

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti6Al4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON ve ELEKTRO
KİMYASAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ulaş ÇAYDAŞ

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK

DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti6Al4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON ve ELEKTRO
KİMYASAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ulaş ÇAYDAŞ

Doktora Tezi
Makina Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK

Üye : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Üye : Prof. Dr. Nuri ORHAN

Üye : Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde derin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK' a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca sürekli manevi desteğini esirgemeyen sayın hocam Cebeli ÖZEK' e, çalışmanın elektro erozyon deneylerinin yapılması kısmında gerekli yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Öğretim Görevlisi Hakan GÜRÜN'e de teşekkür ederim. Ayrıca çalışma süresince bana katlanan ve sabreden sevgili eşim Ebru ÇAYDAŞ' a da sonsuz şükranlarımı sunarım.

Makine Eğitimi Bölümü Araştırma Görevlilerinden Arş. Gör. Engin ÜNAL ve Arş. Gör. İbrahim CAN'a, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen 1096 no'lu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP personeline de ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	XVI
ABSTRACT.....	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Ultrasonik Titreşim Kullanılarak Yapılan Çalışmalar.....	6
2.1.1. Ultrasonik Titreşim Kullanarak Mikro Deliklerin İşlenmesi.....	6
2.1.2. İş Parçasına Titreşim Uygulanarak Yapılan Çalışmalar.....	7
2.1.3. Gaz Ortamında Titreşimli Elektrotlarla Yapılan Çalışmalar.....	7
2.1.4. Titreşimli Telli Erozyon ile Yapılan Çalışmalar.....	7
2.2. Kuru Elektro Erozyon Alanında Yapılan Çalışmalar.....	8
2.2.1. Talaş Kaldırma Oranı ve Takım Aşınması Alanında Yapılan Çalışmalar.....	8
2.2.2. Yüzey Pürüzlüğü ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	8
2.2.3. Kuru Telli Erozyon Alanında Yapılan Çalışmalar.....	9
2.3. Toz İlavesi Yapılarak Elektro Erozyonla İşleme Alanında Yapılan Çalışmalar.....	9
2.3.1. Yüzey Kalitesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	10
2.3.2. Talaş Kaldırma Oranı Alanında Yapılan Çalışmalar.....	10
2.3.3. Artık Tabaka Kalınlığı ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	10
2.4. Elektro Erozyon ile İşlemede Modelleme Alanında Yapılan Çalışmalar.....	11
2.5. Elektro Erozyon Alanında Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi.....	12
2.6. Elektro Kimyasal İşleme Yöntemi.....	13
3. TİTANYUM ALAŞIMLARI ve TALAŞLI İŞLENEBİLİRLİKLERİ.....	14
3.1. Saf Titanyum.....	14
3.2. α -Ti Alaşımları.....	14
3.3. α + β -Ti Alaşımları.....	15
3.4. β -Ti Alaşımları.....	16
3.5. Titanyum Alaşımlarının Talaşlı İşlenebilirliği.....	16
3.5.1. Kesici Takım Seçimi.....	17
3.5.2. Kesici Takım Aşınma Mekanizmaları.....	20
3.5.3. Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi.....	25
3.5.3.1. Kesme Hızı.....	25
3.5.3.2. İlerleme Miktarı.....	26
3.5.3.3. Talaş Derinliği.....	27
3.5.3.4. Soğutma Sıvısının Kullanımı.....	27
3.5.4. Titanyum Alaşımlarının Klasik Yöntemlerle İşlenmesinde Elde Edilen Sonuçlar.....	28
4. ELEKTRO EROZYON ve ELEKTROKİMYASAL TAŞLAMA YÖNTEMLERİ.....	29
4.1. Elektro Erozyon Yöntemi.....	29
4.1.1. Talaş Kaldırma Mekanizması.....	29
4.1.2. Elektro Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri.....	35
4.1.2.1. Tepe Akımı.....	35
4.1.2.2. Ortalama Çalışma Akımı.....	36
4.1.2.3. Akım Yoğunluğu.....	36
4.1.2.4. Ark Süresi (Kıvılcım Süresi).....	36
4.1.2.5. Ark Aralığı (Bekleme Süresi).....	36
4.1.2.6. Servo.....	36
4.1.2.7. Kafa Hızı.....	37
4.1.2.8. Çalışma Süresi ve Geri Çekme Süresi.....	37
4.1.2.9. Ark Koruma.....	37

4.1.2.10. Sıvı Seviyesi.....	37
4.1.2.11. Dielektrik Sıvısı	37
4.1.2.11.1 Parlama Noktası	38
4.1.2.11.2. Dielektrik Mukavemeti	38
4.1.2.11.3. Renk	39
4.1.2.11.4. Koku.....	39
4.1.2.11.5. Koruyucu Tedbirler	39
4.1.3. Dielektrik Sıvısının Uygulama Şekilleri	39
4.1.3.1. Elektrottan Püskürtme	39
4.1.3.2. İş Parçasından Püskürtme	40
4.1.3.3. İş Parçasından Emme (Vakum).....	40
4.1.3.4. Elektrottan Emme	41
4.1.3.5. Kenardan Püskürtme Metodu.....	41
4.1.3.6. Titreşimli Dielektrik Sirkülasyonu.....	42
4.1.4. Takım (Elektrot).....	42
4.1.4.1. Elektrot (Takım) Aşınması.....	43
4.1.5. Başlıca Elektro Erozyon Çeşitleri	43
4.1.5.1. Elektro Erozyon (Electrical Discharge Machining) EDM	43
4.1.5.2. Tel Erozyon (Wire Electrical Discharge Machining) WEDM.....	44
4.1.5.3. Freze Erozyon (Electrical Discharge Milling)	44
4.1.5.4. Taşlama Erozyon (Electrical Discharge Grinding) EDG	44
4.1.5.5. Ultrasonik Destekli Erozyon (Ultrasonic Aided EDM) UEDM	44
4.1.5.6. Mikro Elektro Erozyon (Micro Electro Discharge Machining) MEDM.....	45
4.1.5.7. Mikro Tel Erozyonu.....	45
4.1.5.8. Oyma erozyon (Mole EDM)	45
4.2. Elektrokimyasal Taşlama Yöntemi	45
4.2.1. Yöntemin Özellikleri.....	46
4.2.2. Talaş Kaldırma Oranı ve Akım	47
4.2.3. Aygıt ve Zımpara Taşı	48
4.2.4. İş parçası	50
4.2.5. Elektrolit.....	50
4.2.6. Elektrolit Taşlama Metotları	50
4.2.7. Elektrolitik Taşlamanın Avantaj ve Dezavantajları	52
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
5.1. Çalışmanın Amacı.....	53
5.2. Deneysel Tasarım ve Planlama	54
5.3. Elektro Erozyon Deneyleri.....	54
5.3.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	57
5.3.2. Metalografik İncelemeler	58
5.3.2.1. XRD ve EDS Analizleri	59
5.3.2.2. Mikrosertlik Ölçümleri.....	59
5.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	59
5.3.4. Elektrot Aşınması ve Talaş Kaldırma Oranlarının Belirlenmesi.....	59
5.4. Elektrokimyasal Taşlama Deneyleri	60
6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	61
6.1. Elektro Erozyon Deney Sonuçları.....	61
6.1.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları.....	61
6.1.1.1. Yüzey Yapısı.....	61
6.1.1.1.1. Akımın Yüzey Yapısına Etkisi.....	62
6.1.1.1.2. Vurum Süresinin Yüzey Yapısına Etkisi	64
6.1.1.2. EDS ve XRD Sonuçları.....	66
6.1.1.3. Beyaz Tabaka Kalınlığı ve Yüzey Çatlakları.....	70
6.1.2. Beyaz Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları.....	74

6.1.2.1. Akımın Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi.....	74
6.1.2.2. Vurum Süresinin Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi	77
6.1.3. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Ölçüm Sonuçları.....	80
6.1.3.1. Akımın Yüzey Çatlak Yoğunluğuna Etkisi.....	80
6.1.3.2. Vurum Süresinin Yüzey Çatlak Yoğunluğuna Etkisi	83
6.1.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	88
6.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları.....	96
6.1.4.1. Akımın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	96
6.1.4.2. Vurum Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	99
6.1.5. Talaş Kaldırma Oranı Sonuçları.....	103
6.1.5.1. Akımın Talaş Kaldırma Oranına Etkisi.....	103
6.1.5.2. Vurum Süresinin Talaş Kaldırma Oranına Etkisi	105
6.1.6. Elektrot Aşınması Ölçüm Sonuçları.....	108
6.1.6.1. Akımın Elektrot Aşınmasına Etkisi	108
6.1.6.2. Vurum Süresinin Elektrot Aşınmasına Etkisi	111
6.2. Elektrokimyasal Taşlama Deney Sonuçları	112
6.2.1. İşleme Voltajının Etkisi.....	113
6.2.2. Elektrolit Akma Oranının Etkisi	116
6.2.3. Tabla İlerleme Miktarının Etkisi.....	118
6.3. Yüzey Pürüzlülüğü İyileşme Oranı	118
7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ	122
7.1. Elektro Erozyon Deneylerinin İstatistiksel Analizi	123
7.1.1. Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Analizi.....	124
7.1.2. Beyaz Tabaka Kalınlığının İstatistiksel Analizi.....	129
7.1.3. Elektrot Aşınmasının İstatistiksel Analizi	132
7.1.4. Talaş Kaldırma Oranının İstatistiksel Analizi.....	136
7.2. Elektro Kimyasal İşleme Yönteminin İstatistiksel Analizi.....	139
7.3. Maliyet Analizi	141
7.3.1. Elektro Erozyon Yöntemi İçin Maliyet Analizi	141
7.3.2. Elektro Kimyasal Taşlama Yöntemi İçin Maliyet Analizi.....	143
8. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	147
8.1. Çoklu Lineer Regresyon Yöntemi	147
8.2. Elektro Erozyon Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi	148
8.2.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Matematiksel Modeli.....	148
8.2.2. Beyaz Tabaka Kalınlığının Matematiksel Modeli	155
8.2.3. Elektrot Aşınmasının Matematiksel Modeli	162
8.2.4. Talaş Kaldırma Oranının Matematiksel Modeli.....	169
8.3. Elektro Kimyasal Taşlama Yönteminin Matematiksel Modellenmesi.....	176
9. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	180
9.1. Genel Sonuçlar	180
9.2. Öneriler	182
KAYNAKLAR.....	183

Şekil 3.1 Ti6Al4V alaşımı ve CK45 çelik için farklı takımlarla yapılan işlemlerde ortaya çıkan ısının takıma ve talaşa dağılım oranı [124].	19
Şekil 3.2 Dönel kesici takım [128].	19
Şekil 3.3 Kesme hızı – sıcaklık grafiği [124].	20
Şekil 3.4 Titanyum alaşımlarının işlenmesinde meydana gelen tipik aşınma çeşitleri : (a) Serbest yüzey aşınması, (b) Krater aşınması, (c) Kırılma [126].	21
Şekil 3.5 V_c : 75 m/dak, f : 0.25 mm/dev, a : 1mm değerleri ile yapılan deneyde kesici takımlardaki serbest yüzey aşınması [123].	22
Şekil 3.6 V_c : 75 m/dak, f : 0.25 mm/dev, a : 1mm değerleri ile yapılan deneyde kesici takım ömürleri [123].	22
Şekil 3.7 Statik yapışma deneyi sonucunda elde edilen yüzeyler: (a) Kaplamalı karbür, (b) Kaplamalı karbürün düşey aşınma profili, (c) CBN, (d) PCD [35].	23
Şekil 3.8 Ani durdurma deneyleri sonucu elde edilen talaş ve talaşın altına yapışan takım parçaları: (a) Kaplamalı karbür, (b) CBN, (c) PCD (X 100) [123].	24
Şekil 3.9 Kesme hızı ile kesme uzunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik [131].	25
Şekil 3.10 Kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki [132].	26
Şekil 3.11 Kesme hızı – ilerleme – takım ömrü ilişkisi. (Ti6Al4V, takım: K20) [124].	26
Şekil 3.12 İlerlemenin takımdaki aşınmaya etkisi. (Takım: Tungsten karbür, a : 0.35 mm/dev, b : 0.25 mm/dev) [129].	27
Şekil 4.1 Elektro erozyon yönteminde talaş kaldırılması.	30
Şekil 4.2 Talaş Kaldırma Sürecinde 1. Aşama.	30
Şekil 4.3 Talaş Kaldırma Sürecinde 2. Aşama.	31
Şekil 4.4 Talaş Kaldırma Sürecinde 3. Aşama.	31
Şekil 4.5 Talaş Kaldırma Sürecinde 4. Aşama.	32
Şekil 4.6 Talaş Kaldırma sürecinde 5. Aşama.	32
Şekil 4.7 Talaş Kaldırma Sürecinde 6. Aşama.	33
Şekil 4.8 Talaş Kaldırma Sürecinde 7. Aşama.	33
Şekil 4.9 Talaş Kaldırma Sürecinde 8. Aşama.	34
Şekil 4.10 Talaş Kaldırma Sürecinde 9. Aşama.	34
Şekil 4.11 Elektro erozyon işleminde elektrotlara uygulanan gerilim ve akım dalga şekilleri.	35
Şekil 4.12 Dielektrik sıvısında olması gereken özellikler.	38
Şekil 4.13 Elektrottan basarak püskürtme.	40
Şekil 4.14 İş parçasından basarak püskürtme.	40
Şekil 4.15 İş parçasından emme (vakum).	41
Şekil 4.16 Elektrottan emerek püskürtme.	41
Şekil 4.17 Yandan püskürtme.	41
Şekil 4.18 Titreşimli püskürtme.	42
Şekil 4.19 Elektrotta aşınma bölgeleri.	43
Şekil 4.20 Elektrolit taşlama prensibi.	46
Şekil 4.21 Tipik bir elektro kimyasal taşlama sistemi [138].	48
Şekil 4.22 EKT işlemi için aygıtın şematik görünümü [139].	49
Şekil 4.23 Elektrolitik taşlama tipleri.	51
Şekil 5.1 Deneylerde kullanılan elektro erozyon tezgahı.	54
Şekil 5.2 Elektro erozyon işleminde kullanılan elektrotlar.	56
Şekil 5.3 İş parçası ve elektrot tutucuları (a: iş parçası tutucusu, b: elektrot tutucu).	56
Şekil 5.4 Tutucuların tezgah üzerindeki konumları (1: Elektrot tutucu, 2: Elektrot, 3: İş parçası, 4: İş parçası tutucusu).	57
Şekil 5.5 Metalografik İnceleme Bölgeleri.	58
Şekil 6.1 Elektro erozyon ile işlenmiş tipik bir yüzey görüntüsü (Elektrot : Grafit, Akım : 6A, vurum süresi : 100µs).	61

Şekil 6.2 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Grafit, Vurum süresi: 100µs).	62
Şekil 6.3 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Bakır, Vurum süresi: 100µs).	63
Şekil 6.4 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Alüminyum, Vurum süresi: 100µs).	63
Şekil 6.5 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25µs, b: 50µs, c: 100µs, d: 200µs, Elektrot: Grafit, Akım: 12A).	65
Şekil 6.6 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25µs, b: 50µs, c: 100µs, d: 200µs, Elektrot: Bakır, Akım: 12A).	65
Şekil 6.7 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25µs, b: 50µs, c: 100µs, d: 200µs, Elektrot: Alüminyum, Akım: 12A).	66
Şekil 6.8 Grafit elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.	67
Şekil 6.9 Bakır elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.	67
Şekil 6.10 Alüminyum elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.	67
Şekil 6.11 Ti alaşımının işlem öncesi yüzeyinden alınan XRD analizi.	68
Şekil 6.12 Ti alaşımının grafit elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.	69
Şekil 6.13 Ti alaşımının bakır elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.	69
Şekil 6.14 Ti alaşımının alüminyum elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.	70
Şekil 6.15 İşlenen yüzeye komşu yüzeydeki etkilenen bölgeler.	70
Şekil 6.16 Ti6Al4V alaşımının soğuma hızına bağlı olarak faz yapısındaki değişim grafiği [152].	71
Şekil 6.17 Farklı elektrotlarla işlenmiş yüzeydeki beyaz tabaka kalınlıkları (a:Al, b: Cu, c: Gr).	72
Şekil 6.18 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Bakır, Vurum Süresi : 100µs).	73
Şekil 6.19 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Alüminyum, Vurum Süresi : 100µs).	73
Şekil 6.20 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Grafit, Vurum Süresi : 100µs).	74
Şekil 6.21 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Grafit).	75
Şekil 6.22 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Bakır).	76
Şekil 6.23 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Alüminyum).	76
Şekil 6.24 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Grafit).	77
Şekil 6.25 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Bakır).	78
Şekil 6.26 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Alüminyum).	78
Şekil 6.27 Ortalama beyaz tabaka kalınlığının işlem parametreleriyle değişimi (a: Grafit elektrot, b: Bakır elektrot, c: Alüminyum elektrot).	80
Şekil 6.28 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Grafit).	81
Şekil 6.29 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Bakır).	82
Şekil 6.30 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Alüminyum).	82
Şekil 6.31 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Grafit).	83
Şekil 6.32 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Bakır).	84
Şekil 6.33 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Alüminyum).	84
Şekil 6.34 Yüzey çatlak yoğunluğunun elektrot malzemesi ve işleme parametreleriyle değişimi (a: Grafit Elektrot, b: Bakır elektrot, c: Alüminyum elektrot).	86
Şekil 6.35 Yüzey çatlak tahmin haritaları (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).	87
Şekil 6.36 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	89
Şekil 6.37 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	89
Şekil 6.38 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	90
Şekil 6.39 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	90

Şekil 6.40 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	91
Şekil 6.41 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	92
Şekil 6.42 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	92
Şekil 6.43 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	93
Şekil 6.44 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	94
Şekil 6.45 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	94
Şekil 6.46 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	95
Şekil 6.47 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.	95
Şekil 6.48 Tek bir kıvılcımın yüzeyde oluşturduğu krater şekli.	96
Şekil 6.49 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Grafit).	97
Şekil 6.50 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Bakır).	98
Şekil 6.51 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Alüminyum).	98
Şekil 6.52 Akımın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün kötüleşmesi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A).	99
Şekil 6.53 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Grafit).	100
Şekil 6.54 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Bakır).	100
Şekil 6.55 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Alüminyum).	101
Şekil 6.56 İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).	102
Şekil 6.57 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Grafit).	103
Şekil 6.58 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Bakır).	104
Şekil 6.59 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Alüminyum).	104
Şekil 6.60 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Grafit).	105
Şekil 6.61 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Bakır).	106
Şekil 6.62 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Alüminyum).	106
Şekil 6.63 İşlem parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkileri (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).	108
Şekil 6.64 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Grafit).	109
Şekil 6.65 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Bakır).	110
Şekil 6.66 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Alüminyum).	110
Şekil 6.67 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Grafit).	111
Şekil 6.68 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Bakır).	111
Şekil 6.69 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Alüminyum).	112
Şekil 6.70 Elektrokimyasal taşlama işleminde talaş kaldırma mekanizması.	113
Şekil 6.71 İşleme voltajının yüzey yapısına olan etkisi (a: 2V, b: 4V, c: 6V, d: 8V).	114
Şekil 6.72 Yüzeye bağlanan beyaz oksit filmi (İşleme voltajı: 2V).	115
Şekil 6.73 2V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan XRD analizi (İşleme voltajı: 2V).	115
Şekil 6.74 2V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.	116
Şekil 6.75 8V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.	116
Şekil 6.76 Elektrolit akma oranının yüzey yapısına olan etkisi (a: 500 l/s, a: 1000 l/s, a: 1500 l/s, a: 2000 l/s).	117
Şekil 6.77 Tabla ilerleme miktarının yüzey yapısına olan etkisi (a: 6 l/s, a: 12 l/s, a: 18 l/s, a: 24 l/s).	118
Şekil 6.78 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.	120
Şekil 6.79 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.	120
Şekil 6.80 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.	121
Şekil 6.81 Taşlama parametrelerinin YPIÖ' na katkısı.	121
Şekil 7.1. Kim daha iyi nişancı ?	122
Şekil 7.2. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	125
Şekil 7.3. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	126

Şekil 7.4. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	126
Şekil 7.5. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.	130
Şekil 7.6. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.	131
Şekil 7.7. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.	131
Şekil 7.8. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.	134
Şekil 7.9. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.	134
Şekil 7.10. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.	135
Şekil 7.11. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.	137
Şekil 7.12. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.	138
Şekil 7.13. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.	138
Şekil 7.14. Elektro kimyasal taşlama işleminde işleme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	140
Şekil 7.15 Elektro erozyon ile işlenen parçanın boyutları.	142
Şekil 8.1. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.	150
Şekil 8.2. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.	150
Şekil 8.3. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.	151
Şekil 8.4. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	153
Şekil 8.5. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	153
Şekil 8.6. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	154
Şekil 8.7. Yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot).	155
Şekil 8.8. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.	157
Şekil 8.9. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.	158
Şekil 8.10. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.	158
Şekil 8.11. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	160
Şekil 8.12. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	161
Şekil 8.13. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	161
Şekil 8.14. Beyaz tabaka kalınlığı için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot).	162
Şekil 8.15. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.	164

Şekil 8.16. Elektrolitik bakır elektrotla elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.	165
Şekil 8.17. Alüminyum elektrotla elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.	165
Şekil 8.18. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	167
Şekil 8.19. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	167
Şekil 8.20. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	168
Şekil 8.21. Elektrot aşınması için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot).	169
Şekil 8.22. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.	171
Şekil 8.23. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.	172
Şekil 8.24. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.	172
Şekil 8.25. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	174
Şekil 8.26. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	174
Şekil 8.27. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	175
Şekil 8.28. Talaş kaldırma oranı için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot).	176
Şekil 8.29. Elektro kimyasal taşlama yönteminde deneysel ve teorik yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.	178
Şekil 8.30. Elektro kimyasal işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.	179
Şekil 8.31. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.	180

