

**AL-6061 ALAŞIMI İÇİN UYGUN ELEKTROKİMYASAL
İŞLEME PARAMETRELERİNİN VE ELEKTROLİTİN
ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE OPTIMUM
ELECTROCHEMICAL MACHINING PARAMETERS AND
ELECTROLYTE FOR THE AL-6061 ALLOY**

GÜLNUR ŞEHNAZ KORKMAZ

DOÇ. DR. SELİS ÖNEL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

ÖZET

AL-6061 ALAŞIMI İÇİN UYGUN ELEKTROKİMYASAL İŞLEME PARAMETRELERİNİN VE ELEKTROLİTİN ARAŞTIRILMASI

Gülnur Şehnaz KORKMAZ

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selis ÖNEL

Haziran 2018, 88 sayfa

Geleneksel yöntemlerle hassas bir şekilde işlenmesi zor olan, sertliği yüksek ve ısıya dayanıklı veya ince film formunda iletken malzemeler için ileri bir imalat yöntemi olan elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde iş parçasına sıvı bir elektrolit içinde elektrik potansiyeli uygulanması yoluyla yüzey atomlarını iyonlaştırılarak işleme yapılmaktadır. Teknolojide meydana gelen gelişmeler sonucu savunma, havacılık ve medikal endüstrilerinde EKİ yöntemi ile mikro boyutlarda işlenebilecek hassaslıkta ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip, yüksek kalitede malzemelere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Sertliği yüksek titanyum, nikel ve karbür gibi malzemelerin EKİ yöntemi ile işlenmesine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Alüminyum alaşımlarının yüzey sertliği diğer malzemelere kıyasla düşüktür. Dolayısıyla geleneksel yöntemlerle işlenmesi mümkündür; ancak ileri teknoloji sanayilerde talep edilen karmaşık şekillerin daha hassas işlenebilmesi gerekmektedir. Çalışmada, bu amaçla T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Tekno Girişim Sermayesi Desteği Programı kapsamında geliştirilmiş olan yerli bir EKİ tezgahında, ülkemizde oldukça fazla alanda kullanımı olan Al-6061 alaşımının elektrokimyasal yöntemle işleme potansiyeli araştırılmış ve uygun çalışma parametreleri belirlenmiştir. İş parçası yüzeyinde pasifizasyonun engellenmesi, yüksek malzeme kaldırma hızı (MKH) ve en az yüzey pürüzlülüğü eldesi için uygun kimyasal içeriğe, derişime ve pH değerine sahip elektrolitin tespit edilmesi, bu çalışmanın temel amacıdır. NaBr, NaCl, NaNO₃, NaF ve NaHCO₃ tuzlarının farklı derişimlerde çözeltilerinin iletkenlikleri tespit edilerek işleme yapılmıştır. Deney tasarımı istatistikî bir yazılım olan Design Expert kullanılmıştır. En iyi MKH ve yüzey kalitesini sağlayan elektrolitler 1,370 M NaBr ve 0,755M NaBr-0,036 M NaNO₃-1,726 M NaCl çözeltileri olarak belirlenmiştir. Malzeme işleme performansı üzerinde asidik ve bazik ortam etkisini incelemek amacıyla belirlenmiş olan çözeltiler, 1 M NaOH, 0,1 M HNO₃ ve 0,1 M HCl çözeltileri ile kullanılarak pH değerleri 2 ve 10 olarak değiştirilmiştir. Asidik çalışma ortamının yüzey kalitesine daha olumlu etkisi olduğu

görülmüştür. HCl kullanılarak pH değeri 2 yapılan bu iki elektrolitin çalışma için en uygun çözeltiler olduğu belirlenmiştir.

Elektrolit çözeltileri belirlendikten sonra, EKİ cihaz değerleri değiştirilerek, bir çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında, işleme süresi 5 ve 15 dk, elektrot aralığı 1, 2 ve 3 mm, gerilim değeri ise 5 ve 8 V olarak çalışılmıştır. Çalışma sonucu elde edilen veriler bir istatistiksel analiz programı olan ‘Design Expert’ yazılımı ile analiz edilmiştir. Çalışma koşulu, elektrolit içeriği pH 2/ 0,660 M NaBr-0,061 M NaNO₃- 1,729 M NaCl, işleme süresi 15 dakika, elektrot aralığı 2 mm ve gerilim değeri 8 V olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak Al-6061 alaşımı için belirtilen parametre koşullarında iyi MKH hızı ve yüzey kalitesine sahip malzemeler elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen eniyileme çalışmalarının endüstriyel alanda kullanılma potansiyeli çok yüksek olup, ülke sanayisine ve teknolojisine önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal işleme (EKİ), alüminyum alaşım, Al-6061, malzeme kaldırma hızı, elektrolit, yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE OPTIMUM ELECTROCHEMICAL MACHINING PARAMETERS AND ELECTROLYTE FOR THE AL- 6061 ALLOY

Gülnur Şehnaz KORKMAZ

Master of Science, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selis ÖNEL

June 2018, 88 pages

For conductive materials with high hardness and heat resistance or in thin film form, which are difficult to machine accurately by conventional methods, electrochemical machining (ECM) is used as an advanced manufacturing method. In this method, machining is accomplished by ionization of the atoms at the surface of the work piece by applying an electric potential in a liquid electrolyte. With technological developments, high quality materials that have low surface roughness enough to be processed via ECM method in micro dimensions with precision are needed in defense, aviation and medical industries. There are various studies that study processing of high hardness materials such as titanium, nickel and carbide via ECM method. Aluminum alloys have lower surface hardness compared to other materials. Thus, they can be processed with traditional methods; however complicated shapes which are demanded in advanced technology industries need to be processed more delicately. In the study, with this reason, electrochemical method processing potential of A1-6061 alloy which is used considerably in our country is researched in a local ECM bench which was developed under the scope of TR Industry and Commerce Ministry, Techno Initiative Fund Support program and suitable work parameters are determined. Main purpose of this study is to determine the electrolyte that has suitable chemical contents, concentration and pH value in order to obstruct passivization on the surface of workpiece, and to obtain high material removal rate (MRR) and minimum surface roughness. Conductivity of solutions of NaBr, NaCl, NaNO₃ and NaF salts were determined in different concentrations whilst they were processed. Design Expert, which is a statistical software was used in the experimental design. 1,370 M NaBr ve 0,755M NaBr-0,036 M NaNO₃-1,726 M NaCl solutions are determined as electrolytes to provide best MRR and surface quality. Determined solutions were used with 1 M NaOH, 0,1 M HNO₃ and 0,1 M HCl solutions in order to observe acidic and alkaline environment effect on material processing

performance and pH value was changed as 2 and 10. It was observed that acidic work environment has better effect on surface quality. It has been determined that, using HCl with these two electrolytes of pH value 2 is the best solution for this study.

After determining the best electrolyte solutions, study was done by changing the working conditions of the ECM device. In scope of parameter study, machining time as 5 and 15 minutes, inter electrode gap as 1, 2 and 3 mm, voltage value as 5 and 8 V were applied. Results which were obtained from parameter study was analyzed with statistical analysis program. Working conditions were determined as pH 2/ 0,660 M NaBr-0,061 M NaNO₃-1,729 M NaCl as electrolyte, 15 min as machining time, inter electrode gap as 2 mm and voltage value as 8 V.

As a result, for Al-6061 alloy, best MRR and materials with best surface quality was obtained in determined conditions. Results obtained in this thesis has a tremendous usage potential in industrial field and will make important contributions to country's industry and technology.

Anahtar Kelimeler: Electrochemical machining (ECM), aluminium alloy, Al-6061, material removal rate (MRR), electrolyte, surface roughness

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bana her konuda destek olan, beni yönlendiren değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Selis ÖNEL'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmada kullanılan alüminyum alaşımları ücretsiz olarak gönderen Coşkunöz Savunma ve Havacılık Şirketinden Bahadır CANGARA'ya teşekkür ederim.

Alüminyum alaşımların küçük boyutlarda kesilmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen Fazıl HIZAL'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında her türlü yardım ve desteği benden esirgemeyen, aynı laboratuvarı paylaştığım Erhan, Güneş, Sercan ve Nazlı'ya çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca benden desteklerini eksik etmeyen müdürüm Kazuhiro NAKAMURA'ya, çalışma arkadaşlarım Ecem KARAHAN ve Ezgi ŞAHİNOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmaya başlarken beni her konuda destekleyen Semih Yücel TİFTİKÇİ'ye yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, her zorlukta ve her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen canım annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Elektrokimyasal İşleme Yöntemi	3
2.1.1 Proses Mekanizması	4
2.1.2 Proses Kimyası	5
2.1.3 Proses Ekipmanları	6
2.1.4 Elektrolit	8
2.1.5 Tabaka Oluşumu ve Korozyon Etkisi	9
2.1.6 EKİ'nin Avantaj ve Dezavantajları	10
2.1.7 EKİ'nin Çevresel Etkisi	11
2.1.8 Uygulama Alanları	11
2.1.9 Literatürdeki EKİ Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	12
2.2 Alüminyum Alaşımlarının Elektrokimyasal Yöntemle İşlenmesi	16
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1 Kullanılan Malzeme ve Cihazlar	23
3.1.1 Alüminyum Alaşımı	23
3.1.2 Kimyasallar ve Tuz Çözeltileri	24
3.1.3 Cihazlar	25
3.2 DeneySEL Yöntemler	27
3.2.1 Elektrolitin Hazırlanması	27
3.2.2 Malzemenin EKİ Yöntemi ile İşlenmesi	30
3.2.3 Çalışma Koşullarının İncelenmesi	32
3.2.3.1 Uygun Elektrolit Tespiti İçin Ön Çalışmalar	34
3.2.3.2 NaBr, NaCl ve NaNO ₃ Tuzları ile Yapılan Çalışmalar	34
3.2.3.3 Asidik ve Bazik Ortamın İşleme Üzerine Etkisi	37
3.2.3.4 İşleme Süresinin, Voltaj ve Elektrot Aralığının İşleme Üzerine Etkisi	37
3.2.4 İşleme Hızı ve Kalitesi ile İlgili Analizler	39
3.2.4.1 Görsel İnceleme	39
3.2.4.2 Malzeme Kaldırma Hızının (MKH) Tespiti	39

3.2.4.3	Yüzey Pürüzlülüğü Analizi.....	40
3.2.4.4	Design-Expert Programı ile Çalışma Koşullarının İncelenmesi	41
4.	DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞILMASI	42
4.1	Uygun Elektrolitin Tespiti.....	42
4.2.1	Uygun Elektrolit Tespiti İçin Ön Çalışmalar	43
4.2.2	NaBr, NaCl ve NaNO ₃ Çözeltileri ile Çalışma Sonuçları	48
4.2.3	Asidik ve Bazik Ortamın İşleme Üzerine Etkisi.....	55
4.3	İşleme Süresi, Voltaj ve Elektrot Aralığının İşleme Kalitesi Üzerine Etkisi	58
5.	SONUÇLAR	64
	KAYNAKLAR	66
	EKLER.....	70
	ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELER

Çizelge 2. 1 Alüminyum Malzemelere Uygulanan EKİ Çalışmaları	15
Çizelge 2. 2 Çok Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Mekanik Değerleri ve Uygulama Alanları [25]	19
Çizelge 2. 3 Al-6061 alaşımının içeriğindeki elementler kütlece % [42]	20
Çizelge 2. 4 Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri [27]	21
Çizelge 3. 1 Al-6061 alaşımının element içeriği [31]	23
Çizelge 3. 2 Al-6061 alaşımının fiziksel özellikleri [45]	24
Çizelge 3. 3 NaBr Çözeltisinin derişimi bağıli iletkenlik değerleri	28
Çizelge 3. 4 NaCl Çözeltisinin derişime bağıli iletkenlik değerleri	29
Çizelge 3. 5 NaNO ₃ çözeltisinin derişime bağıli iletkenlik değerleri	29
Çizelge 3. 6 NaF çözeltisinin derişime bağıli iletkenlik değerleri	30
Çizelge 4. 1 Sulu çözeltilerde limit iyonik iletkenlikler [54]	43
Çizelge 4. 2 0.5 M derişimdeki Tuz Çözeltilerinin EKİ Sonuçları	44
Çizelge 4. 3 NaF elektrolitinin derişimine bağıli işleme performansı	48
Çizelge 4. 4 Elektrolit tespiti için yapılan çalışmalar	49
Çizelge 4. 5 Elektrolit tespit çalışması sonrası elde edilen veriler ve malzemelerin yüzey görüntüleri	50
Çizelge 4. 6 1,370 M NaBr Elektrolit Çözeltisi için pH çalışması	55
Çizelge 4. 7 Tuz çözeltisi çeşidinin MKH ve YP üzerindeki etkisi	56
Çizelge 4. 8 0.755 M NaBr/0.036 M NaNO ₃ /1.726 M NaCl Elektrolit Çözeltisi için pH çalışması	57
Çizelge 4. 9 0.755 M NaBr/0.036 M NaNO ₃ /1.726 M NaCl Çözeltisi kullanılarak yapılan pH çalışması sonucu malzeme yüzey görüntüleri	58
Çizelge 4. 10 EKİ Cihaz Koşulları Çalışması	59
Çizelge 4. 11 EKİ sonrası sonuçlar ve yüzey görüntüleri	61

ŞEKİLLER

Şekil 2. 1 EKİ yönteminin prensipleri [7]	4
Şekil 2. 2 EKİ Yöntemi ile Malzeme İşlenmesi [8]	5
Şekil 2. 3 Demir bir işparçasının EKİ yöntemi ile sodyum klorür çözeltisinden oluşan bir elektrolit içinde işlenmesi sırasında yüzeyde iyonlaşmanın şematik görünümü [8]	5
Şekil 2. 4 Elektrokimyasal işleme cihazının bölümleri [8].....	7
Şekil 2. 5 EKİ yöntemi ile yapılan uygulama örnekleri [8]	12
Şekil 2. 6 EKİ yöntemi ile yapılmış disk örnekleri[24]	12
Şekil 2. 7 FCC kristal yapısı [38]	16
Şekil 2. 8 Alüminyum alaşımlar kullanılarak EKİ ile yapılan bazı parçalar [41].....	20
Şekil 3. 1 a) 1,6 cm çapta, 10 cm uzunlukta silindir boru şeklinde Al-6061 alaşımı, b) 1,5 cm çapta, 2 cm yüksekliğinde kesilmiş Al-6061 malzemesi.....	24
Şekil 3. 2 Elektrokimyasal işleme cihazının görüntüsü	25
Şekil 3. 3 a) Servo sistem ve işleme tankı, b) İşleme tezgahı, katot uç ve elektrolit akış borusu	26
Şekil 3. 4 a. Elektrolit tankı ve pompaları, b. Sıcaklık kontrolörü	26
Şekil 3. 5 İş parçasının elektrokimyasal işleme tezgahına yerleştirilmesi	30
Şekil 3. 6 Elektrokimyasal işleme anından bir görüntü	31
Şekil 3. 7 Çalışma kapsamında oluşturulan akış şeması	33
Şekil 3. 8 Yüzey pürüzlülüğü ölçme prensibi [37]	40
Şekil 4. 1 Kullanılan tuz çözeltileri için hazırlanan derişime bağlı elektriksel iletkenlik grafiği	42
Şekil 4. 2 0.5 M derişimdeki tuz çözeltilerinin iletkenliğe bağlı MKH değerleri	45
Şekil 4. 3 0.5 M derişimdeki tuz çözeltilerinin MKH ve yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki ilişki	46
Şekil 4. 4 Çalışma sonucu MKH ile yüzey pürüzlülüğü ilişkisi	51
Şekil 4. 5 Expert Design ile elde edilen çözümler	52
Şekil 4. 6 0.958M NaBr-2.0 M NaNO ₃ -2.0 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu	52
Şekil 4. 7 1.617M NaBr-1.913 M NaNO ₃ -3.988 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan 2. işleme sonucu	53
Şekil 4. 8 3. Dereceden polinom denklem kullanılarak elde edilen çözümler.....	53
Şekil 4. 9 1.370 M NaBr çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu	54
Şekil 4. 10 2.dereceden polinom denklem modeli kullanılarak elde edilen çözümler.....	54
Şekil 4. 11 0.755M NaBr-0.036 M NaNO ₃ -1.726 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu	54
Şekil 4. 12 Tuz çözeltisi çeşidinin MKH ve YP üzerindeki etkisi	55
Şekil 4. 13 EKİ cihaz çalışma koşullarının MKH ve YP üzerindeki etkisi	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

e	Elektron
M	Metal
z	Değerlik Elektron Sayısı
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Na	Sodyum
Fe	Demir
H	Hidrojen
O	Oksijen
Cl	Klor
N	Azot
C	Karbon
Cu	Bakır
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
Ti	Titanyum
Cr	Krom
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
Ni	Nikel
F	Flor
Mn	Manganez
K	Potasyum
°C	Santigrat derece
°F	Santigrat Fahrenayt
°K	Santigrat Kelvin
dk	Dakika
ppt	g/L düzeyinde derişim
mS	Mili Siemens
MPa	Mega Paskal
GPa	Giga Paskal

cm	Santimetre
mm	Milimetre
μm	mikrometre
in	İnç
g	Gram
cm^3	Santimetre küp
W	Watt
V	Volt
A	Amper
M	Molarite
J	Akım Yoğunluğu (A/cm^3)
a	Atom Ağırlığı (akb)
η	İşleme Verimliliği (%)
v	Elektron Değerlik Sayısı
ρ	İş Parçasının Yoğunluğu (g/cm^3)
F	Faraday sabiti (96500 Coulomb/mol)
I	Elektrik Akımı (A)
t	Süre (dk)
mN	Mili Newton

Kısaltmalar

EKİ	Elektro Kimyasal İşleme
IEG	Elektrotlar arası aralık
DA	Doğru Akım
AA	Alternatif Akım
MKH	Malzeme kaldırma hızı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
EDS	Enerji Yayıcı Spektroskopi
EPMA	Elektron Prob Mikro Analizi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektroskopi
FCC	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
IACS	Uluslararası Tavlanmış Bakır Standartlar

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ile beraber işlenmesi zor fakat üstün özelliklere sahip malzemelere olan talep artmıştır. Bu malzemeler, özellikle elektronik, enformatik, havacılık ve uzay endüstrilerinde ihtiyaç duyulan hafif, aşınma ve korozyon dayanımı yüksek, mekanik özellikleri gelişmiş malzemelerdir. Üstün özelliklere sahip süper alaşımlar, kompozitler, titanyum, nikel ve karbür alaşımları gibi malzemelerin ihtiyaç duyulan sektörlerde kullanılabilmesi için karmaşık geometrilerde, hassas şekilde işlenmeli hatta bazı durumlarda mikro işleme yapılmalıdır. Kullanılan geleneksel (alışılmış) imalat yöntemleriyle bu malzemelerin istenilen şekilde işlenmesi oldukça zor ve zahmetlidir, hatta bazılarının bu yöntemlerle işlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, alışılmamış imalat yöntemleri üzerinde çalışılarak, farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle istenilen karmaşık geometride hassas mikro/makro boyutlarda üretimi mümkün kılabilen ve yüzey kalitesi yüksek malzemelerin üretilmesi amacıyla geliştirilmişlerdir. Temel olarak ısı, kimyasal, elektriksel ve mekanik işleme etkileri kullanılarak geliştirilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerden malzemenin yapısal ve yüzey özelliklerini değiştirmeden kullanılabilen imalat yöntemi elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemidir.

Elektrokimyasal işleme yöntemi, tezgah ve işleme maliyetleri yönünden pahalı bir işleme yöntemi olduğu için günümüzde endüstride çok fazla kullanılamamaktadır [1]. Ancak, yüksek bütçelere sahip ve hassas işlemlerin ihtiyaç duyulduğu uçak-uzay ve otomotiv sanayi gibi endüstrilerde kullanım potansiyeli oldukça yüksek ve en çok araştırılan yöntemlerden birisidir. Elektrokimyasal işleme yönteminin çok hızlı bir imalat yöntemi olması, takım ve iş parçası arasında fiziksel bir temas olmadığından dolayı takım aşınması olmaması, işleme özelliğinin, iş parçasının fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olmaması, elde edilen yüzey kalitesinin ısı etki ve çapaklanmadan etkilenmemesinden dolayı yüksek olması gibi avantajları vardır. Bu yöntemin teknik olarak karmaşık olmasından dolayı ticari anlamda tezgah üretimini yapan pek fazla üreticisi bulunmamaktadır. Ülkemizde savunma sanayisinde kullanılan yabancı üretim makineler ve bilimsel araştırma ve geliştirme projeleri için laboratuvar ölçekli olarak üretilmiş prototipler bulunmaktadır.

Otomotiv, uzay, havacılık, elektronik ve bilgisayar alanında özellikle ihtiyaç duyulan kompozit malzemeler ve titanyum, nikel gibi alaşımların elektrokimyasal işleme yöntemi ile hassas bir şekilde işlenerek kullanılması ile ilgili pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu malzemeler dışında, bahsedilen endüstrilerde oldukça fazla kullanılan bir diğer malzeme de

alüminyum alaşımlardır. Oldukça hafif, korozyona karşı dayanımı yüksek, ısı ve iletkenliği çok iyi ileten bir malzeme olmasından dolayı bir çok farklı endüstriyel alanda çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Alüminyumun yüzey özelliklerinden dolayı geleneksel imalat yöntemleri ile işlenebilmektedir. Bu malzemenin mikro hassasiyete sahip uygulamalarda kullanılabilmesi için elektrokimyasal işleme gibi daha hassas bir yöntem kullanılması gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, alüminyum alaşımlarının elektrokimyasal işleme yöntemi ile işlenme potansiyelini inceleyen çok fazla çalışma olmadığı görülmektedir. Oysa, mikro kanallı soğutma sistemleri gibi pek çok farklı uygulama için kullanım potansiyeli yüksek olan bu malzemenin mikro işlenme özelliğinin araştırılması uzay ve havacılık sektörlerindeki gelişmelere fayda sağlayacaktır.

Tez kapsamında, T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Tekno Girişim Sermayesi Desteği Programı kapsamında geliştirilmiş olan yerli bir EKİ tezgahında, ülkemizde oldukça fazla alanda kullanımı olan Al-6061 alaşımının, bu yöntemle işlenme potansiyelinin araştırılması ve çalışma parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen optimizasyon bilgilerinin endüstriyel alanda kullanılma potansiyeli çok yüksek olup, ülke sanayisine ve teknolojisine büyük katkılar sağlayacaktır.

EKİ yöntemi için en önemli parametrelerden bir tanesi işlenecek malzeme için uygun elektrolit çözeltisi seçimidir. Alüminyum alaşımları hava ile etkileşime girip, yüzeyinde kolayca bir pasifizasyon tabakası oluşturduğu ve bundan dolayı korozyon dayanımı yüksek olduğu için, uygun elektrolit seçimi oldukça kritik bir önem taşımaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada uygun elektrolit çözeltisi seçimi oldukça geniş bir yer tutmaktadır.

Tez kapsamında, ilk bölümde elektrokimyasal işleme yönteminin çalışma prensibi, proses detayları, ekipmanları, yöntemin avantaj ve dezavantajları ile uygulama alanlarından bahsedilmiştir. Deneysel çalışmalar kısmında, çalışmada kullanılan malzemeler, cihazlar, EKİ cihazının özellikleri ve laboratuvar çalışmaları ile kullanılan proses parametreleri anlatılmıştır. Deneysel bulgular ve tartışılması bölümünde ise proses parametrelerinin işlem verimliliğine ve yüzey kalitesine olan etkileri, proses tasarım çalışmaları ve işleme sonuçları yer almaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Son yıllarda makro ve mikro boyutlu, paslanmaz çelik, karbitler, süper alaşımlar ve titanyum alaşımları gibi işlenmesi zor malzemelere olan talep özellikle otomotiv, uzay sanayi, elektronik, optik, medikal cihazlar ve iletişim endüstrisindeki gelişmelerden dolayı oldukça artmıştır. Fakat, bu malzemelerin olağanüstü özelliklerine rağmen, geleneksel yöntemlerle işlenmesi sırasında pek çok sorunla karşılaşmış ve bu yüzden, kullanılabilecek uygulama alanları oldukça kısıtlı kalmıştır [2]. Bu sorunlar, küçük boyutlarda kesici takımlarının yapılamamasından kaynaklı, yapılan iş boyutunun sınırlı kalması ve işlem sırasında fiziksel temastan dolayı oluşan titreşimin, takımların aşınmasına neden olmasından kaynaklanmaktadır [3]. Alışılmış yöntemlerin yetersiz kaldığı alanlarda kullanılmak üzere alışılmamış imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler mekanik, elektrokimyasal, elektrotermal ve kimyasal işlemler olmak üzere 4 ana başlıkta incelenebilir:

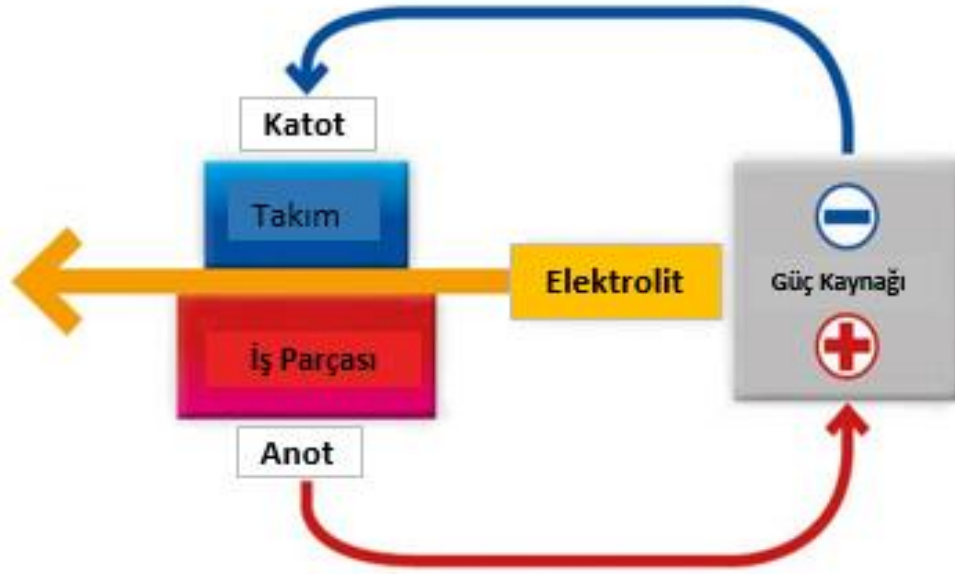
1. Mekanik işlemler: Aşındırıcı jet, su jeti, aşındırıcı su jeti ile işleme ve ultrasonik işleme,
2. Elektrokimyasal İşlemler: Elektrokimyasal işleme, elektrokimyasal taşlama ve elektron jeti ile delme,
3. Elektrotermal İşlemler: Elektriksel aşındırma, lazer ve elektron demeti ile işleme,
4. Kimyasal İşlemler: Kimyasal ve fotokimyasal işleme yöntemleridir.

