu göstermektedir. 2 tur sayısının olduğu deneylerin iş parçası yüzeylerinde CNC sonrası oluşan freze izlerinin giderilemediği belirlenmiştir. Tur sayısının en az 5 olması işlenen malzeme miktarında bir değişime sebep olduğu belirlenmiştir. Şekil 41’de 2 tur sayısı ile 11 tur sayısına sahip iş parçasının yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 41a’da gösterilen iş parçası yüzeyinde freze izlerinin belirgin bir şekilde olduğu görülmektedir. Şekil 41b’de ise iş parçasının yüzeyinde freze izlerinin görülmediği ve köşe noktalarında parlaklık olduğu görülmektedir. Tur sayısı hariç tüm parametreler sabit tutulduğunda yüzey parlaklığında artış gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise tur sayısının işleme süresini arttırması olarak belirlenmiştir.



Şekil 41. 10 mm/s takım ilerleme hızı 2.55 lt/dk elektrolit debisi a) 2 tur b) 11 tur

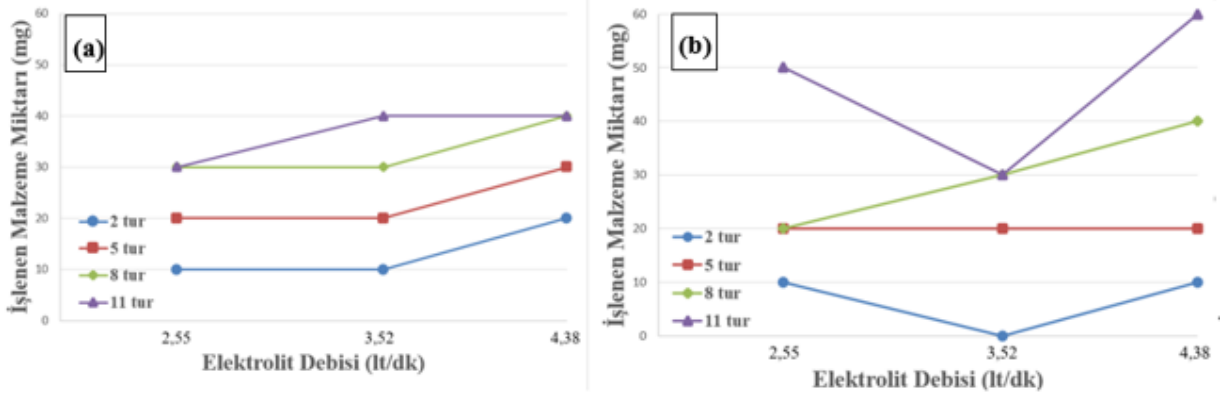
Tur sayısının artması ile işlenen malzeme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. 11 tur ile yapılan işlemlerin tümünde en fazla işlenen malzeme miktarına ulaşıldığı, 2 tur ile yapılan işlemlerin tümünde ise en az işlenen malzeme miktarına ulaşıldığı belirlenmiştir. 8 tur yapılan işlemlerde ise ortalama işlenen malzeme miktarı 27,777 mg olmuştur. 8 tur için işlenen malzeme miktarı; en yüksek 40 mg olurken, en az 20 mg olmuştur. 11 tur için işlenen malzeme miktarı; en yüksek 60 mg olurken, en düşük 30 mg olmuştur. Bu durum Şekil 41’de gösterilen işlenmiş iş parçalarının yüzey durumlarını da açıklamaktadır. Şekil 42’de tur sayısının takım ilerleme hızına göre işleme etkisine ait grafikler gösterilmiştir. Şekil 42a ve Şekil 42b incelendiğinde yapılan işlemlerde tur sayısından bağımsız olarak takım ilerleme hızı arttıkça işleme miktarının stabil kaldığı ya da düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 42a incelendiğinde 2 tur için; 2.55 lt/dk elektrolit debisinde farklı takım ilerleme hızlarında işleme miktarına etki etmediği belirlenmiştir. Şekil 42a’da diğer elektrolit debileri için takım ilerleme hızlarının artmasıyla birlikte işleme miktarının düştüğü belirlenmiştir. Şekil 42b’de tüm elektrolit debilerinde takım ilerleme hızlarının artmasıyla işleme miktarının düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 42. Belirli tur sayıları için takım ilerleme hızının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 2 tur b) 8 tur