Tablo 3.1. Alaşımsız titanyumun farklı arayer oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri	14
Tablo 3.2. α -Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	15
Tablo 3.3. $\alpha+\beta$ Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	15
Tablo 3.4. β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	16
Tablo 3.5. Titanyumun bazı karakteristikleri ve kesici takıma etkisi [127].	18
Tablo 3.6. Titanyumun işlenmesinde çeşitli kesici takımların performansı [127,129,130].	24
Tablo 3.7. Ti – 6Al – 4V alaşımı için uygun işleme parametreleri [124].	28
Tablo 5.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%).	55
Tablo 5.2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.	55
Tablo 5.3. Elektro erozyonda kullanılan elektrotların özellikleri.	55
Tablo 5.4. Elektro erozyon deneyleri ile ilgili detaylar.	57
Tablo 5.5. EEİ ile işlemede kullanılan işleme parametreleri.	58
Tablo 5.6. Elektrokimyasal taşıma deney şartları.	60
Tablo 6.1. EDM sonrasında ölçülen ortalama beyaz tabaka kalınlıkları.	74
Tablo 6.2. EDM sonrasında ölçülen yüzey çatlak yoğunlukları.	80
Tablo 6.3. Grafit elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.	88
Tablo 6.4. Bakır elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.	91
Tablo 6.5. Alüminyum elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.	93
Tablo 6.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.	97
Tablo 6.7. Talaş kaldırma oranı ölçüm sonuçları.	103
Tablo 6.8. Elektrot aşınması ölçüm sonuçları.	109
Tablo 6.9. EDM, AEKT deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin toplu gösterimi.	119
Tablo 7.1. Elektro erozyon işleme parametreleri ve seviyeleri.	124
Tablo 7.2. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	124
Tablo 7.3. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	124
Tablo 7.4. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	125
Tablo 7.5. Varyans analizi hesap tablosu [166].	127
Tablo 7.6. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.	128
Tablo 7.8. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.	129
Tablo 7.9. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	129
Tablo 7.10. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	130
Tablo 7.11. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	130
Tablo 7.12. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.	132
Tablo 7.13. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.	132
Tablo 7.14. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.	132
Tablo 7.15. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	133
Tablo 7.16. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	133
Tablo 7.17. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	133

Tablo 7.18. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.....	135
Tablo 7.19. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.....	135
Tablo 7.20. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.....	136
Tablo 7.21. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	136
Tablo 7.22. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	137
Tablo 7.23. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	137
Tablo 7.24. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.....	139
Tablo 7.25. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.....	139
Tablo 7.26. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.....	139
Tablo 7.24. Elektro kimyasal taşlama parametreleri ve seviyeleri.....	140
Tablo 7.25. Elektro kimyasal taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin değerleri (S/N değerleri).....	140
Tablo 7.26 Titanyum alaşımını farklı yöntemlerle işleme maliyetleri.....	145
Tablo 8.1. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede yüzey pürüzlülüğü modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.....	148
Tablo 8.2. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek yüzey pürüzlülükleri ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri.....	149
Tablo 8.3. Grafit elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	151
Tablo 8.4. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	152
Tablo 8.5. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	152
Tablo 8.5. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede beyaz tabaka kalınlıkları modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.....	156
Tablo 8.6. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek beyaz tabaka kalınlıkları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen beyaz tabaka kalınlık değerleri.....	157
Tablo 8.7. Grafit elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	159
Tablo 8.8. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	159
Tablo 8.9. Alüminyum elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	160
Tablo 8.10. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elektrot aşınma miktarı modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.....	163
Tablo 8.11. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek elektrot aşınma miktarları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen elektrot aşınma değerleri.....	164
Tablo 8.12. Grafit elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	166
Tablo 8.13. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	166
Tablo 8.14. Alüminyum elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.....	166
Tablo 8.15. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede talaş kaldırma miktarı modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.....	170

Tablo 8.16. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek talaş kaldırma oranları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen talaş kaldırma oranları.	171
Tablo 8.17. Grafit elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.	173
Tablo 8.18. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.	173
Tablo 8.19. Alüminyum elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.	173
Tablo 8.20. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü modeline ait regresyon ve korelasyon katsayıları.	177
Tablo 8.21. Elektro kimyasal taşlama yönteminde gerçek yüzey pürüzlülükleri ve matematiksel model kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülükleri.	178
Tablo 8.22. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.	179

ÖZET

Doktora Tezi

Ti6Al4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON VE ELEKTROKİMYASAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ulaş ÇAYDAŞ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2008, Sayfa : 195

Titanyum ve alaşımları sahip oldukları, yüksek dayanım, yoğunluk oranı ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı, özellikle elektronik, bilgisayar, havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Buna karşın sahip olduğu düşük elastisite modülü, ısı iletkenlik ve yüksek kimyasal reaktivite özelliklerinden dolayı klasik imalat yöntemleri ile işlenebilirlikleri zayıftır. Bu malzemelerin klasik olmayan imal usulleri ile işlenmesi tercihli hale gelmiştir. Bu imalat yöntemlerinden bir tanesi de elektro erozyonla işleme yöntemidir. Bu yöntemle, sert, karmaşık profilli iletken parçaların mikron hassasiyetinde işlenebilmesi mümkündür. Ancak, malzeme ile işlem parametrelerinin uygun seçimi, maliyeti ve verimliliği doğrudan etkilemektedir. Yöntemdeki termal etkiler, malzeme yüzeyinde krater, çatlak, boşluk, döküntü ve eriyik damlalar şeklinde birçok hasarlara, yüzeyin altında ise mikroyapı değişimlerine yol açmaktadır. Bu yüzeysel oluşumlar, özellikle dinamik yüklemeli makine elemanlarının hasar sürecini etkilemektedir. Dolayısı ile elektro erozyon ile işlenmiş yüzeyler, işlem parametrelerine bağlı olarak genellikle ikinci bir bitirme işlemine ihtiyaç duyabilmektedir. Bunun için farklı mekanik iyileştirme yöntemleri kullanılsa da elektro kimyasal işleme yöntemi ideal bir son işlem olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenebilirlik karakteristiklerini belirlemek amacıyla, elektro erozyon ve elektrokimyasal taşlama yöntemleri kullanılmıştır. Elektro erozyon deneylerinde vurum süresi ve akım parametreleri değişken olarak alınırken, püskürtme basıncı ve vurum ara süresi sabit tutulmuştur. Grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum olmak üzere üç farklı elektrot ile işlem yapılmıştır. Elektro erozyon deneyleri neticesinde numunelerin yüzey ve ısıdan etkilenen

tabakaları taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş, noktasal analiz (EDS), X – ışınları analizi (XRD) ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerleri, mikroyapı değişimleri, takım (elektrot) aşınma oranları, talaş kaldırma oranı, yüzey çatlak yoğunluğu ve beyaz tabaka kalınlığı gibi karakteristik değişimler incelenmiştir. Deneylerin ikinci aşamasında, aynı şartlarda elektro erozyonla işlenmiş numuneler, elektro kimyasal taşlama yöntemi ile taşlanmıştır. Elektro kimyasal taşlama deneylerinde işleme voltajı, elektrolit basıncı ve tabla ilerleme miktarı parametreleri değişken alınırken, elektrolit konsantrasyonu ve cinsi sabit tutulmuştur. Elektro kimyasal taşlama sonrasında yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranı, işleme parametrelerine bağlı olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemde de işleme etki eden parametrelerin bağıl etkileri istatistiki açıdan değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. Ayrıca yöntemler, lineer regresyon metodu kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen modellerin uygunlukları varyans analizi ve artık analiz yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen modellerin her iki yöntemde de bundan sonraki uygulamalar için deney yapmadan tahmin amaçlı kullanılabileceği saptanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmış, ikinci bölümde güncel literatürden örnekler verilmiştir. Üçüncü bölümde, titanyum alaşımları tanıtılmış ve klasik işleme yöntemlerinde karşılaşılan problemlere değinilmiştir. Dördüncü bölümde, elektro erozyon ve elektro kimyasal taşlama yöntemleri tanıtılmıştır. Beşinci bölümde, deneysel çalışmanın yöntemi ve deneylere hazırlık aşamaları verilmiştir. Altıncı bölümde deney sonuçları tartışılarak yorumlanmıştır. Yedinci bölümde, her iki yöntemde kullanılan parametrelerin istatistiksel ve maliyet analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sekizinci bölümünde her iki yöntemde işleme parametreleri ve ölçülen değerler arasındaki matematiksel ilişkiler (matematiksel modelleme) belirlenmiş, dokuzuncu ve son bölümde çalışma sonunda elde edilen genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V, EDM, AECG, Yüzey pürüzlülüğü, varyans analizi, modelleme.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF Ti 6Al 4V ALLOY BY ELECTRICAL DISCHARGE AND ELECTROCHEMICAL MACHINING PROCESSES

Ulaş ÇAYDAŞ

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Education

2008, Page: 195

Titanium and its alloys are extensively used in electronic, computer and aerospace industries because of these materials' excellent properties such as a high strength – weight ratio, high temperature and exceptional corrosion resistance. Additionally, highly chemical reactivity, low elastic modules and thermal conductivity of titanium also impair machinability. It is advised to machine these materials by non –traditional machining (NTM) processes. Electrical discharge machining (EDM) process is one of the NTM process. It is possible to machine all electrical conductive materials in micron tolerances to hard and complex shapes by this method. However, the macroscopic effect of heating produces much damages on the surface such as globules of debris, pockmarks, melted drops and varying size craters. These surface formations especially affect the failure process of machine elements under repetitive loading conditions. Thus, the EDMed surfaces are generally needed a second finish operation according to machining parameters. Although, several mechanical surface treatment methods have been employed to improve the EDMed surfaces, the electrochemical machining (ECM) process was found more suitable finish for EDM.

In this study, Ti6Al4V alloy was machined by electrical discharge and electrochemical machining processes to determine machining characteristics. In EDM trials, current and pulse duration were taken as alternative when flushing pressure and pulse interval time were fixed. Three different tool electrode materials namely; graphite, electrolytic copper and aluminum were used to machine Ti alloy. At the end of the EDM experiments, the metallographic

inspections of the samples were observed by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrograph (EDS), X – ray diffraction (XRD) and surface hardness measurements. The surface roughness of the machined surfaces, microstructural changes, tool wear ratio, material removal rate, surface crack density and white layer thickness were the main performance characteristics under investigation. Then the same EDMed specimens (machined under same conditions for standardization purpose) were machined by electrochemical grinding (ECG) process. In ECG process, machining voltage, electrolyte flow rate and table feed rate parameters were changed while electrolyte concentration and type of electrolyte were constant. The surface roughness improvement ratio was determined based on the ECG parameters. The relative effect of each EDM and ECG parameters were determined in statistical manner and the processes were optimized. Both machining processes were modeled by using linear regression approach. The adequacies of models were checked by analysis of variance (ANOVA) and residual analysis techniques. As a consequence, the developed models were able to predict the both machining processes without making experiments.

In the first chapter of this study, the subject was introduced. In the second chapter, the place in the literature of study was investigated and some novel studies were given concerning this subject. In the third chapter, titanium, its alloys and the main difficulties met in conventional machining processes were determined. In the fourth chapter, the EDM and ECM processes were introduced. In the fifth chapter, the method of experimental study and the preparation phases to experiments were presented. In the sixth chapter, the experimental results were given and discussed. In the seventh chapter, the statistical and economy analyses for both processes were given. In the eighth chapter, the processes were modeled by linear regression method. In the ninth and final chapter, general results and recommendations were given.

Keywords: Ti6Al4V, EDM, AECG, surface roughness, analysis of variance, modeling.

1. GİRİŞ

İşlenebilirlik, gerekli yüzey özellikleri ve toleranslarına sahip olacak şekilde, bir malzemenin işlenmesinde karşılaşılan kolaylıklar veya zorluklar olarak tanımlanabilir. Herhangi bir işleme yönteminde, kesici takımın ömrü, talaş kaldırma oranı, tüketilen güç miktarı, kesme kuvvetleri, elde edilen yüzeyin kalitesi ve çıkan talaşın şekli gibi faktörler işlenebilirliği ölçmede kullanılan kriterlerlerdir. İşlenen malzemenin özellikleri, kesici takımın özellikleri ve geometrisi, uygulanan kesme şartları, tezgahın rijitliği ve işleme ortamı gibi diğer çeşitli etkenler de işlenebilirliği önemli derecede etkilemektedir. Günümüzde, metal işleme sektöründe dünyada ortalama bir milyar dolar'ın üzerinde bir harcama yapılmaktadır. Ancak, işlenen malzemelerin yaklaşık %10 gibi bir bölümü talaş olarak atıl duruma düşmektedir. Doğru ve uygun işleme şartlarının kullanılması ile bu atık miktar % 20 oranında azaltılabilmektedir. Dolayısı ile işleme yöntemlerinin seçimi büyük önem arz etmektedir. Diğer yandan, işlenmiş bir yüzeyin ve yüzey altının karakteristikleri, o ürünün performansını belirlemede kullanılan etkenlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve tamlığı, işlenen yüzeyin kalitesini belirtmektedir. Talaş kaldırma işlemi sonucunda, yüzeyde geometrik sapmalar ve metalurjik değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler, mikro çatlaklar, mikro çukurlar, yırtılmalar, plastik deformasyon, ilerleme izleri ve yüzeye yeniden yapışan talaşların oluşturduğu birikintiler şeklinde oluşan hasarlardır. Bu yüzey hasarları, aynı zamanda çatlak yayılmalarını hızlandırarak malzemelerin yorulma ömürlerini azaltmaktadır. Dolayısı ile malzemelerin gerekli yüzey tamlığında işlenmeleri gerekmektedir.

Son yıllarda, teknolojinin hızlı gelişmesi hem malzeme hem de bu malzemelerin kullanılabilir ürün haline getirilmesinde kullanılan yöntemlerden beklentileri arttırmaktadır [1]. Özellikle elektronik, bilgisayar, havacılık ve uzay endüstrilerde mukavemetli ve hafif malzemelere olan ihtiyaçlar giderek artmaktadır. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları, yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı, bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır [2,3]. Bu alaşımlar içerisinde Ti6Al4V alaşımı, en büyük paya sahiptir [4]. Bu alaşımların kullanıldıkları yerler de dikkate alındığında, işleme sonrasında gerekli yüzey kalitesi ve toleranslarının oldukça yüksek olması gerekmektedir [5]. Bu alaşımlar, talaşlı imalat esnasında, yüksek sıcaklıklarda dahi sahip oldukları özellikleri korumaktadırlar. Dolayısıyla, titanyum alaşımları genellikle “işlenmesi zor malzeme” grubunda yer almaktadır [6]. Klasik işleme yöntemlerinde, kesme anında oluşan plastik deformasyon, takım – talaş ve takım – iş parçası arasında meydana gelen sürtünmelerin de etkisiyle açığa çıkan ısı ve bunun bir sonucu olan sıcaklığın da etkisiyle birçok problem meydana gelmektedir [7]. Çelik ve dökme demirlere nazaran bu alaşımların sahip olduğu düşük termal iletkenlik (yaklaşık 15 W/m°C) de, kesici takım ve iş parçasında oluşan yüksek sıcaklığın diğer önemli bir nedenidir [8]. Ayrıca, bu

alaşımların yumuşak matrise sahip olmaları, işlem anında hızlı sertleşmelere yol açmakta, yüksek sıcaklıklarda kesici takım malzemesiyle reaksiyona girme eğilimleri ve kesici takım ucuna yapışmaları gibi nedenler, işlemin maliyetini ve verimliliğini önemli derecede etkilemektedir [9 – 11]. Siekman [12], bu alaşımların hangi klasik yöntem kullanılırsa kullanılsın, işlenmesinin daima bir problem olduğunu belirtmiştir. Bu bakımdan bu malzemelerin işlenmesinde alışılmamış imalat yöntemlerinin kullanılması tercihli hale gelmiştir [13]. Bu çalışmalar doğrultusunda geliştirilen imalat yöntemlerinden bir tanesi de üzerinden akım geçen bir elektrot yardımı ile talaş kaldıran ve bilgisayar kontrollü olarak çalışan elektro erozyon ile işleme (EDM) yöntemidir.

Elektro erozyon ile işleme (EDM), elektriksel olarak iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalımlarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece iş parçasından küçük parçacıkların ergitilerek ve buharlaştırılarak koparılması prensibine dayanan bir işleme yöntemidir. İşleme anında, ısınma ve soğumayı içeren karmaşık bir süreç meydana gelmekte ve boşalım enerjisi, boşalım süresi, elektrot ilerleme hızı, dielektrik sıvı basıncı, ve malzeme özellikleri gibi işlem faktörleri iş parçasında oluşan kraterlerin büyüklüğünü, dolayısı ile yüzey yapısını ve işlem etkinliğini belirlemektedir [14]. Titanyum alaşımlarının bu yöntemle işlenebilmesi, EDM yöntemini modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir. Ancak, literatür araştırması bölümünde de yer alan yüzey yapısı ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, elektro erozyon yöntemi ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılgan bir tabakanın oluştuğu, bu tabakanın kılcal çatlaklar ve artık gerilmeler içerdiği ve dolayısıyla malzemenin özellikle yorulma gibi mekanik özelliklerini zayıflattığı görülmektedir. Havacılık alanında kullanılan titanyum alaşımları, oldukça ağır şartlar altında çalışmaktadır. Bu alaşımların, bu şartlar altındaki performansları ve servis ömürleri, işlendikleri yöntemle doğrudan ilişkilidir. Çalışma şartlarının yanı sıra, beklenmedik ve bilinmeyen faktörler de malzemenin performansını etkilemektedir. Bu malzemelerin elektro erozyon yöntemi ile işlenmesi neticesinde oluşan yüzey hasarlarını ortadan kaldırmak için ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektro erozyon ile işleme neticesinde, yüzey ani ısınma ve soğumaya maruz kalmakta ve oluşan hasarlar malzemenin mukavemetini önemli derecede azaltmaktadır. Yüzeyde oluşan beyaz tabaka oldukça sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir. Bu tabakanın kırılma dayanımı, uygulanan akım şiddetine bağlı olarak değişmektedir [15 , 16]. Tsut Sui ve diğ., [17 – 20] yaptıkları çalışmada, elektro erozyon ile işlemede oluşan ısıdan etkilenen bölgenin malzeme ömrünü azalttığını belirtmişlerdir. Özellikle yorulma ömrünün uzun tutulması için, elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylere genellikle ikinci bir işlem yapılmalıdır. Tosha [21], yaptığı

çalışmada elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylere bilyeli dövme işlemi uygulamış ve malzemenin yorulma dayanımının oldukça arttığını belirtmiştir.

Yorulma ömrü, bir malzemenin yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği, yüzey artık gerilmeleri ve çatlaklar gibi yüzey özelliklerine bağlıdır. Son yıllarda yapılan birçok araştırmalarda [22 – 29], yüzey özelliklerini artırmak için malzeme yüzeyine oksit, nitrit ve karbür gibi sert ve ince tabakalı filmler kaplanmıştır. Ayrıca yine yorulma dayanımını artırmak için mekanik iyileştirme veya yüzey modifikasyonu gibi yöntemler de denenmiştir [30,31]. En çok çalışılan geleneksel kaplama TiN' dür. Bu kaplama genellikle fiziksel buhar biriktirme (PVD) veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri ile yapılmakta ve malzemenin aşınma ve diğer özellikleri oldukça iyileştirilmektedir [32,33]. Bu yöntem, Y.H.Guu ve Hocheng [34] tarafından elektro erozyon ile işlenmiş bir yüzeye uygulanmış ve malzemenin yorulma dayanımı % 10.9 ~ 29.4 arasında arttırılmıştır. Ancak, kaplama yöntemi ile yapılan yüzey iyileştirme işlemlerinde kaplama malzemesinin ürünün çalışma şartlarına göre uyumsuzluğu bu yöntemin seçimini zorlaştırmaktadır. Titanyum alaşımları, bazı uygulamalarda oldukça yüksek sıcaklıklar altında çalışmaktadırlar. Özellikle uçak motor pervaneleri gibi uygulamalarda, kaplama malzemesinin kopması oldukça yüksek bir olasılıktır. Bu durum, yapılan bazı deneylerde de kanıtlanmıştır. Nabhani [35] yaptığı bir çalışmada, statik yapışma deneyi neticesinde kaplamalı kesici takımlarda kaplamanın tamamının koptuğunu belirlemiştir.

Elektro erozyon yüzeylerinin elle parlatılması yöntemi de oldukça yaygın kullanılan iyileştirmelerden birisidir. Ancak, bu yöntem, uzun zaman almakta ve operatör için yorucu bir iş haline gelmektedir. Bu yöntemde, yüzey kalitesini etkileyen birçok değişken mevcuttur. Parlatma işleminde uygulanan baskı kuvveti, kullanılan aşındırıcı (abrasiv) cinsi, aşındırıcının tane boyutu, parlatma yönü ve kullanılan yağlayıcı gibi parametreler parlatma kalitesini etkilemektedir. Dolayısıyla bu yöntemde işlemin homojenliğini sağlamak oldukça zordur. Ayrıca, aynı şartlarda dahi, elde edilen yüzeyler operatörden operatöre değişmektedir [36].

Diğer yandan, birçok çalışmada [37 – 39] elektro erozyon ile işlenmiş yüzeyler, kompozit elektrotlar kullanılarak yüzey alaşımlama şeklinde iyileştirilmiştir. Kompozit elektrotlar genellikle toz metalurjisi yöntemiyle düşük sıkıştırma basınçlarında kalıplanır ve sinterlenirler. Bu elektrotlar düşük termal iletkenliğe sahip olduklarından, kompozit malzeme elektrot yüzeyinden ayrılarak iş parçasının yüzeyini kaplamaktadır. Bu şekilde iş parçasının yüzeyi daha az çatlak içerir ve korozyon ve aşınma dayanımı artar. Ancak, kompozit elektrotlar işleme parametrelerine göre seçildiklerinden ve arzu edilen yüzey özelliklerine göre özel üretim istediklerinden elektrot ve işlem maliyeti önemli derecede artmaktadır[40].

Yüzey iyileştirme yöntemlerinden bir tanesi de elektro erozyon ile işlemede kullanılan dielektrik sıvı içerisine metal tozlarının atılması ile yapılan bir çeşit alaşımlamadır. Bu

yöntemde, metal tozları sıvı içerisine katılmakta, sıvı sirkülasyonu ile tank içerisinde homojen bir şekilde dağılmakta ve elektrot ile iş parçası arasındaki kıvılcım oluşumu hızlanmaktadır. Kıvılcım boşalım hızıyla dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliği daha kısa sürede yenilmekte ve daha yüksek bir boşalımın olması sağlanmaktadır [41]. Bu şekilde talaş kaldırma oranı artmakta, takım aşınma oranı azaltılmakta ve EDM ile işlenen yüzeyin korozyon dayanımı artmaktadır [42 – 44]. Ayrıca, dielektrik sıvıda bulunan metal tozları iş parçasının yüzeyine kaplanarak malzemenin yüzey sertliği artırılır ve mikro çatlak oranı azaltılır [45]. Luo [46] çalışmasında, bu yöntemi kullanarak yaptığı çalışmada, elektrot ile iş parçası arasında dağınık halde bulunan metal tozlarının daha az arklara neden olduğunu ve işlemin verimliliğini artırdığını belirtmiştir. Bu yöntem ucuz ve kolay uygulanabilir olmasına rağmen, yüzey hasarları belirli bir oranda azaltılabilmekte ve iyileşme oranı sınırlı kalmaktadır.