Her yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar arasından kullanılmak istenilen malzemenin ve hedeflenen ürünün özelliğine uygun yöntemler seçilmelidir.

2.1 Elektrokimyasal İşleme Yöntemi

Elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemi, metalik parçaların metalürjik özellikleri hiçbir şekilde değişikliğe uğratılmadan işlenebilmesine olanak sağlar. Genellikle, imalat tezgahlarında uygulanan yüksek basınç ve sürtünme ısı etkisi ile metal deforme olur. EKİ yönteminde ise takım basınçları olmadığı için metale zarar verilmez ve parça yüzeyinde şekil işleme olayı, yüzeydeki atomik katmanların birbiri ardına elektrolit içine çözünmesi ile sağlanır. Bu yöntem 1929 yılında Gussell tarafından tanıtılmış ve elektrokimyasal delme, taşlama ve parlatma şeklinde gelişerek, günümüze kadar gelmiştir [4]. Kısaca anodik aşındırma tekniği olarak bilinen elektrokimyasal işleme yöntemi, anodik kutuba yerleştirilen işlenecek parçanın yüzeyinden metal atomlarının katodik kutupdaki takım üzerinden

geçirilen doğru akım yardımıyla parçalanarak iyon haline dönüştürülmesi ve bu iyonların elektrolit olarak adlandırılan çözelti yardımıyla metal iyonu şeklinde işleme bölgesinden uzaklaştırılması şeklinde tanımlanmaktadır. Bu yöntemle, işlenmesi diğer imalat yöntemlerine göre daha zor olan sert ve karmaşık geometriye sahip parçaların sertlik, dayanım gibi mekanik veya ısıl özelliklerden bağımsız olarak iletken olmak koşuluyla rahatlıkla işlenebilmesi mümkündür [5, 6].



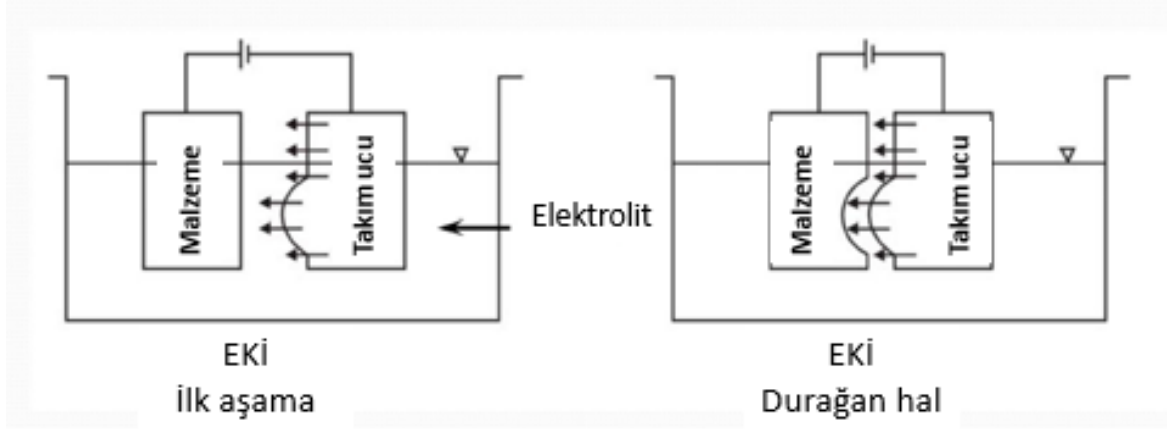
Şekil 2. 1 EKİ yönteminin prensipleri [7]

Elektrokimyasal işleme yöntemi temel olarak, metal malzeme ile elektrot arasında bulunan bir elektrolit aracılığı ile kontrollü elektrokimyasal etkileşim olayına dayanmaktadır (Şekil 2.1). Faraday Kanunu çerçevesinde malzeme işlenir. Bu kanuna göre, pozitif yüklü iş parçasından ayrılan elektronlar ve iyonlar elektrolite geçiş yapar. Yüksek hız ve sabit basınç değerindeki elektrolit bu elektron ve iyonları taşıyarak, katoda gitmesini önler ve işlem alanından uzaklaştırır. Böylece anot konumunda bulunan iş parçası erozyona uğrar ve katodun (elektrodun) şeklini alana kadar erozyon devam eder. Elektrot, üretilmek istenen malzeme şeklinin bir negatifi olarak düşünülebilir [7].

2.1.1 Proses Mekanizması

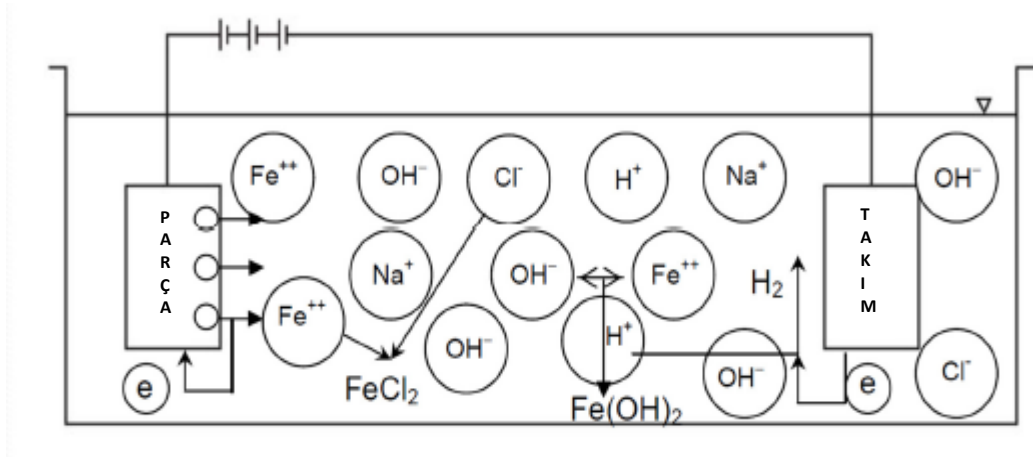
EKİ, önceden şekil verilmiş takım (katot) ve iş parçası (anot) arasından yüksek akım yoğunluğu ve düşük voltajda bir doğru akım geçirilmesi ile oluşan elektrokimyasal bir anodik eritme prosesi olarak tanımlanabilir. İş parçası üzerinde, metal atomları deplating reaksiyonu iyonlaşır ve böylece elektrotun şekli iş parçası üzerine kopyalanmış olur (Şekil

2.2). Elektrolit yardımıyla, işlem sırasında oluşan ısı ve metal iyonları anot ve katot arasındaki boşluktan uzaklaştırılır. Takım ve iş parçası birbirlerine değmeyecek şekilde, aralarında küçük bir boşluk bırakılarak işlem devam ettirilir.



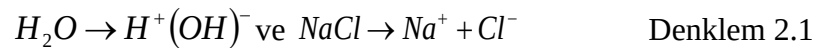
Şekil 2. 2 EKİ Yöntemi ile Malzeme İşlenmesi [8]

2.1.2 Proses Kimyası



Şekil 2. 3 Demir bir işparçasının EKİ yöntemi ile sodyum klorür çözeltisinden oluşan bir elektrolit içinde işlenmesi sırasında yüzeyde iyonlaşmanın şematik görünümü [8]

Şekil 2.3’de demirin sodyum klorür elektroliti içerisinde elektrokimyasal yöntemle işlenmesi resmedilmiştir. Bu işlem sırasında, elektrotlar arasında potansiyel fark meydana geldiği için anot ve katotta elektrokimyasal tepkimeler meydana gelir.



Negatif yüklü OH^- ve Cl^- anyonları anoda doğru, pozitif yüklü H^+ ve Na^+ katyonları ise katoda doğru ilerler.

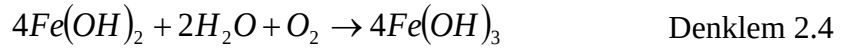
Katot tarafında meydana gelen tepkime:



Anot tarafında meydana gelen tepkime ise aşağıdaki şekilde gerçekleşir:



Bu tepkimelerin dışında Fe iyonları ve diğer iyonlar birleşerek $Fe(OH)_2$ 'yi oluşturur. Ayrıca, $Fe(OH)_2$, su ve oksijenin de etkisi ile birlikte ferrit hidroksite dönüşür:

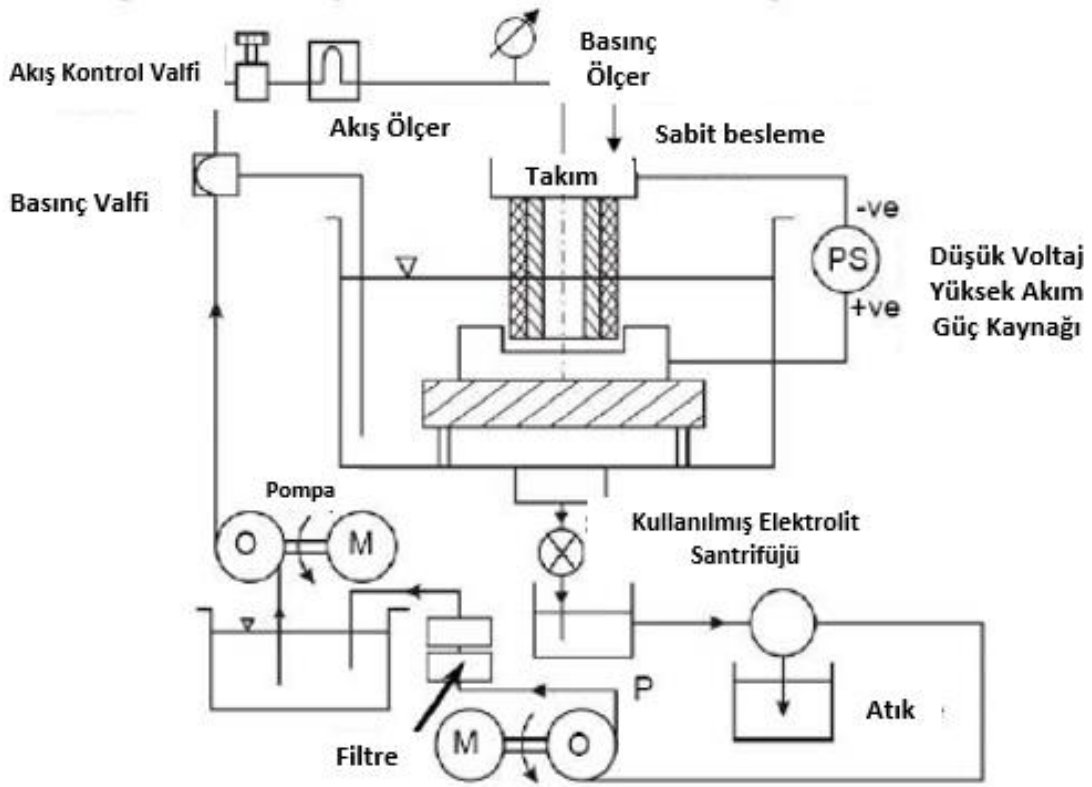


Elektrot ve çalışılan malzeme arasında fiziksel bir temas olmadığı için, malzemeden daha sert takımlara ihtiyaç duyulmadan ve takım aşınması olmaksızın işlem yapılması mümkündür. Bundan dolayı, EKİ yöntemi ile çok ince plakalar, kırılğan malzemeler ve çok ince şekil değiştirebilen alaşımlar işlenebilmektedir [9].

EKİ yöntemi malzemeyi elektrokimyasal işlem sırasında atomik seviyede çözmektedir. Bundan dolayı, malzeme uzaklaştırma hızı veya işlem hızı, çalışılan malzemenin mekanik veya fiziksel özelliklerine bağlı olmayıp, yalnızca malzemenin atomik kütlesine, değerlik sayısına ve elektrik iletkenliği gibi değerlerine bağlıdır. Bunların dışında, EKİ yöntemi ile atomik seviyede çözünme olduğundan dolayı, herhangi bir ısı zararına uğramadan düzgün yüzeyler elde edilmektedir.

2.1.3 Proses Ekipmanları

EKİ cihazı güç kaynağı, elektrolit besleme (ve arıtma sistemi), takım elektrot ve besleme sistemi, işleme parçası ve parça tutma sistemi gibi temel bölümlerden oluşur. Şekil 2.4'de bu bölümler gösterilmiştir [10].



Şekil 2. 4 Elektrokimyasal işleme cihazının bölümleri [8]

- **Güç Kaynağı:** EKİ sırasında, elektrotlar arası aralıktan (IEG) yüksek değerlerde doğru akım ve düşük elektrik potansiyelinin geçmesi istenen bir durumdur. Dolayısıyla, rektifiyer (alternatif akımı doğru akıma çeviren cihaz) ve transformatör kullanılarak, üç fazlı alternatif akım (AA) düşük voltajlı, yüksek akımlı doğru akıma (DA) dönüştürülür. Proses kontrolün düzgün yapılamaması, ekipman arızaları, kullanıcı hatası gibi sebepler işleme parçası ve elektrot arasında kıvılcım oluşmasına neden olabilir. Bundan dolayı, belirli aralıklarla gücün kesilmesi yöntemi ile parça ve elektrota zarar gelmesi önlenabilir. Bu durumu en aza indirmek için EKİ sırasında sabit bir elektrik potansiyeli kullanmak yerine kesikli (pulsed) voltaj uygulaması yapılabilir. Kesikli voltaj uygulaması kullanılarak, elektrotlar arası aralık, çalışma alanını kısıtlayabildiğinden dolayı düşürülebilir ve bu durum daha yüksek işleme veriminin elde edilmesini sağlar [11].
- **Elektrolit besleme ve temizleme sistemi:** Bu sistem içerisinde pompalar, filtreler, borular, kontrol vanaları, ısıtma veya soğutma bobinleri, basınç ölçer ve depolama tankı bulunmaktadır [12] Her bir sistemin korozyona uğramayacak şekilde, paslanmaz çelik vb. özel malzemelerden yapılması gerekmektedir.

- Takım elektrot ve besleme sistemi: Takım elektrot olarak kullanılacak olan malzeme öncelikle iletken olmalı, uzun süre korozif elektrolite maruz kalacağından dolayı anti korozif özellikte olmalıdır. Malzemenin elektriksel ve ısı iletkenliğinin yüksek olması, EKİ için gerekli sertlikte ve işlenebilme potansiyeline sahip olması gereklidir. Bakır, pirinç, bronz, paslanmaz çelik ve titanyum malzemeleri EKİ için takım elektrot (katot) olarak en çok kullanılan malzemelerdendir.
- İşleme parçası ve parça tutma sistemi: Bu proseste sadece elektriksel iletkenliği olan malzemelerin işlenmesi mümkündür. İş parçasının yani anodun kimyasal özellikleri malzeme kaldırma hızını en çok etkileyen parametrelerdendir. İş parçası tutma sistemi elektriksel iletkenliği olmayan, iyi ısı kararlılık ve düşük nem absorpsiyon özelliklerine sahip malzemelerden yapılır. Plastik ile zenginleştirilmiş grafit, plastikler, perspeks gibi malzemeler iş parçasını tezgah üzerine sabitleyici araçlarının yapımında kullanılır.

2.1.4 Elektrolit

EKİ prosesinde elektrolitin üç temel görevi vardır: Takım ve iş parçası arasındaki akımı taşır, reaksiyon sonucu ortaya çıkmış olan ürünleri elektrotlar arası aralıktan uzaklaştırır ve işlem sırasında akımın geçişinde oluşan ısının uzaklaştırılmasını sağlar [11]. İşlemden kullanılan elektrolit yüksek elektriksel iletkenliğe sahip, viskozitesi düşük, özgül ısısı yüksek, kimyasal olarak kararlı, iş parçasının yüzeyinde oluşabilecek seramik filme karşı direnci yüksek, korozif ve toksik olmamalıdır. Elektrolitin iletkenliği tuz derişimine, içerisinde çözölmüş gaz miktarına ve sıcaklık gibi özelliklere bağılıdır [13].

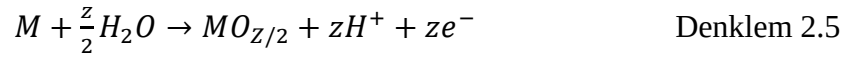
EKİ işleminin için en çok kullanılan elektrolitler sodyum klorür, sodyum nitrat, potasyum bromür, potasyum klorür gibi derişik tuz çözeltileridir. Bu çözeltiler diğerk kimyasal çözeltilere kıyasla daha ucuzdur, makineye ve işlemeye zarar vermezler. Diğerk kimyasal yöntemlerde kullanılan asidik çözeltiler zamanla makineyi korozyona maruz bırakarak zarar verebilir.

Çoğunlukla, paslanmaz çeliğinin işlenmesinde parlak bir yüzey elde etmek amacıyla sodyum klorür kullanılır. Sodyum klorür genelde paslanmaz çeliğinin yüzeyinde pasifize edici tabaka oluşturmaz ve bu sayede yüzeyde hızlı ve düzgün bir işleme yapılmasını sağlar. Buna karşın, takımın birebir hassas kopyasını oluşturmak için paslanmaz çeliğinin işlenmesi sırasında sodyum nitrat kullanılır. Sodyum nitrat, paslanmaz çelik için yüzey pasifizasyonuna sebep

olan bir elektrolittir; fakat bu durumda kaçak korozyon oluşmasını engelleyerek, takımın replikasyonunun daha hassas bir şekilde yapılmasına olanak sağlar [11]. Sodyum nitrat kullanıldığı durumlarda, yüksek akım yoğunluğu anodik çözülmei arttırırken, düşük akım yoğunluğu pasifizasyonu arttırır. Bu sayede, aynı derişimdeki sodyum klorüre göre sodyum nitrat işleme verimliliğini arttırır [11]. İşleme parçasının fiziksel ve kimyasal özelliklerine uygun elektrolit seçimi EKİ için çok kritiktir, özellikle de yüzey özelliklerine bağlı olarak pasifizasyon durumu incelenmelidir. İşlem parametreleri araştırılırken elektrolit içinde kullanılan tuz çözeltisinin türü, derişimi, elektriksel iletkenliği, pH değerleri ve sıcaklıkları dikkatle incelenerek optimum değerlerle işleme yapılmalıdır.

2.1.5 Tabaka Oluşumu ve Korozyon Etkisi

İşleme sırasında kullanılan elektrolitin seçimi iş parçasında, takım elektrodunda ve çözelti içinde oluşacak tepkimeleri belirler. İki çeşit temel elektrolit türü vardır: Pasifleştiren ve pasifleştirmeyen elektrolitler. Pasifleştiren elektrolitler, iş parçası üzerinde pasif bir tabaka oluşturulmasını sağlar. Pasif tabaka genellikle, elektrolit ile temasa geçildiğinde veya sistemden akım geçişi olduğunda Denklem 2.5'te görülen metal oksit ve hidroksitlerin oluşmasıyla meydana gelir:

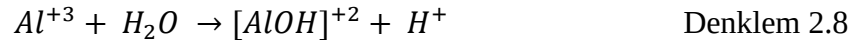
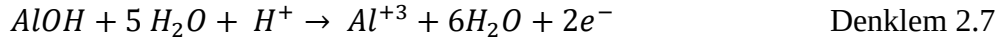


Bu durum, hem metal hem de elektrolitin özelliklerine bağlıdır. Çoğu pasif tabaka elektriksel olarak yalıtkandır ve iş parçası yüzeyinde bir bariyer oluşturur. Bu durum çoğunlukla işleme sürecini zorlaştıran, hatta bazı durumlarda herhangi bir kimyasal çözünmenin oluşmasını tamamen engelleyebilmektedir. Bu pasif tabaka oluşumuyla, korozyon direnci azalır ve malzeme kaldırma hızı düşer. Bazı durumlarda kolay bozulabilen bir pasif tabakanın varlığı, daha hassas ve keskin şekillerin oluşmasını sağlamakta ve böylece daha hassas işleme elde edilmektedir. Bu durum özellikle de mikro boyutlu işleme için esastır. Pasifleştirmeyen elektrolitler ise adından da anlaşılabilceği gibi, pasif bir tabaka oluşturulmasına izin vermezler. Genellikle, klorür gibi agresif iyonlara sahiptir ve bu iyonlar film oluşumunu engeller.

Alüminyum malzemelerin işleme performansları malzemelerin korozyon etkisine bağlıdır. Korozyon davranışları ise kullanılan çözeltinin pH değeri, sıcaklık değeri, derişimi gibi parametrelerden etkilenmektedir [14-19].

Alüminyum alaşımlar hava ile etkileşime geçtikleri anda yüzeylerinde alümina tabakası adı verilen oksit film tabakası oluştururlar. Bu tabaka nötr sulu çözeltilerle temasa geçtiğinde kristalize olmuş alümina tabakası oluşturur [20].

Asit ve baz çözeltilerinde ise alüminyumun korozyon davranışı nötr çözeltilere kıyasla farklıdır. Alüminyumun asit çözeltiler içerisindeki çözünme mekanizması aşağıdaki gibidir:



Oluşan çözünebilir karmaşık iyon kompleksi olan $[AlOHX]^+$ aracılığı ile metalin çözünmesi sağlanır [21].

2.1.6 EKİ'nin Avantaj ve Dezavantajları

EKİ yöntemi birçok etkileyici özelliklere sahiptir;

- EKİ yöntemi ile oldukça karmaşık geometriye sahip, yüksek hassaslıkta yüzeyler tek seferde işlenebilir.
- Takım elektrodun şeklinde ve boyutunda hiçbir kayıp olmaksızın, tek bir takım elektrot ile pek çok sayıda parçanın işlenmesi mümkündür. Takım aşınması olmadığından dolayı, teorik takım elektrot ömrü oldukça yüksektir.
- İş parçasının işlenebilme kapasitesi fiziksel ve mekanik özelliklerinden bağımsızdır. Bu proses ile dayanım ve sertliğine bağlı olmaksızın (yumuşak veya sert) metallerin ve alaşımların işlenmesi mümkündür.
- Takımda ve iş parçasında gerilme ve ısı yorulma kalıntısı yoktur.
- Atık miktarı ve toplam işleme süresi düşüktür.

Bu yöntemin birçok avantajına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

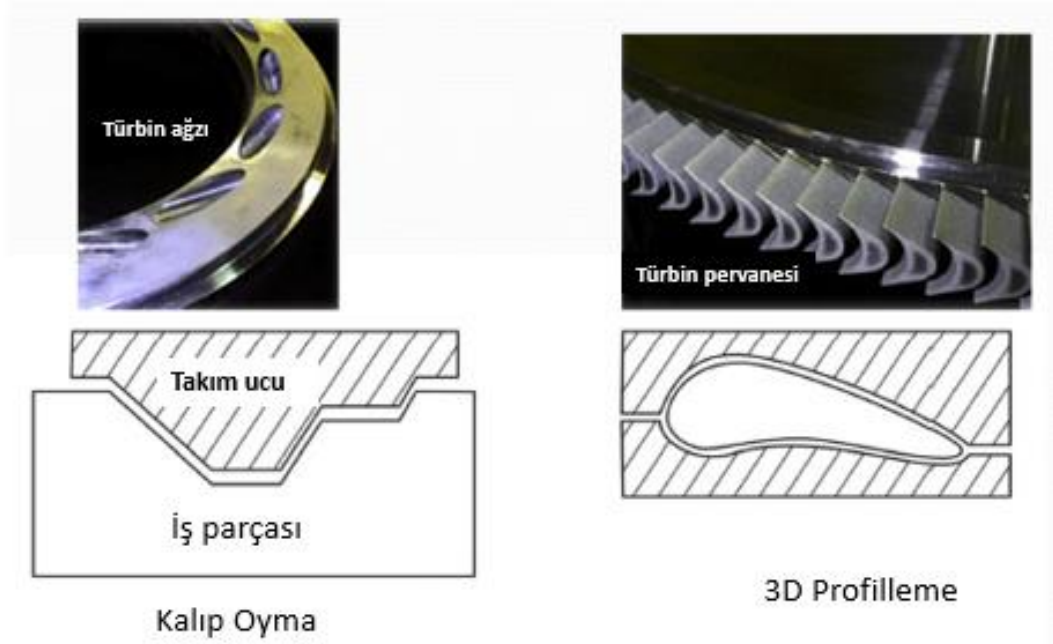
- Ekipmanın yatırım maliyeti, kurulması ve bakım masrafları yüksektir.
- İletken olmayan malzemelerin işlenmesi mümkün değildir.
- Elektrolitin, ekipmanlarda korozyona neden olmayacak şekilde iyi depolanması gerekmektedir.
- Elektrotlar arasında kıvılcım problemi olabilmektedir.