Tablo 4’e göre takım ilerleme hızı incelendiğinde takım ilerleme hızı arttıkça işlenen malzeme miktarında azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durum takım ilerleme hızının artması ile işleme süresinin düşmesi olarak açıklanmaktadır. Tur sayısına bağlı olarak yapılan işlemlerde

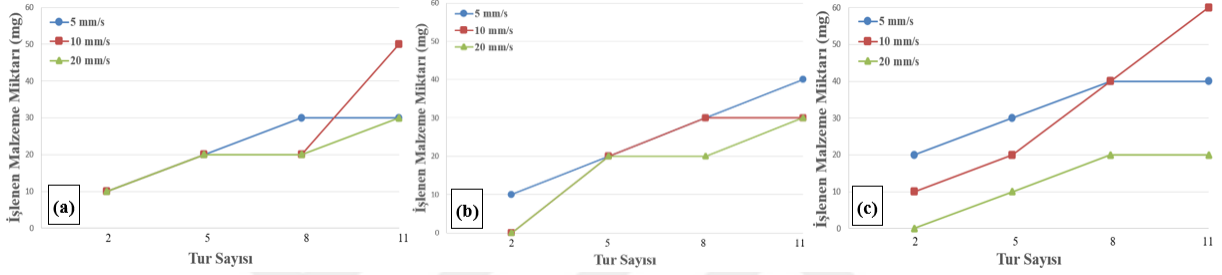
tur sayısı aynı tutulup takım ilerleme hızı artırıldığında işleme süresi düşmektedir. Kısacası; 5 mm/s takım ilerleme hızında tur başına 8 saniye işleme süresi olurken, 20 mm/s takım ilerleme hızında tur başına 2 saniye işleme süresi olmaktadır ve bu durum Tablo 4'te işleme süresinde belirtilmiştir. Şekil 43a'da gösterilen 5 mm/s takım ilerleme hızının ortalama işlenen malzeme miktarı 26.677 mg iken Şekil 43b'de gösterilen 10 mm/s takım ilerleme hızının 25.833 mg olmuştur. Ayrıca en yüksek ilerleme hızında yapılan işlemlerde ortalama işlenen malzeme miktarı 16.677 mg olmuştur. 5 mm/s ve 10 mm/s takım ilerleme hızlarının işlenen malzeme miktarları aynı koşullar için karşılaştırıldığında 2 deney şartı dışında tüm şartlar için 5 mm/s takım ilerleme hızının daha yüksek işleme miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. 20 mm/s takım ilerleme hızının işleme süresine de bağlı olarak en düşük işleme miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneylerde 3 defa iş parçasının gramajının değişmediği belirlenmiş ve bu 3 durumun 2'sinin 20 mm/s takım ilerleme hızında, diğerinin ise 10 mm/s takım ilerleme hızında olduğu belirlenmiştir. 5 mm/s takım ilerleme hızında ise iş parçasında gramaj değişikliği gerçekleşmiştir. Şekil 43a'da 11 tur hariç; 2.55 lt/dk ve 3,52 lt/dk elektrolit debilerinde yapılan işlemlerde işlenen malzeme miktarının sabit kaldığı 4,38 lt/dk elektrolit debisinde ise artış olduğu belirlenmiştir. 3,52 lt/dk elektrolit debisinden 4,38 lt/dk elektrolit debisine geçişte işlenen malzeme miktarındaki artışın Şekil 43b'de de gerçekleştiği belirlenmiştir.



**Şekil 43.** Belirli takım ilerleme hızlarında farklı tur sayıları için elektrolit debisinin işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 5 mm/sn tur b) 10 mm/sn