Başka bir yöntemde, elektro erozyonda kullanılan elektrotlara sert ve pürüzsüz bilyeler takılmış ve bilyeli dövme sistemine benzer şekilde yüzeyler geliştirilen bu elektrotlarla işlenmiş ve yüzey pürüzlülüğü % 80' e yakın oranda iyileştirilmiştir [47]. Aynı zamanda bu yöntemin yüzeyin korozyon ve yorulma dayanımını da artırdığı belirtilmiştir [48 – 51].

Düşük yüzey özelliklerinin yanı sıra elektro erozyon ile işleme yönteminde talaş kaldırma oranı oldukça yavaştır. Özellikle bitirme işlemlerinde bazı çalışmalar enerji değerlerinin kademeli olarak azaltılmasını ve bitirme pasosunun oldukça düşük değerlerde gerçekleşmesi gerektiğini önermektedir [52]. Ancak bu durumda talaş kaldırma oranı azalmakta ve işlem süresi oldukça artmaktadır. İşlem hızını artırarak daha iyi yüzeylerin elde edilebilmesi en önemli kazanımdır. Bu amaç için, iki farklı yöntemin tek bir tezgahta birleştirilmesi ile yeni işleme teknikleri geliştirilmiştir. Örneğin, elektro erozyon ve elektrokimyasal işleme yöntemlerinin bir bileşimi olan elektrokimyasal boşalımlarla işleme (ECDM) yöntemi ile talaş kaldırma oranının normal EDM' ye nazaran 10 kat artırılabilceği belirtilmiştir [53 – 56]. Diğer çalışmalarda, ultrasonik işleme (USM) ile EDM yöntemleri birlikte kullanılarak titanyum alaşımı için talaş kaldırma oranı artırılmıştır [57 – 61]. K.M. Shu ve G.C.Tu [62], klasik taşlama ile EDM yöntemini birleştirerek (elektro boşalımlarla taşlama) yeni bir yöntem denemişlerdir. Bu çalışmada, bakır matrisli ve SiCp takviyeli kompozit bir elektrot taş olarak kullanılmıştır. Talaş kaldırma oranı, klasik EDM'nin 3 ~ 5 katı kadar artmıştır. Ancak, bu yöntemde elektrot aşınması, uygulama parametrelerine bağlı olarak önemli derecede artmıştır. Ayrıca bu yöntemde talaş kaldırma elektro erozyon tabanlı olduğundan yüzey EDM yüzeylerine benzerdir. Denenen bu yöntemlerin çoğunda elektro erozyon hasarları tamamen kaldırılamamakta ve yüzey iyileştirme sınırlı kalmaktadır.

Sakai ve diğ [63], elektro erozyonla işlem neticesinde yüzeyde oluşan artık tabakanın elektrokimyasal işleme yöntemiyle (ECM) yüzeye hasar vermeden tamamen kaldırılabilceğini

belirtmiştir. Çalışmada, parlak ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir. Rajurkar ve diğ [64] çalışmalarında ECM yönteminin yüksek işleme oranı, pürüzsüz ve hasarsız parlak yüzeyler sağladığını belirtmişlerdir. Ramasawmy ve Blunt [65], farklı elektrolit çözeltileri kullanarak elektro erozyon ile işlenmiş yüzeyleri elektrokimyasal parlatma yöntemiyle parlatmışlardır. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğü 3.50 ~ 49.35 oranında iyileştirilmiştir. W. Theisen ve A. Schuermann [66] çalışmalarında, Ni-Ti şekil hafızalı bir alaşımı 2A ve 4A olmak üzere iki farklı akım değerinde elektro erozyonla işledikten sonra yüzeyleri elektrokimyasal parlatma ile parlatmışlardır. Ortalama 22 µm kalınlığındaki beyaz tabaka 8 dakika parlatma süresi sonunda yüzeyden tamamen kaldırılmıştır. Bu süre kabul edilebilir bir süredir. Ancak daha kalın ve sert tabakalar için uzayabilir. Dolayısıyla beyaz tabakanın hasarsız kaldırılabilceği en uygun yöntem elektrokimyasal işleme yöntemidir [65].

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı, elektro erozyon ve elektrokimyasal taşlama yöntemleri ile işlenmiştir. Elektro erozyon ile işlem neticesinde, vurum süresi ve akım parametrelerine bağlı olarak, malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, beyaz tabaka kalınlıkları, yüzey çatlak yoğunlukları ve elektrot aşınma miktarları belirlenmiştir. Elektro erozyon yöntemi ile işleme sonrasında, numunelerin yüzeylerinde meydana gelen hasarlar tespit edilmiş, bu hasarların elektro kimyasal işleme/taşlama yöntemi ile giderilebilmesi için uygun işleme şartlarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, elektro kimyasal taşlama yönteminde elektrolit akma oranı, tabla ilerleme miktarı ve işleme voltajı gibi parametreler kullanılmıştır. Elektro kimyasal taşlama sonrasında, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranı belirlenmiştir. Daha sonra, deneysel ölçümlerden elde edilen verilerin doğruluğunu ve hata oranlarını belirlemek amacıyla istatistiksel analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile, her iki işleme şartlarında da işleme etki eden parametrelerin münferit ve diğer parametrelerle etkileşimlerini neticesinde performans üzerindeki etkileri sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca deneysel verilere dayalı olarak, lineer regresyon yöntemi kullanılarak her iki işleme yöntemi de modellenmiştir. Elde edilen matematiksel modellerin uygunlukları varyans ve artık analizleri yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Ayrıca, klasik ve modern imalat yöntemleri için maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, elektrokimyasal taşlama yönteminin, ekonomi ve işleme hızı açısından, elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerdeki hasarları kaldırmak için kullanılabilecek uygun bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektro erozyon ile işlemede, işlem performansını arttırmak ve oluşabilecek hasarları minimize etmek için, konu farklı açılardan ele alınmış ve farklı alanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Son 25 yılda farklı alanlarda yapılan çalışmalar, farklı başlıklar altında değerlendirilerek aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

2.1. Ultrasonik Titreşim Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Elektro erozyon yöntemi ile işlemede, daha etkin bir işleme sağlayabilmek için uygulanan yöntemlerden bir tanesi de, kullanılan takım elektrotuna titreşim uygulamaktır. Bu yöntem 1980'li yıllarda denenmiş ve günümüzde hala uygulanmaktadır. Bu yöntemde, takım elektrotuna yüksek frekansta titreşim uygulanarak, iş parçası yüzeyi ile takım arasındaki basınç değeri değiştirilmekte ve sıvı sirkülasyonu artırılmaktadır. Böylece, ara bölgede sıvının koparılan talaşı süpürme işlemi daha etkin olmakta ve daha temiz yüzeyler elde edilebilmektedir [67].

2.1.1. Ultrasonik Titreşim Kullanarak Mikro Deliklerin İşlenmesi

1995 yılında Zhixin ve diğ. [68] yaptıkları çalışmada, seramik malzemelere delik delmek amacıyla ultrasonik titreşimli elektro erozyon yöntemini kullanmışlardır. Deneylerde, talaş kaldırma oranının klasik erozyon yöntemine nazaran daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ogawa ve diğ. [69], aynı yöntemi kullanarak delinen mikro deliklerin derinliklerinin, titreşimsiz elektrotlara nazaran 2 kat arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Wansheng ve diğ. [70], 32 mm kalınlığındaki Ti – 6Al – 4V alaşımına YG6X karbür elektrot kullanarak 0.2 mm çapında delik delmişlerdir. Çalışmada takım elektrotuna 20kHz frekansında titreşim uygulanmıştır. Sonuç olarak, derinlik/çap oranının 15 kat arttırılabileceği belirtilmiştir. Yan ve diğ. [71], mikro elektro erozyon ve mikro ultrasonik işleme yöntemlerini birleştirerek 150 µm çapında ve 500 µm derinliğinde delikler açmışlardır. Çalışmada, delik giriş ve çıkış çapları arasındaki farkın bu yöntemle 2 µm'a kadar düşürülebileceği vurgulanmıştır. Huang ve diğ. [72] çalışmalarında, titreşimli elektrotlar kullanarak yapılan işlemlerde elektrot aşınması olmadan işleme hızının 60 kat arttırılabileceğine değinmişlerdir. Ghoreishi ve Atkinson [73], eksenel titreşimli elektrot, dönel elektrot ve hem dönel hem de eksenel titreşimli elektrotlar kullanarak bu 3 farklı elektrot hareket yöntemi ile yapılan dalma erozyon uygulamalarında talaş kaldırma oranı, takım aşınması ve yüzey kalitesi değerlerini incelemişlerdir. Çalışmada, dönel titreşimli elektrotlarla yapılan işlemlerde, talaş kaldırma oranının titreşimli elektrotlara nazaran %35, dönel elektrotlara nazaran ise %100 arttığı belirtilmiştir.

2.1.2. İş Parçasına Titreşim Uygulanarak Yapılan Çalışmalar

Elektro erozyon yönteminde, takım elektrotunun yanı sıra, iş parçasına titreşim uygulanması diğer bir yaklaşımdır. Bu yöntemle ilgili, Egashira ve Masuzawa [74], bir quartz saatine 5 μm kadar küçük delik delmeyi başarmışlardır. Ancak, bu tip uygulamalarda takım aşınmasının büyük bir problem olduğuna değinilerek, sinterlenmiş elmas takımların uygun olabileceği önerilmiştir. Gao ve Liu [75], 0.5 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemeye ultrasonik titreşim uygulayarak ve uygulamadan deneyler yapmış ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmada, 43 μm çapında tungsten elektrot kullanılmıştır. Sonuç olarak, titreşimli işlemenin normal erozyon yöntemine nazaran 8 kat daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Prihandana ve diğ. [76], iş parçasına titreşim uygulanmasıyla talaş kaldırma oranının önemli derecede arttırıldığını belirtmişlerdir.

2.1.3. Gaz Ortamında Titreşimli Elektrotlarla Yapılan Çalışmalar

Zhang ve diğ. [77], boru şeklinde ve içerisinden gaz geçen bir elektrot ile dielektrik ortamsız kuru işleme şartlarında, elektrotta titreşim uygulamak suretiyle yaptıkları çalışmada, işleme voltajı, vurum süresi, titreşim frekansı ve akım parametreleri değerlerinin artmasıyla talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğünün de arttığını, boru elektrot et kalınlığının artmasıyla bu değerlerin azaldığını tespit etmişlerdir. Aynı yazarlar diğer bir çalışmalarında [78], normal hava ve oksijen olmak üzere 2 farklı gaz ile yaptıkları elektro erozyon deneylerinde, yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla 0.032 ve 0.046 μm olarak ölçmüşlerdir.

2.1.4. Titreşimli Telli Erozyon ile Yapılan Çalışmalar

Guo ve diğ. [79], tel erozyon ile işlemede tel elektrotuna ultrasonik titreşim uygulandığında, iş parçası ve tel arasında birden fazla boşalım kanalının (plazma kanalı) oluştuğunu tespit ederek, bu sayede kesme oranının önemli derecede arttığını belirtmişlerdir. Guo bir diğer çalışmasında [67], ultrasonik titreşimli tel elektrot ile yapılan kesme işlemlerinde kesme hızının klasik tel erozyonuna nazaran %30 arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün 1.95 μm 'dan 1.7 μm 'a düştüğüne değinmiştir.

Ultrasonik titreşim yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, elektro erozyon ile işlemede bu yöntemin kullanılmasıyla derin ve küçük çaplı deliklerin işlenebildiği görülmektedir. Deneylerde genellikle 17 – 25 kHz aralığında bir frekans uygulanmaktadır. Yapılan çalışmaların çoğunda çelik bazı iş parçası seçilmiştir.

2.2. Kuru Elektro Erozyon Alanında Yapılan Çalışmalar

Bu yöntemde, ince cidarlı bir bakır boru, elektrot olarak kullanılmaktadır. Bu elektrot içerisinde yüksek basınçta hava veya gaz geçmektedir. Bu yöntemin uygulanmasının başlıca amacı, dielektrik sıvı ortamında oluşan kirlilikleri ve bu atıkların temizlik maliyetini azaltmaktır. Yu ve diğ. [80], bu yöntemi, sementit karbür malzemelerin işlenmesinde kullanarak, yağ dielektrik ortamında dalma erozyon ve freze erozyon yöntemleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmada, aynı geometriye sahip iş parçasının dalma erozyon yönteminde en kısa sürede işlendiği saptanmıştır. Ancak, dalma erozyon yönteminde, takım elektrotunun yapılması gerekliliği, gerçek imalatla kuru EDM'nin daha faydalı olabileceğine değinilmiştir.

2.2.1. Talaş Kaldırma Oranı ve Takım Aşınması Alanında Yapılan Çalışmalar

Kunieda ve diğ. [81] 1991 yılında, işlem aralığına oksijen gazı püskürtmek suretiyle bu yöneme yeni bir şekilde yaklaşmışlardır. Çalışmada, boşalım frekansı artırılarak talaş kaldırma oranı önemli derecede arttırılmıştır. Kunieda daha sonra diğer bir çalışmasında [82], içerisinde hava – oksijen karışımı geçen ve CNC kontrollü bir takım geliştirerek, üç boyutlu şekillerin bile oldukça hassas işlenebildiğini göstermiştir. Çalışmada, karışımdaki oksijen konsantrasyonunun artmasıyla, talaş kaldırma oranının da arttığı tespit edilmiştir.

Yoshida ve Kunieda [83], kuru elektro erozyon yönteminde, elektrot aşınma miktarını araştırmışlardır. Çalışmada, iş parçasından kopan partiküllerin elektrot yüzeyini aşınmaya karşı koruduğu ve vurum sürelerinin bütün değerlerinde bile aşınmanın ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirtilmiştir. Takım elektrotunun kesiti incelendiğinde, sadece 2 µm'lık bir aşınma derinliğinin gerçekleştiği saptanmıştır. ZhanBo ve diğ. [84], kuru elektro erozyon ile işlemede, talaş derinliği, gaz basıncı, vurum süresi, vurum ara süresi ve takım elektrotunun devir sayısı gibi parametreleri kullanarak, 3 boyutlu yüzeylerin işlenebilirlik fizibilitesini yapmışlardır. Çalışmada, maksimum talaş kaldırma oranı ve minimum elektrot aşınmasının, 25 µs vurum süresi, yüksek basınç ve talaş derinliği değerlerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca elektrot devir sayısının artmasıyla, takım aşınmasının da nispeten arttığına değinilmiştir.

2.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Zhang ve diğ. [85], bakır bir elektrot ile AISI 1045 çelik malzemeyi kuru elektro erozyon yöntemi ile işlemişler ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, voltaj, akım ve vurum sürelerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı tespit edilmiştir. Curodea ve diğ. [86], termo – plastik bir elektrot ile takım çeliği malzemesini kuru elektro erozyon yöntemi ile işlemişlerdir. Çalışmada, dielektrik olarak hava kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü 36 µm olarak ölçülmüştür.

2.2.3. Kuru Telli Erozyon Alanında Yapılan Çalışmalar

Bu yöntemle ilgili ilk çalışmalar Furudate ve Kunieda [87] tarafından yapılmıştır. Bu yöntemde, dielektrik ortamında kesme yapan klasik tel erozyon yöntemine nazaran daha hassas yüzeyler elde edilebilmektedir. İşlem aralığı ve tel titreşimleri bu yöntemde daha da azaltılabilmektedir. Yöntemde iş parçası yüzeyinde herhangi bir korozyon oluşmamaktadır. Wang ve Kunieda [88] bu yöntemin bir bitirme işlemi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak diğer bir çalışmada [89], bu yöntemdeki talaş kaldırma oranının klasik tel erozyona nazaran daha düşük olduğu ve işlenmiş yüzeylerde çizik şeklinde istenmeyen durumların oluştuğuna değinilmiştir. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için, kesme derinliğinin azaltılması ve tel izleme yolunun artırılması gerektiği tavsiye edilmiştir.

Kuru elektro erozyonla işleme yöntemi alanında yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, bu konuyla ilgili ilk çalışmanın 1991 yılında yapıldığı görülmektedir. Ancak 1997 yılında CIRP Annals’da yayımlanan “Electrical discharge machining in gas” başlıklı makale 18 atıf almıştır [90]. Bu yöntemin gelişimi ile ilgili özellikle Japonya ve Çin’de çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemin genel karakteristikleri Kunieda [91] tarafından aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- Bütün vurum sürelerinde bile takım aşınması hemen hemen ihmal edilebilecek düzeydedir.
- İşlemdeki talaş kaldırma kuvvetleri klasik EDM’den daha küçüktür.
- Farklı uygulamalar için, kullanılacak gazı değiştirmek mümkündür.
- Eriyerek katılaştıran tabaka kalınlığı daha az olduğundan, artık gerilmeler daha düşüktür.
- Çalışma aralığı, klasik EDM’den daha azdır.
- Yöntemde, sıvı tankı, reçine ve sirkülasyon sistemi gibi ekipmanlara ihtiyaç olmadığından, makine yapısı daha basittir.

2.3. Toz İlavesi Yapılarak Elektro Erozyonla İşleme Alanında Yapılan Çalışmalar

Elektro erozyon yönteminde, dielektrik sıvı içerisine abrasiv (aşındırıcı) tozlar katılmak suretiyle işlemin verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Toz katkılı EDM olarak da bilinen bu yöntemde, daha düşük enerji [92] kullanılarak, daha etkin işlem yapılabilir. Elektriksel olarak iletken olan tozlar, dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliğini azaltmakta ve iş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcımları arttırmaktadır. Bu şekilde, talaş kaldırma oranı ve yüzey kalitesi artmaktadır. Yöntemde kullanılan tozun cinsi, boyutları ve karışım oranına bağlı olarak, ayna yüzeye yakın yüzeyler elde edilebilmektedir.

2.3.1. Yüzey Kalitesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Wong ve diğ. [93] çalışmalarında, farklı tane boyutlarına sahip grafit, silikon, alüminyum, cam tozu, silikon karbür ve molibden sülfür tozlarını kullanarak elde edilen yüzeyleri karşılaştırmışlardır. Çalışmada, SKH – 51 ve SKH – 54 olmak üzere iki farklı iş parçası kullanılmıştır. Alüminyum tozların ilavesi ile yapılan deneylerde SKH – 51 malzemesinde ayna yüzeye yakın kalite elde edilmiştir. Dolayısıyla, kullanılan iş parçası ve toz cinsine göre yüzey kalitelerinin değiştiği ve uygun işleme şartlarının bu kriterlere göre belirlenmesi gerektiğine değinilmiştir. Yan ve diğ. [94], SKD – 61 malzemesi için, uygun tozların dielektrik sıvıya katılmasıyla yüzey sertliğinin ve korozyon direncinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Pecos ve Henriques [95], farklı yüzey alanlarına sahip elektrotlar kullanarak değişik işleme sürelerinde oluşan yüzeylerin kalitelerini incelemişlerdir. Çalışmada, dielektrik sıvıya 2 gr/l oranında silisyum tozu ilave edilmiştir. 64 cm² yüzey alanına sahip elektrot ile yapılan deneyde yüzey pürüzlülüğü 0.57 µm olarak ölçülürken, bu değer 1 cm² alanlı elektrot kullanıldığında 0.09 µm'a kadar düşürülmüştür.

2.3.2. Talaş Kaldırma Oranı Alanında Yapılan Çalışmalar

Jeswani [96] yapmış olduğu çalışmada, gazyağı sıvısına 4 gr/l oranında grafit tozu ilave ederek yaptığı elektro erozyon işleminde, talaş kaldırma oranının %60 ve takım aşınmasının %15 arttığını tespit etmiştir. Yan ve Chen [97] çalışmalarında, alüminyum tozlarının katılmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranının iyileştiğini belirtmişlerdir. Zhao ve diğ. [98] çalışmalarında, 10 µm tane boyutlu ve 40 gr/l oranında alüminyum tozları kullanarak yaptıkları deneylerde, talaş kaldırma oranını 2.06 mm³/dak' dan 3.4 mm³/dak' ya (%70) yükseltmişlerdir. Çalışmada ayrıca uygun akım ve vurum sürelerinin seçilmesiyle işlem verimliliğinin daha da arttırılabileceğine değinilmiştir. Tzeng ve Lee [99], 70 – 80 nm boyutlarında krom ilaveli dielektriklerle yapılan elektro erozyon deneylerinde talaş kaldırma oranının oldukça arttığını tespit etmişlerdir. Kansal ve diğ. [100] Taguchi yöntemi ile bir deneysel çalışma yaparak, uygun miktarda grafit tozlarının kullanılmasıyla talaş kaldırma oranının arttığını ve yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınmasının azaldığı tespit etmişlerdir.

2.3.3. Artık Tabaka Kalınlığı ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Klocke ve diğ. [101] tarafından yapılan bir çalışmada, Inconel 718 nikel alaşımının işlenmesinde toz partikül ilavesinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, 2 ve 10 gr/l olmak üzere iki farklı karışım oranlarında alüminyum ve silisyum tozları kullanılmıştır. Sonuç olarak, en düşük beyaz tabaka kalınlığı ve en yüksek talaş kaldırma oranının alüminyum tozları ile yapılan deneylerde elde edildiğine değinilmiştir. Wu ve diğ.

[102], toz ilavesi kullanmadan saf dielektrik ortamında yaptıkları deneylerde, yüzeyde 5 – 8 µm kalınlığında bir artık tabakanın oluştuğunu, ancak dielektrik sıvısına alüminyum tozlarının katılmasıyla bu değerin 1 – 2 µm'a kadar düştüğünü tespit etmişlerdir. Sharif ve diğ. [103], dielektrik sıvısına SiC tozu ilave ederek Ti – 6246 alaşımını elektro erozyon yöntemi ile işlemişlerdir. Çalışmada, akım, voltaj ve vurum süresi parametreleri değişken olarak alınırken, talaş kaldırma oranı, elektrot aşınması ve artık tabaka kalınlığı ise incelenen performanslar olarak değerlendirilmiştir. İşleme parametreleri ve performanslar arasındaki ilişki, yanıt yüzey metodu yöntemi ile modellenmiş ve her bir performans için ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Beyaz tabaka kalınlığı üzerinde en etkin parametrenin SiC karışım oranı olduğu tespit edilmiştir.

Toz ilavesi yapılarak yapılan elektro erozyon işlemleri alanında yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, yöntemin ilk olarak 1981 yılında uygulamaya başlandığı görülmektedir. Daha sonra, farklı malzemeler için, farklı tane boyutu ve karışım oranlarında ilaveler yapılarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmaların tamamında, dielektrik sıvısına toz partiküllerin ilave edilmesiyle, işleme verimliliğinin arttığı tespit edilmiştir.