2.1.7 EKİ'nin Çevresel Etkisi

EKİ yönteminde kullanılan tuz çözeltileri diğer kimyasal işleme yöntemlerinde kullanılan asitler ve organik çözeltilerle kıyaslandığında çevreye olan zararları oldukça düşüktür. İşleme sonrası ortaya çıkan ağır metal iyonları herhangi bir işlemde geçmediği sürece, çevreye zarar vermektedir. Özellikle de bu yöntemin endüstriyel boyutlarda kullanılması sonucu ortaya çıkan su kirliliği azımsanmayacak boyutlardadır. Endüstriyel atıklardan kaynaklı ağır metal kirliliği limiti 0,5 – 3 ppm arasında kabul edilmektedir. Bu malzemeler arındırılmadığı takdirde suda yaşayan canlıları zehirlemekte ve ekosisteme büyük zararlar vermektedir. Ağır metaller iyonlarının sulardan arındırılması amacıyla kullanılan iyon değiştirme, elektro biriktirme, sıvı-sıvı ekstraksiyonu gibi bazı yöntemler bulunmaktadır [22]. Laboratuvarımızda daha önce geliştirilen 3 boyutlu işleme yapma kapasitesi bulunan bir EKİ tezgahında bakır malzemelerin işlenmesi sonucunda oluşan kirli elektrolitin arıtımı için bir sistem kurulmuştur. Bakır iyonlarının, elektrolit çözeltisinden arıtılması amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, elektrolit önce kağıt filtrelerden geçirilmiş ve ağır metallerin arıtılması için doğal zeolit ve polimer bazlı katyon tutucu reçine olan Lewatit TP 207 kullanılarak iyon değiştirme yöntemi uygulanmıştır. Yapılan denemeler sonucunda % 100 oranında arıtma sağlanmıştır [23]. EKİ sonrası ortaya çıkan ağır metal iyonlarının, elektrolit çözeltisinden uzaklaştırılması amacıyla benzer çalışmalar yapılabilmektedir. Böylece, elektrolitin geri dönüşümü sağlanarak, ekonomik açıdan avantajlı ve çevreye zararlı etkisi en az seviyede olan bir sistem tasarlanabilmektedir.

2.1.8 Uygulama Alanları

EKİ yöntemi, son yıllarda oldukça fazla teknolojik gelişme yaşanan ve yeni ihtiyaçlar ortaya çıkan bir çok endüstrinin taleplerini karşılamaya yönelik geliştirilmiştir. Özellikle karmaşık geometride ve hassaslıkta malzemelerin tasarlanmasını gerektiren savunma, havacılık, uzay ve medikal endüstrilerde kullanılmaya başlanmıştır. EKİ yöntemi kalıp oyma, yüzey parlatma, aşındırma, üç boyutlu profilleme, delme ve mikro işleme gibi uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2. 5 EKİ yöntemi ile yapılan uygulama örnekleri [8]

Bu yöntem, uçak motor sanayisinde genelde imalatta kullanılır. İmalat alanında, geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor türbin paleleri, pale diskleri gibi parçaların şekillendirilmesinde kullanılır (Şekil 2.6)



Şekil 2. 6 EKİ yöntemi ile yapılmış disk örnekleri[24]

2.1.9 Literatürdeki EKİ Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

EKİ yöntemi, çalışma alanının oldukça fazla olmasından dolayı geliştirilmeye açık bir yöntemdir. Yöntemin uygulanabilirliği açısından yapılan çalışmalar genellikle sistem parametrelerinin araştırılmasına dayalıdır. Bhattacharyya ve arkadaşları [25], EKİ’de besleme hızı ve güç kaynağı koşulları gibi işleme parametrelerinin malzeme kaldırma hızına ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. İşleme voltaj değeri 6-10 V, elektrolit derişimi 15-20 g/L ve darbeli işleme sıklığı 10-15 ms değerleri arasında MKH değerinin oldukça yüksek ve yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğunu gözlemişlerdir.

Yapılan başka bir çalışmada, EKİ yöntemi ile mikro ölçekte delikler açılarak, elektroliz süresi, gerilim, elektrolitin molar derişimi ve işlem yapılma aralığı gibi bazı parametrelerin delik çapına olan etkileri araştırılmıştır. Elde edilen deliğin çapını en çok etkileyen faktörün işleme süresi olduğu belirlenmiştir [26]. EKİ yönteminde takım elektrot tasarımı, işlem parametrelerinin seçimi ve sistem eniyilemesi gibi temel sorunların çözümü için bir CAE prototipi J. Kozak tarafından geliştirilmiştir [27].

Titanyum, nikel ve tungsten gibi metallerin alaşımları ve güçlendirilmiş paslanmaz çelik gibi çok sert malzemeler bu yöntemle işlenme potansiyelleri olan malzemelerdir. Bu malzemelerin EKİ yöntemi ile işlenebilirliği birçok grup tarafından incelenmiştir. Zhengyang ve arkadaşları [28] uzay araçlarının motorlarında kullanılan özel bir bileşim olan Ti60 alaşımını EKİ yöntemi ile işleyerek, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen elektrokimyasal parametreleri incelemişlerdir. Çalışmada elektrolit derişimi, voltaj değeri, frekans, sıcaklık ve besleme hızı gibi parametrelerle çalışılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen faktörün güç kaynağının frekans değeri olduğu görülmüştür. Jet motorlarının verimliliğini arttırmak için titanyum ve nikel bazlı alaşımlar oldukça fazla kullanılmaktadır. Zeis ve arkadaşları [29] farklı özelliklerdeki titanyum ve nikel bazlı farklı alaşımlar kullanarak, bu malzemelerin elektrokimyasal işlenebilirliğini araştırmışlardır. Elektrolit türü, besleme hızı ve voltaj değerlerinin, MKH ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri gözlenmiştir. Aynı koşullarda, besleme hızı arttırıldığında MKH'nın arttığı ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, voltaj değeri arttırıldığında ise MKH'nın azaldığı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir.

Kullanılan elektrolitlerin malzeme işlenebilirliği üzerinde etkisi oldukça büyüktür. Bu etkiyi araştırmak amacıyla, Haish ve arkadaşları [30] pasif NaNO_3 ve daha aktif NaCl elektrolitlerini kullanarak, farklı elektrolitlerin 100Cr6 çeliğinin elektrokimyasal işlenebilirliği üzerinde olan etkilerini incelemişlerdir. NaCl çözeltisi kullanıldığında difüzyon çok daha rahat olduğu için MKH artmaktadır. NaNO_3 çözeltisi kullanıldığında ise malzeme yüzeyinde film tabaka oluştuğu için difüzyon zorlaşmakta ve MKH'nın düştüğü görülmüştür.

EKİ metodu ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır; fakat bu çalışmaların çoğu nikel, titanyum ve karbür gibi sert, işlenmesi zor malzemeler üzerine yoğunlaşmaktadır. Oysa, bir çok endüstride farklı amaçlarla kullanılan alüminyum malzemelerin bu yöntem yardımıyla mikro boyutlarda işlenebilmesi bir çok uygulama alanının önünü açacak ve bu

malzeme için yeni kullanım amaçları ortaya koyacaktır. Çizelge 4.1’de alüminyum malzemesi kullanılarak yapılan bazı çalışmalar ve içerikleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.1’de yer alan çalışmalardan ilkinde Al-6061 alaşımı kullanılarak yapılan EKİ çalışmasında, elektrot olarak teflon kaplı paslanmaz çelik tüpler ve elektrolit olarak 1 M derişimdeki KBr tuz çözeltisi kullanılmıştır. Elektrolit çözeltisinin sıcaklığı 21-26°C ve iletkenlik değeri 111-121 mS/cm’dir. Ultrasonik titreme büyüklüğü, akım değeri, darbeleri akım frekansı ve işleme süresi gibi parametrelerle çalışılmıştır. MKH 20-35 mm³/dk değerleri arasında değişmektedir. Çalışmada, yan ürün olarak ortaya çıkan AlBr₃’ün, yüzey üzerindeki birikimi, akımın darbeleri olarak kullanılması ve ultrasonik dalgalar yardımıyla azaltılmıştır. Buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün de azaltıldığı ortaya konmuştur [31].

Bazı çalışmalarda bu çalışmada da parametre olarak değerlendirilen, elektrolit çözeltisi olarak kullanılan tuz çözeltisinin çeşitlerine, derişim farkına ve iyon değişim farkına odaklanılmıştır [32, 33].

EKİ cihazının çalışma parametreleri olan elektrot aralığı, gerilim, elektrolit akış hızı, akım yoğunluğu ve işleme süresi gibi parametreler pek çok çalışmanın temelini oluşturulmaktadır.

Bahsedilen çalışmalardan yararlanılarak, bir parametre çalışması oluşturulmuş ve optimum parametre koşulları belirlenmiştir.

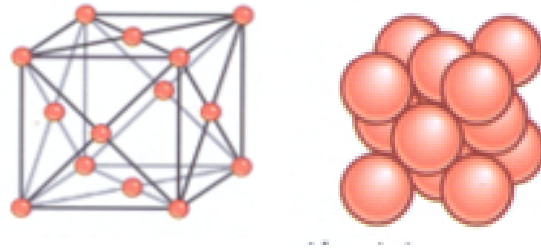
Çizelge 2. 1 Alüminyum Malzemelere Uygulanan EKİ Çalışmaları

Çalışma sahibi, Basıldığı Dergi ve Basım Yılı	İş parçası	Elektrot	Elektrolit	İşleme Parametreleri	Sonuçlar
Jigar B, Patel et al, Procedia Manufacturing 2017 [31]	Al 6061-T6 Alaşımı	Teflon kaplı paslanmaz çelik tüp	Potasyum Bromür (KBr) 1 M 111-121 mS/cm 21-26 °C	Ultrasonik titreme büyüklüğü (0,15,36 µm) Akım değeri (22,26 A) Pulsed akım frekansı (0,125,275 Hz) İşleme süresi (6,89, 10,33 dk)	20-35 mm ³ /dk arasında
Aris Widyo Nugroho et, al, 2nd Int, Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, Chemical Engineering (ICIMECE) 2016 [34]	Paslanmaz çelik ve alüminyum tabakalar	Pirinç çubuk	Sodyum Klorür (NaCl) 150g/L (2,56 M)	Elektrot Aralığı (0,5, 0,75, 1,0 mm) Gerilim (7, 10, 13 V)	Paslanmaz Çelik: 3,0-6,0 x 10 ⁻² mm ³ /dk Alüminyum: 5,0- 8,0 x 10 ⁻² mm ³ /dk
Atul J, Unare et, Al, Int, Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2016 [35]	Al-7075 Alaşımı	Bakır	Potasyum Klorür (KCl)	Gerilim (15, 18, 21) Besleme (0,3, 0,6, 0,9) Elektrolit Değişimi (10, 15, 20)	Optimum Parametre: Gerilim: 15 V Akış hızı: 0,9 mm/min Elektrolit değişimi: %20
Andi Sudiarso et, Al, International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) 2013 [36]	Pirinç Paslanmaz Çelik 204 Al 1100	Pirinç	Sodyum Klorür (NaCl) 150g/L (2,56 M)	Elektrot çapı (2,6 mm) Elektrolit akış hızı (6 m/s) Gerilim (15 V)	Pirinç: 2,96x10 ⁻⁴ mm ³ /dk Paslanmaz Çelik: 2,54-5,74x10 ⁻⁴ mm ³ /dk Alüminyum: 0,79-2,53x10 ⁻⁴ mm ³ /dk.
J, E, Bannard et, Al Journal of Applied Electrochemistry 1981 [32]	Al tabaka 35°C'deki 0,5M NaOH çözeltisind e ön işlem yapılmış	Perpex ve çelik	Elektrolit: 0,9M ve 2,7 M NaCl, 3,5 M NaClO ₃ , 1,4 M HCl, 0,8 M HNO ₃ Sıcaklık: 288 ve 313 °K	Elektrotlar arası mesafe: 0,5, 1,00 ve 2,00 mm İşleme süresi: 5,15 ve 30 dakika Akış hızı: 1,2, 4,1 ve 6,2 dm ³ /min	İyonların ve işleme koşullarının yüzey üzerine etkisi incelenmiş.
Shuangqing Qian, Feng Ji AASRI Int, Conf, on Ind, Electronics and App, 2015 [33]	Al Alaşım	Paslanmaz Çelik	NaCl ve NaNO ₃ %18 g/L 30 °C	Akım yoğunluğu: 5 ve 25 A/cm ² Elektrolit Çeşidi: NaCl ve NaNO ₃	Akım yoğunluğunun ve elektrolit çeşidinin alaşım yüzeyine etkisi incelenmiş.

2.2 Alüminyum Alaşımlarının Elektrokimyasal Yöntemle İşlenmesi

Alüminyum doğada en çok bulunan elementlerden birisidir. Diğer elementlerle kolayca bağlandığı için saf alüminyum doğada bulunmaz. Bundan dolayı insanoğlu bu elementle ilgili geçmiş yıllarda çok fazla bilgi edinememiştir. Alüminyumun yaklaşık 1880'li yıllarda endüstriyel olarak kullanılmaya başlanması ile çeşitli alaşımları geliştirilmiştir. Alüminyum dünyanın en hafif metallerinden biridir (çeliğin yoğunluğu $7,9 \text{ g/cm}^3$ iken alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ dir); fakat aynı zamanda çok güçlü, son derece esnektir. Pek çok ortam şartında korozyona karşı dayanıklıdır. Manyetize olmaz, mükemmel elektrik ve ısı iletkenliği vardır ve hemen hemen tüm diğer metallerle alaşım oluşturabilir. Yüzey işlenebilirliğinin iyi olması bu malzemenin pek çok alanda kolaylıkla kullanılabilmesine imkan vermiştir [37].

Alüminyum alaşımlarının çoğunluğu kolayca şekillendirilebilir, buna örnek olarak yüksek saflıktaki, ince alüminyum folyo tabakalarının kolayca katlanabilmesi verilebilir. Alüminyum FCC kristal yapısına (Şekil 2.7) sahip olduğundan dolayı, çok düşük sıcaklıklarda bile kolayca şekillendirilebilir. Alüminyum en büyük kısıtlaması, erime sıcaklığının (660°C) düşük olmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda kullanılamamasıdır.



Şekil 2. 7 FCC kristal yapısı [38]

Alüminyumun mekanik dayanımı soğuk işleme ve alaşımlama işlemi ile güçlendirilebilir, fakat bu iki işlem de korozyona karşı olan direnci azaltır. Alüminyum alaşımları için kullanılan başlıca katkı elementleri çinko, bakır, silisyum, manganez, magnezyum, demir, nikel ve titanyumdur [39].

❖ Katkı Elementlerinin Alüminyuma Etkileri

- Çinko (Zn) : Alüminyumun akışkanlığını artırır, yüksek çinko içeren alaşımlar sıcakta çatlama ve soğukta çekme özelliği gösterirler. Çinko oranı % 10' dan yüksek alaşımlar, zayıf korozyon direnci gösterirler.

- Bakır (Cu) : Alüminyuma sertlik, dayanım, akışkanlık ve kolay işlenebilme özellikleri sağlar. Bakır % 33 oranında kullanıldığında, alüminyumla ötektik bileşim oluşturur.
- Silisyum (Si) : Alüminyum içerisinde % 1-1,5 civarında ergime gösterir. Silisyum %12 oranında kullanıldığında, alüminyum ile ötektik bileşim yapar. Kristalleri incelterek, ergime derecesini düşürür (565 °C), mekanik özellikleri ve sıcak dayanımını yükseltir, akışkanlığı artırır. Silisyum miktarı arttıkça, işlenmeye karşı dayanım meydana gelir.
- Manganez (Mn) : Alüminyum içinde %0.3 oranında ergir. Ergime derecesini yükseltir, akışkanlığı arttırmak için demir ile birlikte kullanılır. Alaşımların dayanım ve çekme özelliklerini artırır.
- Magnezyum (Mg) : Magnezyum % 33 oranında kullanıldığında, alüminyum ile birlikte ötektik bileşim oluşturur. Özgül ağırlığı az olduğu için girdiği alaşımın özgül ağırlığını düşürür. Magnezyum oranı % 6'dan fazla olan alaşımlarda çökelme sertliği oluşur.
- Demir (Fe) :İğneli doku biçiminde kristallenir. İğneli doku kristallerin oluşması tehlikeli olur. Mekanik dayanımları azaltır.
- Nikel (Ni) : Alaşımın korozyon dayanımını iyileştirir, parçalara kalıcı parlaklık verir.
- Titanyum (Ti) : Alüminyum alaşımlarında, bor ile birlikte, tane inceltici olarak kullanılır [40].

Isıl işlem uygulanamayan alaşımlar tekli fazdan meydana gelir, bu durum katı-çözelti dayanımı artırılarak, alaşım dayanımının artmasına dayanır. Diğerleri ise alaşımlama işleminin bir sonucu olarak ısı eşliğinde eritilme işlemi ile elde edilir. Bu alaşımlarda, çökelme sertleşmesi alüminyum dışındaki alaşımı oluşturan diğer iki elementin metaller-arası bileşik oluşturmasına bağlıdır.

Alüminyum alaşımlar dökme veya dövme alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. İçeriklerindeki temel safsızlık veya metal saflığı seviyesine göre bu alaşımlar 4 haneli rakamlarla adlandırılırlar. Bu rakamların arkasından bir tire işareti ile alaşıma uygulanan işlemi (ısıl ve/veya mekanik) ifade eden bir harf ve 3 haneli bir sayı gelir. Örnek olarak, “F” üretildiği şekilde , “H” gerinim sertleştirilmesi işlemi, “O” ise tavlama işlemi yapılmış anlamına; T3

ise alaşım çözelti ısıı işlemleri, soğuk işleme ve daha sonra doğall olarak yaşlandırılmış anlamına gelmekte, T6 ise çözelti ısıı işleminin ardından, yapay yaşlandırma işlemleri yapılmış anlamına gelmektedir. Çizelge 2.2’de endüstride çok fazla kullanılan bazı alaşımların mekanik özellikleri, içerikleri, uygulama alanları gibi bilgiler özetlenmiştir.

Çizelge 2. 2 Çok Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Mekanik Değerleri ve Uygulama Alanları [25]

Alaşım No.	İçerik (% Küttele)	İşlem Koşulları	Çekme Mukavemeti (MPa/ksi)	Akma Mukavemeti (MPa/ksi)	Uzama (% EL)	Uygulama Alanları	Sınıflandırma
1100	Cu: 0.12	Tavlanmış (O)	90/13	35/5	35-45	Gıda, kimyasal ambalajları, Depolama ekipmanları, Isı değiştiriciler, Işık yansıtıcıları	Dövme, Isıl İşlem Uygulanmayan Alaşımlar
3003	Cu: 0.12 Mn: 1.2 Zn: 0.1	Tavlanmış (O)	110/16	40/6	30-40	Mutfak aletleri, Basınç tankları, Boru sistemleri	
5052	Mg: 2.5 Cr: 0.25	Gerinim Sertleştirilmesi (H32)	230/33	195/28	12-18	Hava araçlarının benzin ve yağ borularında, Benzin tanklarında, Ekipmanlarda, Perçinlerde, Kablolarda	
2024	Cu: 4.4 Mg: 1.5 Mn: 0.6	Isıl İşlem (T4)	470/68	325/47	20	Hava araçlarının yapısal malzemelerinde, Ekipmanlarda, Kamyon tekerleklerinde, Vidalı ekipman parçalarında	Dövme, Isıl İşlem Uygulanmış Alaşımlar
6061	Mg: 1.0 Si: 0.6 Cu: 0.30 Cr: 0.23	Isıl İşlem (T4)	240/35	145/21	22-25	Hava araçları, Kamyon, Kano, Demiryolu araçları, Mobilya, Boru hatları,	
7075	Zn: 5.6 Mg: 2.5 Cu: 1.6 Cr: 0.23	Isıl İşlem (T6)	570/83	505/73	11	Hava araçlarının yapısal parçaları ve diğer kritik uygulamalarında	
356.0	Si: 7.0 Mg: 0.3	gerinim Sertleştirilmesi (H32)	228/33	164/24	3.5	Hava araçlarının poMPa kısımlarında, Otomotivlerin şanzıman kutularında, Su soğutmalı silindir bloklarda	
2090	Cu: 2.7 Mg: 0.25 Li: 2.25 Zr: 0.12	Isıl İşlem, Soğuk İşleme (T83)	455/66	455/66	5	Hava araçlarının yapısal parçalarında ve Kroyojenik tankların malzemelerinde	Alüminyum-Lityum Alaşımlar
8090	Cu: 1.3 Mg: 0.95 Li: 2.0 Zr: 0.1	Isıl İşlem, Soğuk İşleme (T651)	465/67	360/52	-	Hava araçlarının yüksek darbelere dayanıklı olması gereken yapısal bölümlerinde	

Şekil 2.8’de alüminyum alaşımlar kullanılarak sanayide üretilen pervaneler, türbinler, çarklar, motorlar ve radyatörler gibi parçalar gösterilmiştir.



Şekil 2. 8 Alüminyum alaşımlar kullanılarak EKİ ile yapılan bazı parçalar [41]

Al-6061 alaşımı içeriğinde pek çok elementi barındıran, oldukça geniş uygulama alanları bulunan bir alüminyum alaşımıdır [42]. Çalışmada kullanılacak olan Al-6061 alaşımının içeriği aşağıdaki Çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3 Al-6061 alaşımının içeriğindeki elementler kütlece % [42]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
0,40-0,80	0,7	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,04-0,35	0,25	0,15	0,05	Kalan

Al 6061 alaşımı içeriğindeki elementlerin oranına bağlı olarak, aynı zamanda AlMg1SiCu olarak da bilinmektedir. Yapılan ısıtılma işlemiyle mekanik özelliklerde değişimler meydana gelmektedir. Çizelge 2.4 incelendiğinde, çekme dayanımı, akma dayanımı ve kesme modülünün ısıtılma işlemi durumuna bağlı olarak tavlama, T4 ve T6 işlemlerine göre arttığı, % uzamanın azaldığı ve elastisitenin değişmediği görülmektedir.

Çizelge 2. 4 Alüminyum 6061 alaşımlarının mekanik özellikleri [27]

Isıl İşlem	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kesme Modülü (MPa)	Elastisite (GPa)
O	124	55	30	83	68,3
T4,T451	241	145	25	167	68,3
T6,T651	310	276	17	207	68,3

Bu alaşımın iyileştirebilirliği ve korozyon dayanımı yüksek, kaynak yapılabilirliği ise iyidir. Orta dayanıma sahip bir alaşımdır. Levha, çubuk boru, lama, tel ve profil şeklinde olmak üzere pek çok farklı formda üretimi mevcuttur. Gemi inşa sektöründe, demiryolu vagonlarında, kamyon korkuluklarında, köprülerde, borularda, kazan imalatı, helikopter pervane kaplaması gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [43].

Teknolojik gelişmelerin artmasıyla beraber bu malzemenin havacılık, savunma sanayi, uzay uygulamaları gibi pek çok alanda kullanımı yaygınlaşarak, artmaktadır. Yüzey özelliklerinden dolayı geleneksel yöntemlerle kolayca işlenebilmektedir; fakat özellikle savunma sanayi ve uzay endüstri uygulamalarında hassas ve mikro işleme yapılması gerektiği için geleneksel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Bu durumdan dolayı bu alaşımın elektrokimyasal işleme yöntemiyle işlenebilirlik potansiyelinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Alüminyum alaşımlarının EKİ potansiyelini inceleyen farklı çalışmalar bulunmaktadır. %5,6-6,1 Zn, % 2,1-2,6 Mg, 1,2-1,6% Cu içeren alüminyum alaşımı 7075'in EKİ yöntemi ile işlenebilirliği, maksimum malzeme kaldırma hızını ve en iyi yüzey kalitesini elde etmek için optimum çalışma koşulları, deneysel sonuçlara Taguchi modelleme yöntemi uygulanarak araştırılmıştır [35]. En iyi elektrik potansiyeli 15 V, takım hızı 0.9 mm/dk ve elektrolit derişimi % 20 KCl çözeltisi olarak tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada ise tek basamaklı EKİ yöntemi kullanılarak fluoroalkilsilan çözeltisi içeren sodyum klorür (NaCl) elektroliti ile süperhidrofobik yüzeye sahip alüminyum malzemeler elde edilmiştir [44]. Malzemelerin hidrofobik karakterleri, morfolojik özellikleri ve kimyasal bileşimleri SEM, EDS, EPMA ve FTIR gibi yöntemlerle incelenmiştir. Hung ve arkadaşları [31] elektrokimyasal işleme cihazı ile teflon kaplı paslanmaz çelik elektrotlar kullanarak, Al-6061-T6 alaşımına delik açmışlardır. Malzeme kaldırma hızı ve açılan delikler 3-boyutlu

optik profilleme cihazıyla incelenmiş ve cihazın akım değeri, frekansı, işlenme süresi gibi çalışma koşullarının etkileri araştırılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında, elektrokimyasal işleme yöntemi için özel olarak tasarlanmış olan yerli bir elektrokimyasal işleme sistemi kullanılmıştır. Bu sistem anodik aşındırma tekniği olarak da bilinmektedir. Bu sistem, doğru akım yardımıyla anot ve katot arasında bir potansiyel fark yaratılarak, işlenecek malzemenin yüzeyinden metal atomlarının iyonlaşma sonucu koparılması ve bu iyonların elektrolit çözeltisi yardımıyla metal iyonu şeklinde işleme bölgesinden uzaklaştırılması prensibi ile çalışır. Elektrolit olarak, tuzlu su çözeltileri kullanılmıştır. Endüstride oldukça yaygın bir şekilde kullanılan Al-6061 alaşımının elektrokimyasal işleme yöntemi ile işlenme potansiyeli araştırılmıştır.