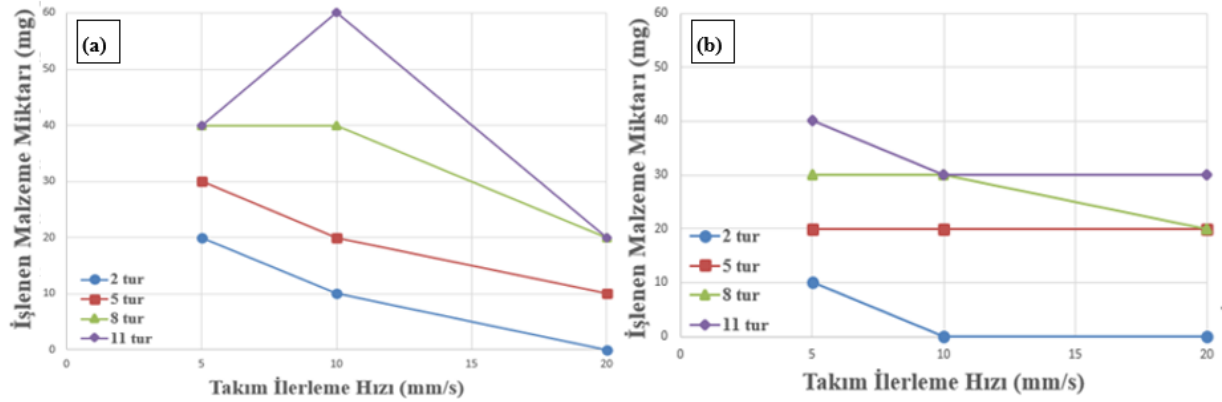
Elektrolit debisinin artırılması ile işleme bölgesinde işlenmiş malzemenin uzaklaştırılmasını hızlandırmaktadır. Elektrolit debisinin 4.38 lt/dk olduğu deney şartlarında

işleme miktarının yüksek olduğu, elektrolit debisinin 2.55 lt/dk olduğu deney şartlarında ise işleme miktarının düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 44'te gösterilen grafikler incelendiğinde tüm elektrolit debileri için tur sayısının artması ile işleme miktarının stabil kaldığı ya da arttığı belirlenmiştir. Şekil 44a, Şekil 44b ve Şekil 44c için 20 mm/s takım ilerleme hızında en düşük işlenen malzeme miktarı olduğu belirlenmiştir. Şekil 44b ve Şekil 44c'de işlenen malzeme miktarının 2 tur sayısında değişmediği durumlar olduğu belirlenmiştir. Şekil 44c'de en yüksek işleme miktarı 60 mg değerine ulaşılmıştır.



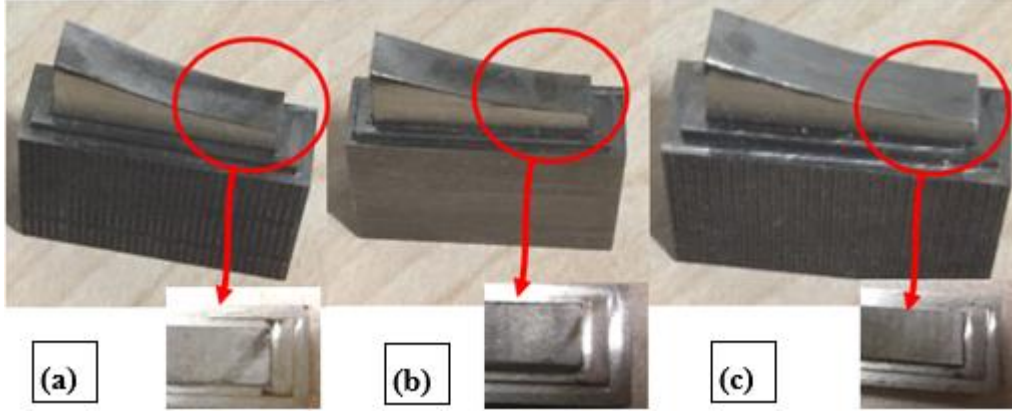
**Şekil 44.** Belirli elektrolit debilerinde farklı takım ilerleme hızları için tur sayısının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 2.55 l/dk. b) 3.52 l/dk. ve c) 4.38 l/dk.

Elektrolit debisinin takım ilerleme hızına göre işleme miktarına etkisi incelendiğinde takım ilerleme hızının artması ile sadece 1 durumda artış olduğu; diğer durumlar için stabil ya da azalma olduğu belirlenmiştir. Artış olan durum incelendiğinde bu durumun robot kolun hareket hassasiyeti üzerine olabileceği belirlenmiştir. Şekil 45'a ve Şekil 45b'deki grafikler incelendiğinde 2 tur için 20 mm/s ilerleme hızında işleme miktarının değişmediği, 5 tur için 10 mm/s değerinde de işleme miktarının değişmediği belirlenmiştir.