2.4. Elektro Erozyon ile İşlemede Modelleme Alanında Yapılan Çalışmalar

Elektro erozyon yönteminde, işlemin verimliliğini etkileyen birçok faktör vardır. Yöntemde, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı gibi performansları ölçmek için, boyutsal analiz, yapay sinir ağları ve termal modelleme gibi farklı modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar, aşağıda özetlenmiştir.

Yahya ve Manning [104] çalışmalarında, vurum süresi, aralık voltajı, boşalım frekansı, aralık akımı ve malzeme özellikleri gibi parametreleri değiştirerek, talaş kaldırma oranı için boyutsal analiz yöntemi ile bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, deneysel değerler ile geliştirilen model arasında hata oranının oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. K.M. Tsai ve P.J.Wang [105,106] yaptıkları çalışmalarda, tepe akımı, vurum süresi, polarite ve malzeme özellikleri gibi parametreleri kullanarak deneysel tasarım yöntemine göre, yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, ve elektrot aşınma miktarı için yarı ampirik bağıntılar elde etmişlerdir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğü modeli için, deneysel değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki ortalama hatanın %10'dan, talaş kaldırma oranı için ise %20'den daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Gopal ve Rajurkar [107], yapay sinir ağları yöntemi ile elektro erozyon yöntemini modellemişlerdir. Çalışmada, işleme derinliği, takım elektrotunun yarıçapı, çevresel yarıçap, eksensel ilerleme, ofset derinliği, vurum süresi, vurum ara süresi ve akım parametreleri, giriş nöronları olarak kullanılmıştır. 9 – 9 – 2 yapısında geriye yayılmalı bir yapay sinir ağ modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak,

yapay sinir ağı modelinin hızlı ve yüksek doğrulukta (minimum hata oranında) tahmin sağladığı belirtilmiştir. Tsai ve Wang [108] çalışmalarında, talaş kaldırma oranını tahmin etmek için altı farklı yapay sinir ağı modeli ve nöro – fuzzy modellerini kullanmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmada, nöro – fuzzy modelinin %16.33 hata ile daha düşük hata oranında tahminler verdiği tespit edilmiştir. Wang ve diğ. [109] çalışmalarında, elektro erozyon yönteminin modellenmesi ve optimizasyonu için yapay sinir ağları ve genetik algoritma yöntemlerini birleştirmişlerdir. Modelde, talaş kaldırma oranı için hata oranı %5.6 ve yüzey pürüzlülüğü için %4.98 olarak tespit edilmiştir. Panda ve Bhoi [110], talaş kaldırma oranını tahmin etmek için ileri beslemeli bir yapay sinir ağı modeli kullanmışlardır. Çalışmada, kullanılan modelin, elektro erozyon yöntemi için oldukça uygun olduğuna değinilmiştir. Petropoulos ve diğ. [111] çalışmalarında, işleme parametreleri ile yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi kurmak için basit ve çoklu regresyon modelleri geliştirmişlerdir. Puri ve Bhattacharya [112], yanıt yüzey metodu yöntemini kullanarak beyaz tabaka kalınlığını modellemişlerdir. Çalışmada, farklı parametreler denenmiş ve optimum kesme hızı 3 mm/dak olarak belirlenmiştir.

Elektro erozyon yönteminin modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, işlemin karmaşıklığını azaltmakta ve performansların ölçülmesi için daha basit ve anlaşılır yaklaşımlar kazandırmaktadır.

2.5. Elektro Erozyon Alanında Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Elektro erozyon alanında son yıllarda yapılan çalışmalar, bu yöntemin oldukça fazla gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu yöntemin karmaşık şekilleri ve sert malzemeleri işleyebilme yeteneği, yöntemi seçkin bir noktaya taşımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı yöntem, sanayideki uygulamalara büyük katkı sağlamaktadır. Yöntemde, yukarıdaki başlıklar altında değerlendirilen çalışmalar dikkate alındığında farklı alanlarda birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bütün bu çalışmalarda esas amaç, işlem hasarlarını ve kayıpları en aza indirgeyerek, işleme hızı ve işlenen yüzey kalitesini arttırmaktır [113]. Ancak, literatürde yüzey yapısı ile ilgili yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, elektro erozyon yöntemi ile işlenen yüzeylere ikinci bir bitirme işleminin yapılması gerektiği belirtilmektedir. Bu işlemlerden bir tanesi de elektro kimyasal işleme yöntemi (ECM)'dir. Bu yöntemle ilgili yapılan çalışmalar, elektro erozyon yöntemine nazaran oldukça sınırlıdır. Yöntemin tanımı, işleme parametreleri ve kullanım alanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

2.6. Elektro Kimyasal İşleme Yöntemi

Elektro - kimyasal işleme yöntemi (ECM), ilk olarak 1929 yılında Gussell tarafından tanıtılmış ve elektro - kimyasal delme, taşlama ve parlatma şeklinde gelişerek günümüze kadar gelmiştir [114]. Kısaca anodik aşındırma tekniği olarak bilinen elektro - kimyasal işleme yöntemi, anodik kutuptaki işlenecek parçanın yüzeyinden metal atomlarının katodik kutuptaki takım üzerinden geçirilen doğru akım yardımıyla parçalanarak iyon forma dönüştürülmesi ve bu iyonların elektrolit olarak adlandırılan sıvı yardımıyla metal iyonu şeklinde işleme bölgesinden uzaklaştırılması şeklinde tanımlanmaktadır. İşlenmesi, diğer imalat yöntemlerine göre zor olan sert ve karmaşık geometriye sahip parçaların iletken olmak koşuluyla rahatlıkla işlenebilmesi mümkündür [115,116]. Yöntemde işleme performansını etkileyen en etkin parametreler, işlem voltajı, elektrolit tipi ve konsantrasyonu, ilerleme miktarı ve kullanılan enerji yoğunluğu olarak bilinmektedir [117,118]. Elektrolit olarak genellikle NaNO_3 , NaCl ve NaClO_3 sulu çözeltileri kullanılmaktadır [119,120]. İşlem anında artık gerilme olmadığından dolayı, diğer yöntemlere kıyasla malzemede ısıdan etkilenen bölge oluşmamakta ve takım aşınması gerçekleşmemektedir. Bu avantajlarından dolayı yöntem, motor enjeksiyon sistemleri, türbin pervaneleri, kalıplar, silah sanayisi, cerrahi enjektör yapımı vb uygulamalarda kullanım alanı bulmuştur [121].

3. TİTANYUM ALAŞIMLARI ve TALAŞLI İŞLENEBİLİRLİKLERİ

Mikroyapılarına bağlı olarak titanyum alaşımları; alaşımsız, α , $\alpha+\beta$ ve metastabil β alaşımları olarak sınıflandırılır. Bu tanımlar işlem sonrası genel mikroyapıyı ifade etmektedir. Bir α alaşımı, yalnızca çok az miktarda β -fazı içerebilir. Bir $\alpha+\beta$ alaşımı α ve dönüşmüş β 'dan meydana gelir. Metastabil bir β alaşımı ise oda sıcaklığına soğutulduğunda kalıntı β fazı oluşumuna yönlenecek, fakat ısıtma işlemle ince α fazı çökelecektir.

3.1. Saf Titanyum

Yaklaşık % 98-99.5 oranında Ti içeren alaşımsız ürünler, özellikle yüksek dayanımın gerekmediği uygulamalarda genellikle yüksek korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Bu malzemeler, aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirliklerinden dolayı kullanılırlar. Saf titanyum alaşımlarının akma dayanımları arayer ve empürte atomlarının oranına bağlı olarak 170-480 MPa arasında değişir. Tablo 3.1'de alaşımsız Ti'nin farklı arayer oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.1. Alaşımsız titanyumun farklı arayer oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri

Alaşım Tipi	% Bileşim									Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	N	C	H	Fe	O		
Tip 1	-	-	-	-	0.03	0.1	0.015	0.2	0.18	240	170
Tip 2	-	-	-	-	0.03	0.1	0.015	0.3	0.25	340	280
Tip 3	-	-	-	-	0.05	0.1	0.015	0.3	0.35	450	380
Tip 4	-	-	-	-	0.05	0.1	0.015	0.5	0.40	580	480
Tip 7	-	-	-	-	0.03	0.1	0.015	0.3	0.25	340	280
Tip 11	-	-	-	-	0.03	0.1	0.015	0.2	0.18	240	170
Tip 12	-	-	-	0.3	0.03	0.1	0.015	0.3	0.25	480	380

3. 2. α -Ti Alaşımları

Al, Sn ve Zr içeren α -Ti alaşımları, düşük (sıfırın altı) ve yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilirler. Yüksek sıcaklıklardaki sürünme dayanımı β -Ti alaşımlarından daha iyidir. α -Ti alaşımlarının sahip olduğu düşük arayer elementi içeriği kriyojenik (sıfırın altı) sıcaklıklarda süneklik ve tokluğu korur.

α alaşımları, çok iyi dayanım, tokluk ve kaynak edilebilirlik özelliği ile bilinirler. Fakat β alaşımlarından daha kötü işlenebilirliğe sahiptirler. Isıl işlemle sertleştirilemeyen α alaşımlarının temel mikroyapısal değişimi tane boyutunun değiştirilmesiyle mümkündür.

α alaşımlarının temel alaşım elementi Al'dur, fakat küçük miktarlarda β kararlı alaşım elementi içeren α alaşımları (Ti-8Al-Mo-1V veya Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo gibi) α -yakın alaşımları olarak da sınıflandırılmaktadır. Tablo 3.2'de α -Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri

ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.2. α -Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

Alaşım Tipi	% Bileşim					Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer		
Ti-0.3Mo-0.8Ni	-	-	-	0.3	0.8Ni	480	380
Ti-5Al-2.5Sn	5	2.5	-	-	-	790	760
Ti-5Al-2.5Sn-EU	5	2.5	-	-	-	690	620
Ti-8Al-1Mo-1V	8	-	-	1	1V	900	830
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	6	2	4	2	-	900	830
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	6	-	-	1	2Nb,1Ta	790	690
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo	2.25	11	5	1	0.2Si	1000	900
Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo	5	5	2	2	0.25Si	900	830

3. 3. α + β -Ti Alaşımları

α + β alaşımları, α ve β fazlarının karışımından oluşmaktadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında % 10-50 arasında β -fazı içerirler.

α + β alaşımları, ısıtma işlem ve yaşlandırma ile sertleştirilebilirler. Isıtma işlem, genellikle çift fazlı α + β bölgesinde yüksek bir sıcaklıktan su, yağ veya uygun bir soğutma ortamında soğutmayla yapılır. İşlem sıcaklığından hızlı soğutmayla β fazı yapıda dönüşmeden kalabilir veya kısmen martenzite dönüşebilir. Isıtma işlemi, α fazını çöktürmek ve korunmuş veya kısmen dönüşmüş β fazında ince bir α mikroyapısı oluşturmak için 480-600 °C'ler arasında yaşlandırma işlemi takip eder. Isıtma işlem ve yaşlandırma işlemi sonucunda α + β alaşımlarının dayanımı % 30-50 arasında artabilir. Alaşımın ısıtma işlemi ve yaşlandırmaya cevap vermesi soğutma hızının bir fonksiyonu olarak parça kalınlığına bağlıdır. Ti-6Al-4V alaşımı için 25 mm'den daha kalın parçaların çok iyi derecede sertleştirilebilmesi için su ortamı yeterli değildir. α + β alaşımlarında β fazı oranı arttıkça sertleşebilirlik de artar. Tablo 3.3'de α + β alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 3.3. α + β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

Alaşım Tipi	% Bileşim					Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer		
Ti-6Al-4V	6	-	-	-	4V	900	830
Ti-6Al-6V-2Sn	6	2	-	-	0.75Cu,6V	1030	970
Ti-8Mn	-	-	-	-	8Mn	860	760
Ti-7Al-4Mo	7	-	-	4	-	1030	970
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6	2	4	6	-	1170	1100
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	5	2	2	4	4Cr	1125	1055
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr	5.7	2	2	2	2Cr,0.25Si	1030	970
Ti-3Al-2.5V	3	-	-	-	2.5V	620	520
Ti 1100	6	4	4	0.4	0.45Si	1000	900
Ti-5Al-5Mo-1.5 Cr	4.5	-	-	5	1.5Cr	900	830

Çift fazlı Ti alaşımlarının fonksiyonel karakteristiklerini belirlemede başlıca faktör, ısıtım işlem esnasında meydana gelen difüzyonlu ve difüzyonsuz dönüşümlerdir. Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri, hem uzay hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılması açısından büyük öneme sahiptir. Alaşımların mikroyapısı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve kırılma tokluğunu kontrol etmede önemli bir faktördür. Ti alaşımlarının özellikleri ısıtım işlem veya termomekanik işlemle geniş bir şekilde değişebilir. Örneğin tamamen lamelli bir yapı, yorulma çatlak direnci ve yüksek kırılma tokluğuyla tanımlanır.

3.4. β -Ti Alaşımları

β alaşımları, uygun bir soğuma hızıyla β fazının tamamen korunduğu ve β kararlı elementler açısından yeterli derecede zengin alaşımlardır. Bu alaşımlar metastabildir ve metastabil β 'da α 'nın çökmesi alaşımların mukavemetini artırmak için kullanılan bir yöntemdir.

β alaşımlarının sahip olduğu kırılma tokluğu karakteristiği, son yıllarda, uzay araçlarında kullanılması açısından önemini artırmıştır. Ayrıca Mo içeriğine sahip bazı β alaşımları iyi korozyon karakteristiğine de sahiptir.

Metastabil β alaşımları aynı zamanda;

- $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha iyi oda sıcaklığında şekillendirilebilirlik karakteristiği,
- Akma dayanımının kriter olarak alındığı sıcaklıklarda $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha yüksek dayanım,
- Kalın kesitli parçalarda ısıtım işlemi $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha iyi cevap vermesi,

gibi özelliklere sahiptir. Tablo 3.4'de β alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri görülmektedir [122].

Tablo 3.4. β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri

Alaşımların Tipi	% Bileşim					Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer		
Ti-10V-2Fe-3Al	3	-	-	-	10V	1170	1100
Ti-13V-11Cr-3Al	3	-	-	-	11Cr,13V	1170	1100
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	3	-	-	8	8V	1170	1100
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	3	-	4	4	6Cr,8V	900	830
Ti-11Mo-6Zr-4.5Sn	-	4.5	6	11.5	-	690	620
Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr	3	3	-	-	15V,3Cr	790	775
Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si	3	-	-	15	2.7Nb,0.2Si	1100	1030

3.5. Titanyum Alaşımlarının Talaşlı İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, bir malzemenin herhangi bir yöntemle şekillendirilmesi esnasında

kullanılan kesici takımın ömrü, tüketilen enerji miktarı ve işlem sonrasında elde edilen yüzey özelliklerinin bir bütünü olarak değerlendirilmektedir. Bütün bu faktörler dikkate alındığında, titanyum ve alaşımları günümüz teknolojisinde işlenmesi zor malzeme grubu içerisinde yer almaktadır. İşlenebilirlik, işleme parametrelerinin mevcut şartlar altında uygun seçilmesiyle iyileştirilebilir. İşleme parametreleri, kesici takım, kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği ve ortam soğutucusu gibi parametrelerdir. Bu bölümde, mevcut literatür ışığında titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde önerilen işleme parametrelerine değinilecektir.

3.5.1. Kesici Takım Seçimi

Yeni kesici takım malzemelerinin bulunması ve takım kaplama teknolojisindeki gelişmeler, talaş kaldırma yöntemlerinin gelişiminde en önemli etkenlerden birisi olmuştur. Böylece talaş kaldırma yöntemlerinin daha ekonomik olması ve uygulandığı malzeme gruplarının artması sağlanmıştır. İşlenmesi zor olan malzemeler bile geliştirilen kesici takımlar ve kaplama teknolojilerindeki ilerlemeler ile günümüzde işlenebilir duruma gelmişlerdir. Kaplamalı sert metal, seramik, kübik bor nitrür (CBN) ve çok kristalli elmas (PCD) gibi takım malzemelerinin kullanımı, son yıllarda yaygın hale gelmiştir.

Kesici takımlardaki bu gelişmeler, titanyum ve alaşımlarının talaşlı şekillendirilmesinde çok büyük değişimlere yol açamamıştır. Bunun temel nedeni, bu malzemelerin talaş kaldırma işlemi sırasında, kullanılan kesici takım malzemesinden beklenen özelliklerin farklılığıdır. Tablo 3.5’ de malzeme özelliklerinin kesici takıma etkisi görülmektedir. Dolayısıyla kesici takımların iyi bir kesme yapabilmesi için, şu özelliklere sahip olmaları gerekir [123 – 126]:

- İşleme esnasında meydana gelen ve uzaklaşmayan yüksek ısıya direnç gösterebilmesi için, yüksek sıcaklıklarda sertliğini sürekli koruyabilmelidir,
- Isı malzemedan uzaklaşmadığı için, kesici takımın ısı iletkenliği yüksek olmalıdır,
- Kesici takım, işlenen malzeme ile daha az kimyasal tepkimelere girmeli ve iyi bir kimyasal kararlılık özelliği olmalıdır,
- Kesme esnasında oluşan kuvvetlerin dar bir alana yayılması ve tırlama olasılığı nedeniyle kesici ucun zayıflaması durumlarına karşı, kesici takımın tokluk ve kırılma direnci yüksek olmalıdır,
- Talaş kalınlığının küçük olması nedeniyle daha rahat talaş kaldırabilmek için, kesici takımın uç keskinliği yüksek olmalıdır,
- Kesici takımın, yüksek basınç, çekme ve kayma dayanımı gibi özellikleri belirli bir değere sahip olmalıdır.

Tablo 3.5. Titanyumun bazı karakteristikleri ve kesici takıma etkisi [127].

Malzeme Karakteristikleri	Kesici Takıma Etkisi
Mukavemetin yüksek sıcaklıklarda korunması	Yüksek kuvvet ve ısıların oluşması
Dar talaş – takım temas alanı	Kesme kuvvetinin ve ısının yoğunlaşması
Isıl iletkenliğin düşüklüğü	Isının sıkışıp yükselmesi
Periyodik talaş oluşumu ve düşük elastisiteden kaynaklanan değişken kuvvetler	Titreşim ve tırlama
Kimyasal reaktivliğin yüksek olması	Özellikle krater aşınması olmak üzere kimyasal tabanlı aşınmalar

Titanyum alaşımlarının frezeleme, delme, tornalama, broslama, planyalama gibi geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesinde genellikle saf tungsten karbür (WC/Co) kesici takım kullanılmaktadır. Bu kesici takımın, kimyasal bileşimi işleme şartlarına bağlı olarak farklı oranlarda değiştirilebilmektedir. Ayrıca bu takımlar kendi aralarında birçok sınıfa ayrılmakta ve genellikle K serisi olarak tanınmaktadırlar. Tungsten karbür takımlarda Co içeriği, birçok araştırmacı tarafından farklı oranlarda katılarak işlenebilirliğin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Ayrıca bu takımlardaki tane boyutu da sertlik ve mekanik özellikleri etkilemektedir. Aucode, Ti6Al4V alaşımının tornalanmasında %6 Co içerikli ve orta taneli (0.8 ila 1.4 μm) WC/Co takımların oldukça yüksek performans gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca başka bir çalışmada bu tür karbür kesici takımlara klor veya indiyum ilavesinin etkili bir kesme yapabileceği tavsiye edilmiştir [124].

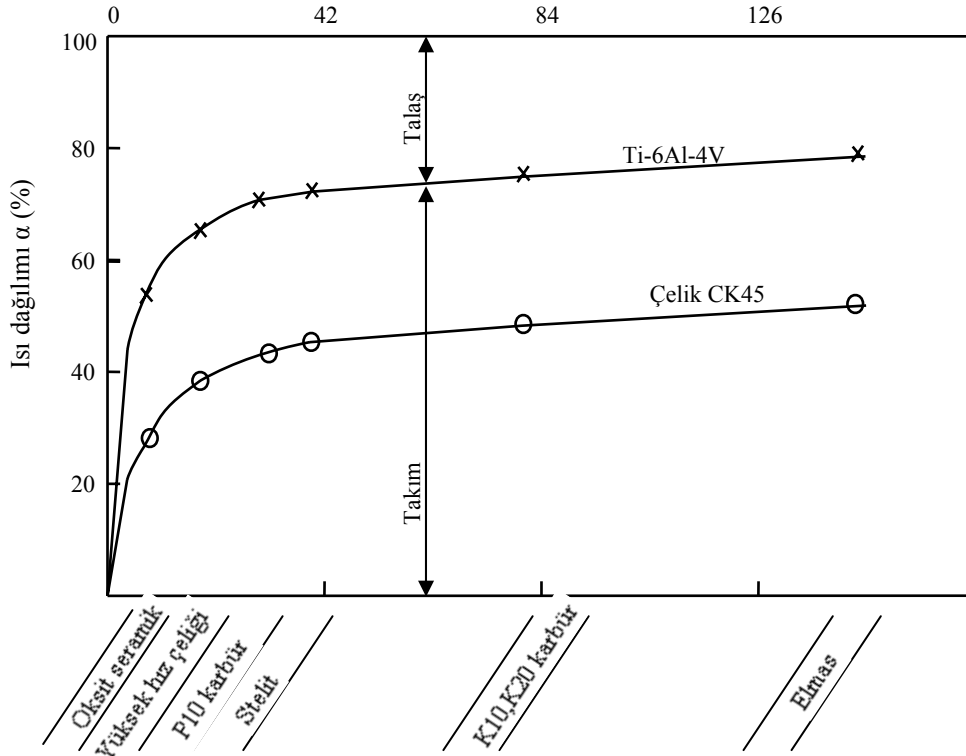
P sınıfı kesici takımlar ise termal özelliklerinden dolayı aşınma dirençleri az olan takımlardır. Bu sınıf takımların mukavemetini arttırmak için genellikle TiC, TiCN, TiN – TiC, Al_2O_3 – TiC, TiN – Ti (C,N) – TiC, Al_2O_3 ve TiB_2 kaplamaları yapılmaktadır. Ancak bu sınıf takımlar kaplamalı da olsa benzer özellikler göstermektedirler ve bundan dolayı titanyum alaşımlarının talaşlı işlenmesinde genel olarak kullanılmazlar.

Seramik takımların kullanılması gün geçtikçe artmaktadır. Bununla birlikte bu takımların ısıl iletkenlik değerlerinin düşük olması kesici takımda sıcaklığın artmasına neden olmakta ve takımın aşınmasını hızlandırmaktadır. Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi seramik takımlarla yapılan işlemlerde meydana gelen ısının büyük bir kısmı takıma aktarılmaktadır. Bu durumsa ısı, takımdan da uzaklaşmayacak ve özellikle ısıl tabanlı aşınma mekanizmaları hızlanacaktır. Ayrıca bu takımların kırılma tokluğunun düşük olması ve işlenen titanyum alaşımı ile kimyasal reaksiyona girmesi diğer önemli faktörlerdir.