3.1 Kullanılan Malzeme ve Cihazlar

3.1.1 Alüminyum Alaşımı

Çalışmada kullanılmak amacıyla seçilen Al-6061 alaşımı, içeriğinde pek çok elementi barındıran, oldukça geniş uygulama alanları bulunan bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımın iyileştirebilirliği ve korozyon dayanımı yüksek, kaynak yapılabilirliği ise iyidir. Endüstride orta dayanıma sahip, havacılık-uzay sanayi malzemesi olarak bilinmektedir. Alaşımın kimyasal ve fiziksel içerikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Al-6061 alaşımının element içeriği [31]

Element İçeriği	Kısaltılması	% Kütle
Silisyum	Si	0,40-0,80
Krom	Cr	0,04-0,35
Manganez	Mn	0,00-0,15
Magnezyum	Mg	0,80-1,20
Bakır	Cu	0,15-0,40
Demir	Fe	0,00-0,70
Çinko	Zn	0,00-0,25
Titanyum	Ti	0,00-0,15
Alüminyum	Al	Kalan

Çizelge 3. 2 Al-6061 alaşımasının fiziksel özellikleri [45]

Fiziksel Özellikler	Değer
Yoğunluk	2,63 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	650 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23,3x10 ⁻⁶ /°K
Elastisite Modülü	70 GPa
Isıl İletkenlik	180 W/m.°K
Elektriksel Direnç	% 45,6 IACS

Alaşım 1,6 cm çapta, 10 cm uzunlukta silindir borular şeklinde Coşkunöz Savunma Havacılık şirketi tarafından sağlanmıştır (Şekil 3.1.a). Düzgün bir yüzey işleme yapılabilmesi için malzemeler 2 cm yüksekliğinde kestirilmiştir (Şekil 3.1.b)

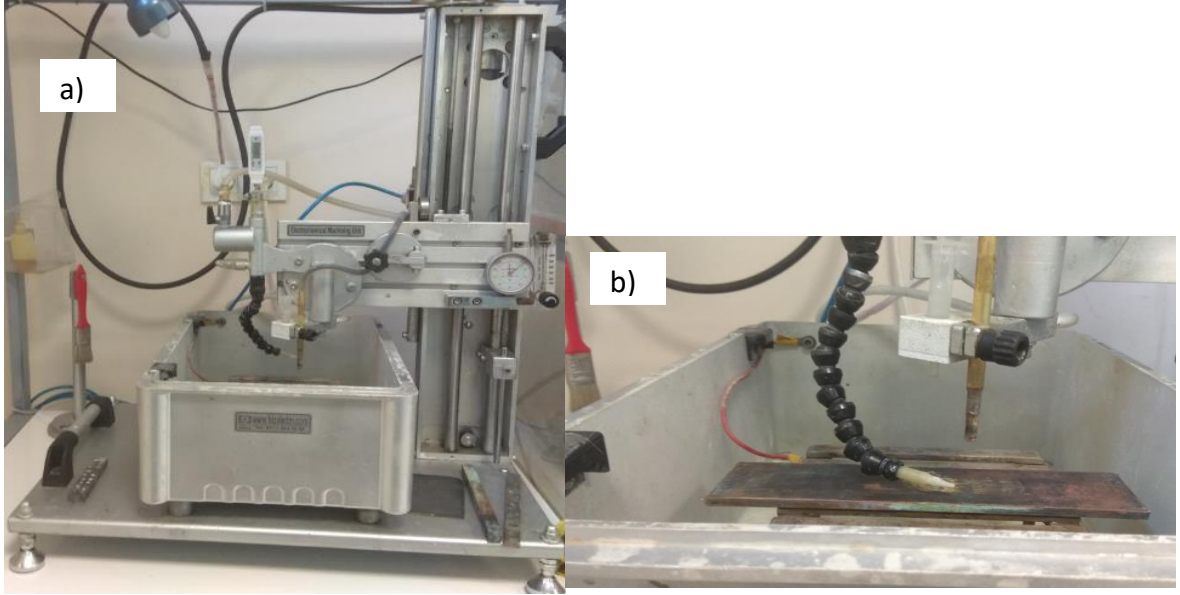


Şekil 3. 1 a) 1,6 cm çapta, 10 cm uzunlukta silindir boru şeklinde Al-6061 alaşımı, b) 1,5 cm çapta, 2 cm yüksekliğinde kesilmiş Al-6061 malzemesi

3.1.2 Kimyasallar ve Tuz Çözeltileri

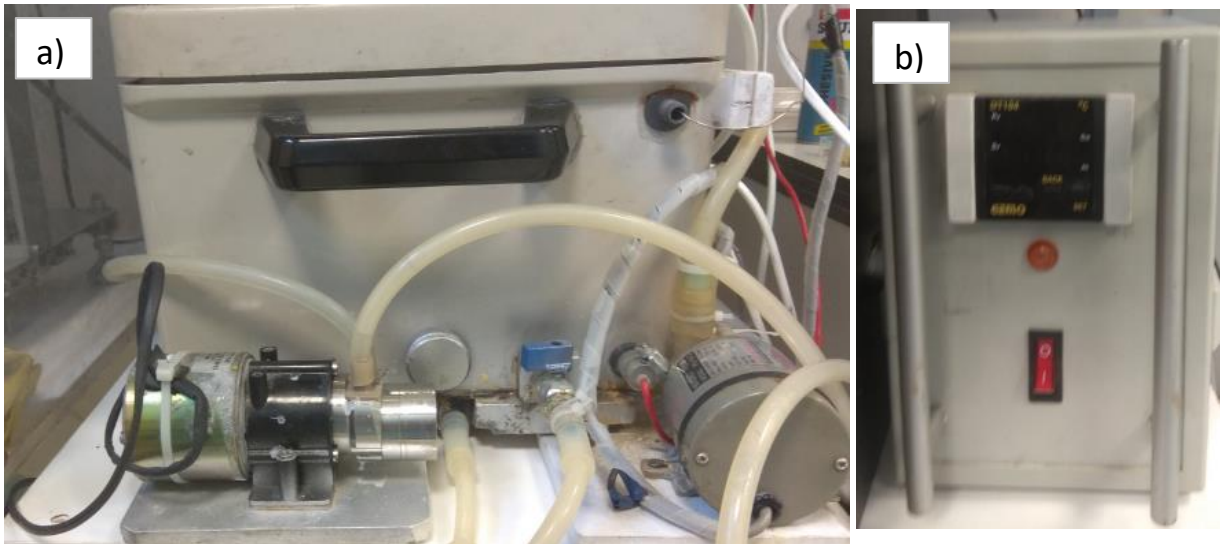
Tez çalışması kapsamında hazırlanan tuz çözeltileri elektrolit olarak kullanılmıştır. Tuz çözeltisi olarak: Sodyum Klorür (NaCl), Sodyum Bromür (NaBr), Sodyum Florür (NaF) ve Sodyum Nitrat (NaNO₃) kullanılmış ve malzemeler Merck'ten alınmıştır. Çözeltilerin pH ayarlamaları için Merck'ten alınan % 65 saflıktaki Nitrik Asit (HNO₃) çözeltisi ve % 37,5 lik Hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır.

ucu olarak 6 mm çapında, pirinç elektrot ucu kullanılmıştır. Elektrot uca bağlı, vakum pompası sistemi aracılığıyla işlenmiş metal iyonlarını içeren elektrolit çekilmektedir. şekil 3.3.b’de kullanılan işleme tezgahı, pirinç elektrot ucu ve elektrolit akış borusu gösterilmiştir.



şekil 3. 3 a) Servo sistem ve işleme tankı, b) İşleme tezgahı, katot uç ve elektrolit akış borusu

Kullanılan doğru akım güç kaynağı 10-25 V ve 1-5 A değer aralıklarında çalışmaktadır. Darbeli akım gönderme özelliğine sahiptir.



şekil 3. 4 a. Elektrolit tankı ve pompaları, b. Sıcaklık kontrolörü

Elektrolit tankının ls 40x40 cm boyutlarında ve sıcaklık kontrollüdür. şekil 3.4.b’de gösterilen sıcaklık kontrol cihazı ile kontrol edilerek, farklı sıcaklıklarda işlenmek istenilen

malzemeler için sıcaklık değeri ayarlanabilir. Devir daim pompası 220V ve 300 W değerlerine sahiptir. Elektrolit akışı 50 L/dk değerlerine kadar çıkabilir.

❖ *pH ve İletkenlik Ölçer*

Çalışmada kullanılan elektrolit çözeltilerinin pH ve iletkenlik değerlerinin ölçümünde Zenith marka cihaz kullanılmıştır. Cihazın ölçüm limitleri pH ölçümü için pH 0-14 arasında, iletkenlik değerleri için 0-500 mS aralığındadır. Ayrıca, ölçüm cihazının hassasiyeti pH değeri için $\pm 1\%$ ve iletkenlik değerleri için $\pm 0,5 \%$ dir.

❖ *Saf Su Cihazı*

Çalışmada elektrolit hazırlamak ve sistem temizliğini yapmak amacıyla saf su kullanılmıştır. Bu işlemlerde kullanılan saf su, Şimşek Labor teknik marka SS200 model su arıtma cihazından elde edilmiştir.

❖ *Hassas Tartı*

Alüminyum alaşımlarının ve elektrolit çözeltilerinin hazırlanması sırasında 0,0001 g hassasiyete sahip, Mettler Toledo marka AB204 model elektronik hassas tartı kullanılmıştır.

3.2 DeneySEL Yöntemler

3.2.1 Elektrolitin Hazırlanması

EKİ işlemine uygun elektrolit çözeltisinin belirlenmesi için farklı tuzlar kullanılmıştır. Elektrolit çözeltisinin derişimine bağlı olarak çözeltinin elektriksel iletkenliği değışmekte ve bu durumda işleme sırasında geçen elektrik akımının değerini etkilemektedir. Her ne kadar elektriksel iletkenlik arttığında akım artsa da düzgün bir işleme elde edebilmek için, yüzeyde pasifizasyonun oluşmayacağı optimum koşullarda çalışmak gerekmektedir.

Elektrolit olarak, 0,5M derişim değerinde NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF çözeltileri kullanılarak işleme yapılmıştır.

NaBr, NaCl ve NaNO₃ için derişime bağlı elektriksel iletkenlik grafikleri oluşturulmuştur. Tuzların moleküler ağırlıkları sırasıyla 102,89 g/mol, 58,44 g/mol ve 84,99 g/mol'dür. Elektrolit çözeltisinin elektriksel iletkenlik değerinin, derişime bağlı olan değışimini incelemek için, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3 ve 5 M derişimlerde çalışılmıştır. NaBr çözeltisi için, 5 M derişim elde etmek amacıyla 51,445 g tuz 100 ml su içerisinde çözdürülmüştür. Her bir derişim değeri için çözelti, gerekli miktarda saf suyla seyreltilmiştir. Aynı işlemler

NaCl ve NaNO₃ çözeltileri için de tekrarlanmıştır. Derişime bağılı iletkenlik sonuçları çizelgelerde verilmiş ve Bölüm 4.2’de grafikleri oluşturularak, yorumlanmıştır.

Çizelge 3. 3 NaBr Çözeltisinin derişimi bağılı iletkenlik değerleri

NaBr Derişimi (M)	İletkenlik (mS)
0	0,0
0,25	22,4
0,5	41,0
0,75	57,4
1	72,1
2	121,0
3	156,7
5	192,5

Çizelge 3.3’de gösterildiğı gibi, çözeltinin derişimi arttıkça elektriksel iletkenlik değeri de orantılı olarak artmaktadır. Elektrolit çözeltisinin iletkenliğı arttıkça, elde edilen işleme akım yoğunluğu değerinin de arttığı ve buna bağılı olarak malzeme kaldırma hızının da artabileceğı düşünölmektedir. Elektrolitin derişimi arttıkça yüzeyde artan iyon yoğunluğuyla bağlantılı olarak pasifize edici tabaka meydana gelmekte ve bu durum malzeme kaldırma hızının azalmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı işleme koşulları belirlenirken bu durum da göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 3.4’de NaCl çözeltisi için derişim değerlerine karşılık ölçölen iletkenlik değerleri verilmiştir. Çözelti derişimi arttıkça elektriksel iletkenlik değeri de buna bağılı olarak artmaktadır. NaCl çözeltisinin iletkenlik değerleri aynı derişimdeki NaBr ile kıyaslandığında biraz daha düşöktür.

Çizelge 3. 4 NaCl Çözeltisinin derişime bağı iletkenlik değ erleri

NaCl Derişimi (M)	İ letkenlik (mS)
0	0,0
0,25	21,9
0,5	39,6
0,75	55,1
1	68,7
2	111,0
3	140,8
5	174,0

Çizelge 3.5’de NaNO₃ çözeltisinin derişime bağı iletkenlik değ erleri gösterilmiştir. Diğ er tuz çözeltilerinde oldu ğ u gibi derişim arttıkça, iletkenlik değ eri de artmaktadır.

Çizelge 3. 5 NaNO₃ çözeltisinin derişime bağı iletkenlik değ erleri

NaNO ₃ Derişimi (M)	İ letkenlik (mS)
0	0
0,25	19,8
0,5	38,7
0,75	51,7
1	62,3
2	89,5
3	104,5
5	116,2

Çizelge 3.6’da NaF çözeltisinin derişime bağı iletkenlik değeri gösterilmiştir. Diğer tuz çözeltilerinde olduğu gibi derişim arttıkça, iletkenlik değeri de artmaktadır. Diğer tuz çözeltileriyle kıyaslandığında aynı derişim değeri NaF çözeltisinin iletkenlik değeri en düşüktür.

Çizelge 3. 6 NaF çözeltisinin derişime bağı iletkenlik değeri

NaF Derişimi (M)	İletkenlik (mS)
0	0,0
0,25	19,8
0,5	31,8
0,75	43,2
1	50,4
2	71,3
3	86,5
5	98,9

3.2.2 Malzemenin EKİ Yöntemi ile İşlenmesi

1. Elektrolit çözeltisi hazırlandıktan sonra, pH ve iletkenlik ölçümleri yapılmaktadır.
2. Hazırlanmış olan elektrolit çözeltisi elektrolit tankına doldurulur.
3. İş parçası, tabla üzerine Şekil 3.5’deki gibi yerleştirilir.



Şekil 3. 5 İş parçasının elektrokimyasal işleme tezgahına yerleştirilmesi

4. Güç kaynağı açılır, belirlenen çalışma değerleri cihazdan seçilir ve servo sistem yardımıyla katot uç iş parçasına yaklaştırılır, belirli bir mesafeye gelene kadar devam edilir.
5. Elektrolit pompa yardımı ile iş parçası üzerine akıtılmaya başlanır, akış ölçer yardımıyla istenilen hız ayarlanır ve işleme başlar (Şekil 3.6).



Şekil 3. 6 Elektrokimyasal İşleme anından bir görüntü

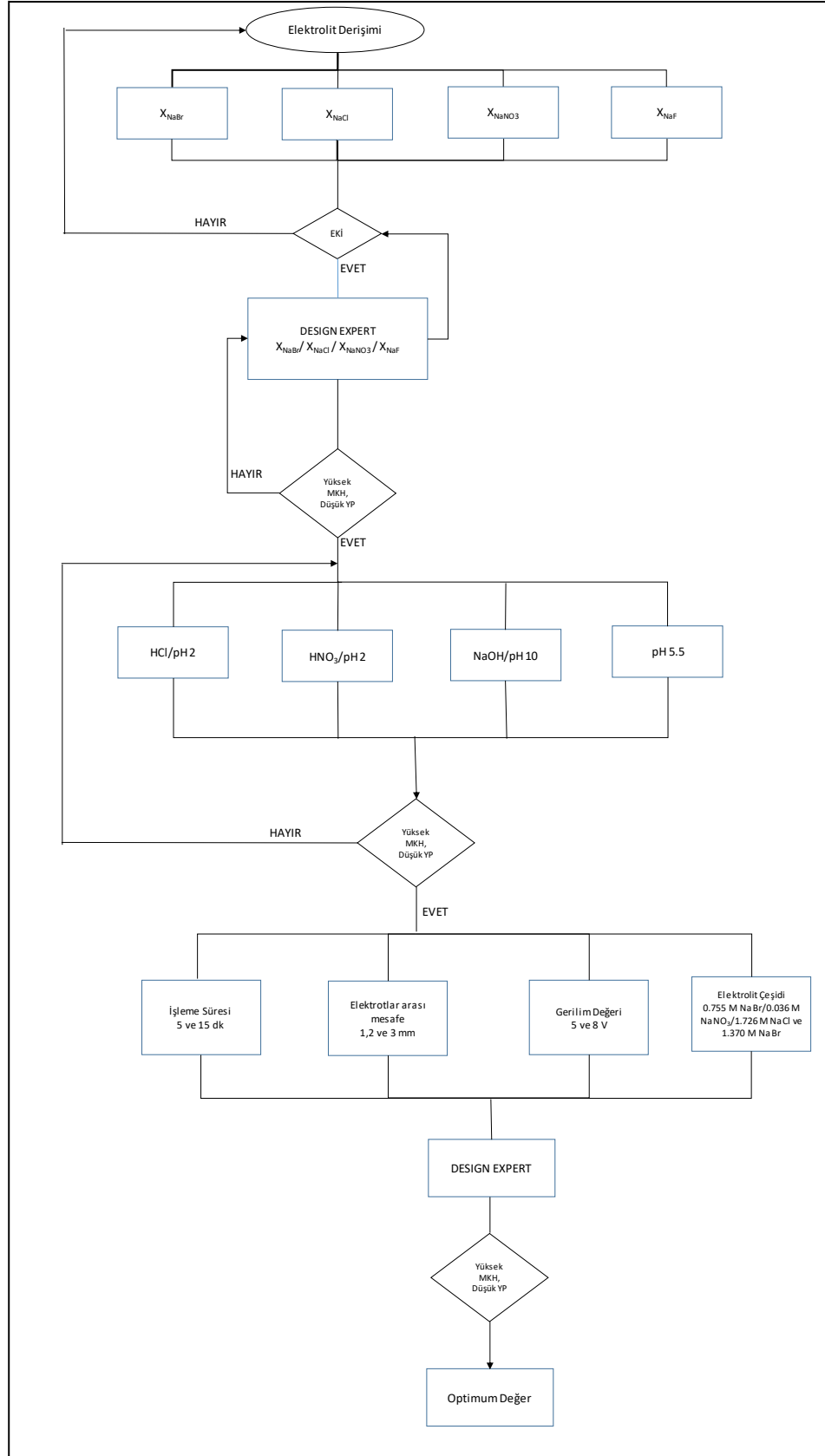
6. Vakum pompası açılarak, malzeme üzerinde biriken iyonları içeren elektrolit çözeltisi uzaklaştırılır.
7. Güç kaynağı üzerindeki akım ölçer yardımı ile anlık olarak işlem sırasında ölçülen akım değerleri gözlenir. Ayrıca, sinyal okuyucu açılarak anlık kare dalga sinyal değerleri incelenebilir.
8. İstenilen süre boyunca bu şekilde sistem otomatik olarak işleme yapmaya devam eder. İşleme bittikten sonra, servo motor yardımıyla katot uç iş parçasından uzaklaştırılır, elektrolit pompası ve vakum pompası kapatılır, en son güç kaynağı da kapatılarak işlem tamamlanmış olur.

Yukarıda bahsedilen işlemler her bir çalışma koşulu için 3 kere tekrarlanarak, ortalama malzeme kaldırma hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri kaydedilmiştir.

3.2.3 Çalışma Koşullarının İncelenmesi

EKİ metodu ile malzeme yüzeylerinin işlenmesi sırasında işlemi etkileyen pek çok farklı unsur bulunmaktadır. Malzemenin yüzey özellikleri ve pasifizasyon durumlarına bağlı olarak, bu unsurların iyi incelenmesi gerekmektedir. Çalışma koşulları belirlenirken, en yüksek malzeme kaldırma hızına ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip malzemelerin elde edilmesi hedeflenmektedir. Elde edilen çalışma koşulları kullanılarak optimum koşulları belirlemek amacıyla, bir istatiksel analiz programı olan ‘Design Expert’ programı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmaların kolayca anlaşılabilmesi amacıyla bir çalışma akış şeması oluşturulmuş ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 Çalışma kapsamında oluşturulan akış şeması

3.2.3.1 Uygun Elektrolit Tespiti İçin Ön Çalışmalar

Çalışma kapsamında uygun elektrolit çözeltisini saptamak amacıyla NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF gibi farklı tuzlar kullanılmıştır. Tuzların hepsinde özellikle katyon olarak Na⁺ seçilmiş ve anyon farkına bağlı işleme özellikleri araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan EKİ koşulları:

Elektrolit çözeltisi : NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF çözeltileri

Derişim : 0,5 M

Gerilim değeri : 5 V

Elektrotlar arası mesafe: 2 mm

İşleme süresi : 5 dk olarak belirlenmiştir.

İşlem öncesi elektrolit çözeltilerinin iletkenlik değeri kontrol edilmiştir. İşlem öncesi ve sonrası fotoğrafları çekilerek işleme etkisi gözlenmiştir. EKİ sonrası deneysel MKH hesaplanmış ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

NaF çözeltisinin işleme performansının derişimine bağlı etkisini kontrol etmek amacıyla, 0,5 M dışında 1 M çözelti ile de işleme yapılmıştır.

3.2.3.2 NaBr, NaCl ve NaNO₃ Tuzları ile Yapılan Çalışmalar

Bu tuz çözeltileri arasından, malzeme kaldırma hızı daha yüksek olan NaBr, NaCl ve NaNO₃ tuzlarıyla çalışılmaya devam edilmiştir. Bu tuzların tek başlarına gösterdikleri işleme performansları ve belirli oranlarda gösterdikleri performanslar kıyaslanarak, en optimum işleme performansına sahip 2 tane elektrolit karışımı belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan EKİ koşulları:

Elektrolit çözeltisi : NaBr, NaCl ve NaNO₃ çözeltileri

Derişim : 0.5, 1, 2 ve 4 M

Gerilim değeri : 5 V

Elektrotlar arası mesafe: 2 mm

İşleme süresi : 5 dk olarak belirlenmiştir.

Gerilim, elektrotlar arası mesafe ve işleme süresi değerlerine literatür araştırmalarından yararlanarak karar verildi. İşleme süresi belirlenirken 1,3 ve 5 dk için ön çalışma yapıldı. Fiziksel gözleme dayalı bir seçim yapılarak, katot şeklini ve yüzey kalitesini rahatça gözlemleyebilmeye olanak veren, 5 dk seçildi.

NaBr ve NaNO₃ tuzları kullanılarak 0, 0,5 ve 2 M derişimlerinde, NaCl tuzu kullanılarak ise 0, 1, 2 ve 4 M değerlerinde çalışılmıştır. Tuz çözeltisi derişimi arttırıldıkça MKH değerinin arttığı görülmüştür; fakat NaBr ve NaNO₃ çözeltilerinin derişimi arttıkça MKH artmasına karşın, yüzey üzerinde biriken yan ürünlerin miktarının da arttığı görülmüştür. NaCl kullanıldığında ise böyle bir yan ürün miktarı artışı gözlenmemiştir. Bundan dolayı, MKH arttırmak amacıyla, NaCl çözeltisinin derişiminin diğer tuz çözeltilerine kıyasla daha yüksek olması gerektiğine karar verilmiştir.

Yapılan çalışmalar kapsamında kullanılan elektrolit çözeltilerinin pH ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür. İşleme sonrasında, deneysel MKH hızları hesaplanmış ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. EKİ sonrasında her bir malzemenin yüzey görüntüleri alınmıştır.

Çok fazla çalışma koşul değeri olduğu ve 2 farklı sonuç elde edildiği için en optimum çalışma koşullarının istatiksel yöntemler kullanılmadan bulunması imkansızdır. Bu amaçla, literatür kapsamında en çok kullanılan analiz programları incelenmiştir [46]. En çok kullanılan istatiksel veri analiz programlarından birisi olan ‘Design Expert’ programı seçilmiş ve çalışma kapsamında kullanılmıştır. Program içerisinde farklı amaçlara yönelik pek çok model bulunmaktadır, özellikle kimya endüstrisinde kullanım amacıyla geliştirilen ‘Response Surface Model’ en çok kullanılan araçlardan birisidir. Bu model, optimum çalışma koşullarını belirleyebilmek amacıyla geliştirilmiş olan, deneysel dizayn ve analiz veri çözümleme yöntemlerini kapsayan bir istatiksel analiz yöntemidir [46, 47]. Bundan dolayı çalışmaya en uygun istatiksel veri modeli olarak bu model seçilmiştir.

Program indirildikten sonra, ilk olarak çalışma verileri ve sonuçları programın ‘Dizayn’ bölümüne girilmektedir (Ek.1). Elektrolit derişim değerleri ‘Factor’ sütununa, elde edilen sonuçlar olan MKH ve Yüzey pürüzlülüğü (YP) sonuçları ‘Response’ bölümüne girilmektedir [48].