**Şekil 45.** Belirli elektrolit debilerinde farklı tur sayıları için takım ilerleme hızının işlenen malzeme miktarı ile değişimi a) 3.52 l/dk. ve b) 4.38 l/dk.

Elektrolit debisinin etkisi ile iş parçası yüzeyinde izler oluşmuştur. 4.38 lt/dk elektrolit debisinin olduğu deney şartlarında iş parçası yüzeyinde elektrolitin giriş yönünden çıkış yönüne doğru bir iz oluşturduğu belirlenmiştir. Şekil 46'te iş parçası üzerinde oluşan izler gösterilmiştir. Elektrolit debisine bağlı olarak Şekil 46a'da 4.38 lt/dk elektrolit debisinin iş parçası üzerinde oluşturduğu iz belirgin bir şekilde gözükmemektedir. Şekil 46b'de 3.52 lt/dk ile yapılan işlemede ise iş parçasının üzerinde iz yine belirgin bir şekilde gözükmemekte olsa da Şekil 46a'ya göre belirginliğini kaybetmeye başladığı gözlenmektedir. Şekil 46c'de ise iz tamamen kaybolmuştur. EKİ'de oluşan bu izleri Kozak ve Zybura-Skrabalak (2016a) yaptığı çalışmada incelemiş ve bu durumu iş parçası yüzeyinde oluşan çözünen malzemelerin oluşturduğu desenler olarak adlandırmıştır. Ortalama işlenen malzeme miktarı baz alındığı zaman 2.55 lt/dk elektrolit debisinde yapılan işlemede 22.5 mg olmuştur.



**Şekil 46.** Elektrolit debisinin iş parçası üzerindeki etkisi a) 4.38 lt/dk elektrolit debisi b) 3.52 lt/dk elektrolit debisi c) 2.55 lt/dk elektrolit debisi

## SONUÇ ve ÖNERİLER

EKİ, serbest form yüzeylere sahip işlenmesi zor malzemelerin işlenebilmesi için etkili bir alışılmamış imalat yöntemi olarak kabul edilmektedir. Yüksek işleme kalitesi, düşük yüzey pürüzlülüğü, düşük takım maliyeti, bitirme işlemlerine gerek olmaması, kolay takım tasarımı, termal bozunma olmaması ve artık stres oluşturmaması EKİ'nin medikal, otomotiv, savunma, havacılık ve uzay sanayisinde kullanılmasını sağlamaktadır. EKİ'de matematiksel modellemelerde ve işlenen malzeme miktarında belirsizlikler nedeniyle yapılan işlemlerin yüzey kalitesi deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. 6 eksenli bir robot kol ve görüntü işleme yöntemi kullanılarak bu belirsizliklerin ortadan kaldırılmıştır.

REKİ, robotik bir kolun hareket kabiliyeti ve esnekliği kullanılarak EKİ prosesi ile birleştirilmesiyle oluşan yeni bir tümleşik işleme yöntemidir. Bu yöntem, robot kolun ucuna bağlı takım tutucu bir aparat ile iş parçası üzerine doğru akım kullanılarak elektrolit püskürtülmesiyle yapılan işleme türüdür. REKİ, şekillendirilmesi ve işlenmesi zor parçaların daha kolay ve hızlı bir şekilde işlenmesini sağlayacak bir yöntemdir. REKİ tezgahının boyutlandırması kullanılacak olan robot kola göre ayarlanmış ve işleme alanı genişletilmiştir. Yüksek akım içerdiği için tezgah zemini pleksiglas malzeme ile kapatılmış ve epoksi ile kaplanmıştır. Tezgahın ana iskeletini oluşturan alüminyum eloksal kaplı sigma profiller kullanılarak elektrolitin korozif etkisinden ve olası kısa devre oluşumlarında tüm sistemin korunması sağlanmıştır. Elektrolit sıçramalarının engellenmesi için her yönden pleksiglass malzeme ile kapatılmıştır. Alt bölmelere elektrolit geçişi engellenmiş ve sistemin otomasyonu için gerekli üniteler bu bölümlere eklenmiştir. Robot kolu kontrol edebilmek için bir robot kontrolcüsü, elektriksel gücü sağlayabilmek için 3 adet DA güç kaynağı, sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesi için termal kamera, konumlandırma ve görüntü işleme için endüstriyel kamera, sistem aydınlatması için bir led lamba, elektrolit akışının sağlanabilmesi ve kontrol edilebilmesi için frekans inventörü ve ultrasonik debimetre eklenmiştir. Tüm bu cihazların birbirleriyle haberleşmesi için bir adet PLC kullanılmıştır. PLC'nin diğer cihazlarla Ethernet yoluyla haberleşmesi için bir adet endüstriyel dağıtıcı da kullanılmıştır.