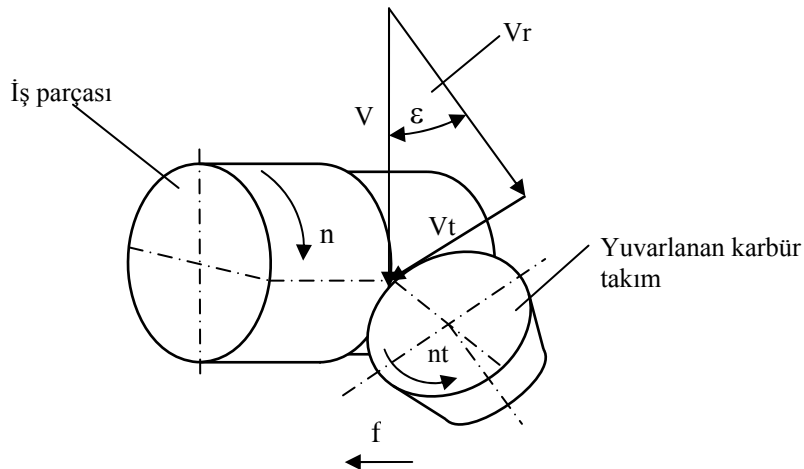
Kübik bor nitrür (CBN) ve çok kristalli elmas gibi süper sert kesici takım malzemeleri, titanyumların işlenmesinde takım aşınmasında iyi performans göstermektedirler. Ancak, yüksek fiyatları nedeniyle uygulamaları sınırlı kalmaktadır.

Titanyumun işlenmesinde Şekil 3.2’ de gösterilen dönel kesici takımlar da kullanılmaktadır. Yuvarlak bir ucun kendi eksenine etrafında döndürülmesi ile kesme bölgesinde

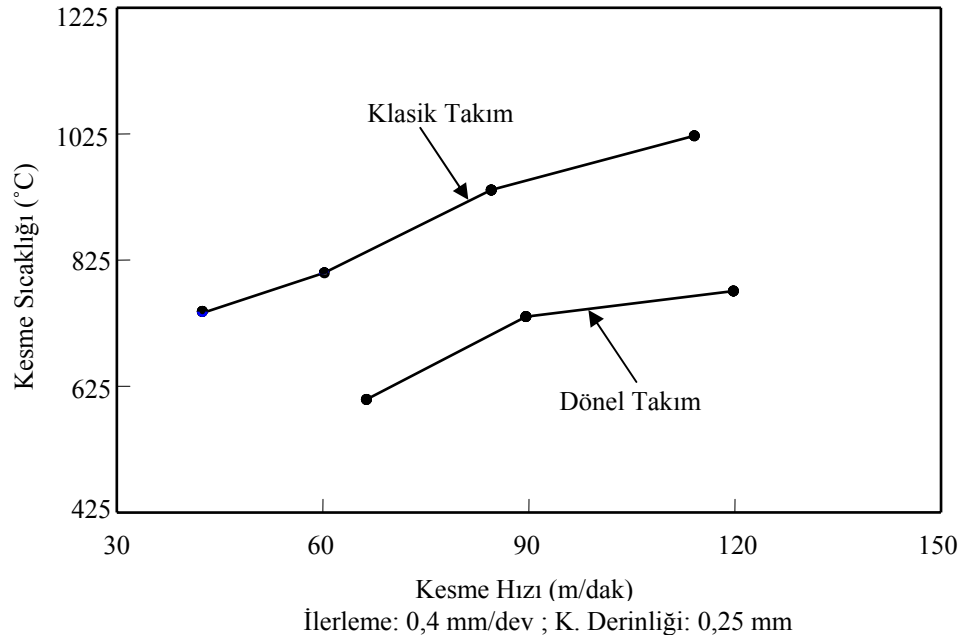
0	42	84	126
---	----	----	-----



Şekil 3.1 Ti6Al4V alaşımı ve CK45 çelik için farklı takımlarla yapılan işlemlerde ortaya çıkan ısıнын takıma ve talaşa dağılım oranı [124].



Şekil 3.2 Dönel kesici takım [128].



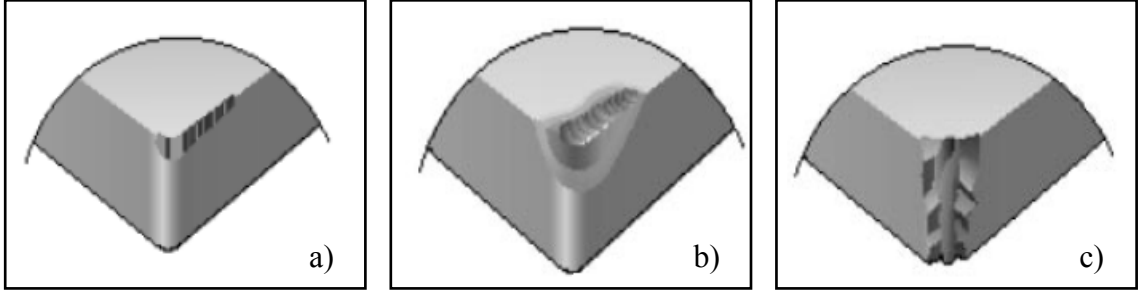
Şekil 3.3 Kesme hızı – sıcaklık grafiği [124].

Yapılan deneylerde elde edilen serbest yüzey aşınması değerlerine göre, örneğin 360 m/dak'lık kesme hızında, 0.2 mm'lik bir aşınma klasik takımında 0.8 dakikada meydana gelirken, dönel takımında bu süre 33 dakika olmaktadır. Kesme sıcaklığındaki düşüş sayesinde, baskın olan ısı tabanlı aşınma mekanizmaları da etkisini yitirmekte ve takım ömrü ortalama 40 kat artmaktadır. Takım ömrü arttığı için kesme hızının geleneksel işlemeye göre çok daha yüksek değerlere çıkabilmesi ve verimliliğin artması mümkündür. Bu şekilde, çok sayıda uç yerine yalnızca bir ucun takılması ve toplam ayar zamanının büyük ölçüde azalması, sürekli olarak takım değiştirilmediği için kalite tutarlılığının olması dönel takımın başlıca avantajları olarak sayılabilir. Ancak, dönel takımlar, karmaşık iş parçaları için kullanılamayan, çok rijit sistemlere ihtiyaç duyan ve yuvarlak uç kullanıldığı için en yüksek talaş derinliği değerinin sınırlı olduğu takımlardır, bu nedenle yaygın olarak kullanılmazlar.

3.5.2. Kesici Takım Aşınma Mekanizmaları

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, kesici takım birçok termal ve mekanik etkiler altında kalmaktadır. Kesme noktasında meydana gelen yüksek kesme gerilmeleri ve sıcaklıklar, takım ömrü ve aşınma oranını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu malzemelerin işlenmesinde kesici takımında serbest yüzey aşınması, krater aşınması ve kırılma, en önemli aşınma tipleridir. Serbest yüzey aşınması, kesici takımın serbest yüzeyinin işlenen yüzeye sürtünmesi ile meydana gelmektedir. Krater aşınması, özellikle titanyumun tipik bir özelliği olan kimyasal reaktivite nedeniyle malzemenin yüksek gerilmeler altında takıma yapışması ve daha sonra kesici takımdan ayrılarak meydana getirdiği aşınma tipidir. Kırılma ise genellikle kırılma tokluğu

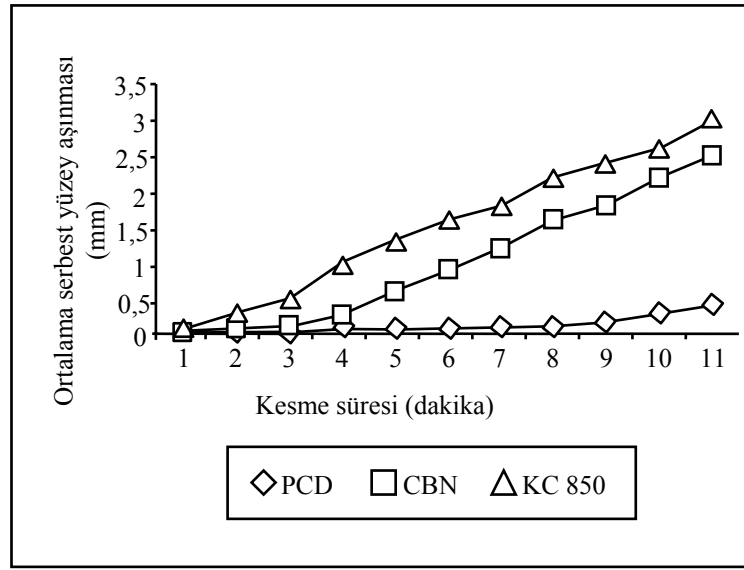
düşük olan takımlarda ve serbest yüzey aşınması ve krater aşınması ile desteksiz kalan takımlarda oluşan bir olaydır. Bu temel aşınma tipleri temsili olarak Şekil 3.4’ de gösterilmektedir.



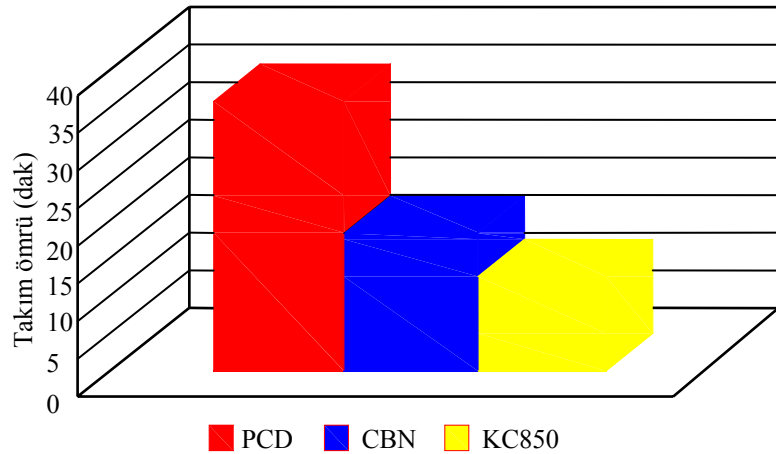
Şekil 3.4 Titanyum alaşımlarının işlenmesinde meydana gelen tipik aşınma çeşitleri : (a) Serbest yüzey aşınması, (b) Krater aşınması, (c) Kırılma[126].

Nabhani yapmış olduğu bir çalışmada [123], kaplamalı karbür, CBN ve PCD olmak üzere üç farklı kesici takım kullanarak Ti6Al4V alaşımını tornalamış ve işleme parametreleri ile takım aşınması arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada, takımlardaki ortalama serbest yüzey aşınması Şekil 3.5’ de görülmektedir. Aynı çalışmada elde edilen takım ömrü değerleri ise Şekil 3.6’ de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, en az aşınmanın ve en yüksek takım ömrünün PCD kesici takımda gerçekleştiği görülmektedir.

Nabhani diğer bir çalışmasında [35], kesici takımlarda meydana gelen krater aşınması mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için statik yapışma deneyi yapmıştır. Çalışmada, titanyum malzemeden bir koni, 115 N’ luk bir normal kuvvet ile aynı zamanda ısıtılarak 10 dak süresince takım üzerine bastırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.7’ de görülmektedir. Tüm kopmaların kesici takım malzemesi üzerinde gerçekleştiği ve en az aşınmanın PCD takımda meydana geldiği tespit edilmiştir. Çalışmada dikkati çeken bir husus, Şekil 3.7(b)’ de düşey profilde görüldüğü gibi kaplamalı karbürde kaplamanın tamamının kopmuş olmasıdır. Özellikle CVD yöntemle yapılan kaplamalarda, yapışma mekanizması daha etkili olmaktadır. Ayrıca, kopma mukavemetlerinin ve tokluklarının düşük olması nedeniyle, kaplamalı takımlar çoğu zaman tercih edilmezler.



Şekil 3.5 V_c : 75 m/dak, f : 0.25 mm/dev, a : 1mm değerleri ile yapılan deneyde kesici takımlardaki serbest yüzey aşınması [123].

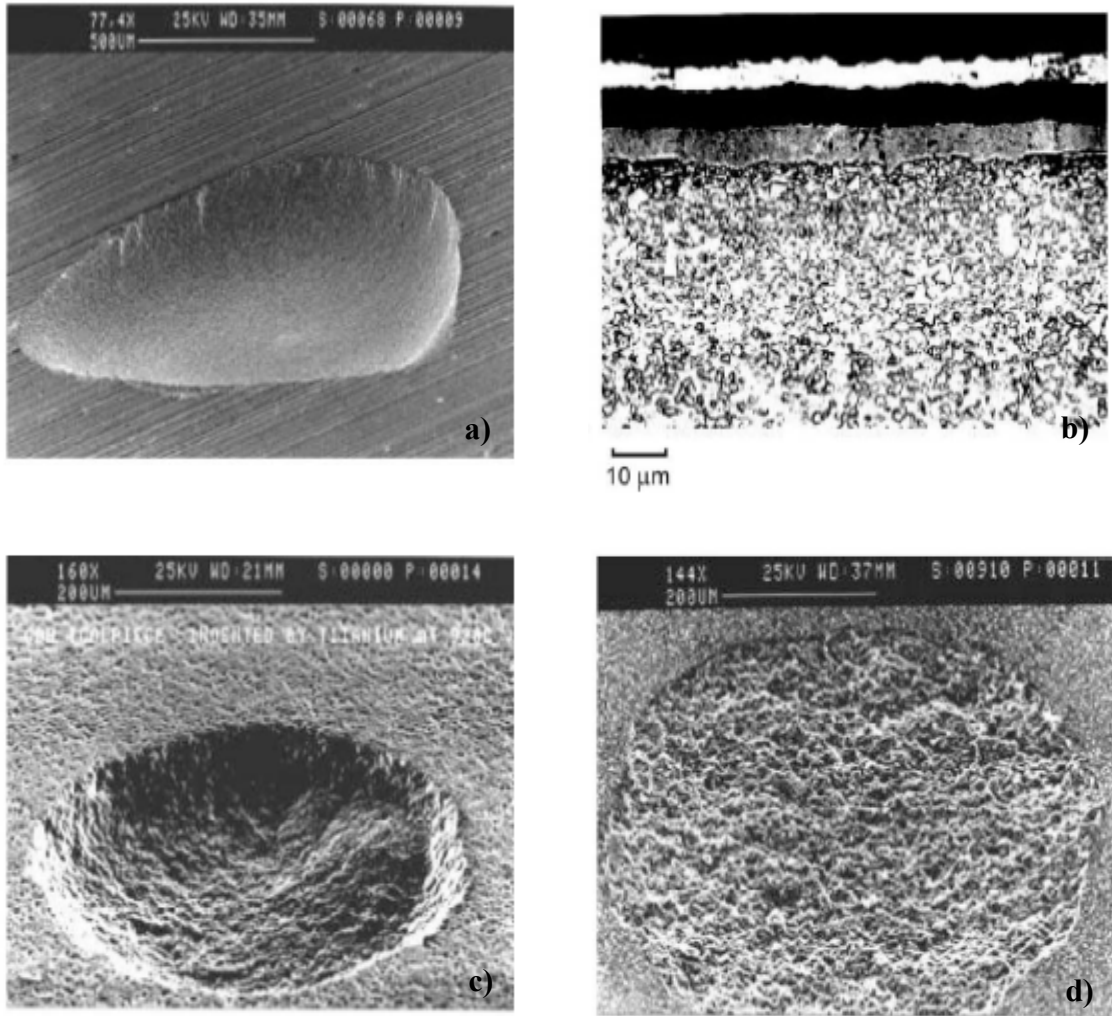


Şekil 3.6 V_c : 75 m/dak, f : 0.25 mm/dev, a : 1mm değerleri ile yapılan deneyde kesici takım ömürleri [123].

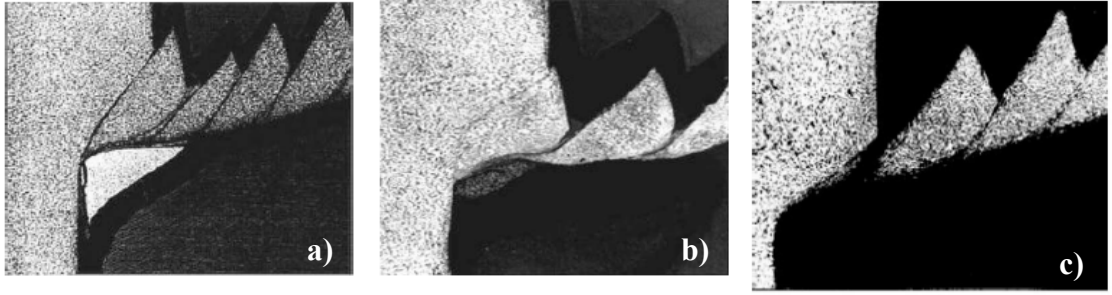
Krater aşınması üzerine yapılan başka bir çalışmada [123], ani durdurma deneyi kullanılmıştır. Bu deneyde kesme işlemi aniden durdurulmakta ve ardından talaş ile kesici takım incelenmektedir. Kaplamalı karbür, CBN ve PCD takımlarla yapılan ani durma deneyi sonucu elde edilen talaş ve talaşın altına yapışan takım parçalarına ait resimler Şekil 3.8’ de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kaplamalı karbürden diğer takımlara nazaran daha büyük bir parça kopmakta, CBN takımında parça büyüklüğü bir miktar daha küçülmekte ve PCD takımlarda en küçük boyuta ulaşmaktadır. Aynı deneyde ayrıca kesici takım incelenmiştir. Kesici takımlara ait resimler Şekil 3.8’ de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kaplamalı

karbür takımın üzerinde iş parçasından ayrılarak takıma yapışmış eriyikler, kalıntılar ve bu eriyiklerin koparılıp alınması ile akış yönüne paralel kanalların oluştuğu görülmektedir. Bu kanallar, daha büyük büyütmelerde incelendiğinde, kanalların pürüzsüz bir aşınma yüzeyine sahip oldukları görülmektedir. CBN ve özellikle PCD takımlarda ise aşınma önemli ölçüde azalmaktadır.

Hız çeliği kesici takımlar, 600 C°' de bile sertliklerini kaybetmeye başlarlar. Bu tip takımlar, sertlik kaybından dolayı plastik deformasyon gösterirler ve özellikle yüksek kesme hızlarında gerilme ve sıcaklık nedeniyle yüksek oranda aşınırlar. Titanyumun işlenmesi açısından takım malzemelerinin performansı Tablo 3.6' da özetlenmektedir.



Şekil 3.7 Statik yapışma deneyi sonucunda elde edilen yüzeyler: (a) Kaplamalı karbür, (b) Kaplamalı karbürün düşey aşınma profili, (c) CBN, (d) PCD [35].



Şekil 3.8 Ani durdurma deneyleri sonucu elde edilen talaş ve talaşın altına yapışan takım parçaları: (a) *Kaplamalı karbür*, (b) *CBN*, (c) *PCD (X 100)* [123].

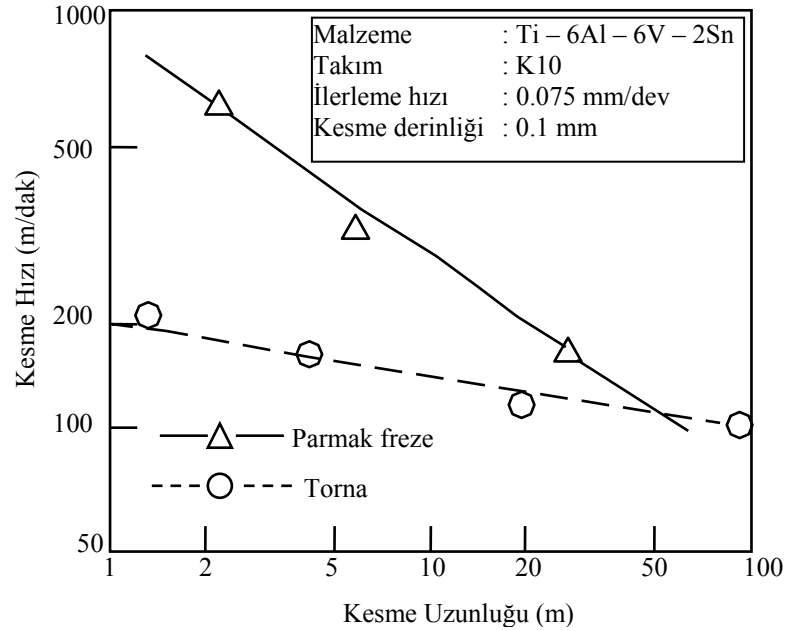
Tablo 3.6. Titanyumun işlenmesinde çeşitli kesici takımların performansı [127,129,130].

Kesici takım cinsi	Takımın performansı
Seramik takımlar	➤ Isıl iletkenlikleri düşüktür. Malzemeden uzaklaşamayan ısı, takımdan da uzaklaşamaz ve ısı tabanlı aşınma mekanizmaları önemli derecede etkili olur, ➤ Titanyum işlenirken, krater ve serbest yüzey aşınması ile oluşan kırılmanın, yüksek gerilmelerin ve değişken yüklerin gerektirdiği tokluk özelliği, seramiklerin en büyük eksikliğidir, ➤ Titanyumla tepkime eğilimleri oldukça yüksektir, ➤ Bu sebeplerden dolayı tavsiye edilmezler.
Hız çeliği takımlar	➤ Oluşan yüksek ısı ve gerilmeler sonucu, kısa sürede plastik deformasyona uğramakta ve ardından kırılmaktadırlar. ➤ Aralıklı kesme işlemleri dışında tavsiye edilmezler.
Kaplamalı karbür takımlar	➤ Özellikle CVD olmak üzere, yukarıdaki deney sonuçları da düşünüldüğünde tavsiye edilmezler. Kaplama kısa sürede kopmaktadır.
Kaplamasız karbür takımlar	➤ Kaplamalı olanlara nazaran daha iyi sonuç vermektedirler. Bunun sebebi, kaplamalı karbürlerde takım ana malzemesinin kaplama ile birlikte kopmasıdır. ➤ Karbür takımlar arasında, özellikle K sınıfı tungsten karbür takımlar, % 6 kobalt eklenmesi ile genel amaçlı talaş kaldırma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ➤ Sementit karbürler iyi sonuç vermemektedir.
CBN ve PCD takımlar	➤ Aşınmalara karşı çok iyi direnç göstermektedirler. Fakat pahalı olmaları kullanımlarını kısıtlamaktadır. Ancak, ince işlemlerde yüksek yüzey kalitesi ve uç değiştirme sıklığının azalmasının istendiği durumlarda tercih edilmektedirler.