Yazılım programı kapsamında lineer, 2FI, 2.dereceden ve 3. Dereceden denklemler gibi birçok farklı çözümleme yöntemi kullanılabilmektedir. Programa girilen veri sayısı ve faktör sayısı değerlendirilerek uygun çözümlemeler seçilebilmektedir. Çalışmanın bu kısmı için, Ek.2’de verilen tablo yardımıyla, 2.dereceden ve 3.dereceden polinom çözümlemelerinin

kullanılmasının uygun olduğu gör÷lm÷ştür. Program önerisi olarak öncelikle, Ek.3'de gösterilen, 2.dereceden polinom çöz÷mlemesi kullanılmıştır.

Çalışma verilerinin numerik optimizasyon çöz÷mler kriterleri belirlenmiş ve yazılıma işlenmiştir. Koşul değeri için en düşük ve en yüksek değeri belirtilerek, limit içerisinde olması hedeflenmiştir. NaBr ve NaNO₃ çözelti için çalışılan aralık 0-2 M, NaCl çözeltisi için 0-4 M aralığında olduğu için limitler bu değeri göre belirlenmiştir. MKH'nın maksimum ve yüzey pürüzlülük değeri minimum olması hedef olarak belirlenmiştir. Ayrıca her bir girdi için, 1'den 5'e kadar önem derecesi belirtilerek, buna uygun sonucun elde edilmesi sağlanmaktadır. Program önerisi değerlendirilerek, önem dereceleri 3 olarak belirlenmiştir. MKH değeri çalışmanın bu bölümü için en önemli değerlendirme kriteri olması nedeniyle, bu değeri önem derecesi program kapsamında seçilebilecek en yüksek değeri olan 5 olarak belirlenmiştir. Koşul değeri Ek.4'de program çıktısı olarak gösterilmiştir. Bu bölümde elde edilen tüm veriler programa işlenmiş ve Ek.5'de tablo halinde belirtilmiştir.

Program tarafından önerilen çözümler kullanılarak işleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve programın tahmini sonuçları karşılaştırılmıştır. İşleme sonucunda elde edilen veriler tekrar yazılıma eklenmiş ve veri analiz işlemi devam ettirilmiştir.

Veri sayısı artırılarak, MKH değeri programa girildikten sonra, programın verdiği iki farklı çözüm önerisi kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümü için, öncelikli amacımız yüksek MKH değeri sağlayacak elektroliti belirlemektir. Bundan dolayı, YP değerlendirme sonuçları bir sonraki aşamalarda değerlendirmeye alınmış ve bu kısımda sadece MKH sonuçlarının değerlendirilmesine karar verilmiştir. Hesaplama modeli olarak Cubic (3.dereceden denklem) model ve quadratic (2. Dereceden denklem) model seçilerek, seçilen modelin analiz sonuçlarına olan etkileri gözlenmiştir.

3.2.3.3 Asidik ve Bazik Ortamın İşleme Üzerine Etkisi

Daha sonra, belirlenen elektrolit çözeltisinin pH'ı değiştirilerek, pH farkının işleme performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çözeltiyi bazik pH 10 değerine getirmek için 1 M NaOH çözeltisi, asidik hale getirmek için 0,1 M HNO₃ ve 0,1 M HCl çözeltileri kullanılarak pH 2 yapılmıştır. İki farklı asit çözeltisi kullanılması, NO₃⁻ ve Cl⁻ iyonlarının işleme üzerine etkilerini araştırmak için yapılmıştır. EKİ çalışma koşulları:

Elektrolit çözeltisi : 1,370 M NaBr ve 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl,

pH değeri : 2, 5,5 ve 10,

Gerilim değeri : 5 V,

Elektrotlar arası mesafe: 2 mm,

İşleme süresi : 5 dk olarak belirlenmiştir.

Çalışma koşullarının bu şekilde belirlenme nedeni bir önceki bölümde açıklanmıştır.

3.2.3.4 İşleme Süresinin, Voltaj ve Elektrot Aralığının İşleme Üzerine Etkisi

Uygun pH değerine sahip elektrolitler kullanılarak, EKİ cihazı koşullarına bağlı bir çalışma yürütülmüştür.

Elektrolit olarak: HCl ile pH 2 olarak ayarlanmış olan, a. 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl ve b. 1,370 M NaBr kullanılmıştır.

İşleme süresi: 5 ve 15 dakika olarak seçilmiştir.

Elektrot arası mesafe: 1, 2 ve 3 mm olarak belirlenmiştir.

Gerilim değeri: 5 ve 8 V olarak ayarlanmıştır.

İşleme süresinin etkisini gözlemlemek amacıyla, daha önceki bölümlerde çalışılan 5 dakika ve daha yüksek bir süre olan 15 dakika süreleri seçilmiştir. Elektrot arası mesafenin işleme sonuçları üzerine olan etkisini gözlemlemek amacıyla, önceki bölümlerde çalışılan 2 mm değeri, daha kısa bir mesafe olan 1 mm ve daha uzak bir mesafe olan 3 mm değerleri seçilmiştir. Gerilim değerinin, işleme sonuçları üzerine etkisini gözlemlemek amacıyla ise 5V ve daha yüksek bir gerilim değeri olan 8 V kullanılmıştır.

Hazırlanan pH: 2 / 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl çözeltisinin iletkenlik değeri 132,6 mS olarak ölçülmüştür. Kullanılan diğer elektrolit olan pH: 2/ 1,370 M NaBr çözeltisinin iletkenliği ise 93,3 mS olarak ölçülmüştür.

Elde edilen veriler Design Expert programı yardımıyla analiz edilmiştir. Hesaplama modeli olarak quadratic (2. Dereceden polinom denklem) modeli seçilmiş işlemler devam ettirilmiştir.

Elektrolit çözeltilerinin derişim değerleri göz önüne alınarak alt ve üst limitleri belirlenmiştir (Ek.6). NaBr çözeltisi 0,755 M ve 1,370 M değerlerinde kullanıldığı için limit aralığı 0-2 M arasında, NaNO₃ çözeltisi 0,036 M değerinde kullanıldığı için limit aralığı 0-0,1 M arasında ve NaCl çözeltisi 1,726 M değerinde kullanıldığından dolayı limit aralığı 0-2 M olarak belirlenmiştir.

Diğer koşullar için de kullanılan koşullara uygun olarak alt ve üst limitler belirlenmiştir. MKH'nın maksimum ve YP değerinin en düşük olduğu değer hedeflenmiştir. MKH değerinin yüksek olması öncelikli hedef olduğu için, önem derecesi 5 olarak belirlenmiştir.

Önerilen çalışma koşulları:

Elektrolit İçeriği : pH 2/ 0,660 M NaBr-0,061 M NaNO₃- 1,729 M NaCl,

İşleme Süresi : 15 dakika,

Elektrot Aralığı : 2,349 ~ 2 mm,

Gerilim Değeri : 7,999 ~ 8 V olarak hesaplanmıştır.

HCl asidi ile pH değeri 2 olarak ayarlanan, 0,660 M NaBr-0,061 M NaNO₃- 1,729 M NaCl çözeltisinin iletkenlik değeri 136,4 mS'dir.

3.2.4 İşleme Hızı ve Kalitesi ile İlgili Analizler

3.2.4.1 Görsel İnceleme

Çalışmada işlenen malzeme yüzeyleri görsel olarak incelenmiş ve 13 MP BSI CMOS sensörlü F2.0 diyafram açıklığına sahip bir kamera yardımıyla görüntüler kaydedilmiştir.

3.2.4.2 Malzeme Kaldırma Hızının (MKH) Tespiti

EKİ metodunda, iş parçasının son şeklini belirleyen temel etken, metal çözünme hızıdır ve bundan dolayı işleme performansı doğrudan anodik reaksiyonlar ile akım yoğunluğuna bağlıdır. İşleme alanında iş parçası doğrudan katot ile etkileşimdedir, iletkenlik değeri sabittir ve elektrotlar arası aralık sabit tutulduğunda anodik tepkime hızı sabit olur. İşleme bölgesinden uzaklaştıkça, iş parçası üzerindeki akım yoğunluğu giderek azalmaya başlar ve uzaklık arttıkça sıfıra yaklaşır. Malzeme kaldırma hızı, malzemenin akım yoğunluğuna (J) ve malzeme çözünme verimine (η) bağlıdır [49].

Malzeme kaldırma hızı kuramsal olarak Eşitlik 3.1’de verildiği şekilde hesaplanır:

$$MKH = \frac{J a \eta}{v F \rho} \quad \text{Eşitlik 3.1}$$

J akım yoğunluğu (A/cm³), a atom ağırlığı (akb), η işleme verimliliği (%), v elektron değerlik sayısı, ρ iş parçasının yoğunluğu (g/cm³) ve F ise Faraday sabitidir (96500 Coulomb/mol).

Makine verimliliğinin η olduğu, elektrik akımının I (Amper) ve işleme süresinin t (dk) olarak kabul edildiği durumlarda, MKH aşağıdaki Eşitlikte verilmiştir;

$$MKH = \frac{I t a}{v F} \quad \text{Eşitlik 3.2}$$

Deneysel olarak ise malzeme kaldırma miktarı aşağıda eşitlik ile hesaplanır [50]:

$$MKH = \frac{\text{İlk ağırlık} - \text{Son ağırlık}}{\text{Yoğunluk} \times \text{Zaman}} \quad \text{Eşitlik 3.3}$$

Elektrokimyasal işleme için en önemli sonuçlardan bir tanesi malzeme kaldırma hızının (MKH) yüksek olmasıdır. İşleme verimi ne kadar yüksek olursa, kaldırma hızı da orantılı olarak artacaktır.

Malzeme kaldırma hızının kuramsal ve deneysel olarak hesaplanması ile yapılan işlemin verimliliği de hesaplanabilmektedir.

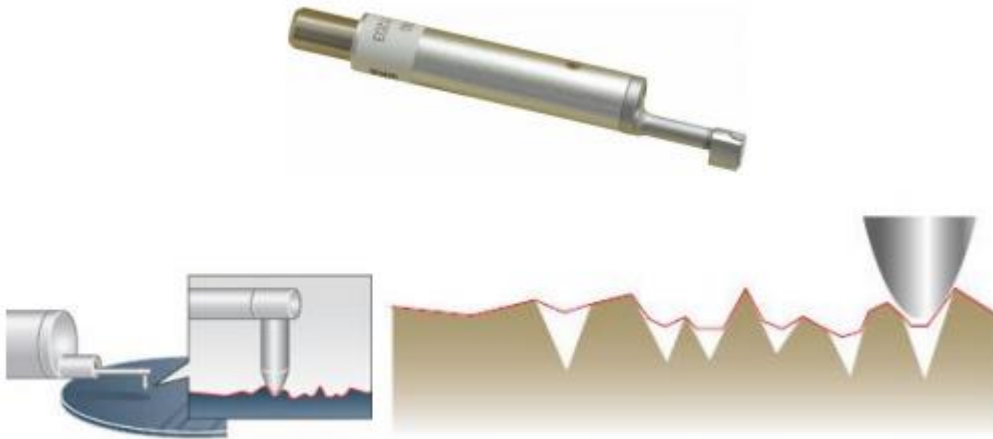
$$\eta = \frac{\text{Deneysel olarak hesaplanan MKH}}{\text{Teorik olarak hesaplanan MKH}} \times 100 \quad \text{Eşitlik 3.4}$$

Yapılan deneyler sonucunda her bir çalışma koşulu için malzeme kaldırma hızı hesaplanarak optimum MKH elde edilmiştir.

3.2.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Son yıllarda ilerleyen teknolojik gelişmelerle birlikte uzay, savunma ve otomotiv endüstrileri gibi alanlarda malzeme geliştirme tekniklerinin oldukça arttığı ve bununla birlikte ürün kalitesinde beklentilerin yükseldiği görülmektedir. Malzemenin kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden birisi de yüzey pürüzlülük değeridir [51].

Yüzey pürüzlülüğü analizleri Mutitoyo marka Surftest SJ-210 model pürüzlülük ölçer cihazıyla yapılmıştır. Cihazın ucundaki elmas uç yardımıyla yüzey pürüzlülüğü ölçülmektedir. Örnekleme uzunluğu 0,08, 0,25, 0,8 ve 2,5 mm olarak ayarlanabilmektedir. Ayrıca 1'den 10'a kadar örnekleme sayısı bulunmaktadır. Ölçüm kuvveti 0,75 mN ve 4mN olarak seçilebilmektedir.



Şekil 3. 8 Yüzey pürüzlülüğü ölçme prensibi [37]

Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde kullanılan parametreler şunlardır:

- R_a : yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalaması,
- R_z : ölçüm bölgesindeki en yüksek ve en düşük 5 değerinin ortalaması,
- R_a : ölçüm bölgesi boyunca profil düzensizliklerinin geometrik ortalamasıdır [52].

EKİ sonrasında elde edilen yüzeyin pürüzlülüğünün düşük olması yüzey kalitesi açısından önemli olduğu için, değerlendirilmesi gereken önemli bir faktördür. Bu yüzden işleme yapılan parçaların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek, düşük yüzey pürüzlülük değerine sahip, yüksek yüzey kalitesinde malzemeler elde edilmeye çalışılmıştır.

3.2.4.4 Design-Expert Programı ile Çalışma Koşullarının İncelenmesi

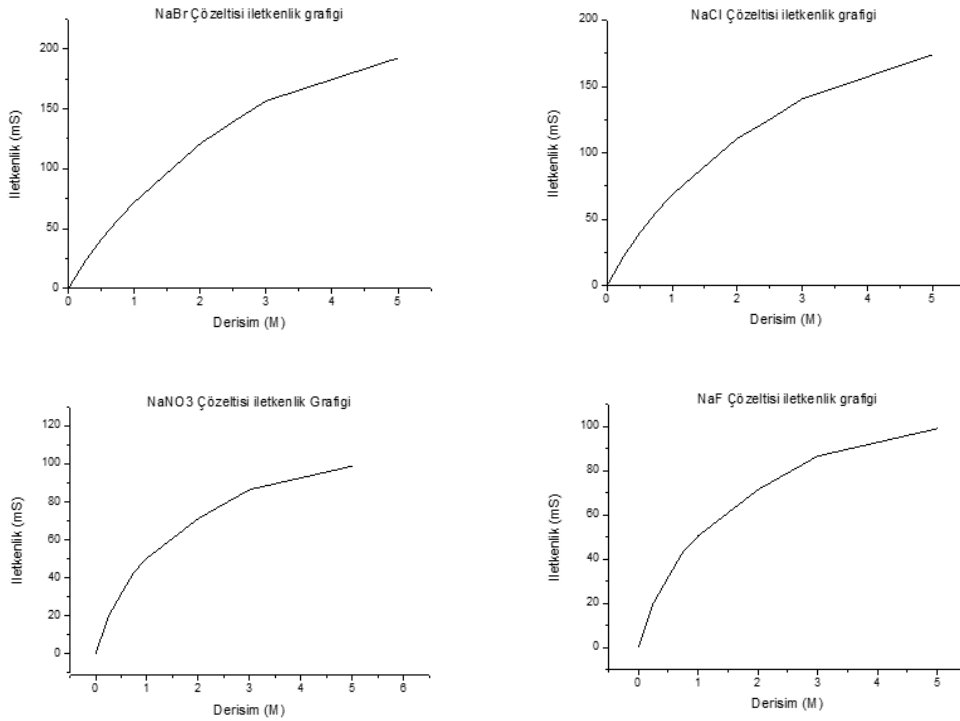
Tez çalışması kapsamında, optimum deney koşullarının belirlenmesi amacıyla Design Expert 11 programı kullanılmıştır. Design Expert programı ile deney tasarımları kolayca yapılabilmektedir. Çalışmada ‘Response Surface Methods’ adı verilen deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, kullanılan değişkenler ve bunlara karşılık elde edilen deney sonuçları programa işlenerek veriler analiz edilmektedir. Açıklamalı istatistiksel analiz verileri ve grafik şeklinde elde edilen sonuçlar aracılığıyla deney tasarımı istatistiksel açıdan daha kapsamlı incelenebilmektedir [53].

Çalışma faktörleri girilirken, her bir koşulun en düşük ve en yüksek aralık değerleri ve önem dereceleri seçilebilmektedir. Sonuçlar yazılırken ise aynı şekilde önem dereceleri, maksimum veya minimum değere sahip olması gibi seçenekler seçilebilmektedir. Örneğin, bu çalışma için MKH’nın maksimum, yüzey pürüzlülük değerinin ise minimum olması gerektiği seçilmiştir. Faktörler ve sonuçlara bağlı olarak, program birçok farklı çözüm yolu önermekte ve istenilirliğe göre bu sonuçları sıralamaktadır. Sistem çalışma koşullarını en güvenilir şekilde incelemek ve kısa zamanda doğru sonuçlar elde etmek için gerekli bir yazılım olarak görülmektedir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞILMASI

4.1 Uygun Elektrolitin Tespiti

EKİ prosedüründe kullanılan çözeltilerden dolayı, malzeme yüzeyinde bir film tabakası oluşması oldukça kolaydır. Bu tabakanın kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin daha da kötüleştiği, geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda görülmüştür. Film tabakasının kalınlığını azaltmak için halojen tuzların kullanımı oldukça yaygındır [28]. Bu amaçla aktifliği düşük olan anyonlar kullanılır, çünkü pasif anyonlar elektrokimyasal işlem sırasında ilk önce açığa çıkar ve tepkimeye girme hızı daha yavaş olduğu için yüzeyde oluşabilecek film tabakası kalınlığı daha düşük olur.



Şekil 4. 1 Kullanılan tuz çözeltileri için hazırlanan derişime bağlı elektriksel iletkenlik grafiği

NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF tuz çözeltileri için 0-5 M aralıklarında derişime bağlı elektriksel iletkenlik grafiği çizilmiştir. Şekil 4.1' de de görüldüğü gibi derişim arttıkça iletkenlik artmaktadır. NaF çözeltisi için tıpkı diğer tuz çözeltilerinde olduğu gibi, derişim arttıkça iletkenliğin arttığı görülmüştür; fakat diğer tuzlarla karşılaştırıldığında, aynı derişim değerinde NaF çözeltisinin iletkenliğinin çok daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni Çizelge 4.1 kullanılarak açıklanabilmektedir. Çizelge 4.1'de bazı anyon ve

katyonların sulu çözeltide ve sonsuz seyreltiklikteki iyonik iletkenlikleri verilmiştir. Çizelgeye göre büyük iyonlar, küçük iyonlardan daha hızlı hareket etmektedir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, iletkenlik sıralamasının $\text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ şeklinde olduğu görülmüştür [54]. Bu veriler, Şekil 4.1'deki değerleri kanıtlar niteliktedir. Çizelgede verilen değerler mS değerindedir.

Çizelge 4. 1 Sulu çözeltilerde limit iyonik iletkenlikler [54]

İyon	18° C	25° C	İyon	18° C	25° C
H^+	315	349,8	OH^-	174	197,6
Li^+	32,55	38,69	OD^-	—	119
Na^+	42,6	50,11	F^-	47,6	55
K^+	63,65	73,52	Cl^-	66,3	76,34
Rb^+	66,3	77	Br^-	68,2	78,3
Cs^+	66,8	77	I^-	66,8	76,8
NH_4^+	63,6	73,4	CN^-	—	82
Ag^+	53,25	61,9	CNO^-	54,8	64,6
Ti^+	64,8	74,7	CNS^-	57,4	66
$1/2 \text{ Be}^{2+}$	—	45	NO_2^-	59	(72)
$1/2 \text{ Mg}^{2+}$	44,6	53,06	NO_3^-	62,6	71,44
$1/2 \text{ Ca}^{2+}$	50,4	59,50	ClO_2^-	—	52
$1/2 \text{ Sr}^{2+}$	50,6	59,46	ClO_2^-	55,8	65,3
$1/2 \text{ Ba}^{2+}$	54,35	63,64	ClO_4^-	59,1	68,0
$1/2 \text{ Ra}^{2+}$	56,5	—			
$1/2 \text{ Cu}^{2+}$	45,3	54			

Malzeme işleme miktarının, iletkenlik arttıkça arttığı bilinen bir gerçektir; fakat çok yüksek derişimlerde çalışıldığında yüzeyde biriken iyonların fazlalığı nedeniyle derişimi daha düşük olan değerlerde çalışılmaya özen gösterilmiştir. Bu nedenle düşük bir derişim değeri olan 0,5 M ve daha yüksek bir değeri olan 2 M ile çalışılmıştır.

4.2.1 Uygun Elektrolit Tespiti İçin Ön Çalışmalar

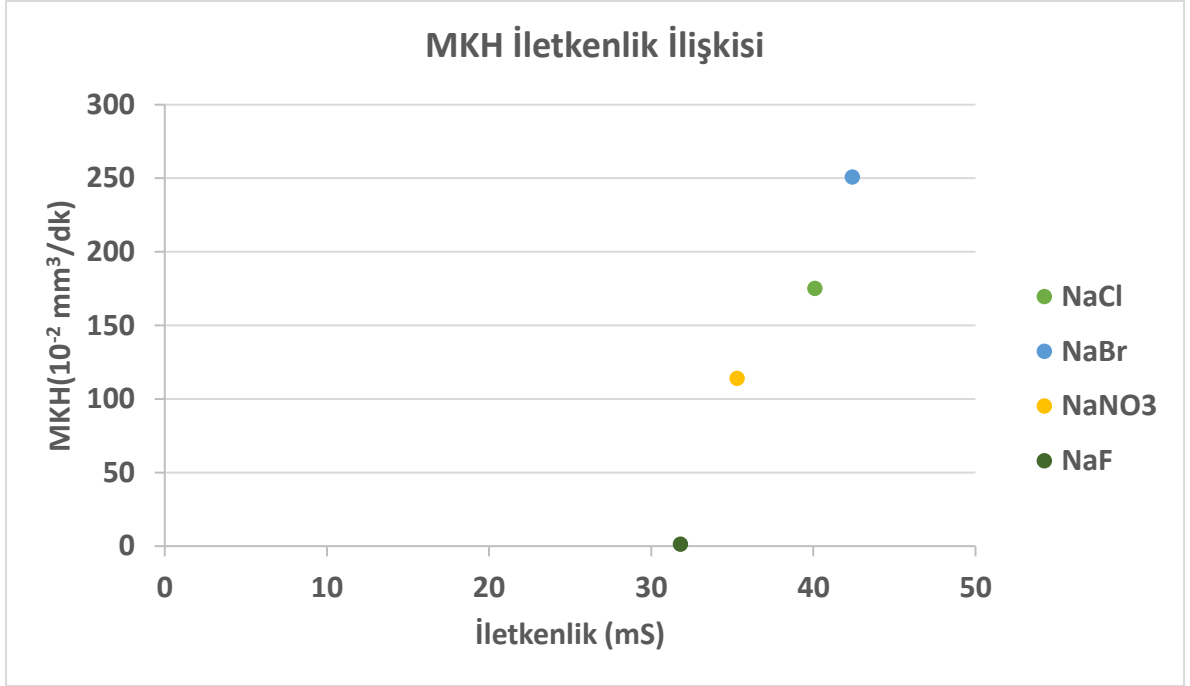
Bu çalışma kapsamında, uygun elektrolit çözeltisini tespit etmek amacıyla birçok farklı çalışma yapılmıştır. İlk olarak, tuz çözeltisinin türü ile malzeme kaldırma hızı arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla, bir önceki bölümde derişime bağlı elektriksel iletkenlik değerleri ölçülen 4 farklı tuz çözeltisi kullanılmıştır.