LabView ortamında oluşturulan arayüz ile sıcaklık, elektrolit debisi, voltaj ve akım değerlerinin kontrolü sağlanmıştır. Voltaj ve elektrolit debi değerleri arayüz üzerinden ayarlanabilmektedir. Ayrıca pompanın çalıştırılması ve durdurulması da arayüz ile yapılmıştır.

Arayüze ayrıca kısa devreleri engelleyebilmek için bir kısıtlayıcı eklenmiştir. Kısıtlayıcı devreye girdiği zaman takımın bulunduğu konumdan 20 mm Z yönünde (yukarı) hareket etmekte ve sistem güvenli durumunda hareket öncesi konumuna geri dönerek işlemeye devam etmesi sağlanmıştır.

Elektrolit debisi, tur sayısı ve takım ilerleme hızı parametreleri kullanılarak inconel iş parçası için 36 deney şartı hazırlanmıştır. İşlenen iş parçaları incelendiğinde 2 tur sayısına sahip deney şartlarında iş parçası yüzeyinde freze izlerinin görüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca 2 tur ile yapılan işlemlerde 2 deney şartında işlenen malzeme miktarı değişmemiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre işleme miktarının değerlendirilebilmesi için tur sayısının en az 5 olması gerektiği belirlenmiştir. 11 tur sayısı ile yapılan işlemede ise 60 mg ile en yüksek işlenen malzeme miktarına ulaşılmıştır. Ortalama işlenen malzeme miktarları incelendiğinde; 37.77 mg ile 11 tur sayısı en fazla, 7.77 mg ile 2 tur sayısı en az işlenen malzeme miktarı olduğu belirlenmiştir. Tur sayılarının artması ile işlenen malzeme miktarının artacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Takım ilerleme hızı parametresine göre ortalama işlenen malzeme miktarı incelendiğinde; 5 mm/s en düşük takım ilerleme hızında 28.89 mg ile en yüksek, 20 mm/s en yüksek takım ilerleme hızında 16.67 mg ile en düşük işlenen malzeme miktarına ulaşıldığı belirlenmiştir. 20 mm/s takım ilerleme hızında 2 defa, 10 mm/s takım ilerleme hızında 1 defa işlenen malzeme miktarı 0 olmuştur. 5 mm/s takım ilerleme hızına ait tüm deney şartlarında işlenen malzeme miktarında değişim olmuştur. Takım ilerleme hızının artması ile işleme süresinin azaldığı ve bu durumun işlenen malzeme miktarının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

4.38 lt/dk elektrolit debisinde 24.44 mg ile en yüksek ortalama işlenen malzeme miktarına ulaşılmıştır. Ayrıca en yüksek işlenen malzeme miktarına 60 mg ile 4.38 lt/dk elektrolit debisinde ulaşılmıştır. Elektrolit debisinin artması ile işleme miktarının arttığı belirlenmiştir. Takımı tutan aparatın elektrolit iletim ucu iş parçasına 45°'lik açıyla durmaktadır. Elektrolit debisinin etkisiyle birlikte iş parçası üzerinde elektrolitin iz oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum elektrolit debisinin azalması ile etkisini kaybetmiştir.

## KAYNAKÇA

ABB, R. (2004). *Product specification IRB 2400*.

Anasane, S. S., & Bhattacharyya, B. (2017). Experimental investigation into micromilling of microgrooves on titanium by electrochemical micromachining. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.06.016>

Ao, S., Qin, X., Li, K., & Luo, Z. (2021). Effects of process parameters on jet electrochemical machining of SiC particle-reinforced aluminum matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(11–12), 3351–3361.