3.5.3. Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi

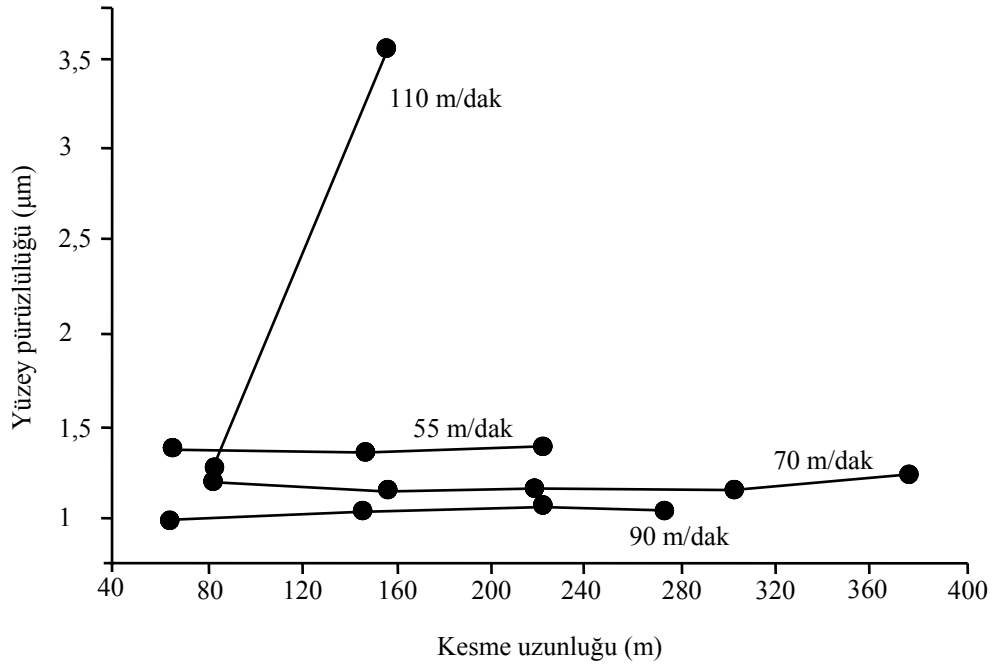
3.5.3.1. Kesme Hızı

İşlenebilirlik ve takım ömrü üzerinde en önemli parametre kesme hızıdır. Kesme hızının artması ile ara bölgede oluşan sıcaklık değerleri daha yüksek olmakta ve genellikle ısı tabanlı takım aşınmaları meydana gelmektedir. Oluşan bu yüksek sıcaklıklarda kesici takım mukavemetini yitirirken, iş parçası korumaktadır. Dolayısıyla yüzey kalitesi, belirli kesme hızı değerlerinin üzerinde takım aşınmasına da bağlı olarak azalmakta ve yüzeye yakın bölgelerde mikroyapı değişimleri ve sertlik artışı gibi problemler doğmaktadır. Bu yüzden, günümüz teknolojisinde titanyum alaşımları işlenirken, kesme hızı 90 – 100 m/dak ile sınırlıdır. Şekil 3.9’da kesme hızı ile takım ömrü arasındaki ilişki görülmektedir. Takım ömrü, yüksek kesme hızlarında oldukça azalmaktadır.



Şekil 3.9 Kesme hızı ile kesme uzunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik [131].

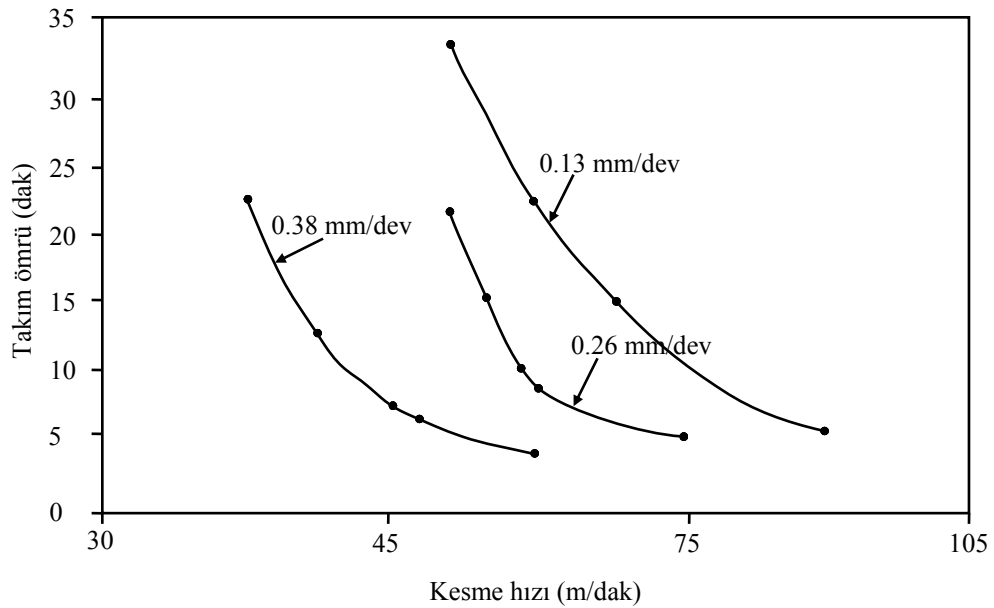
Ayrıca kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Şekil 3.10’da görülmektedir. Düşük kesme hızlarında, yüzey pürüzlülüğü azalmaktayken, kesme hızının fazla yüksek olduğu 110 m/dak değerinde takım aşınmasının da artmasıyla yüzey pürüzlülüğü ani bir artış göstermektedir. Dolayısıyla hem takım ömrü hem de yüzey pürüzlülüğü açısından optimum hızın 90 m/dak olduğu söylenebilir.



Şekil 3.10 Kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki [132].

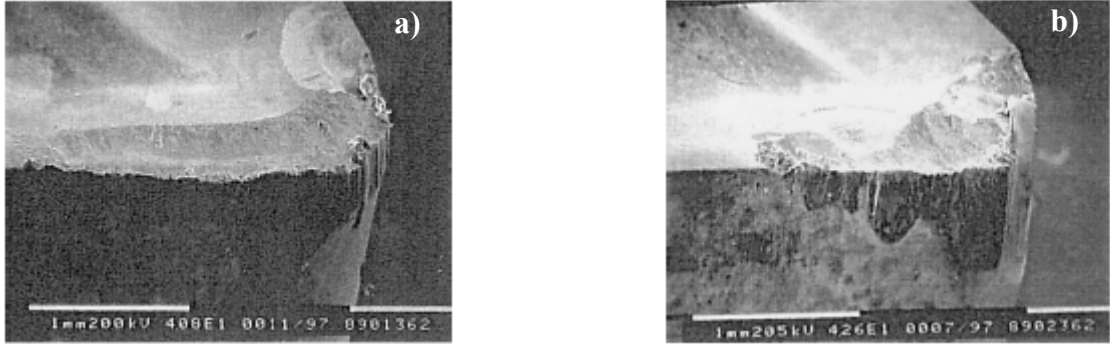
3.5.3.2. İlerleme Miktarı

Takım ömrü ve yüzey kalitesini etkileyen diğer bir parametre ise ilerleme miktarıdır. Bu etki, genellikle, takım – talaş temas alanının çok dar olması ve ilerleme miktarı arasındaki değişimin sonucunda kuvvet artışı şeklinde olmaktadır. Şekil 3.11’ de kesme hızına da bağlı olarak ilerleme miktarı ve takım ömrü arasındaki ilişki verilmiştir. Sabit kesme hızı değerlerinde (75 m/dak), ilerleme miktarının 0.13’ den 0.23’ çıkmasıyla takım ömrünün yarı yarıya azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.11 Kesme hızı – ilerleme – takım ömrü ilişkisi. (Ti6Al4V, takım: K20) [124].

Bir başka deneyde ise, aynı kesme hızında ilerleme miktarının azaltılmasıyla takımda meydana gelen aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 İlerlemenin takımdeki aşınmaya etkisi. (Takım: Tungsten karbür, a: 0.35 mm/dev, b: 0.25 mm/dev) [129].

3.5.3.3. Talaş Derinliği

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, talaş derinliği kesme hızından sonra en etkili etken olarak göze çarpmaktadır. Kesme derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Talaş derinliği, kaba işlemlerde 6 – 8 mm, ince işlemlerde ise 0.25 – 1 mm aralığında seçilmelidir. Takım ömrünü etkileyen en önemli etken olan sıcaklık, talaş derinliğinin artması ile çok yüksek değerlere çıkmaktadır.

3.5.3.4. Soğutma Sıvısının Kullanımı

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, kesici takım ucunda meydana gelen yüksek sıcaklık ve gerilmeler büyük problemler doğurmaktadır. Bu problemleri azaltmak için kesme sıvısının kullanılması işlenebilirliği kolaylaştırmaktadır. Kesme sıvılarının kullanımı soğutmayı sağlamanın yanı sıra, takım sıcaklığı ve kesme kuvvetlerini azaltmakta ve talaşın takıma kaynak olmasını engelleyerek takım ömrünü artırmaktadır. Sürekli ve bol debili bir soğutma sıvısının akışı, aynı zamanda daha iyi bir basınç sağlayarak talaş akışını kolaylaştırmakta ve sıcaklık etkilerini minimize ederek özellikle taşlama işlemlerinde talaş yanmalarını engellemektedir. Ayrıca soğutma sıvısının debisi, kırık ve daha kolay atılabilen talaş oluşumuna yardımcı olmaktadır. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde birçok farklı soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Gerekli soğutma ve kullanılan tezgaha en az korozyon tabanlı zararlar veren sıvılar tercih edilmelidir. Soğutma sıvılarının doğru seçimi, takım aşınması ve yüzey kalitesini de önemli derecede etkiler.

Titanyum alaşımlarının ve özellikle Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde yapılan birçok deneysel çalışma neticesinde Tablo 3.7’ de verilen işleme koşullarının uygulanması tavsiye edilmektedir.

Tablo 3.7. Ti – 6Al – 4V alaşımı için uygun işleme parametreleri [124].

İşlem	Takım malzemesi	Kesme hızı (inç/dak)	İlerleme (inç/devir)	Talaş derinliği (inç)
Tornalama (kaba)	C – 2	150	0.010	0.250
Tornalama (finiş)	C – 2	200	0.006 – 0.008	0.010 – 0.030
Tornalama (finiş)	C – 2	300	0.006 – 0.008	0.010 – 0.030
Frezeleme	M42 HSS	60	0.003 inç/diş	0.125
Frezeleme	C – 10	200	0.005 inç/diş	0.150 – 0.200
Delme	M42 HSS	30	0.005	
Delme	C – 2	40	0.004	
Raybalama	M42 HSS	20	0.010	
Raybalama	C – 2	35	0.010	
Kılavuz çekme	M7 HSS	15	-	
Broslama	M3 HSS	12	0.003 inç/diş max.	
Eğri yüzey işleme	M42 HSS	12	0.012	

3.5.4. Titanyum Alaşımlarının Klasik Yöntemlerle İşlenmesinde Elde Edilen Sonuçlar

İşlenmesi zor olan malzemeler sınıfında yer alan titanyum alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili koşullar ve parametreler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varılabilir [124-127]:

- Titanyum alaşımlarının işlenmesinde oldukça yüksek kesme sıcaklıkları meydana gelmektedir. Bunun temel nedeni, takım – talaş temas uzunluğunun kısa ve kesme bölgesinin dar olması, malzemenin düşük ısı iletkenliğine sahip olmasıdır.
- bu malzemelerin işlenmesinde, birçok kesici takım denense de genel amaçlı talaşlı imalat işlemlerinde K sınıfı tungsten karbür takımlar tavsiye edilmektedir.
- CBN ve PCD takımlar pahalı olsalar da yüksek yüzey kalitesi ve düşük aşınma değerleri verdiklerinden, bu takımlar da bir seçenek olarak düşünülmelidir.
- Kesme hızının artmasıyla yüzey kalitesi iyileşse de, kesme hızı belirli bir değeri aşmamalıdır.
- Kesme derinliği sıcaklığı, takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğü önemli derece etkilemektedir. Dolayısıyla küçük tutulmalıdır.
- Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, oluşan sıcaklıkların azaltılması için kesme sıvısı kullanılmalıdır.

Talaşlı işlenebilirlik parametreleri incelendiğinde titanyum alaşımlarının geleneksel yöntemlerle işlenmesinde birçok problemin doğduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin alışılmamış imalat yöntemlerinde işlenmesi tercihli hale gelmiştir.

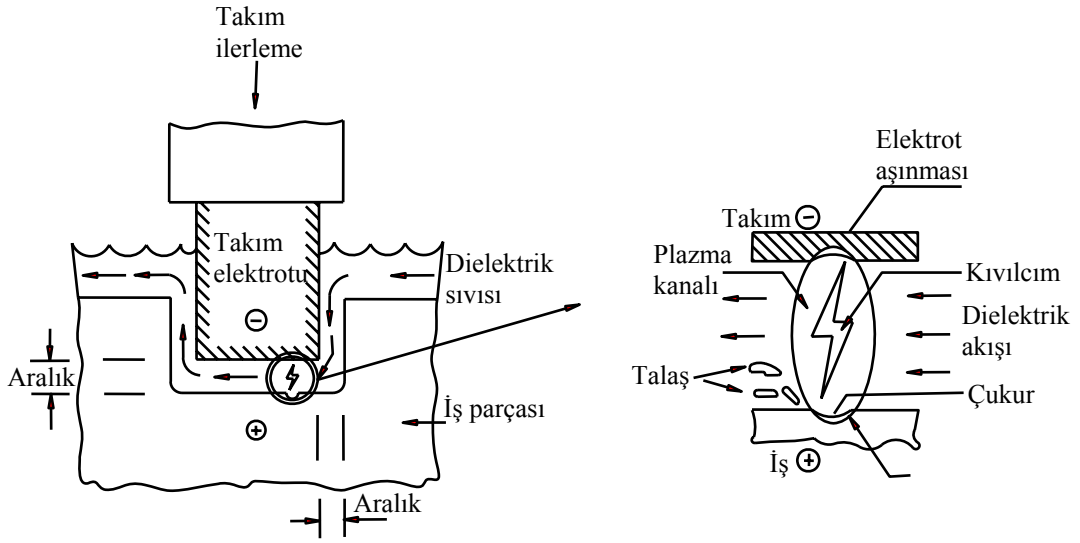
4. ELEKTRO EROZYON ve ELEKTROKİMYASAL TAŞLAMA YÖNTEMLERİ

4.1. Elektro Erozyon Yöntemi

4.1.1. Talaş Kaldırma Mekanizması

Elektrik ileten metallere gerilim uygulandığında, bu metaller elektrot ismini alırlar. Elektro erozyon işleminde, iki elektrot kullanılır. Bu elektrotlardan bir tanesi alet (tool), diğeri ise iş parçasıdır. Bu iki elektrot arası dielektrik sıvısı ile doludur (Şekil 4.1). Dielektrik sıvısı elektrik iletmeyen bir sıvıdır. Yöntemde elektrotlar arasına bir gerilim tatbik edilir ve takım iş parçasına özel bir servo mekanizma ile yaklaştırılır. Elektrot ile iş parçası arasında en yakın olan noktada dielektrik kırılır ve iyonlaşır. Buradan akım geçimi (ark – enerji boşalımı) başlar. Dielektrik basıncı arkı dar bir alana hapseder. Noktasal olarak yüksek bir akım geçimi (1 – 5 milyon Amper/cm²) ve iyon bombardımanı ile iş parçası ve elektrot üzerinde yüksek miktarda sıcaklık oluşur. Bu sıcaklık, bir kısım metalin buharlaşmasına, bir kısmının ise erimesine sebep olur. Elektronik anahtarlama ile akım kesilerek ark söndürülür. İyonlaşmış bölgeye hücum eden dielektrik sıvının erimiş metale temasıyla metalin bir kısmı tanecikler halinde koparak dielektrik sıvının içinde yüzmeye başlar. Böylece bir miktar talaş kaldırılmış ve en yakın iki nokta uzaklaşmış olur. Akımın verilip kesilmesiyle sürekli bir ark dizisi oluşturularak her defasında farklı bir nokta kopartılır ve elektrot malzemesinin şekli karşıya geçirilir. Bir süre sonra, mesafenin uzaklaşması yüzünden, ark atlayamaz olur. Bu durumda özel servo mekanizması elektrotu iş parçasına yaklaştırır, istenen derinliğe kadar daldırır ve istenirse geri çeker. Dielektrik sıvı, arkın oluşması ve dar alana hapsedilmesi için gerekli ortamı oluşturduğu gibi, koparılan taneciklerin ortamdan uzaklaştırılması ve açığa çıkan yüksek ısının azaltılmasını sağlar. Elektrotlara gerilim uygulandığı ve birbirlerine yaklaştırıldığında belirli bir mesafede kıvılcım atlaması olur. Elektrotların birbirlerine değmesi durumunda kısa devre gerçekleşir ve erozyon işlemi gerçekleşmez.

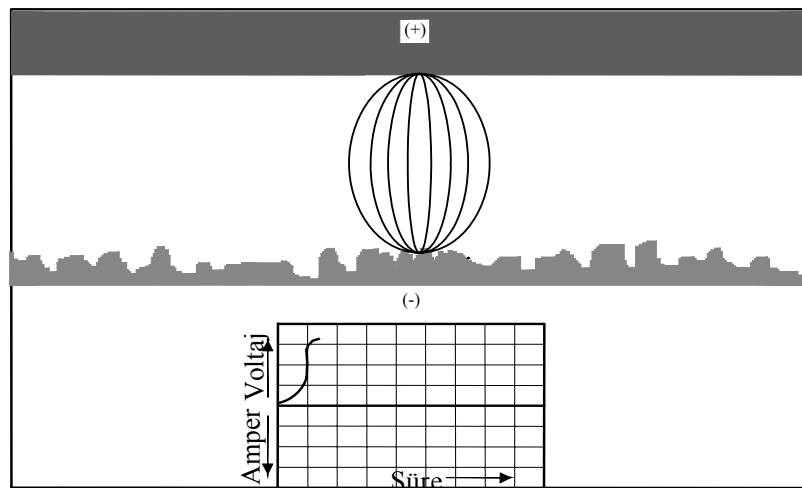
Şekil 4.1’ de yöntemde elektrot/iş parçası arasındaki etkileşim gösterilmektedir. Yöntemde talaş kaldırma sürecinde bir çevrimde meydana gelen olaylar aşağıda dokuz aşamada açıklanmıştır. Bu ardışık vuruş – vuruş bekleme düzeni bir EDM çevirimini temsil etmekte ve saniyede 250 000 defa tekrarlanmak suretiyle malzemeden talaş kaldırmaktadır. Şekildeki grafikler tanımlanan noktalarda izafi olarak akım ve voltaj değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.1 Elektro erozyon yönteminde talaş kaldırılması.

1. Aşama

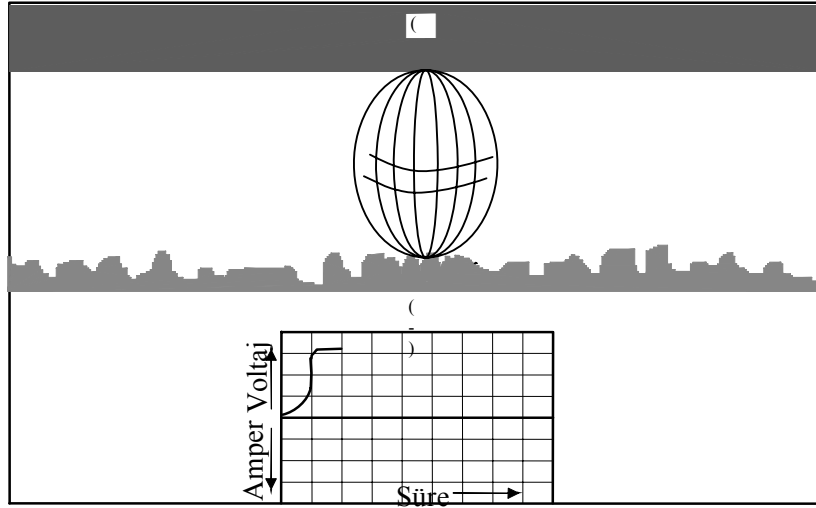
Elektrot ile iş parçası belirli bir mesafe ile birbirlerine yaklaştığında, dielektrik sıvı her ikisinin arasında yalıtkan görevi yaparak herhangi bir ark oluşumuna müsaade etmez. Ancak yeterli büyüklükte bir elektriksel potansiyel veya bir önceki çevrimden kalan metalik parçacıklar, sıvının yalıtkanlık özelliğini bozabilir. Şekilde görüldüğü gibi elektrot ve iş parçası arasındaki en yakın noktada elektriksel alan maksimum düzeydedir. Voltaj artmakta ancak akımın sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 Talaş Kaldırma Sürecinde 1. Aşama.

2. Aşama

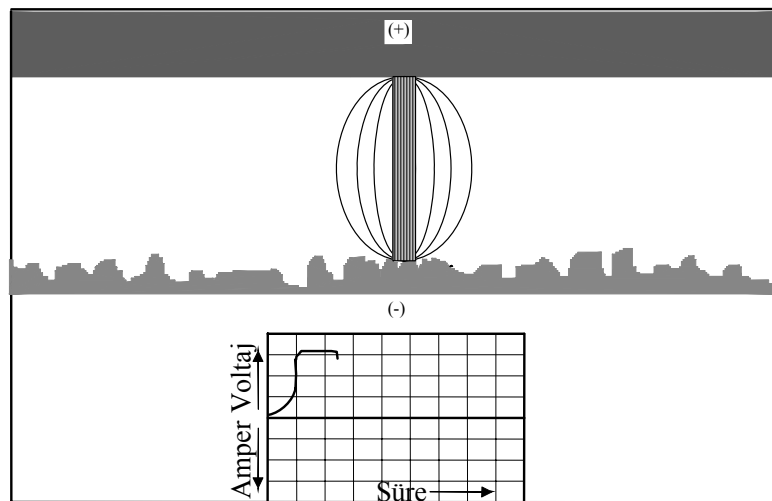
Şarj edilen atomların sayısı artarken, dielektrik sıvının izolasyon özelliği elektrik alanının en güçlü olduğu yerde dar bir kanal boyunca azalmaya başlar. Voltaj en yüksek düzeye ulaşır fakat akım hala sıfırdır.



Şekil 4. 3 Talaş Kaldırma Sürecinde 2. Aşama.