Çizelge 4. 2 0.5 M derişimdeki Tuz Çözeltilerinin EKİ Sonuçları

Özellikler	iletkenlik (mS)	EKİ Sonrası	MKH (10^{-2} mm ³ /dk)	MKH (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
0,5 M NaBr	42,60		250,95	6,60	0,74
0,5 M NaCl	40,10		175,30	4,61	1,12
0,5 M NaNO ₃	35,20		114,07	3,00	1,31
0,5 M NaF	31,80		1,52	0,04	1,14

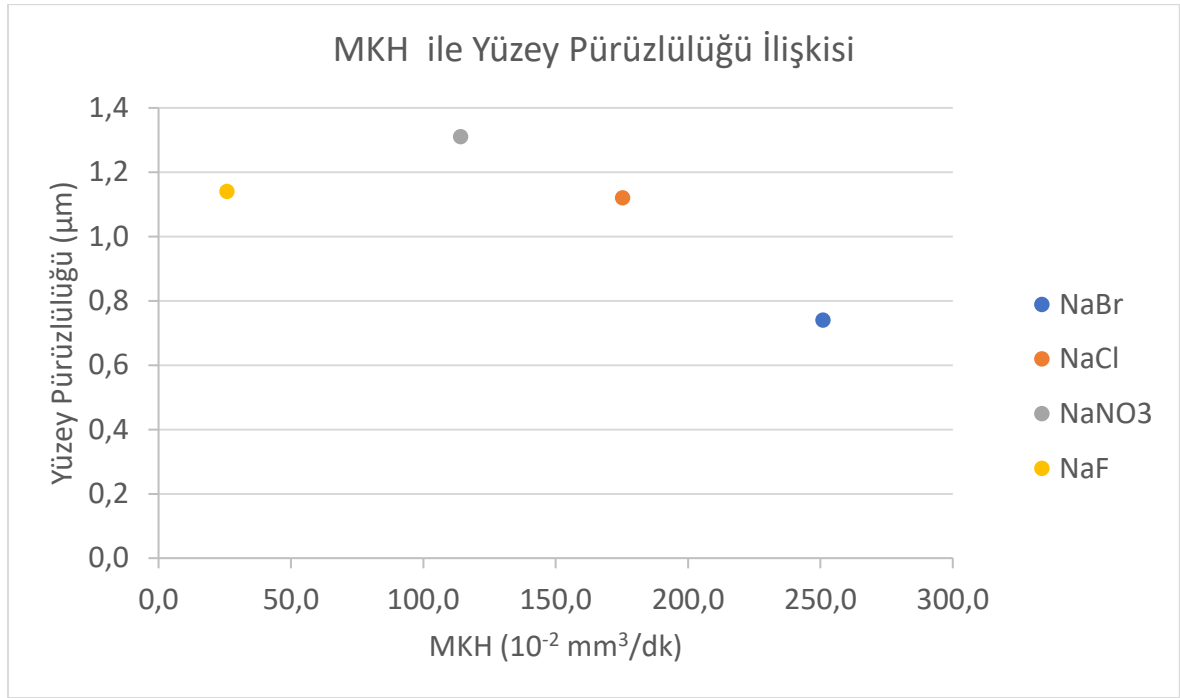
Çizelge 4.2’de 0,5 M derişimdeki 4 farklı tuz çözeltisinin iletkenlik sonuçları, işleme sonrası görüntüleri, MKH ve yüzey pürüzlülük sonuçları gösterilmiştir. Bir önceki bölümdeki çalışma sonuçlarından tahmin edilebileceği gibi iletkenlik değeri en yüksek olan 42,60 mS değeri ile NaBr çözeltisi ve 31,80 mS değeri ile en düşük iletkenliğe sahip olan NaF çözeltisidir. EKİ sonrası malzeme yüzey görüntüleri incelendiğinde NaBr elektroliti ile işlenmiş malzemenin yüzeyinde oldukça yüksek miktarda işleme olduğu görülebilmektedir. NaF çözeltisi ile işlenmiş olan malzemenin yüzeyinde nerdeyse hiç işleme oluşmamış, hatta beklendiği üzere yüzeyinde bir miktar tabaka oluşumunu gözlenmiştir. MKH değerleri NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF elektrotları için sırasıyla: 250,95, 175,30, 114.,07 ve 25,80 x 10⁻² mm³/dk’dır. Yüzey pürüzlülüğü değeri en düşük olan elektrolit ise NaBr’dır.

Çizelge 4.2'deki verilerden yararlanarak, MKH ve iletkenlik ilişkisini gözlemlemek amacıyla Şekil 4.2'de bulunan grafik çizilmiştir.



Şekil 4. 2 0.5 M derişimdeki tuz çözeltilerinin iletkenliğe bağı MKH değerleri
Grafik incelendiğinde, iletkenlik değeri arttıkça malzeme kaldırma hızının arttığı
görülmektedir.

Malzeme kaldırma hızı ve yüzey pürüzlülüğü arasında herhangi bir bağlantı olup olmadığını
anlamak amacıyla Şekil 4.3'de bulunan grafik çizilmiştir.



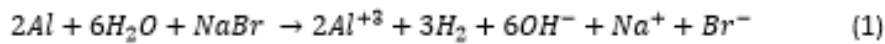
Şekil 4. 3 0.5 M derişimdeki tuz çözeltilerinin MKH ve yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki ilişki

Şekil 4.3 incelendiğinde NaF çözeltisi dışında kalan çözeltiler için, MKH arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Bu durumda işleme kalitesinin MKH'ına bağlı olarak iyileştiğini göstermektedir. NaF çözeltisi kullanıldığında yüzeyde neredeyse hiç işleme yapılamadığı için yüzey pürüzlülüğünün NaNO₃'ten düşük olması anlaşılabilir bir sonuçtur.

EKİ Sonucu Meydana Gelen Elektrokimyasal Tepkimeler

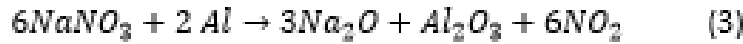
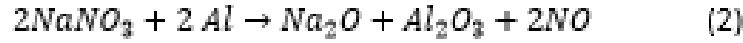
❖ NaBr Çözeltisi

NaBr çözeltisi ile alüminyum alaşımının etkileşimi sonucu ortaya çıkan tepkimeler aşağıda belirtilmiştir. Tepkime sonucunda, Al₂Br₆ veya daha kararlı yapıda olan AlBr₃ yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır.



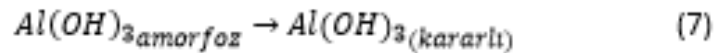
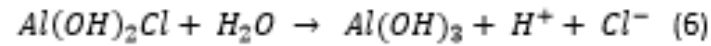
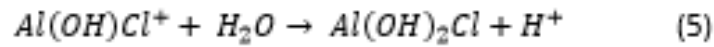
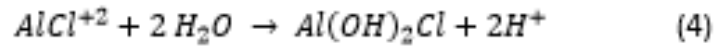
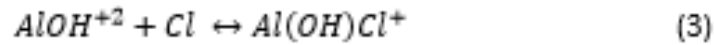
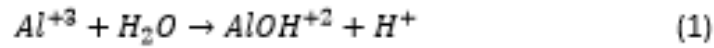
❖ *NaNO₃ Çözeltisi*

NaNO₃ çözeltisi ile alüminyum alaşımının etkileşimi sonucu ortaya çıkan tepkimeler aşağıda belirtilmiştir. Tepkime sonucunda Al₂O₃ bileşiği ortaya çıkmaktadır. Bu bileşik beyaz renklidir ve NaNO₃ çözeltisi ile işleme yapılan malzeme yüzeylerinde beyaz renkli bu malzemenin varlığına rastlanmıştır.



❖ *NaCl Çözeltisi*

NaCl çözeltisi ile alüminyum alaşımının etkileşimi sonucu ortaya çıkan tepkimeler aşağıda belirtilmiştir. Tepkime sonucunda, Al(OH)₂ ürünü ortaya çıkmakta ve amorföz yapıdan kararlı yapıya geçiş yapmaktadır. Al(OH)₂'in çözünürlüğü pH koşullarına bağlıdır.



NaF çözeltisi ile Derişim Çalışması

0,5 M NaF çözeltisi kullanıldığında malzeme yüzeyinde neredeyse hiç işleme olmadığı için, çözelti derişimi 1 M değerine çıkarılarak, tekrar işleme yapılmıştır. İşleme sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4. 3 NaF elektrolitinin derişimine bağlı işleme performansı

Özellikler	İletkenlik (mS)	EKi Sonrası	MKH (10^{-2} mm ³ /dk)	MKH (mg/dk)
0,5 M NaF	31,80		1,52	0,04
1,0 M NaF	50,40		0,76	0,02

Çizelge 4.3 incelendiğinde, NaF elektrolitin derişimi 0,5 M’den 1 M’a çıkarıldığında iletkenlik 31,80 mS değerinden 50,40 mS değerine ulaşmıştır. 0,5 M değerinde malzeme yüzeyinde neredeyse hiç işleme olmamıştır ($1,52 \times 10^{-2}$ mm³/dk). Derişim değeri arttığında ise iletkenlik artmasına rağmen kaldırma hızı değeri daha da azalmıştır. Bunun nedeninin, F⁻ iyonunun aktifliğinin çok yüksek olması dolayısıyla yüzeyde bir tabaka oluşturması olduğu düşünülmektedir. 1 M NaF elektrolitine ait görüntü incelendiğinde yüzeyde bir film tabakası görülmektedir, bu durumda tabaka oluşumunun doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

4.2.2 NaBr, NaCl ve NaNO₃ Çözeltileri ile Çalışma Sonuçları

Uygun elektrolit çözeltisini bulmak amacıyla bir önceki bölümde 4 farklı tuz çözeltisi ile çalışma yapılmıştır. NaF tuzu ile malzeme yüzeyinde neredeyse hiç işleme yapılamadığı için diğer 3 tuz çözeltisi kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir. Çalışmanın bu kısmında, NaBr, NaCl ve NaNO₃ elektrolitleri farklı derişimlerde kullanılarak, elektrolit karışımları oluşturulmuştur.

Çizelge 4. 4 Elektrolit tespiti için yapılan çalışmalar

Deney No.	Derişim			pH	İletkenlik	MKH		YP
	NaBr	NaNO ₃	NaCl	pH	mS	10 ⁻² mm ³ /dk	mg/dk	µm
	M (mol/L)	M (mol/L)	M (mol/L)					
1	2	0	0	5,5	121,1	285,17	7,5	0,49
2	2	0,5	0	5,6	132	136,88	3,6	1,32
3	2	2	0	5,7	145	110,27	2,9	1,34
4	2	0	1	5,9	149,5	167,30	4,4	0,81
5	2	0,5	4	5,8	180,2	152,09	4,0	0,63
6	2	0	4	5,8	187,3	235,74	6,2	0,15
7	0,5	0	0	5,7	42,4	250,95	6,6	0,74
8	0,5	0,5	0	5,9	67,1	117,07	3,0	1,62
9	0,5	2	0	6,1	103,3	197,72	5,2	1,23
10	0,5	0	4	5,8	169,5	212,93	5,6	0,90
11	0	0,5	0	5,8	35,3	114,07	3,0	1,31
12	0	2	0	6	86	174,90	4,6	0,98
13	0	0	4	5,5	159,8	152,09	4,0	0,97
14	2	0	2	5,7	175,2	160,8	4,23	1,22

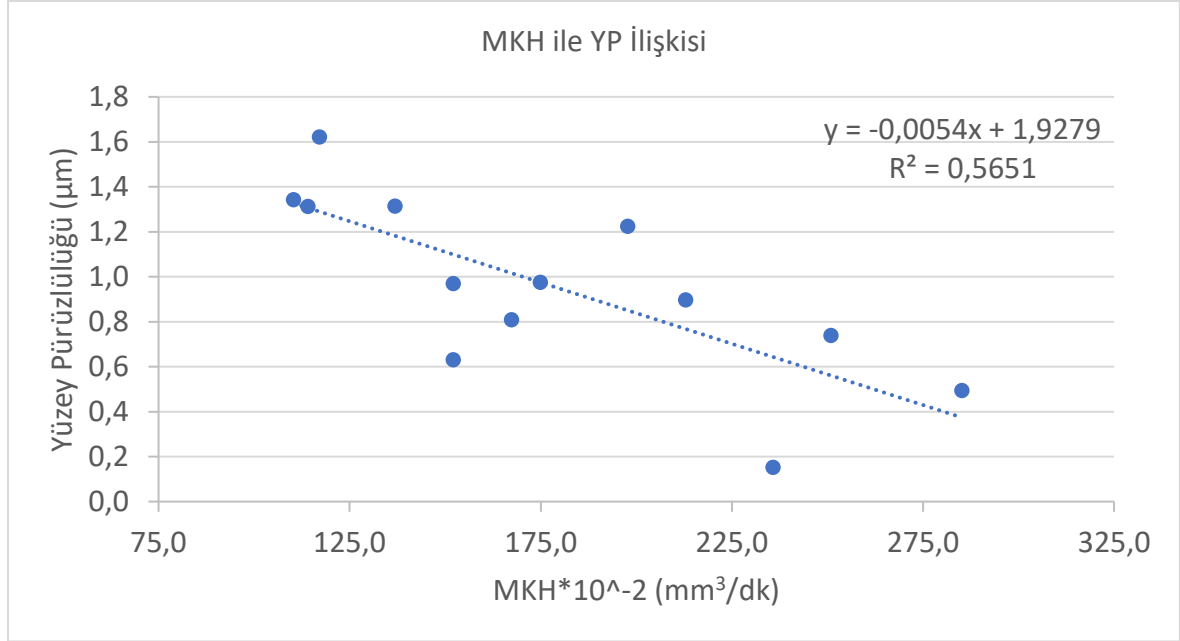
Çizelge 4.4’de uygun elektrolit çözeltisi içeriğini belirlemek amacıyla yapılan çalışma verileri ve sonuçları özetlenmiştir. NaBr ve NaNO₃ çözeltileri için derişim değerleri 0, 0.5 ve 2 M olarak; NaCl çözeltisi için ise 0,1 ve 4 M olarak belirlenmiştir. Çözeltilerin pH değerleri 5,5 ve 6,1 arasındadır. İletkenlik değerleri çözelti içeriği ve derişimine bağlı olarak, 42,4 ve 187,3 mS değerleri arasında değişmektedir. Hesaplanan MKH değerleri 110,27 ile 285,17 x 10⁻² mm³/dk değerleri arasında çıkmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri ise 0,49 ve 1,62 µm arasında değişmektedir. Her bir işleme sonrası elde edilen sonuçlar ve yüzey görüntüleri alınmış ve Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 5 Elektrolit tespit çalışması sonrası elde edilen veriler ve malzemelerin yüzey görüntüleri

Deney No.1	Deney No.2	Deney No.3
Derişim: 2 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 0 M NaCl	Derişim: 2 M NaBr, 0.5 M NaNO ₃ , 0 M NaCl	Derişim: 2 M NaBr, 2 M NaNO ₃ , 0 M NaCl
MKH: 285.17 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 7.5 mg/dk, YP: 0.49 µm	MKH: 136.88 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 3.6 mg/dk, YP: 1.32 µm	MKH: 110.27 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 2.9 mg/dk, YP: 1.34 µm
		
Deney No.4	Deney No.5	Deney No.6
Derişim: 2 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 1 M NaCl	Derişim: 2 M NaBr, 0.5 M NaNO ₃ , 4 M NaCl	Derişim: 2 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 4 M NaCl
MKH: 167.30 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 4.4 mg/dk, YP: 0.81 µm	MKH: 152.09 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 4.0 mg/dk, YP: 0.63 µm	MKH: 235.74 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 6.2 mg/dk, YP: 0.15 µm
		
Deney No.7	Deney No.8	Deney No.9
Derişim: 0.5 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 0 M NaCl	Derişim: 0.5 M NaBr, 0.5 M NaNO ₃ , 0 M NaCl	Derişim: 0.5 M NaBr, 2 M NaNO ₃ , 0 M NaCl
MKH: 250.95 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 6.6 mg/dk, YP: 0.74 µm	MKH: 117.07 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 3.0 mg/dk, YP: 1.62 µm	MKH: 197.72 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 5.2 mg/dk, YP: 1.23 µm
		
Deney No.10	Deney No.11	Deney No.12
Derişim: 0.5 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 4 M NaCl	Derişim: 0 M NaBr, 0.5 M NaNO ₃ , 0 M NaCl	Derişim: 0 M NaBr, 2 M NaNO ₃ , 0 M NaCl
MKH: 212.93 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 5.6 mg/dk, YP: 0.90 µm	MKH: 114.07 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 3.0 mg/dk, YP: 1.31 µm	MKH: 174.90 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 4.6 mg/dk, YP: 0.98 µm
		
Deney No.13	Deney No.14	
Derişim: 0 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 4 M NaCl	Derişim: 2 M NaBr, 0 M NaNO ₃ , 2 M NaCl	
MKH: 152.09 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 4.0 mg/dk, YP: 0.97 µm	MKH: 160.8 x 10 ⁻² mm ³ /dk, 4.23 mg/dk, YP: 1.22 µm	
		

Çizelge 4.5'deki görüntüleri incelendiğinde sadece NaBr içeren 1 ve 7. görüntülerde yüzeyin gri olduğu, sadece NaNO₃ içeren 11 ve 12. görüntülerde yüzeyde beyaz bir tabaka varlığı olduğu görülmektedir. NaNO₃ derişimi arttıkça bu tabakanın daha da arttığı anlaşılmaktadır.

Bu beyaz tabakanın, NaNO_3 ve alüminyum alaşımının kimyasal tepkimesi sonucu ortaya çıkan, Al_2O_3 olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 4 Çalışma sonucu MKH ile yüzey pürüzlülüğü ilişkisi

Çizelge 4.4'deki sonuçlar kullanılarak MKH ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi belirlemek için Şekil 4.4'deki grafik oluşturulmuştur. Genel hatlarıyla incelendiğinde MKH arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Oluşturulan veriler lineer bir düzleme konulduğunda R^2 değerinin 0,5651 olduğu görülmüştür, bu durum MKH ve yüzey pürüzlülüğü arasında herhangi bir ilişkinin olmadığını ortaya koymaktadır.

Verilerin Design Expert Programı ile Çözümlemesi

Tüm koşullar program tarafından çözümlendikten sonra, 66 farklı çözüm önerilmiştir. Bunlar arasından MKH'nın maksimum ve yüzey pürüzlülüğünün minimum olacağı değer ilk sıralarda yer almaktadır. Ayrıca, belirtilen kriter değerlerine bağlı olarak istenilebilirlik değeri de hesaplanarak gösterilmektedir.

66 Solutions found

	Number	NaBr	NaNO3	NaCl	MKH	YP	Desirability	
	1	0,958	2,000	2,000	446,834	-0,168	0,917	Selected
	2	0,948	2,000	2,000	446,822	-0,165	0,917	
	3	0,938	2,000	2,000	446,781	-0,162	0,917	
	4	0,967	2,000	1,999	446,521	-0,170	0,917	
	5	0,930	2,000	1,997	445,710	-0,155	0,915	
	6	1,127	2,000	2,000	442,875	-0,218	0,911	
	7	0,750	2,000	2,000	440,962	-0,101	0,908	
	8	0,915	2,000	1,985	440,649	-0,128	0,907	
	9	0,687	2,000	2,000	436,833	-0,079	0,901	
	10	1,251	2,000	2,000	434,970	-0,252	0,898	
	11	0,603	2,000	2,000	429,710	-0,049	0,889	
	12	1,034	1,958	2,000	429,498	-0,094	0,889	

Şekil 4. 5 Expert Design ile elde edilen çözümler

Program tarafından önerilen, 0,958M NaBr-2,0 M NaNO₃-2,0 M NaCl çözeltisi ile işleme yapılmış ve Şekil 4.6’da belirtilmiştir.

0.958M NaBr-2.0 M NaNO ₃ -2.0 M NaCl			
MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH mg/dk	YP (µm)	EKİ sonrası görüntü
190.100	5,0	1,4	

Şekil 4. 6 0.958M NaBr-2.0 M NaNO₃-2.0 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu

0,958M NaBr-2,0 M NaNO₃-2,0 M NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltinin pH değeri 5,8, iletkenliği 148,9 mS’dir. Bu çözelti kullanılarak yapılan EKİ sonucu malzeme kaldırma hızı 190,100 x10⁻² mm³/dk ve yüzey pürüzlülüğü sonucu 1,4 µm olarak bulunmuştur. Çizelge 4.6’da malzemenin işleme sonrası görüntüsü incelendiğinde yüzey kalitesinin iyi olmadığı anlaşılmaktadır. Program tarafından önerilen çözelti içeriği: 1,617M NaBr-1,913 M NaNO₃-3,988 M NaCl ‘dir. Hazırlanan çözeltinin pH değeri 6,2, iletkenliği 167,8 mS’dir

Tekrar programa konularak elde edilen sonuç ve işleme sonrası görüntüsü Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

1.617M NaBr-1.913 M NaNO ₃ -3.988 M NaCl			
MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH mg/dk	YP (µm)	EKİ sonrası görüntü
152,1	4,0	2,2	

Şekil 4. 7 1,617M NaBr-1,913 M NaNO₃-3,988 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan 2. işleme sonucu

Elde edilen bu değerler tekrar programa sokularak, analiz işlemi devam ettirilmiştir.

Programın, yüzey pürüzlülük değerini bu aşamada doğru değerlendiremediği ve öncelikli olarak malzeme kaldırma hızına bağlı elektrolit çeşidinin bulunması amaçlandığı için, yüzey pürüzlülüğü değerlendirmeye alınmadı. Hesaplama modeli olarak cubic (3. Dereceden polinom denklem) modeli seçildiğinde, program çözüm olarak Şekil 4.8’de gösterilen değeri önermiştir.

Number	NaBr	NaNO ₃	NaCl	MKH	Desirability
1	1,370	0,000	0,000	280,321	0,907
2	1,361	0,000	0,000	280,318	0,907
3	1,342	0,000	0,000	280,279	0,907
4	1,440	0,000	0,000	280,026	0,905
5	1,383	0,001	0,005	279,785	0,904

Şekil 4. 8 3. Dereceden polinom denklem kullanılarak elde edilen çözümler

İlk olarak, Şekil 4.5’de ilk sırada belirtilen 1,370 M NaBr çözeltisi kullanılmasına karar verilmiştir. İşleme sonrası MKH sonuçları ve yüzey görüntüsü Şekil 4.9’da verilmiştir.

1,370 M NaBr			
MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH mg/dk	YP (µm)	EKi sonrası görüntü
159,7	4,2	1,4	

Şekil 4. 9 1.370 M NaBr çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu

Hazırlanan çözeltinin pH değeri 5,7, iletkenliği 95,3 mS'dir. İşleme sonrası 159,7x10⁻² mm³/dk malzeme kaldırma hızı değeri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri 1,4 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.9'da aynı malzeme üzerinde, aynı çözeltiyle yapılmış 2 farklı çalışma görüntüleri verilmiştir.

- Hesaplama modeli olarak quadratic (2. Dereceden denklem) modeli seçilmiştir. Şekil 4.10'de gösterilen 25 numaralı çözümdeki 0,755M NaBr-0,036 M NaNO₃-1,726 M NaCl çözeltisi kullanılmıştır.

Number	NaBr	NaNO3	NaCl	MKH	Desirability
20	0,015	0,080	0,738	418,982	1,000
21	0,778	0,041	2,119	437,739	1,000
22	0,727	0,045	2,363	448,068	1,000
23	0,566	0,050	2,586	467,468	1,000
24	0,610	0,020	2,749	464,725	1,000
25	0,755	0,036	1,726	428,016	1,000

Şekil 4. 10 2.dereceden polinom denklem modeli kullanılarak elde edilen çözümler

0,755M NaBr-0,036 M NaNO₃-1,726 M NaCl çözeltisi kullanılarak işleme yapılmıştır ve Şekil 4.11'de sonuçlar ve işleme sonrası malzeme yüzey görüntüsü verilmiştir.

0.755M NaBr-0.036 M NaNO3-1.726 M NaCl			
MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH mg/dk	YP (µm)	EKi sonrası görüntü
220,5	5,8	1,8	

Şekil 4. 11 0.755M NaBr-0.036 M NaNO₃-1.726 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan işleme sonucu

Hazırlanan çözeltinin pH değeri 6,0, iletkenliği 128,1 mS'dir. İşleme sonrası $220,5 \times 10^{-2}$ mm³/dk malzeme kaldırma hızı değeri elde edilmiştir. Elektrot şekli malzeme üzerinde rahatça görülmektedir. Yüzey pürüzlülük değeri 1,8 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.11'de aynı malzeme üzerinde, aynı çözeltiyle yapılmış 2 farklı çalışma görüntüleri verilmiştir. Bir önceki koşula kıyasla malzeme kaldırma hızı ve yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır.

4.2.3 Asidik ve Bazik Ortamın İşleme Üzerine Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, alüminyumun korozyon davranışını en çok etkileyen faktörlerden birisi olan pH etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, pH değeri HCl ve HNO₃ asitleri kullanılarak 2, NaOH bazı kullanılarak ise 10 yapılmıştır. Çözeltinin pH değeri 5,5 civarlarında olduğu için farklı bir malzeme eklenmemiştir.

Çizelge 4. 6 1,370 M NaBr Elektrolit Çözeltisi için pH çalışması

Elektrolit Çözeltisi: 1,370 M NaBr					
pH değeri	Kullanılan Asit/Baz	İletkenlik (mS)	MKH (10^{-2} mm ³ /dk)	MKH (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
2	HCl	94.6	228.1	6.0	1.6
2	HNO ₃	94.3	208.2	5.48	1.9
5.50	-	95.7	159.7	4.20	1.4
10	NaOH	95.2	41.8	1.10	2.4

1,370 M NaBr çözeltisi kullanılarak yapılan pH çalışmasının iletkenlik değerleri, MKH ve YP sonuçları Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Çözelti asidik hale getirildiğinde 228,1 ve 208,2 $\times 10^{-2}$ mm³/dk MKH değerlerine, 1,6 ve 1,9 μm YP değerlerine ulaşılmıştır. İki asidik çözelti karşılaştırıldığında, en yüksek MKH değerine HCl kullanıldığında ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, HCl kullanıldığında YP değeri de azalmaktadır. Çözelti bazik hale getirildiğinde ise MKH 41,8 $\times 10^{-2}$ mm³/dk olarak azalmış ve YP 2,4 μm değerine çıkmış, yüzey kalitesi azalmıştır. Bu çözelti için HCl asidinin kullanılarak, çözelti pH değerinin 2 yapılarak, kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4. 7 Tuz çözeltisi çeşidinin MKH ve YP üzerindeki etkisi

Deney No.1	Deney No.2
Derişim: 1.370 M NaBr, pH: 2 (HCl)	Derişim: 1.370 M NaBr,pH: 2 (HNO₃)
MKH:228.1x10⁻² mm³/dk,6.0 mg/dk, YP:1.6 µm	MKH:208.2 x10⁻² mm³/dk, 5.48 mg/dk, YP:1.9 µm
	
Deney No.3	Deney No.4
Derişim: 1.370 M NaBr, pH:5.5	Derişim: 1.370 M NaBr, pH:10 (NaOH)
MKH:159.7 x10⁻² mm³/dk, 4.20 mg/dk, YP:1.4 µm	MKH:41.8 x10⁻² mm³/dk,1.10 mg/dk, YP:2.4 µm
	

Çizelge 4.7 incelendiğinde çözeltinin orijinal pH değeri olan 5,5’de elektrot şeklinin oldukça net görüldüğü yüzeyin renginin koyu gri olduğu görülmektedir. HCl kullanılarak pH 2 yapıldığında ise şeklin daha net görüldüğü ve yüzeydeki koyu gri tabakanın olmadığı görülmektedir. HNO₃ kullanıldığında ise tıpkı HCl içeren çözeltide olduğu gibi şeklin görüldüğü ve diğerine göre işleme miktarının daha az olduğu anlaşılmaktadır. NaOH kullanıldığında ise yüzeyde koyu renkli tabaka oluşmakta ve elektrot şekli tam olarak seçilememektedir. Çizelge 4.7’de aynı malzeme üzerinde, aynı çözeltiyle yapılmış 2 farklı çalışma görüntüleri verilmiştir.