Ayyappan, S., & Sivakumar, K. (2014). Experimental investigation on the performance improvement of electrochemical machining process using oxygen-enriched electrolyte. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1–4), 479–487.

CAO, W., WANG, D., REN, Z., & ZHU, D. (2021). Evolution of convex structure during counter-rotating electrochemical machining based on kinematic modeling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(3), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.003>

Cebi, A., Demirtas, H., Aslan, M. T., Yilmaz, O., Kanber, B., & Kaleli, A. R. (2020). A novel machine tool concept: Robotic electrochemical machining. *Procedia Manufacturing*, 54(2019), 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.031>

Chen, W., & Han, F. (2019). Short-circuit avoidance in electrochemical machining based on polarization voltage during pulse off time. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 2531–2539. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03364-3>

Chen, X., Zhang, Q., & Sun, Y. (2019). Model-Based Compensation and Pareto-Optimal Trajectory Modification Method for Robotic Applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(7), 1127–1137. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00124-x>

Cordes, M., Hintze, W., & Altintas, Y. (2019). Chatter stability in robotic milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.004>

Dabrowski, L., & Paczkowski, T. (2005). Computer simulation of two-dimensional electrolyte flow in electrochemical machining. *Elektrokhimiya*, 41(1), 102–110.

Darvekar, S., Rao, A. B. K., & Ganesh, S. S. (2021). Machining capability of a 2-D of parallel kinematic machine tool and conventional CNC milling machine. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3213–3218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.376>

Demirtas, H., Üniversitesi, S., & Yilmaz, O. (2016). Development of a desktop size electrochemical machine for micro/macro manufacturing. *International Conference on Machine Design and Production, Bursa, Türkiye*.

Demirtas, H., Yilmaz, O., & Kanber, B. (2017). A simplified mathematical model development for the design of free-form cathode surface in electrochemical machining. *Machining Science and Technology*, 21(1), 157–173. <https://doi.org/10.1080/10910344.2016.1275192>

Devanathan, C., Giri, R., Dinesh, C., & Gajesh, B. (2021). Influence of process parameters on MRR and taper cut in micro drilling of SS304 using electrochemical machining. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.1000>

Er, M. (2005). Endüstriyel Robotlar. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 69,78.



- Fu, R., Curley, P., Higgins, C., Kilic, Z. M., Sun, D., Murphy, A., & Jin, Y. (2022). Double-sided milling of thin-walled parts by dual collaborative parallel kinematic machines. *Journal of Materials Processing Technology*, 299(September 2021), 117395.
- Guo, J., Zhu, D., & Zhu, D. (2021). Flow field design and experimental investigation of electrochemical machining on blisk. *Chinese Journal of Aeronautics*, September, 1–9.
- Hizume, S., & Natsu, W. (2018). Influence of Machining Conditions on ECM Characteristics of Titanium Alloy in Shape Generation by Scanning Tool Electrode. *Procedia CIRP*, 68, 746–750.
- Ji, W., & Wang, L. (2019). Industrial robotic machining: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1–4), 1239–1255.
- Keerthivasan, T., Kaushik, P., Mirunalini, P., & Surendhiran, J. (2020b). Design and analysis of erosion in electrochemical machining tool. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 182–186. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.012>
- Kim, S. H., Nam, E., Ha, T. I., Hwang, S. H., Lee, J. H., Park, S. H., & Min, B. K. (2019). Robotic Machining: A Review of Recent Progress. In *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* (Vol. 20, Issue 9, pp. 1629–1642). SpringerOpen.
- Klimchik, A., & Pashkevich, A. (2018). Robotic manipulators with double encoders: accuracy improvement based on advanced stiffness modeling and intelligent control. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 740–745.
- Korkmaz, G. Ş. (2018). *Al-6061 Alaşımı için Uygun Elektrokimyasal İşleme Parametrelerinin ve Elektrolitin Araştırılması*.
- Kozak, J., & Zybura-Skrabalak, M. (2016b). Some Problems of Surface Roughness in Electrochemical Machining (ECM). *Procedia CIRP*, 42, 101–106.
- Kumar, A., & Pabla, B. S. (2021). Review on optimized process parameters of electrochemical machining and its variants. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10854–10860.
- Li, C., Wu, H., Eskelinen, H., Handroos, H., & Li, M. (2020). Design and implementation of a mobile parallel robot for assembling and machining the fusion reactor vacuum vessel. *Fusion Engineering and Design*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111966>
- Lin, Y., Zhao, H., & Ding, H. (2017). Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.02.002>
- Liu, G., Tong, H., Li, Y., Zhong, H., & Tan, Q. (2020). Multiphysics research on electrochemical machining of micro holes with internal features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(5–6), 1527–1542.
- Liu, W., Luo, Z., Li, Y., Liu, Z., Li, K., Xu, J., & Ao, S. (2019). Investigation on parametric effects on groove profile generated on Ti1023 titanium alloy by jet electrochemical machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9–12), 2357–2370.
- Lu, L., Zhang, J., Fuh, J. Y. H., Han, J., & Wang, H. (2020). Time-optimal tool motion planning with tool-tip kinematic constraints for robotic machining of sculptured surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101969>
- Mayank, G., Fuchen, C., & Masanori, K. (2018). Analysis of Reactions Determining Current Efficiency in Electrochemical Machining. *Procedia CIRP*, 68, 511–516.
- Merlet, J. P. (2006). Parallel robots. In *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology*.