3. Aşama

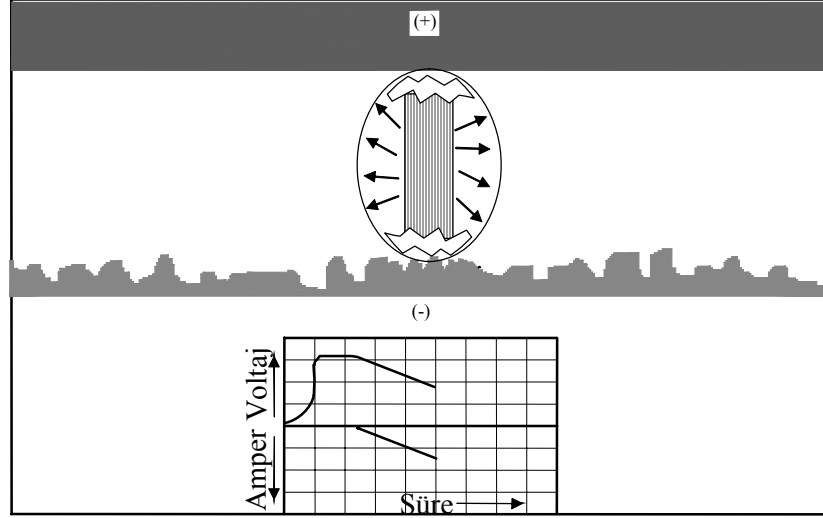
Akım sıvının yalıtkanlık özelliğini yok eder, kıvılcım çakar ve voltaj azalmaya başlar.



Şekil 4. 4 Talaş Kaldırma Sürecinde 3. Aşama.

4. Aşama

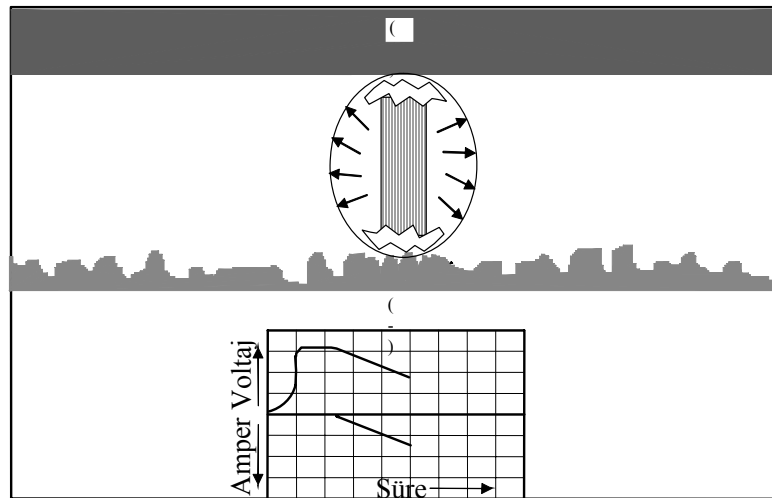
Akım artarken, hızlı bir ısı artışı meydana gelir ve voltaj düşmeye devam eder. Oluşan yüksek sıcaklık sıvının, iş parçasının ve elektrotun bir kısmını buharlaştırır. Elektrot ile iş parçası arasında bir boşalım kanalı oluşmaya başlar.



Şekil 4. 5 Talaş Kaldırma Sürecinde 4. Aşama.

5. Aşama

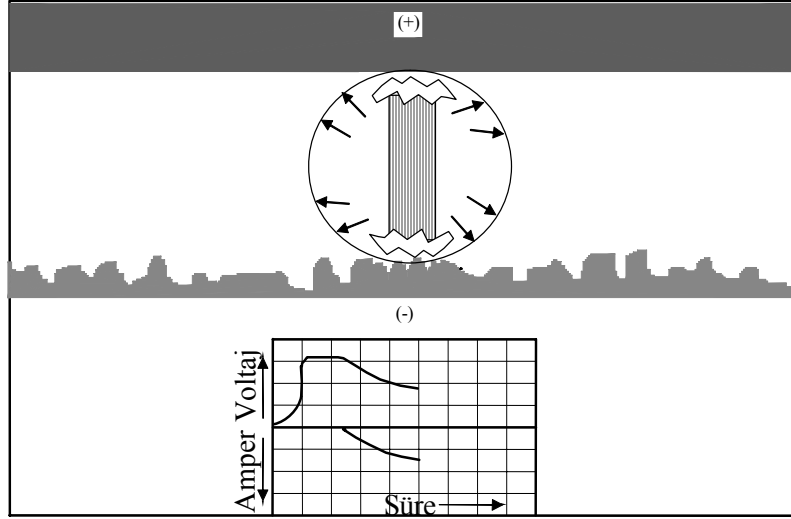
Akım boşalmasıyla oluşan sıcaklığın tesiri ile bir buhar balonu dışa doğru genişlemeye çalışır. Fakat dielektrik sıvısının baskısıyla ve boşalım kanalına doğru iyonların baskısıyla sınırlanır. Bu iyonlar, oluşan oldukça yoğun manyetik alan içerisine çekilirler. Akım yükselmeye devam eder voltaj ise düşer.



Şekil 4. 6 Talaş Kaldırma sürecinde 5. Aşama.

6. Aşama

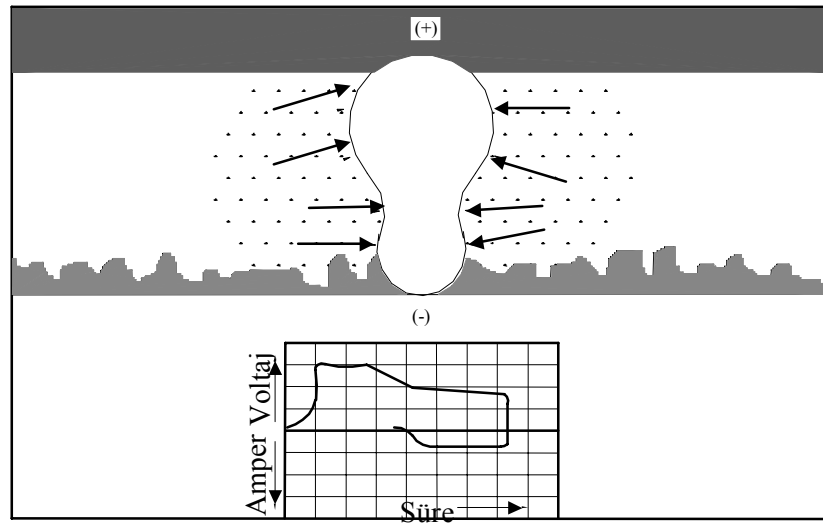
Vurum süresinin sonuna doğru akım ve voltaj dengelenir. Balonun içerisinde sıcaklık ve basınç maksimum düzeye ulaşır ve bir miktar metal kaldırılır. Metal, boşalım kanalı altında ergimiş haldedir ancak buhar balonunun tesiri ile yerinde tutulmaktadır. Boşalım kanalı bu aşamada yoğun bir akım ile buharlaşmış dielektrik sıvısı ve metalden oluşan yüksek sıcaklığa sahip plazmadan ibarettir.



Şekil 4. 7 Talaş Kaldırma Sürecinde 6. Aşama.

7. Aşama

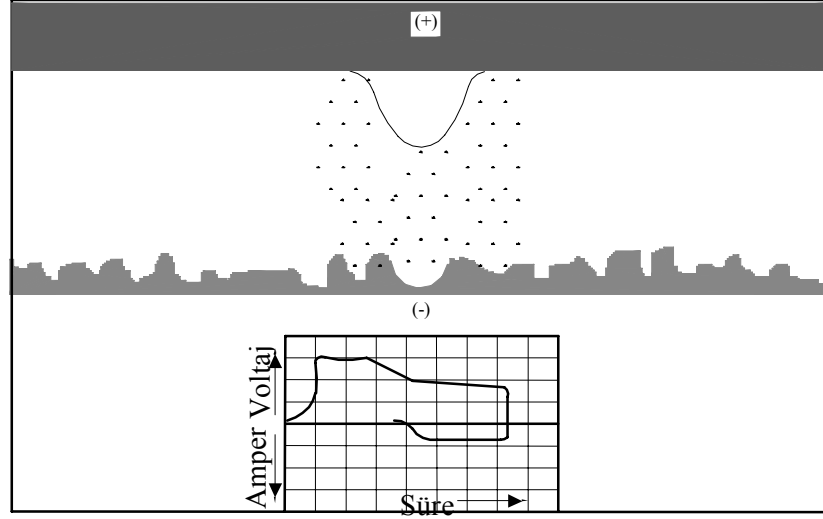
Vurum ara süresinin başlangıcında akım ve voltaj sıfıra düşer, buhar balonu söner ve iş parçasından ergimiş olan metal atılır.



Şekil 4. 8 Talaş Kaldırma Sürecinde 7. Aşama

8. Aşama

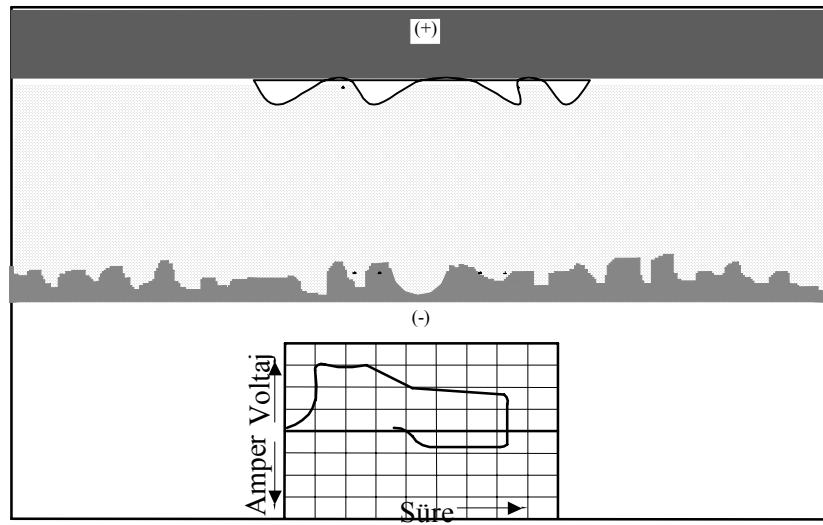
Dielektrik sıvı kıvılcım bölgesine hücum ederek iş parçasından ayrılan parçacığı, elektrotu ve iş parçasını soğutur.



Şekil 4. 9 Talaş Kaldırma Sürecinde 8. Aşama.

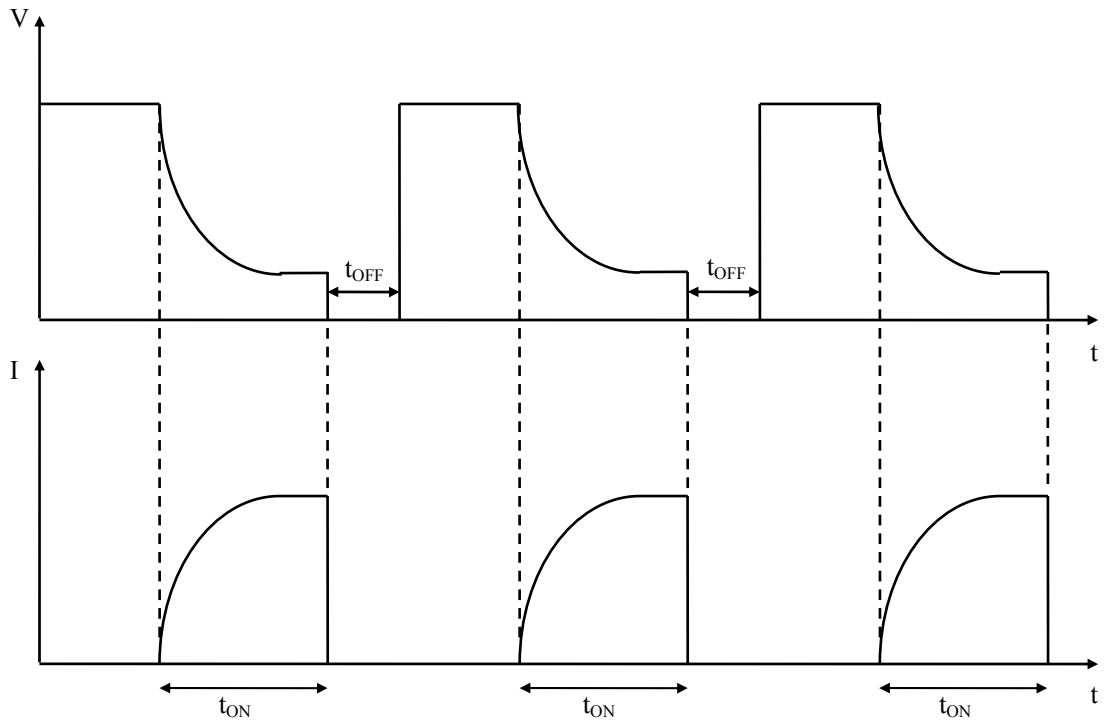
9. Aşama

İş parçasından ayrılan metal, dielektrik sıvı içerisinde küçük küreler şeklinde katılaşır. Bir miktar buhar yüzeye yükselir. Çevrimin sonunda, yeterli bir vurum ara süresi ile kalıntıların ara bölgeden uzaklaştırılması sağlanır. Böylece iş parçasında ve elektrotta hasara yol açabilecek arklar önlenmiş olur.



Şekil 4. 10 Talaş Kaldırma Sürecinde 9. Aşama.

Böylelikle bir çevrim sonunda birbirine en yakın olan iki nokta aşınmış olur. Elektrottaki aşınma, iş parçasına nazaran daha azdır. Aynı çevrimin yeni en yakın iki nokta arasında tekrarlanması suretiyle malzeme işlenmektedir. Elektrotlara uygulanan gerilim ve akım grafikleri Şekil 4.11’ de görüldüğü gibidir. t_{ON} , her bir kıvılcımın uygulanma süresini (vurum süresi), t_{OFF} süresi ise elektrotta ardı ardına uygulanan iki gerilim arasındaki süreyi (vurum aralığı veya bekleme süresi) göstermektedir [133].



Şekil 4.11 Elektro erozyon işleminde elektrotlara uygulanan gerilim ve akım dalga şekilleri.

4.1.2. Elektro Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri

Furkan M25A elektro erozyon tezgahına ait işleme parametreleri aşağıda ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

4.1.2.1. Tepe Akımı

Tepe akımı, kıvılcım boşalması sırasında meydana gelen akımın tepe değeridir. Yüzey kalitesi ve talaş kaldırma hızını etkileyen en önemli faktördür. Tepe akımı yükseldikçe, talaş kaldırma hızı ve yüzey pürüzlülük derecesi artar.

4.1.2.2. Ortalama Çalışma Akımı

Ortalama çalışma akımı, çalışma sırasında (kıvılcım boşalımları sırasında) meydana gelen akım darbelerinin ortalama değerine denir. Ortalama çalışma akımı, aralık mesafesi ve vurum ara sürelerinin artması ile azalmakta ve vurum süresi ve güç seviyesi ile artmaktadır.

4.1.2.3. Akım Yoğunluğu

Elektrotun çalışma yüzeyinde, birim alana düşen ortalama çalışma akımına akım yoğunluğu denir. Akım yoğunluğu A/cm^2 ile ifade edilir. Akım yoğunluğunun artmasıyla elektrot sıcaklığı da artar ve elektrot aşınma oranı artar. Dolayısıyla, güç seviyesi seçiminde elektrotun çalışma yüzeyi dikkate alınmalıdır.

4.1.2.4. Ark Süresi (Kıvılcım Süresi)

Ark süresi, kıvılcım boşalmasının başlamasıyla kıvılcımın sona ermesi arasında geçen süredir. Kıvılcım süresi arttıkça, boşalma akımının etkisi daha uzun süre devam eder ve talaş kaldırma süreci bu sürede gerçekleşir. Dolayısıyla bu süre, talaş kaldırma hızı, elektrot aşınması ve yüzey kalitesini etkiler. Bu süre μs cinsinden ifade edilmektedir.

4.1.2.5. Ark Aralığı (Bekleme Süresi)

İki kıvılcım boşalması arasındaki minimum süredir. Daha yüksek bir seviyede vurum ara süresi kıvılcımlar arasındaki zamanın artmasına yol açar ve daha düşük enerji üretimi ile sonuçlanır. Vurum ara süresinde, parçacıklar aralığın dışına püskürtülmektedir. Ark aralığı (bekleme süresi) hiçbir zaman sıfır yapılmamalıdır. Eğer yapılırsa, elektrotlar arasındaki elektrik alan sürekli olacağı için ark kanalı da sürekli olacak ve koparılan talaşlar ortamdan uzaklaştırılamayacaktır. Bu durumda hep aynı nokta erozyona uğrayacağı için iş parçasında istenmeyen tahribatlar oluşacaktır. Bekleme süresinin artması genellikle işleme hızını yavaşlatmaktadır. Genellikle ark ve ark ara süresi yaptıkları etkilerden dolayı bir arada göz önüne alınır ve ark aralığı ark süresinden küçük seçilmelidir.

4.1.2.6. Servo

Elektro erozyon işleminin devam edebilmesi için aralık mesafesinin ayarlanan bir değerde (gap voltajı) tutulması gerekir. Bu mesafenin otomatik olarak sürekli ayarlanmasını sağlayan üniteye servo kontrol denmektedir. Aralığın gerçek değeri sürekli ölçülerek ayarlanan aralık değeriyle karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucuna göre servo mekanizması, gerçek değeri ayarlanan değere yaklaştıracak şekilde elektrotu hareket ettirir. Aralık mesafesinin ayarını kontrol eden bu parametre düşürüldüğünde, daha küçük bir aralık meydana gelir. Aşırı düşük

değerlerde, parçacıklar aralık içerisinde kaldığından işleme kararsız hale gelir. Ayrıca bu parametre kesme performansını ve aşırı yanmayı (overburn) kontrol eder. Eğer yüksek bir değere ayarlanırsa, kesme hızı yavaşlar.

4.1.2.7. Kafa Hızı

Servo kafayı hareket ettiren motorun hızının ayarlanmasını temin eder. Kafa hızı, el kumanda, geri çekme (hızlı geri / ileri hareket) ve otomatik çalışma hızları üzerinde etkilidir.

4.1.2.8. Çalışma Süresi ve Geri Çekme Süresi

Düzenli çalışma için elektrot ile iş parçası arasındaki koparılan talaşın uzaklaştırılması gerekir. Bunu sağlamak için periyodik olarak çalışmaya ara verilerek elektrot iş parçasından uzaklaştırılır ve geri yaklaştırılır. Tezgah çalışma süresi kadar otomatik çalıştıktan sonra işlemeye ara vererek geri çekme süresi boyunca elektrotu iş parçasından uzaklaştırır ve sıvı basıncı ile ara bölge yıkanır. Bu sürenin sonunda elektrot iş parçasına geri yaklaştırılır. Başlangıç noktasının az gerisinde veya ilk kıvılcımın meydana gelmesiyle çalışma süresi başlatılır.

4.1.2.9. Ark Koruma

Çalışma sırasında erozyon atıklarının yeterince temizlenememesi anormal kıvılcımlara yani zararlı ark veya kısa devrelere neden olur. Zararlı ark ve kısa devre elektrot ve iş parçası üzerinde tahribat oluşturur. Zararlı ark veya kısa devrenin giderilememesi durumunda işlemi durduran sisteme ark koruma sistemi denilmektedir.

4.1.2.10. Sıvı Seviyesi

Elektro erozyon ile işlemede iş parçası ve elektrotun çalışma yüzeyinin 3 – 4 cm kadar dielektrik sıvı ile örtülmesi emniyet açısından gereklidir. Haznedeki sıvının seviyesi, yüksekliği ayarlanabilen bir dielektrik dönüş borusuyla ayarlanır. Ayarlanan seviyede sıvı akışı devam ediyorsa elektro erozyon işlemi yapılabilir. Herhangi bir sebeple dolaşım durmuş ise işlem durur. Böylece meydana gelebilecek iş kazaları ve elektrotun zarar görmesi veya yangın tehlikesi önlenir.

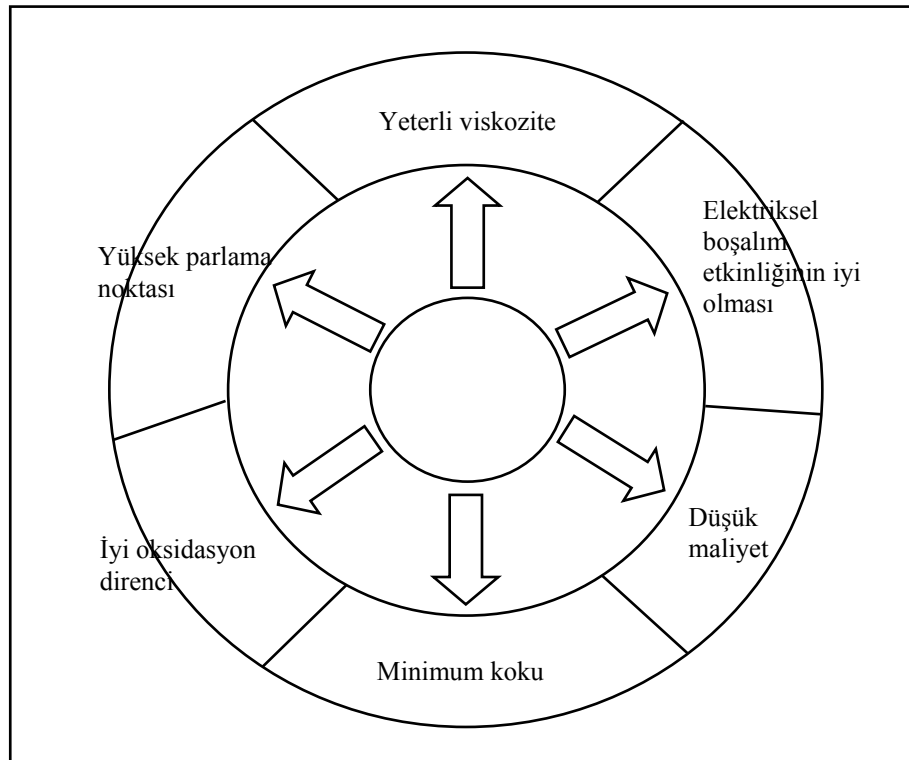
4.1.2.11. Dielektrik Sıvısı

Dielektrik sıvısının temel fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir.