0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl çözeltisi kullanılarak yapılan pH çalışmasının iletkenlik değerleri, MKH ve YP sonuçları Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl Elektrolit Çözeltisi için pH çalışması

Elektrolit Çözeltisi: 0.755 M NaBr/0.036 M NaNO₃/1.726 M NaCl					
pH değeri	Kullanılan Asit/Baz	İletkenlik (mS)	MKH (10⁻² mm³/dk)	MKH (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
2	HCl	132,6	210,9	5,55	0,7
2	HNO ₃	131,8	205,8	5,41	1,1
5,5	-	128,1	220,5	5,80	1,8
10	NaOH	133,2	43,7	1,15	2,3

Çözeltiyi asidik hale getirmek için HCl kullanmak, malzeme kaldırma hızını 220,5'ten 210,9x10⁻² mm³/dk değerine düşürmüştür; fakat YP değerini neredeyse yarı yarıya azaltmıştır. İki asidik çözelti özellikleri karşılaştırıldığında ise en yüksek MKH değerine HCl kullanılarak ulaşıldığı görülmektedir. İki durumda da, YP değeri pH 5,5'e göre azalmaktadır. Bu çözelti için HCl asidi kullanılarak pH 2 yapılmasına karar verilmiştir. Çünkü, YP değerini oldukça azaltmakta ve bu sırada MKH değerinde çok az bir değişim meydana gelmektedir. Çözelti bazik hale getirildiğinde ise tıpkı diğer elektrolit çözeltisinde olduğu gibi, MKH oldukça azalmış ve YP değeri artmıştır.

Çizelge 4.9'daki görüntüler incelendiğinde asidik hale getirilen çözeltilerin işleme sonuçlarının diğer sonuçlardan çok daha iyi olduğu görülmektedir. Özellikle de çözelti bazik hale getirildiğinde malzeme işleme performansının gözle görülür bir şekilde düştüğü görülmüştür. İşleme performansını gözlemlemek amacıyla, Deney.1 ve 3'de işleme aynı malzeme üzerinde 2 kez yapılmış ve görüntü eklenmiştir. Deney.2 ve 4 için farklı malzemeler üzerinde deneme yapıldığı için tek bir işleme görüntüsü bulunmaktadır.

Çizelge 4. 9 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl Çözeltisi kullanılarak yapılan pH çalışması sonucu malzeme yüzey görüntüleri

Deney No.1	Deney No.2
Derişim: 0.755 M NaBr,0.036 M NaNO ₃ , 1.726 M NaCl, pH: 2 (HCl)	Derişim: 0.755 M NaBr,0.036 M NaNO ₃ , 1.726 M NaCl, pH: 2 (HNO ₃)
MKH:210.9x10 ⁻² mm ³ /dk,5.55 mg/dk, YP:0.7 µm	MKH:205.8 x10 ⁻² mm ³ /dk,5.41 mg/dk YP:1.1 µm
	
Deney No.3	Deney No.4
Derişim: 0.755 M NaBr,0.036 M NaNO ₃ , 1.726 M NaCl, pH: 5.5	Derişim: 0.755 M NaBr,0.036 M NaNO ₃ , 1.726 M NaCl, pH:10 (NaOH)
MKH:220.5 x10 ⁻² mm ³ /dk, 5.80 mg/dk, YP:1.8 µm	MKH:43.7 x10 ⁻² mm ³ /dk,1.15 mg/dk, YP:2.3 µm
	

Yolshina ve arkadaşlarının Al-6063 alaşımının farklı derişimlerde fosforik asit ve sodyum hidroksit ortamlarındaki korozyon davranışlarını incelediği bir çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, sodyum hidroksit ve fosforik asit kullanılan çözeltisi kullanılan alüminyum malzeme yüzeyleri kıyaslandığında, sodyum hidroksit varlığında yüzeyin çok daha pürüzlü bir tabakadan meydana geldiği görülmüştür [14]. Aynı şekilde bu çalışmada kullanılan NaOH çözeltisi ile oluşan bu pürüzlü ve sert tabakanın malzeme kaldırma hızını düşürdüğü düşünülmektedir.

Çalışmanın bir sonraki bölümünde, 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl ve 1,370 M NaBr çözeltilerinin pH değeri HCl asidi ile 2 yapılarak kullanılacaktır.

4.3 İşleme Süresi, Voltaj ve Elektrot Aralığının İşleme Kalitesi Üzerine Etkisi

Bir önceki bölümde asidik ve bazik elektrolitin malzeme işleme performansı üzerindeki etkisi incelenerek, en uygun ortamın pH 2 değerindeki HCl çözeltisi ile elde edildiği belirlenmiştir. Çizelge 4.10'da belirtilen çalışmalarda kullanılan faktörler incelenerek,

uygun çalışma koşulları araştırılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, EKİ cihazı çalışma koşulları olarak değerlendirilen elektrotlar arası aralık ve gerilim değerleri ile diğer bir önemli kriter olan malzeme işleme süresi kullanılarak bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, işleme süresi olarak 5 ve 15 dk, elektrot aralığı olarak 1, 2 ve 3 mm, gerilim değeri 5 ve 8 V olarak çalışılmıştır. MKH ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek, 'Design Expert' programı yardımıyla en optimum koşullar belirlenmiştir. Elektrolit olarak HCl ile pH 2 olarak ayarlanmış olan, a. 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl ve b. 1,370 M NaBr kullanılmıştır. Her bir işleme için malzeme kaldırma hızı hesaplanmış ve yüzey pürüzlülük değeri ölçülerek, Çizelge 4.10'da özetlenmiştir.

Çizelge 4. 10 EKİ Cihaz Koşulları Çalışması

Deney No.	Elektrot Türü	İşleme Süresi (dk)	Elektrot Aralığı (mm)	Gerilim (V)	MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
1	a	5	2	5	210,9	5,55	0,7
2	a	5	1	5	38,0	1,0	0,8
3	a	5	3	5	53,1	1,40	0,6
4	a	5	2	8	266,2	7,0	1,3
5	a	15	1	8	67,8	1,78	1,1
6	a	15	2	5	187,6	4,93	0,8
7	a	15	2	8	251	6,6	0,3
8	b	5	2	5	228,1	6,0	1,9
9	b	15	2	5	242,8	6,39	1,7
10	b	5	2	8	268,1	7,05	1,7
11	b	15	2	8	295,7	7,78	1,3

Çizelge 4.10 incelendiğinde, MKH değerlerinin 38,0 ve 295,7 10⁻² mm³/dk, YP değerlerinin ise 0,3 ve 1,9 değerleri aralığında olduğu görülmüştür. İşleme süresi 5 dakikadan 15 dakikaya çıkarıldığında malzeme kaldırma hızı genellikle artmaktadır; fakat YP için böyle bir yorum yapmak mümkün değildir. Elektrot arası mesafe incelendiğinde ise 1 mm çok yakın olduğu için araya yeteri miktarda elektrolit çözeltisi girememekte ve işleme

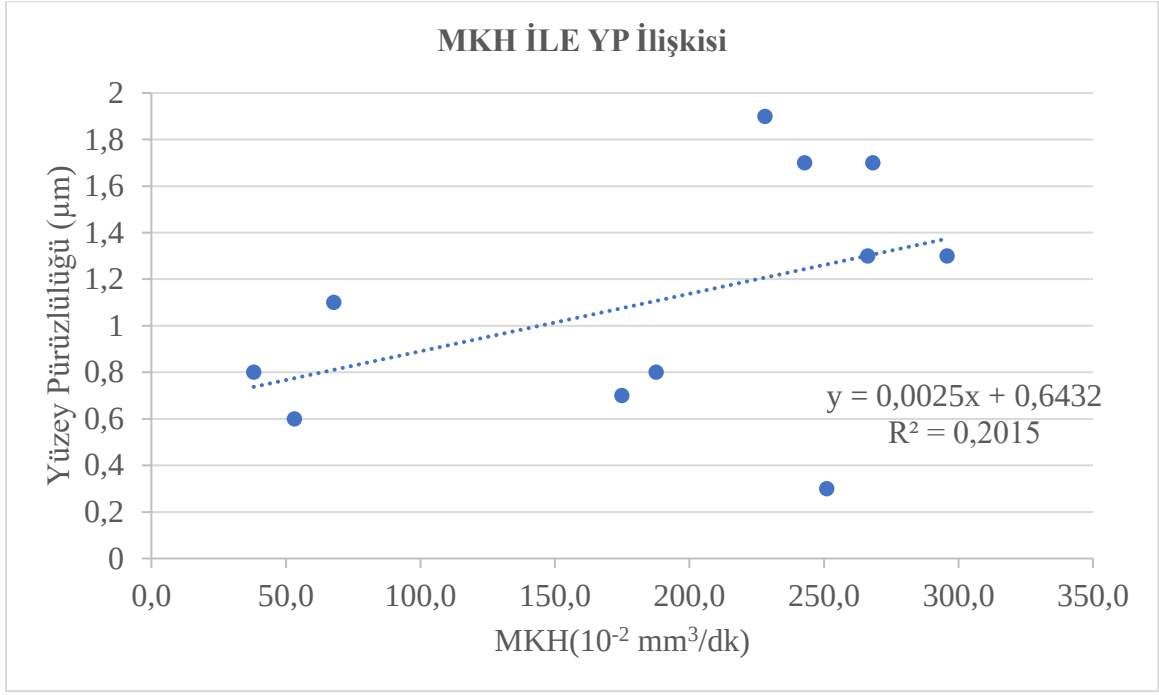
performansı oldukça düşmektedir. Mesafe 3 mm'ye çıkarıldığında ise mesafe çok uzak olmakta elektrolit üzerinden yeterince akım iletilememektedir, bu yüzden MKH düşmektedir. En uygun mesafenin 2 mm olduğu gözlenmiştir. Voltaj etkisi incelendiğinde ise 5 V'dan 8V'a çıkarıldığında MKH hızının arttığı görülmektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve malzemelerin yüzey görüntüleri çekilmiş ve Çizelge 4.11'de özetlenmiştir. 8 nolu deney sonucunda fotoğrafta 2 tane elektrot izi görülmektedir, bunun nedeni bu deneyde aynı malzeme üzerinde 2 kez işleme yapılmasıdır. Diğer deneylerde ise farklı malzemeler üzerinde işleme olayı tekrarlanmıştır.

Çizelge 4. 11 EKİ sonrası sonuçlar ve yüzey görüntüleri

Derişim: 0.755 M NaBr,0.036 M NaNO ₃ , 1.726 M NaCl		
Deney No.1	Deney No.2	Deney No.3
İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:5V	İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:1 mm, Gerilim:5V	İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:3 mm, Gerilim:5V
MKH:210,9x10 ⁻² mm ³ /dk, 5.55 mg/dk, YP:0.7 µm	MKH:38.0 x10 ⁻² mm ³ /dk, 1.0 mg/dk, YP:0.8 µm	MKH:53.1x10 ⁻² mm ³ /dk, 1.40 mg/dk, YP:0.6 µm
		
Deney No.4	Deney No.5	Deney No.6
İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:8V	İşleme süresi:15 dk, Elektrot mesafesi:1 mm, Gerilim:8V	İşleme süresi:15 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:5V
MKH:266.2x10 ⁻² mm ³ /dk, 7.0 mg/dk, YP:1.3 µm	MKH:67.8 x10 ⁻² mm ³ /dk, 1.78 mg/dk, YP:1.1 µm	MKH:187.6x10 ⁻² mm ³ /dk, 4.93 mg/dk, YP:0.8 µm
		
Deney No.7		
İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:8V		
MKH:251x10 ⁻² mm ³ /dk, 6.6 mg/dk, YP:0.3 µm		
		
Derişim: 2 M NaBr,0 M NaNO ₃ , 0 M NaCl		
Deney No.8	Deney No.9	Deney No.10
İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:5V	İşleme süresi:15 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:5V	İşleme süresi:5 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:8V
MKH:228.1x10 ⁻² mm ³ /dk, 6.0 mg/dk, YP:1.9 µm	MKH:242.8 x10 ⁻² mm ³ /dk, 1.7 mg/dk, YP:1.7 µm	MKH:268.1x10 ⁻² mm ³ /dk, 7.05 mg/dk, YP:1.7 µm
		
Deney No.11		
İşleme süresi:15 dk, Elektrot mesafesi:2 mm, Gerilim:8V		
MKH:295.7x10 ⁻² mm ³ /dk, 7.78 mg/dk, YP:1.3 µm		
		

Şekil 4.12'deki grafik, cihaz çalışma koşulları ile yürütülen deneyler sonucunda elde edilen MKH ve YP arasındaki bağlantıyı araştırmak amacıyla çizilmiştir.



Şekil 4. 12 Çalışma koşulları sonuçlarına göre MKH ve YP arasındaki ilişki

Şekil 4.12'deki grafik incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü ve MKH arasında bir ilişki olmadığı görülmüştür. R^2 sonucu 0.2015 olması bunu doğrular niteliktedir.

Verilerin Design Expert Yazılım ile Eniyileme Çalışmaları

Çizelge 4.10'da belirtilen tüm veriler ve sonuçları Design Expert programına girilerek, analiz edilmiştir.

Program sonucunda 65 farklı çözüm önerilmiştir. Şekil 4.15'de bu çözüm önerilerinden bazıları gösterilmiştir. Kullanılan elektrolit çözeltilerinin derişim değerlerine en yakın olan ve istenilirliği en yüksek çözümlerden olan 21. Çözüm önerisi en iyi değer olarak belirlenmiştir.

Number	NaBr	NaNO ₃	NaCl	İşleme Süresi	Elektrot Aralığı	Gerilim Değeri	MKH	YP	Desirability	
1	0,658	0,086	1,890	15,000	2,345	8,000	253,195	0,000	0,884	
2	0,658	0,091	1,779	15,000	2,346	8,000	253,194	-0,000	0,884	
3	0,657	0,080	1,106	15,000	2,345	8,000	253,194	0,000	0,884	
4	0,657	0,046	1,543	15,000	2,345	8,000	253,194	-0,000	0,884	
5	0,657	0,005	0,028	15,000	2,344	8,000	253,195	0,000	0,884	
6	0,658	0,079	0,702	15,000	2,346	8,000	253,195	0,000	0,884	
7	0,659	0,087	0,071	15,000	2,347	8,000	253,194	0,000	0,884	
8	0,658	0,033	0,439	15,000	2,345	8,000	253,194	0,000	0,884	
9	0,660	0,000	0,263	15,000	2,348	8,000	253,193	-0,000	0,884	
10	0,660	0,053	1,909	15,000	2,349	8,000	253,195	0,000	0,884	
11	0,660	0,014	0,968	15,000	2,349	8,000	253,193	0,000	0,884	
12	0,656	0,023	0,426	15,000	2,344	8,000	253,193	0,000	0,884	
13	0,658	0,045	1,071	15,000	2,346	8,000	253,196	0,000	0,884	
14	0,660	0,017	0,002	15,000	2,350	8,000	253,192	0,000	0,884	
15	0,661	0,098	1,520	15,000	2,351	8,000	253,191	0,000	0,884	
16	0,662	0,013	1,458	15,000	2,351	8,000	253,190	0,000	0,884	
17	0,653	0,034	1,949	15,000	2,339	8,000	253,189	0,000	0,884	
18	0,663	0,053	1,830	15,000	2,353	8,000	253,188	-0,000	0,884	
19	0,663	0,062	1,174	15,000	2,354	8,000	253,186	0,000	0,884	
20	0,666	0,022	1,812	15,000	2,357	8,000	253,176	0,000	0,884	
21	0,660	0,061	1,729	15,000	2,349	7,999	253,160	0,000	0,884	Selected

Şekil 4. 13 Design Expert yazılımından elde edilen çalışma koşulları

0,660 M NaBr-0,061 M NaNO ₃ -1,729 M NaCl			
MKH (10 ⁻² mm ³ /dk)	MKH mg/dk	YP (µm)	EKİ sonrası görüntü
281,4	7,4	0,4	

Şekil 4. 14 0.660 M NaBr-0.061 M NaNO₃- 1.729 M NaCl kullanılarak yapılan işlem sonucu

Gerçekleştirilen işleme sonrasında MKH 281,4x10⁻² mm³/dk değerinde, YP değeri ise 0,4µm elde edilmiştir. İşleme sonrası yüzey durumu incelendiğinde elektrot şeklinin malzeme yüzeyinde olduğu ve herhangi bir farklı renkte tabaka olmadığı görülmüştür.

Bu sonuç için teorik ve deneysel MKH değerleri kullanılarak verim hesabı yapılmış ve verim % 74,62 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak; elektrolit içeriği HCl ile pH 2 olarak ayarlanmış olan 0,660 M NaBr-0,061 M NaNO₃-1,729 M NaCl çözeltisi olarak belirlenmiştir. EKİ çalışma koşulları için en optimum değerlerin, işleme süresi 15 dakika, elektrotlar arası mesafe 2mm ve gerilim değeri 8 V olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

- ❖ Malzeme kaldırma hızının (MKH) NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF çözeltileri için iletkenliğe bağlı değişimi incelenmiş ve iletkenlik arttıkça yüzey kalitesinden bağımsız olarak MKH'nın arttığı gözlenmiştir.
- ❖ Elektrolit olarak 0,5, 1, 2 ve 4 M derişimlerde NaBr, NaCl ve NaNO₃ çözeltileri, EKİ tezgahı çalışma koşulları 5 V gerilim, 2 mm elektrotlar arası mesafe ve 5 dk işleme süresi şeklinde belirlenerek denenmiştir. Çözeltilerin iletkenlikleri 42,4 ve 187,3 mS, MKH'ları 110,27 ile 285,17 x 10⁻² mm³/dk ve yüzey pürüzlülükleri ise 0,49 ve 1,62 µm arasında değişmiştir. MKH ile yüzey pürüzlülüğü (YP) ilişkisi incelenmiş ve R² değerinin 0,5651 olduğu tespit edilerek bu iki değer arasında ilişki olmadığı veya çok zayıf olduğu görülmüştür.
- ❖ 0,5 M derişimde NaBr, NaCl, NaNO₃ ve NaF çözeltileri için gerilim değeri 5 V, elektrotlar arası mesafesi 2 mm ve işleme süresi 5 dk olarak belirlenen EKİ tezgahı çalışma koşullarında en yüksek MKH 250,95x10⁻² mm³/dk ve en düşük yüzey pürüzlülüğü (YP) 0,74 µm ile NaBr çözeltisi için elde edilmiştir.
- ❖ NaF çözeltisi ile 1,52x10⁻² mm³/dk gibi düşük bir MKH ile neredeyse hiç yüzey işlemesi yapılamamıştır. NaF çözeltisinin EKİ kapasitesinin derişim ile olan bağlantısını araştırmak amacıyla 1 M derişimindek NaF çözeltisi ile işleme yapılmış ve MKH'nın daha da düştüğü görülmüştür. Özellikle titanyum ve alaşımlarının elektrokimyasal yöntemle işlenmesinde etkili olan NaF'ün Al-6061 alaşımı için uygun olmadığı tespit edilmiştir.
- ❖ Deneysel çalışmalar sonucu MKH ve yüzey kalitesi açısından en iyi sonuç veren iki elektrolit sırasıyla şöyle belirlenmiştir:
 1. 3 farklı tuz çözeltisinin karışımı olan, 0,755M NaBr-0,036 M NaNO₃-1,726 M NaCl çözeltisi kullanılarak MKH 220,5x10⁻² mm³/dk ve YP 1,8 µm olarak elde edilmiştir.
 2. Sadece NaBr çözeltisi içeren 1,370 M derişimindeki elektrolit kullanılarak ile MKH 159,7 mm³/dk ve YP 1,4 µm olarak elde edilmiştir.
- ❖ pH değerinin işleme performansına olan etkilerini belirlemek amacıyla pH değeri 5,5 olan 1,370 M NaBr ve 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl elektrolitleri

HCl ve HNO₃ asitleri kullanılarak pH 2'ye ve NaOH bazı kullanılarak pH 10'a ayarlanmıştır. 1,370 M NaBr çözeltisi için en yüksek MKH olan 228,1x10⁻² mm³/dk değerine HCl kullanılarak pH değeri 2 yapıldığında ulaşılmıştır. 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl çözeltisi ile HCl kullanılarak pH değeri 2 yapıldığında ise MKH 220,5'ten 210,9x10⁻² mm³/dk değerine düşmüştür. YP değeri ise 1,8'den 0,7 µm'ye düşmüş ve yüzey kalitesinin arttığı gözlenmiştir. Her iki çözelti için de NaOH kullanıldığında, MKH oldukça azalmış ve YP değerinin arttığı görülmüştür.

- ❖ HCl ile pH 2 olarak ayarlanmış olan 0,755 M NaBr/0,036 M NaNO₃/1,726 M NaCl ve 1,370 M NaBr elektrolitleri ile sabit EKİ çalışma koşullarında (işleme süresi 5 ve 15 dk, elektrot aralığı 1, 2 ve 3 mm, gerilim değeri 5 ve 8 V) işleme yapıldığında MKH değerlerinin 38,0 ve 295,7 10⁻² mm³/dk, YP değerlerinin ise 0,3 ve 1,9 değerleri aralığında olduğu görülmüştür. MKH ile YP ilişkisi incelenmiş ve R² değerinin 0,2015 olduğu tespit edilerek bu iki değer arasında ilişki olmadığı görülmüştür.
- ❖ Çalışma sonucunda, işleme süresi 15 dakika, elektrot aralığı 2 mm ve gerilim 8 V olarak belirlenen EKİ tezgahı koşullarında gerçekleştirilen işleme sonrasında en iyi MKH (281,4x10⁻² mm³/dk) ve YP (0,35 µm) değerlerini sağlayan en başarılı elektrolit içeriği HCl ile pH 2'ye ayarlanan asidik ortamda 0,660 M NaBr – 0,061 M NaNO₃ – 1,729 M NaCl olarak belirlenmiştir. Bu elektrolit çözeltisi kullanılarak yapılan EKİ sonucu elde edilen deneysel ve teorik MKH değerleri kullanılarak verim hesabı yapılmış ve verim % 74,62 olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] J. G. Adam Ruszaj, Sebastian Skoczypiec, "Electrochemical Machining – Special Equipment and Applications In Aircraft Industry," *Management and Production Engineering Review*, vol. 7, no. 2, pp. 34-41, **2016**.
- [2] M. M. S. K. P. Rajurkar, A.P. Malshe, "Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 13-26, **2013**.
- [3] J. A. McGeough, *Advanced Methods of Machining*. Chapman and Hall, **1988**.
- [4] J. F. Wilson, *Practice and theory of electrochemical machining*. New York ; Sydney : Wiley-Interscience, **1971**.
- [5] K. P. Rajurkar, "Nontraditional Manufacturing Processes," in *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*, A. K. R.C. Dorf, Ed. New York, ABD: John Wiley & Sons. Inc., pp. 211-241, **1992**.
- [6] E. A. O. Çakır, "Elektrokimyasal İşleme Yöntemi," *Metal-Makina Dergisi*, no. 56, pp. 40-46, **1994**.
- [7] *Functional principle of ECM*. Available: <http://www.emag.com/technologies/ecm-electro-chemical-machining.html> (Haziran, **2018**).
- [8] Available: http://makina.beun.edu.tr/eskisite/dersler/MAK349_Imalat_Teknolojileri/Notlar/09_%C4%B0malat%20Teknolojileri.pdf (Haziran, **2018**).
- [9] A. H. U.Caydas, "Elektro-Kimyasal İşleme Yöntemi," *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, vol. 4125, **2004**.
- [10] T. Jagadeesha, "Electro Chemical Machining." (Haziran, **2018**).
- [11] A. I. Rebecca J. Leese, "Electrochemical micromachining: An introduction," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, pp. 1-13, **2016**.
- [12] S. Ö. Gözde Ergin, "Bir Elektrokimyasal İşleme Uygulamasında Atık Elektrolitte Bakır İyonu (Cu²⁺) Tayini ve Aritimi," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* vol. 29, no. 3, **2014**.
- [13] *Electro Chemical Machining (ECM)*. Available: <https://mechanicalengineering.com/electro-chemical-machining-ecm/> (Haziran, **2018**).
- [14] P. R. Deepa Prabhu, "Corrosion behavior of 6063 aluminium alloy in acidic and in alkaline media," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 10, pp. 2234-2244, **2017**.
- [15] V. Y. K. L.A. Yolshina, V.B.Mlakov, N.G. Molchanova, "Corrosion and electrochemical behavior of aluminium treated with high-temperature pulsed plasma in CsCl-NaCl-NaNO₃ melt," *Corrosion Science*, vol. 53, pp. 2015-2026, **2011**.
- [16] S. H. S. Van Gils, E. Stijns, M. Vancaldenhoven, H. Terryn, L. Mattsson, "Electropolishing of aluminium: processing and assesment of visual apperance," *Surface and Interface Analysis*, vol. 35, pp. 121-127, **2003**.
- [17] F. E. E. Sara Maria Aguilar-Sierra, "Improvement of Electropolishing of 1100 Al Alloy for Solar Thermal Applications," *ASM International*, vol. 27, pp. 1387-1395, **2018**.