- Modi, R. (2017). Experimental Investigation of Machining Parameter in Electrochemical Machining. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Mousavi, S., Gagnol, V., Bouzgarrou, B. C., & Ray, P. (2017). Model-based stability prediction of a machining robot. *Mechanisms and Machine Science*, 46, 379–387.
- Natsu, W., He, J., & Iwanaga, Y. (2020). Experimental Study on Electrochemical Machining with Electrolyte Confined by Absorption Material. *Procedia CIRP*, 87, 263–267.
- Natsu, W., & Terada, A. (2012). Approach to detect and control gap-width with peak current in pulse ECM. *Advanced Materials Research*, 482–484, 1973–1978.
- Neto, J. C. da S., Silva, E. M. da, & Silva, M. B. da. (2006). Intervening variables in electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1–3), 92–96.
- Nubiola, A., & Bonev, I. A. (2013). Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 236–245.
- Rajurkar, K. P., Sundaram, M. M., & Malshe, A. P. (2013). Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 6, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>
- Sabourin, M., Paquet, F., Hazel, B., Côté, J., & Mongenot, P. (2010). Robotic approach to improve turbine surface finish. *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, CARPI 2010*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CARPI.2010.5624446>
- Sakamoto, M., & Natsu, W. (2020). Study on Machining Instability Phenomenon in Electrochemical Machining of Large Aspect-ratio Holes. *Procedia CIRP*, 95, 777–781.
- Saravanan, K. G., Prabu, R., Venkataramanan, A. R., & Beyessa, E. T. (2021). Impact of Different Electrolytes on the Machining Rate in ECM Process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1432300>
- Shivesh, C., Gaurav, S., Surjeet, S., & Abhishant, S. (2016). Effect of various process parameters on material removal rate on mild steel in electrochemical machining. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 5(2), 54–58.
- Skoczypiec, S. (2016). Discussion of ultrashort voltage pulses electrochemical micromachining: a review. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 87, Issues 1–4, pp. 177–187). Springer London.
- Susemihl, H., Brillinger, C., Stürmer, S. P., Hansen, S., Boehlmann, C., Kothe, S., Wollnack, J., & Hintze, W. (2017). Referencing Strategies for High Accuracy Machining of Large Aircraft Components with Mobile Robotic Systems. *SAE Technical Papers, Part F1298*(September).
- Tang, L., Fan, Z. J., Zhao, G. G., Yang, F., & Yang, S. (2016). High Aspect Ratio Deep Spiral Tube Electrochemical Machining Technology. *Procedia CIRP*, 42(Isem Xviii), 407–411.
- Tang, L., Li, B., Yang, S., Duan, Q., & Kang, B. (2014). The effect of electrolyte current density on the electrochemical machining S-03 material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), 1825–1833. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5617-x>
- Tao, B., Zhao, X. W., & Ding, H. (2019). Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. *Science China Technological Sciences*, 62(8), 1388–1400.
- Tao, J., Zeng, H., Qin, C., & Liu, C. (2019). Chatter detection in robotic drilling operations combining multi-synchrosqueezing transform and energy entropy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(7–8), 2879–2890.
- van der Velden, T., Rommes, B., Klink, A., Reese, S., & Waimann, J. (2021). A novel approach for the efficient modeling of material dissolution in electrochemical machining. *International Journal of Solids and Structures*, 229, 111106.

Verl, A., Valente, A., Melkote, S., Brecher, C., Ozturk, E., & Tunc, L. T. (2019). Robots in machining. *CIRP Annals*, 68(2), 799–822. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.009>

Volgin, V. M., Lyubimov, V. v., Kabanova, T. B., & Davydov, A. D. (2021). Theoretical analysis of micro/nano electrochemical machining with ultra-short voltage pulses. *Electrochimica Acta*.

Wang, D., Li, J., He, B., & Zhu, D. (2019). Analysis and control of inter-electrode gap during leveling process in counter-rotating electrochemical machining. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(11), 2557–2565.

Wang, F., Yao, J., & Kang, M. (2020a). Electrochemical machining of a rhombus hole with synchronization of pulse current and low-frequency oscillations. *Journal of Manufacturing Processes*, 57(40), 91–104.

Wang, J., Xu, Z., Liu, J., & Tang, X. (2021). Real-time vision-assisted electrochemical machining with constant inter-electrode gap. *Journal of Manufacturing Processes*, 71(June), 384–397.

Wang, J., Xu, Z., Wang, J., Xu, Z., & Zhu, D. (2021). Electrochemical machining of blisk channels with rotations of the cathode and the workpiece. *International Journal of Mechanical Sciences*, 208(March), 106655.

Wang, J., Xu, Z., Wang, J., & Zhu, D. (2020). Electrochemical machining on blisk channels with a variable feed rate mode. *Chinese Journal of Aeronautics*.

Wang, Y., Xu, Z., Hu, J., & Zhang, A. (2020). Surface integrity analysis of electrochemical machining of  $\gamma$ -TiAl alloys. *Materials Today Communications*, 25(May), 101686.

Wang, Y., Xu, Z., Liu, J., Zhang, A., Xu, Z., Meng, D., & Zhao, J. (2021). Study on flow field of electrochemical machining for large size blade. *International Journal of Mechanical Sciences*, 190(February 2020), 106018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106018>

Wang, Y., Xu, Z., & Zhang, A. (2020). Anodic characteristics and electrochemical machining of two typical  $\gamma$ -TiAl alloys and its quantitative dissolution model in NaNO<sub>3</sub> solution. *Electrochimica Acta*, 331, 135429. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135429>

Xu, Z., Chen, X., Zhou, Z., Qin, P., & Zhu, D. (2016). Electrochemical Machining of High-temperature Titanium Alloy Ti60. *Procedia CIRP*, 42(Isem Xviii), 125–130.

Yan, S., Xu, X., Yang, Z., Zhu, D., & Ding, H. (2019). An improved robotic abrasive belt grinding force model considering the effects of cut-in and cut-off. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 496–508. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.029>

Yu, L., Zhu, D., Yang, Y., & Zhao, J. (2020). Improvement of leading-edge accuracy by optimizing the cathode design plane in electrochemical machining of a twisted blade. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(4).

Zhu, D., Liu, C., Xu, Z., & Liu, J. (2016). Cathode design investigation based on iterative correction of predicted profile errors in electrochemical machining of compressor blades. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(4), 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.01.003>

Zhu, D., Yu, L., Zhao, J., Liu, J., & Xu, Z. (2019). Research on shaping law in electrochemical machining for the leading/trailing edge of the blade. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(1–4), 559–565. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3191-3>

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdulkadir ÇEBİ

Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2014, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği (2019 Mezun)
- 2020, Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Araştırma Görevlisi

### Yayımları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Cebi, A., Demirtas, H., Aslan, M. T., Yilmaz, O., Kanber, B., & Kaleli, A. R. (2021). A novel machine tool concept: Robotic electrochemical machining. *Procedia Manufacturing*, 54, 203-208.
- Çebi, A, Aslan, MT, Demirtaş, H, (2021). Serbest form yüzeye sahip parçaların üretim nedenli hata miktarlarının robot kol yardımlı lazer sensör ile tespiti, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, 1126-1132.