- [18] Z. Y. A. Ahmad, N. A. Q. Mohd Daud, M. Daud, "Electrochemical Behavior of Aluminum Alloys in Natural Seawater," in *Proceedings of ICEE 2009 3rd International Conference on Energy and Environment* Malacca, Malaysia, **2009**.
- [19] J. V. Petrocelli, "The Electrochemical Behavior of Aluminum," *ABD*, **1951**.
- [20] R. K. Hart, "The formation of films on aluminium immersed in water " *Trans. Faraday Society*, vol. 53, pp. 1020–1027., **1957**.
- [21] N. O. Obi-Egbedi, Obot, I.B., Umoren, S.A., "Spondias mombin L. as a green corrosion inhibitor for aluminium in sulphuric acid: Correlation between inhibitive effect and electronic properties of extracts major constituents using density functional theory.," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 5, pp. 361-373, **2012**.
- [22] G. Ergin, "Bir Elektrokimyasal İşleme Uygulamasında Atık Elektrolitin Ağır Metal İyonlarından Arındırılması ve Geri Kazanımı," Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, **2012**.
- [23] G. Ergin, OOnel, S., "Determination and Removal of Copper Ions (Cu²⁺) in The Waste Electrolyte in An Electrochemical Machining Application," *Journal Of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 29, no. 3, pp. 487-494, **2014**.
- [24] *ECM applications* Available: <http://merooock.blogspot.com.tr/2013/01/electrochemical-machining-ecm.html> (Haziran, **2018**).
- [25] J. M. B. Bhattacharyya, "Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 1301-1310, **2003**.
- [26] Y. H. S. H. Hocheng, S.C.Lin, P.S.Kao, "A material analysis of electrochemical machining using flat – end cathode," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 264-268, **2003**.
- [27] J. Kozak, "Computer simulation system for electrochemical shaping," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, pp. 354-359, **2001**.
- [28] X. Z. Chen Xuezhen, Zhu Dong, Fang Zhongdong, Zhu Di, "Experimental research on electrochemical machining of titanium alloy Ti60 for a blisk," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 1, pp. 274-282, **2016**.
- [29] M. Z. F. Klockea, A. Klinka, "Experimental Research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components," *Veselovaca, Procedia CIRP* vol. 6, pp. 368-372, **2013**.
- [30] E. M. T. Haish, J.W. Schultze, "Electrochemical Machining of the Steel 100Cr6 in aqueous NaCl and NaNO₃ Solutions: Microstructure of Surface Films formed by Carbides," *Electrochimica Acta*, vol. 47, pp. 235-241, **2001**.
- [31] Z. F. J.B.Patel, P.P.Villanueva, W.N.P.Hung, "Quality Enhancement with Ultrasonic Wave and Pulsed Current in Electrochemical Machining," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 662-673, **2017**.
- [32] J. R. D. J.E. BANNARD, G. LEWIS, "Electrochemical machining as a method of preparing grained aluminium surfaces," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 11, pp. 253-259, **1981**.

- [33] F. J. Shuangqing Qian, "Investigation on the Aluminium-alloy Surface with Micro-pits Array Generating by through Double Mask Electrochemical Machining," presented at the AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications, **2015**.
- [34] S. Aris Widyo Nugroho, M. Budi Nurahman, Puma Septiaji, "Overcut and material removal rate on electrochemical machining of aluminum and stainless steel using Isolated Brass Electrode," presented at the 2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, Chemical Engineering (ICIMECE), **2016**.
- [35] P. R. A. A.J.Unare, "Optimization of Process Parameters of Electrochemical Machining of Aluminium Alloy 7075 by Using Gray-Taguchi Method," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 3, no. 7, pp. 120-123, **2016**.
- [36] N. L. F. R. Andi Sudiarso, Muslim Mahardika, "Material removal rate on electrochemical machining of Brass, Stainless Steel and Aluminium using Brass Electrodes," *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME)*, vol. 1, no. 1, pp. 14-17, **2013**.
- [37] F. J. S. Qian, "Investigation on the Aluminum-alloy Surface with Micro-pits Array Generating by through Double Mask Electrochemical Machining," presented at the AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications, **2015**.
- [38] *FCC Kristal Yapısı*. Available: <https://www.ggspdt.com/42a-metals-and-metallic-alloys.html> (Haziran, **2018**).
- [39] D. G. R. William D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., **2009**.
- [40] *Katkı elementlerinin Alüminyum alaşımlarına etkileri*. Available: <https://malzemebilimi.net/aluminyum-alasimlari.html> (Haziran, **2018**).
- [41] *Alüminyum Alaşımlar Kullanılarak Yapılan Parçalar*. Available: <http://blog.luckygroup.com/2015/09/importance-of-aluminium-alloys-and-their-various-functionalities.html> (Haziran, **2018**).
- [42] C. Y. H. C.G. Kuo, J.H. Chen, P.W. Lee, "Discharge Current Effect on Machining Characteristics and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 6061 Workpiece Produced by Electric Discharging Machining Process," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 11, pp. 1-8, **2017**.
- [43] *Al 6061 Alaşımının Özellikleri ve Uygulamaları*. Available: <http://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr> (Haziran, **2018**).
- [44] W. X. J.Song, Y.Lu, "One-Step Electrochemical Machining of Superhydrophobic Surfaces on Aluminium Substrates," *Journal of Material Science*, vol. 47, pp. 162-168, **2012**.
- [45] *Alüminyum 6061 Alaşımının mekanik özellikleri*. Available: <http://referansmetal.com/upload/files/aluminyum-mekanik-ozellikler.pdf> (Haziran, **2018**).
- [46] A. I. K. G. V. Raymond H. Myers "Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach," *The American Statistician*, vol. 46, no. 2, pp. 131-139, 1990 **2012**.

- [47] A. I. K. W. H. C. Raymond H. Myers "Response Surface Methodology: 1966–1988," *Technometrics*, vol. 31, no. 2, pp. 137-157, **1989**.
- [48] (06/2018). *Response Surface Design and Analysis*. Available: <https://www.statease.com/docs/v11/tutorials/multifactor-rsm.html> (Haziran, **2018**).
- [49] S. M. B. Bhattacharyya, A.K. Boro, "Electrochemical machining: New possibilities for micromachining," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 18, pp. 283-289, **2002**.
- [50] G. T. A. Mohanty, S. Dewangan, S. Dewangan, S. Gangopadhyay, "Experimental Study of Material Removal Rate, Surface Roughness & Microstructure in Electrochemical Machining of INCONEL 825," presented at the 5th International Journal& 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, Assam, 12-14 December, **2014**.
- [51] S. S. Kuldip Singh Sangwana, Girish Kanta, "Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach," *Procedia CIRP* 29, pp. 305-310, **2015**.
- [52] *Yüzey pürüzlülük parametreleri*. Available: <http://www.kuark.org/2017/10/yuzey-puruzluluk-olcumu/> (Haziran, **2018**).
- [53] N. Eğri, "Deney Tasarım Tekniği Uygulanmamış Optimizasyon Çalışmalarının İrdelenmesi," Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2008**.
- [54] P. D. S. Üneri, *Elektrokimya*. Ankara: Ankara Üniversitesi Basımevi, **1988**.

EKLER

Ek.1 Design Expert programında bulunan dizayn bölümüne çalışma verilerinin eklenmesi

Run	Factor 1 a:NaBr M	Factor 2 B:NaNO3 M	Factor 3 C:NaCl M	Response 1 MKH 10 ⁻² mm3/dk	Response 2 YP mikro m
1	0,5	0	0	250,95	0,74
2	0,5	0,5	0	117,07	1,62
3	0,5	2	0	197,72	1,45
4	2	0	0	285,17	0,49
5	2	0,5	0	136,88	1,32
6	2	2	0	88,72	1,34
7	0	0,5	0	114,07	1,31
8	0	2	0	174,9	1,65
9	0	0	4	152,09	0,64
10	2	0	1	167,3	0,48
11	2	0,5	4	152,09	0,63
12	2	0	4	235,74	0,15
13	0,5	0	4	212,93	0,73
14	2	0	2	160,8	1,22

Ek.2 Uygun matematiksel modelleme seçimi için faktör sayısına bağlı deney sayısı

# FACTORS	LINEAR	QUADRATIC	CUBIC
2	3	6	10
3	4	10	20
4	5	15	35
5	6	21	56
6	7	28	84
7	8	36	120

Ek.3 İstatiksel çözümleme modeli

Process Order: Quadratic ▼ Add Term

Model Type: Polynomial ▼ Response: Design Only ▼

Options... Power Options... Variance Ratio: 1

Ek.4 Uygun elektrolit tespiti için kullanılan numerik optimizasyon çözümleme kriterleri

	Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
	a:NaBr	is in range	0	2	1	1	3
	B:NaNO3	is in range	0	2	1	1	3
	C:NaCl	is in range	0	4	1	1	3
	MKH	maximize	88,72	300	1	1	5
	YP	minimize	0,15	1	1	1	3

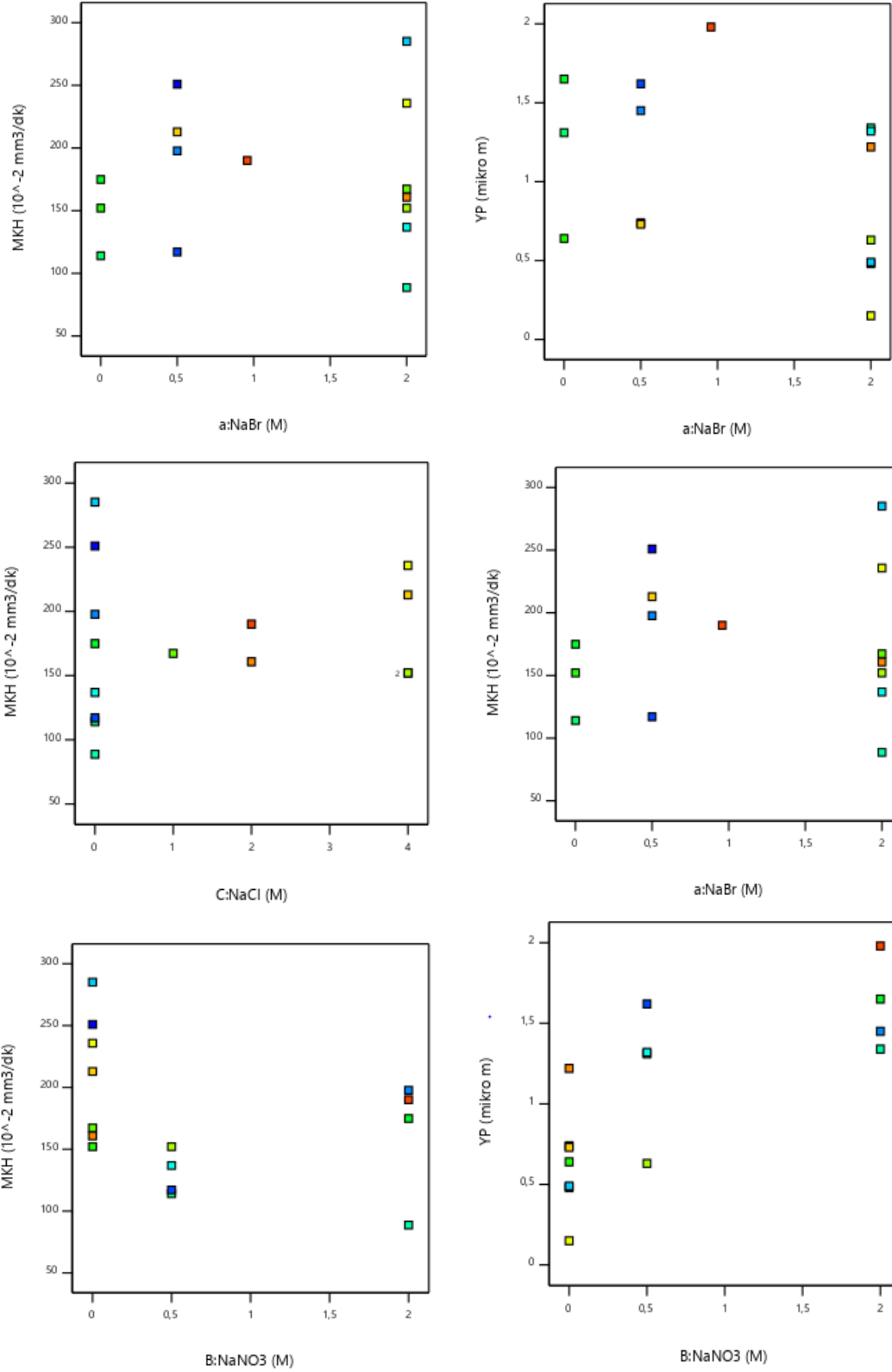
Ek.5 Tüm verilerin programa işlenmesi

Run	Factor 1 A:NaBr M	Factor 2 B:NaNO3 M	Factor 3 C:NaCl M	Response 1 MKH 10 ⁻² mm3/dk
1	0,5	0	0	250,95
2	0,5	0,5	0	117,07
3	0,5	2	0	197,72
4	2	0	0	285,17
5	2	0,5	0	136,88
6	2	2	0	88,72
7	0	0,5	0	114,07
8	0	2	0	174,9
9	0	0	4	152,09
10	2	0	1	167,3
11	2	0,5	4	152,09
12	2	0	4	235,74
13	0,5	0	4	212,93
14	2	0	2	160,8
15	0,958	2	2	190,1
16	1,617	1,913	3,988	152,1

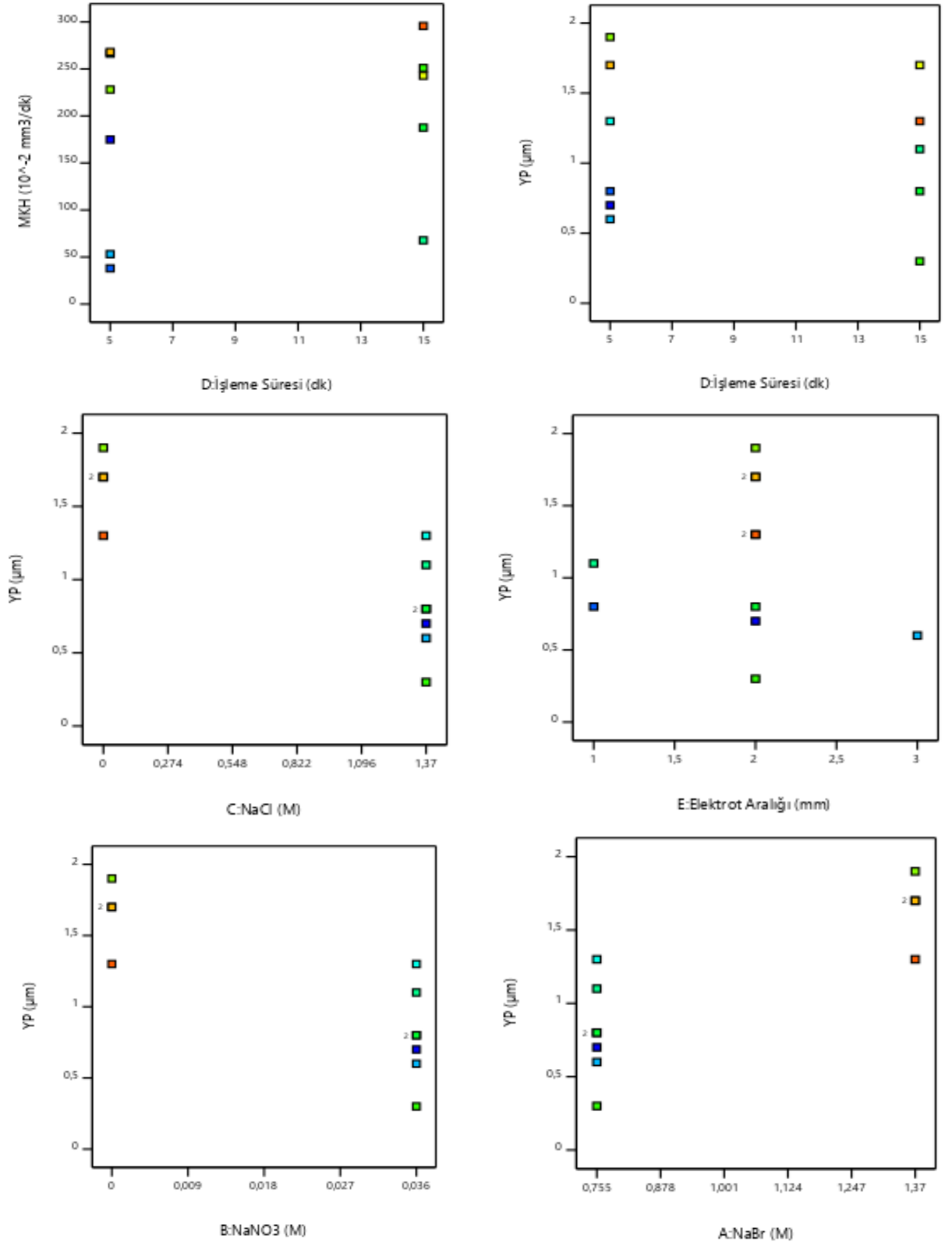
Ek.6 EKİ çalışma koşulları değişimine bağlı olarak belirlenen çalışma kriterleri

	Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
	A:NaBr	is in range	0	2	1	1	3
	B:NaNO3	is in range	0	0,1	1	1	3
	C:NaCl	is in range	0	2	1	1	3
	D:İşleme Süresi	is in range	5	15	1	1	3
	E:Elektrot Aralığı	is in range	1	3	1	1	3
	F:Gerilim Değeri	is in range	5	8	1	1	3
	MKH	maximize	38	300	1	1	5
	YP	minimize	0	1,9	1	1	3

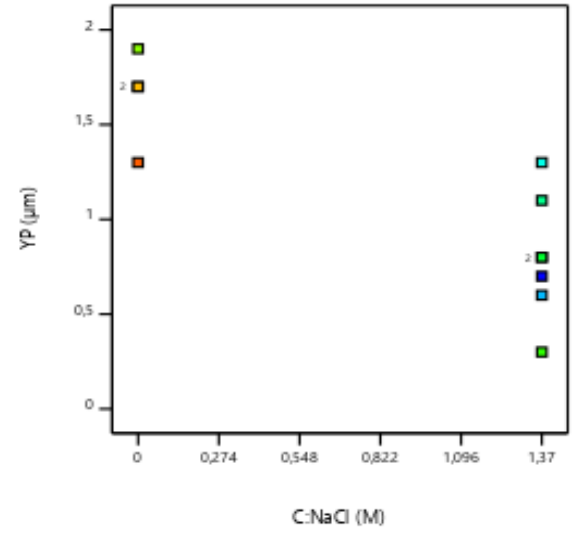
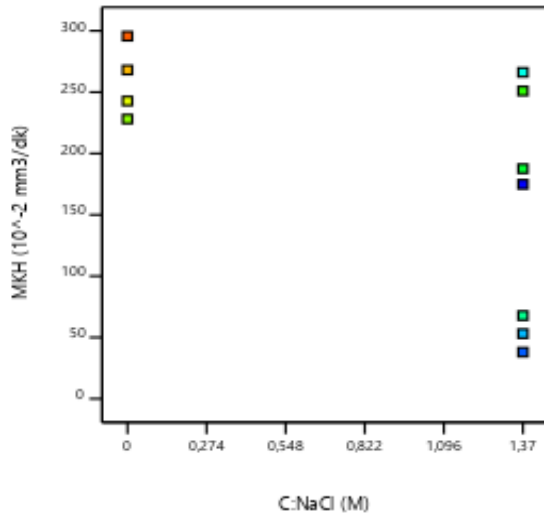
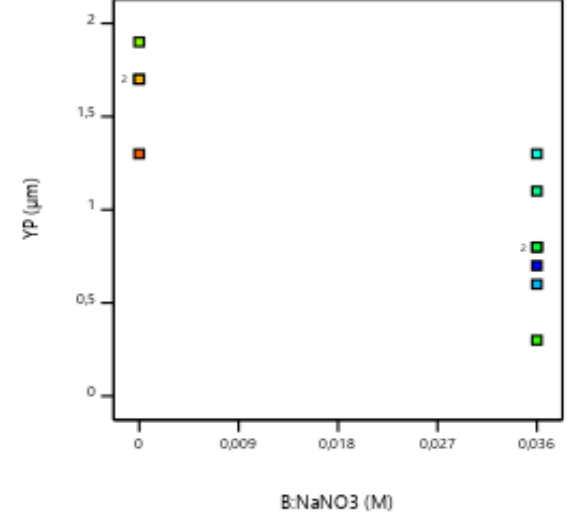
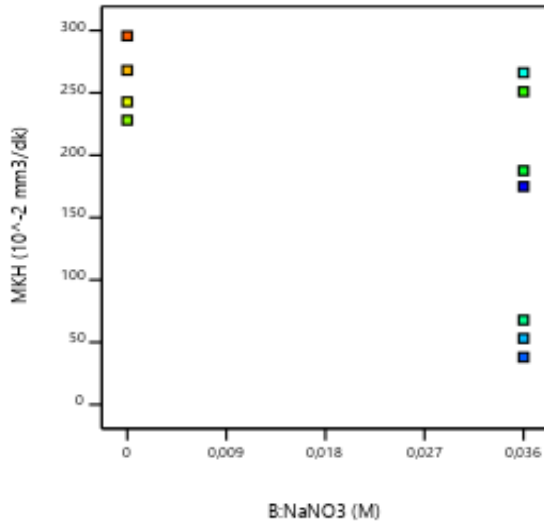
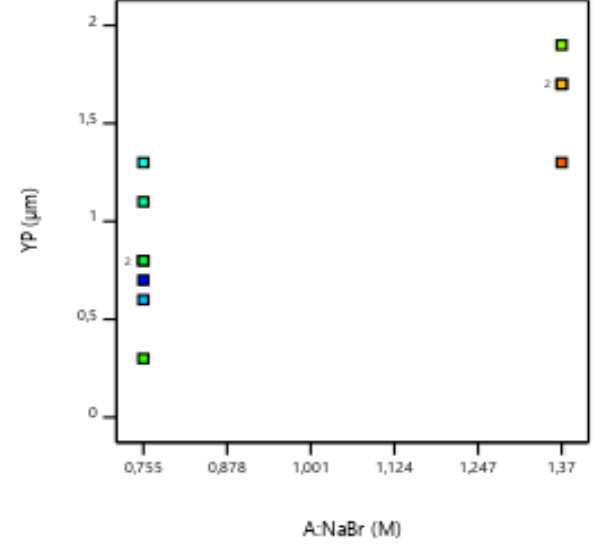
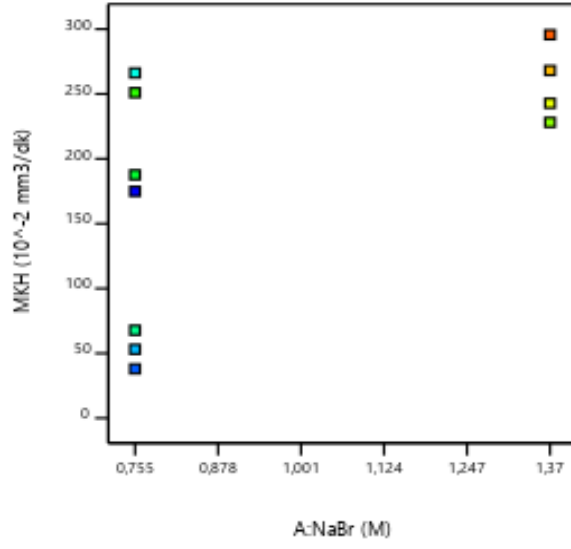
Ek.7 Design Expert yazılımından elde edilen tuz çözeltisi türüne bağlı çıktılar



Ek.8 Design Expert yazılımından elde edilen cihaz çalışma koşullarının MKH ve YP üzerine etkisine bağlı çıktılar



Ek.9 Design Expert yazılımından elde edilen cihaz koşulları çalışmasında kullanılan elektrolit tipinin MKH ve YP üzerine etkisine bağlı çıktılar



ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Gülnur Şehnaz KORKMAZ

Doğum Yeri ve Tarihi : İskenderun, 27.05.1991

Medeni Hali : Bekar

E posta : gulnur.korkmaz91@gmail.com

Eğitim

Lise : İstiklal Makzume Anadolu Lisesi

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü

Erasmus Programı : Universidade de Santiago de Compostela, Kimya Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – İyi Seviye,

Almanca – Başlangıç Seviyesi,

İspanyolca – Temel Seviye

İş Deneyimi

12.2014-08.2016 :Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği/ *Tübitak 1001 Projesi Bursiyerliği*

12.2016-07.2017: Ali Raif İlaç Sanayi /*Arge Analisti*

07.2017: Sumitomo Rubber Ako Lastik San. / *Proses Geliştirme Mühendisi*

Deneyim alanları

Arge

İlaç Sanayi

Proses Geliştirme Mühendisliği

Lastik Üretimi

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster ile Katıldığı Toplantılar

-