- Elektro erozyon işlemi anında iş parçası yüzeyinden koparılarak işlem aralığına dökülen parçacıkları, ara bölgeden uzaklaştırmak,
- İş parçası ve elektrot arasında kıvılcım oluşumuna yardım etmek,

- Kıvılcım yolunu dar bir kanala dönüştürmek. Buna boşalım kanalı denir.
- İş parçası ve elektrot arasında yalıtkanlığı sağlamak,
- Elektro erozyon esnasında ısınan bölgeleri soğutmak

En yaygın kullanılan EDM dielektrik sıvıları, hafif yağlama yağları, transformatör yağlar, silisyum esaslı yağlar ve gazyağı gibi çeşitli petrol ürünleri ve özellikle tel erozyonu (wire – EDM) için su’ dur. Kullanılan yağlar, yüksek yoğunluk ve vizkoziteye sahip olmalıdırlar. Bu yağlar, boşalım kanalı ve boşalım enerjisinin düzenli bir şekilde oluşmasını sağlar fakat ara bölgeye püskürtülmeleri zorluklar çıkarabilir. EDM işleminde en yaygın kullanılan dielektrik sıvı, gazyağıdır. Elektro erozyon işleminde kullanılan dielektrik sıvısının seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda açıklanmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Dielektrik sıvısında olması gereken özellikler.

4.1.2.11.1 Parlama Noktası

Parlama noktası, kullanılan sıvı buharının alevlendiği sıcaklık değeridir. Güvenli bir erozyon işlemi için sıvının parlama noktasının yüksek olması tercih edilir.

4.1.2.11.2. Dielektrik Mukavemeti

Kullanılan dielektrik, iş parçası ve takım elektrotu arasındaki şartlar ve gereksinimler sağlanıncaya kadar yalıtkan olmalı , daha sonra iletken bir özellik kazanmalıdır. Vurum ara

süresi anında, iş parçası ile elektrot arasında izolasyon sağlamalıdır. İyi bir dielektrik mukavemetine sahip EDM yağı, işlem anında ara bölgedeki kıvılcım kontrolünü düşük sıvı basınçlarında dahi sağlayabilir. Dolayısıyla, muhtemel ark oluşumları engellenmiş olur.

4.1.2.11.3. Renk

Elektro erozyon işleminde kullanılan bütün dielektrik sıvılar genellikle koyu renktedirler. Fakat, işlem anında daldırılmış durumda olan iş parçasının görünebilmesi için temiz olmalıdırlar. Sıvı rengi temiz veya su beyazlığında olmalıdır. Temiz olmayan lekeli veya kirli sıvılar, istenmeyen ve hatta tehlikeli durumlara yol açabilir.

4.1.2.11.4. Koku

Elektro erozyon işleminde kullanılan dielektriklerin çok ağır bir koku saçmaları genellikle sıvının içerisinde sülfür biriktiğine işaret etmektedir. Sıvının kokusu, değiştirilme aşamasını tahmin etmek için kullanılabilecek bir faktördür.

4.1.2.11.5. Koruyucu Tedbirler

İşleminde kullanılan sıvının özenle korunması ve sıvının cinsine göre sıvı ömrü birkaç yıl artırılabilir. Sıvının düzenli filtrelenmesi ve su ile karışımının engellenmesi, sıvı ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Elektro erozyon işleminde kullanılan elektrot yüzeyinin çok yüksek sıcaklıklara maruz kalması nedeniyle yüzeyde yoğunlaşma ve buğulaşma meydana gelmekte, dolayısıyla kullanılan dielektriğin su ile teması tamamen kesilememektedir. Grafit elektrotlar gözenekli yapılarından dolayı havadaki nemi emmesi nedeniyle diğer metal elektrotlara nazaran dielektriğin buğulaşmaması açısından daha avantajlıdır. Çoğu elektrot malzemesi, servise sunulmadan önce kuru bir fırında korunmaktadır.

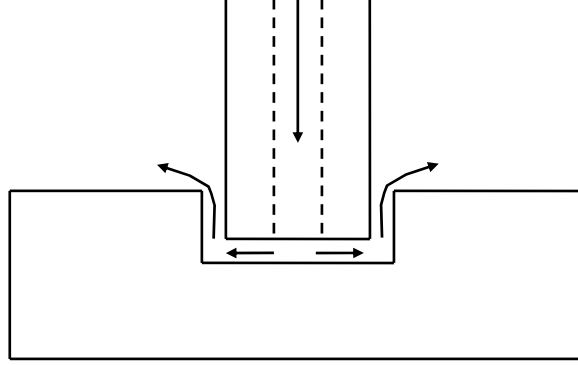
Bir sıvının rengi tek başına değişim zamanının geldiğine işaret etmeyebilir. Sıvı kullanılmaya yeni başlandığında ne kadar temiz olursa olsun, zamanla yüksek ısı nedeniyle sıvı bozulur ve kahverengiye doğru bir renk değiştirir. Özellikle yüksek akımlar bu bozulmayı daha fazla hızlandırmaktadır. Bozulmalar genellikle sıvı içerisinde katran, reçine ve hidrokarbon oluşumu şeklinde göze çarpmaktadır. Bu durumda, filtreleme işlemi de işe yaramayabilir. Dolayısıyla renkli sıvı ile kirli sıvının iyi ayırt edilmesi gerekmektedir [134].

4.1.3. Dielektrik Sıvısının Uygulama Şekilleri

4.1.3.1. Elektrottan Püskürtme

Elektrota boydan boya bir veya birkaç delik delinir. Dielektrik sıvı, elektrot ve iş parçası arasına elektrot boyunca gönderilir. Bu, metal talaş partiküllerini işleme alanından süratle

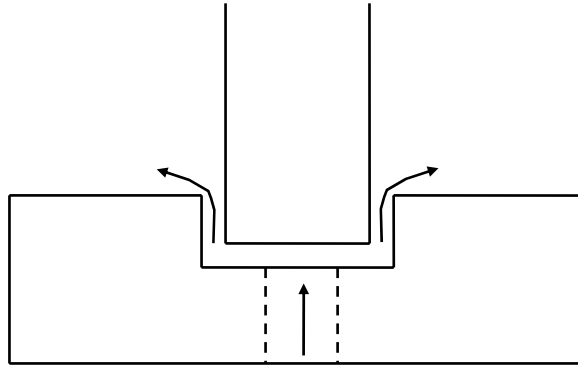
uzaklaştırır. İşlenen boşluklarda, işleme operasyonunun tamamlanmasından sonra taşlanarak veya diğer işleme metotlarıyla giderilmesi gerekirken küçük çıkıntı uçlar veya göbek kalabilir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Elektrottan basarak püskürtme.

4.1.3.2. İş Parçasından Püskürtme

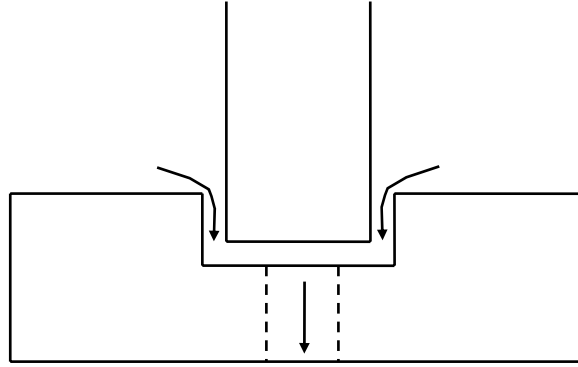
Dielektrik sıvının iş parçasından yukarı doğru püskürtülerek sirkülasyonunu sağlamak yaygın bir metottur. Bu tip püskürtme ile temizleme, boydan boya delik işleme uygulamaları ve göbek veya çıkıntı pim için deliklere sahip oyukların işlenmesiyle sınırlıdır. Şekil 4.14’ de bu püskürtme şekli gösterilmektedir.



Şekil 4.14 İş parçasından basarak püskürtme.

4.1.3.3. İş Parçasından Emme (Vakum)

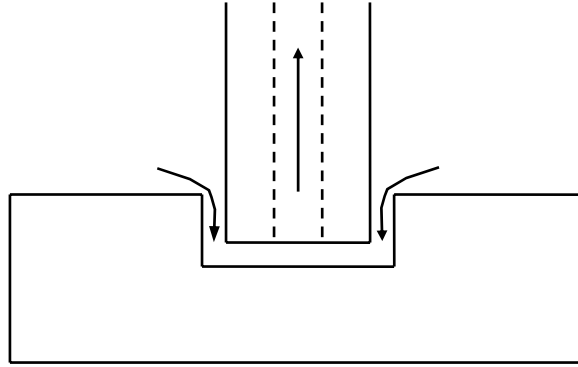
İş parçası ve elektrot arasında normal 0.02 mm’lik aralık boyunca, dielektrik sıvının sirkülasyonuna sebep olan emme (vakum) oluşturulur. Akış iş parçasındaki bir delikten aşağı doğrudur. Vakum akışı, işleme verimliliğini artırarak, buharlaşmadan oluşan kokuyu ve dumanı azaltır, iş parçasındaki konikliği elemine etmeye veya azaltmaya yardım ederek, diğer metotlara nazaran çeşitli üstünlüklere sahiptir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 İş parçasından emme (vakum).

4.1.3.4. Elektrottan Emme

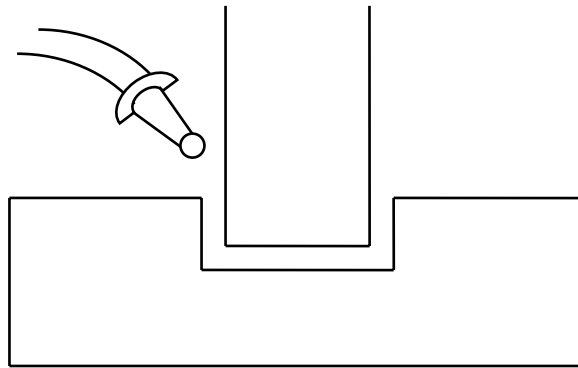
Benzer şekilde bu defa elektrot içine açılan delikten vakum oluşturularak dielektrik sıvı emilir. Akış, elektrot içindeki delikten yukarı doğrudur. İş parçasından emmede sayılan avantajlar burada da geçerlidir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Elektrottan emerek püskürtme.

4.1.3.5. Kenardan Püskürtme Metodu

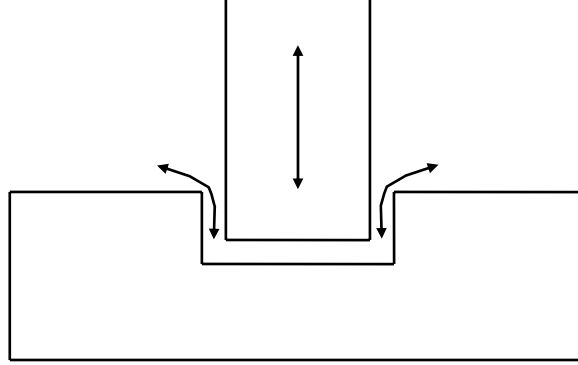
Dielektrik sıvı, elektrot ile iş parçası arasındaki boşluktan püskürtülür (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Yandan püskürtme.

4.1.3.6. Titreşimli Dielektrik Sirkülasyonu

Basma ve emme etkisi (titreşim) kıvılcım aralığından talaşları uzaklaştırmada dielektrik sirkülasyonu oluşturmak için kullanılır. Elektrot aşağı – yukarı titreştirilir. Bu metot özellikle diğer metotların kullanılmasının pratik olmayacağı kör oyuklar, derin delikler veya çok küçük delikler için etkilidir. Diğer metotlarla da bir arada kullanılabilir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Titreşimli püskürtme.

4.1.4. Takım (Elektrot)

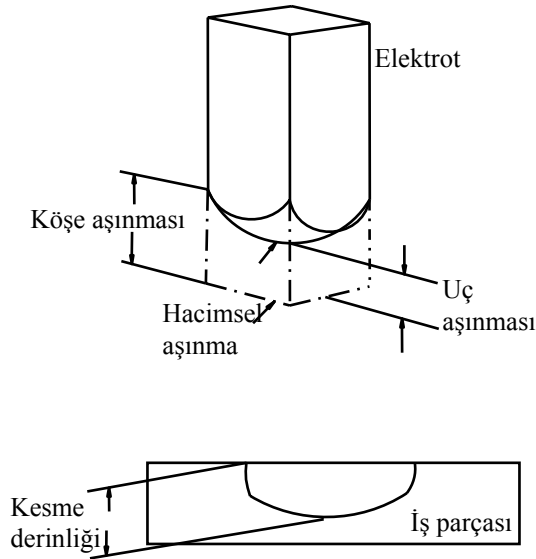
EDM’ de takım (elektrot), yapılmak istenen iş parçasının formuna uygun olarak şekillendirilmiş aşındırıcı parçadır. Prensip olarak, bütün elektrik ileten malzemeler elektrot yapımında kullanılabilirler. Geleneksel işleme metotlarındaki gibi, bazı elektrot malzemeleri, diğerlerinden daha iyi kesme ve aşındırma özelliklerine sahiptir. Düşük elektrot aşınması için, erime sıcaklığı yüksek, elektriksel ve ısıl iletkenlikleri iyi olan malzemeler tercih edilmelidir. Bu özellikler, elektrotun talaş kaldırma kapasitesi üzerinde önemli etkiye sahiptirler. Bu yüzden elektrot malzemesi aşağıdaki kriterler göz önüne alınarak seçilmelidir.

- Kolay bulunması, işlenmesi, düşük maliyetli olması ve tekrar kullanılabilmesi,
- Elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması,
- İş parçasından verimli metal talaş kaldırmaya elverişli olması,
- Aşındırma işlemi boyunca deformasyona dirençli olması,
- Düşük aşınma miktarları verebilmesi.

Elektro erozyon ile işlemede kullanılmak üzere, elektrot malzemesi üretmek için pek çok deney gerçekleştirilmiştir. Zira, EDM işleminde üretilen parça maliyetinin en az % 50 sini elektrot masrafı oluşturur. Pratikte en çok kullanılan elektrot malzemeleri, grafit, elektrolitik bakır, tungsten karbür, pirinç, alüminyum ve çinko alaşımlarıdır.

4.1.4.1. Elektrot (Takım) Aşınması

Elektro erozyon işlemi sırasında iş parçasının yanında elektrot da aşınmaya veya erozyona maruz kalır. Bunun sonucu olarak, kesme işlemi esnasında, takım orijinal şeklini kademeli olarak kaybettiği için yakın toleransta bir parça üretmek oldukça zordur. Bazı durumlarda, istenilen toleranslarda bir parça üretmek için 4 – 5 tane elektrot kullanmak gerekebilir. Elektrotta oluşan aşınma bölgeleri, Şekil 4.19’ da gösterildiği gibi, uç aşınma, yan aşınma, köşe aşınması veya hacim aşınması olarak ifade edilebilir. EDM’ de genellikle elektrot/iş parçası aşınma oranı %1 veya daha az ise aşınmanın olmadığı (no wear condition) varsayılır. Aşınma ilk önce köşelerde oluştuğu için elektrotun yeniden yapılması gerektiğini köşe aşınması belirler [135].



Şekil 4. 19 Elektrotta aşınma bölgeleri.

4.1.5. Başlıca Elektro Erozyon Çeşitleri

Yüksek tamlıkta metal işleme yeteneğine sahip olan ve çeşitli sanayi uygulamalarında mevcut olan bazı farklı Erozyon çeşitlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

4.1.5.1. Elektro Erozyon (Electrical Discharge Machining) EDM

EDM, termal enerji kullanarak elektriksel boşalım ile parçayı işleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde yüksek tamlıklarda iş parçası elde edilebilir. EDM yöntemiyle bir insan saçının çapından daha küçük delikler bile işlenebilmektedir. Bu yöntemde iş parçası elektrik

iletkenliğine sahip olmalıdır ve bir dielektrik sıvı ortamına daldırılmalıdır. Dalma Erozyon yönteminde takım elektrotu, iş parçasının yüzeyine bastırılarak işlem yapılmaktadır.

Tasarım ve uygulama alanları olarak her bir Erozyon yöntemi birbirinden farklı oldular da, talaş kaldırma mantığı olarak hepsinde elektro boşalımlarla işleme şekli standarttır. EDM sistemleri, ‘Die-Sinking’ yani Dalma Erozyon ve ‘Wire EDM’ (Tel Erozyonu) olmak üzere iki temel alana ayrılır. Dalma Erozyon yöntemi, aynı zamanda ‘Sinkers’ (Dalma) ve ‘Vertical EDM’ (Dik İşlem Erozyon) olarak da adlandırılmaktadır.

4.1.5.2. Tel Erozyon (Wire Electrical Discharge Machining) WEDM

Bu yöntem, iş parçası boyunca lineer olarak hareket eden bir tel elektrotu yardımıyla, elektriksel boşalımlarla kesme işlemidir. Tel erozyonu yönteminde arzu edilir düzeyde iş parçasının imalatı için tel elektrotu ile iş parçası arasındaki kesme şartları, önceden hazırlanmış bir CNC programıyla kontrol edilmektedir.

WEDM, yaygın olarak kalıp ve kalıp parçalarının yanı sıra modellenmiş ceplerin imatı ve birçok değişik sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır.

4.1.5.3. Freze Erozyon (Electrical Discharge Milling)

Bu yeni yöntem, bir freze çakısı gibi kendi eksenini etrafında dönen bir silindirik elektrot yardımıyla elektro boşalımlarla şekil verme işlemidir. Dişi kalıp imalatında, istenen derinlik verilmek suretiyle kalıp çerçevesi ve iç kısım kolaylıkla işlenebilir. Talaş kaldırma şekli EDM yani Dalma Erozyona benzerdir. Freze Erozyonda standart silindirik elektrotlar kullanılarak, karmaşık elektrot tiplerinin imatları ve maliyetleri azaltılmıştır.

4.1.5.4. Taşlama Erozyon (Electrical Discharge Grinding) EDG

Dönel Erozyon olarak da bilinen bu Erozyon yönteminde, abrasiv taşlama taşı elektrik iletkenliği olan bir tekerlek, takım elektrotu olarak kullanılmaktadır. Taşlama yöntemine benzer şekilde elektro boşalımlarla iş parçası şekillenir. Bu yöntem, karpitler ve çeşitli elmas formları gibi kesici takımların bilenmesinde tercih edilmektedir. Bu yolla elmas taşların imalatındaki fiyat oranı da azaltılmaktadır. EDG yöntemi U.S. ve Avrupa ülkelerinde daha çok yaygınlaşmıştır.

4.1.5.5. Ultrasonik Destekli Erozyon (Ultrasonic Aided EDM) UEDM

Bu yöntem, ultrasonik frekanslarla titreten bir takım elektrotu kullanılarak elektriksel boşalımlarla talaş kaldırma yöntemidir. Ultrasonik titreşim, küçük yada mikro düzeydeki deliklerin delinmesinde mükemmel bir işleme karallılığı ve sürekliliği sağlar.

4.1.5.6. Mikro Elektro Erozyon (Micro Electro Discharge Machining) MEDM

Mikro EDM, Dalma Erozyonunun küçük bir şekli olarak ele alınabilir. Bu yöntemde takım elektrotu 10.000 rpm kadar döndürülerek V kanalları kolaylıkla işlenebilir. 5 mikrondan daha küçük elektrot çapları mevcuttur. Farklı şekillerin ve mikro deliklerin işlenmesinde kullanılır. Elektrotlar Tel Erozyonu olarak bilinen yöntemin aksine zıt kutuplu olarak yapılmışlardır. En yaygın olan Mikro Erozyon elektrotları 20 µm ile 250 µm arasında değişmektedir. Mikro Erozyonun en önemli üretim alanlarından bir tanesi de X-Y-Z eksenlerinde hareket eden bir CNC programıyla 1 µm toleranslı parçaları imal etmektir. Mikro EDM $\pm 1-2$ µm toleransında 10 µm ile 200 µm arasındaki delikleri delebilmektedir. Bu işlemin çok küçük ve hassas olması nedeniyle, MEDM uygulamaları mikroskopla incelenebilir.

4.1.5.7. Mikro Tel Erozyonu

Bu yöntemde çapı 10 µm kadar olan bir tungsten tel elektrotu kullanılır. Bu sistemle ölçüleri 0.1- 1 mm arasında değişen ince plakalar işlenmektedir. Bu makineler oldukça düşük enerji seviyelerinde kontrol edilebilen bir görüntüleme(monitör) sistemi, enerji jeneratörü ve hareket eden bir tel elektrotundan ibarettir.

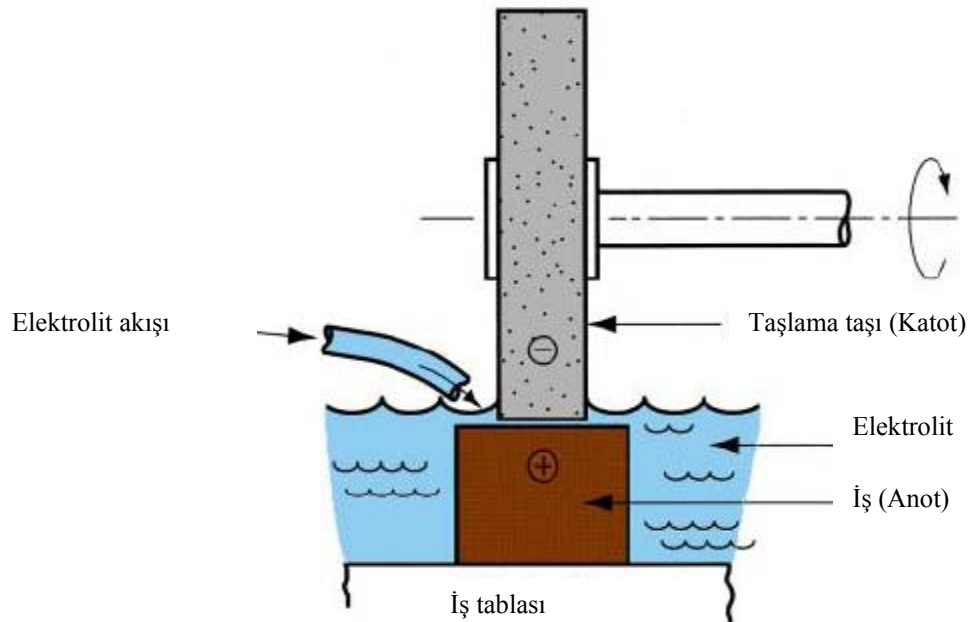
4.1.5.8. Oyma erozyon (Mole EDM)

Bu yöntem iş parçasının içine doğru ilerleyen bir delik yada bir eğri olarak tanımlanmış bir yolda işlem yapabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Sistem, sanki yere bir tünel kazarcasına, parçayı işleyebildiğinden oldukça orjinaldir. Oyma Erozyon tezgahında kullanılan elektrotun şekli eğilebilen bir çubuk gibidir ve şekil hafıza alaşım malzeme kullanılmıştır. Bu yöntemde makine edilecek tünelin şekli ultrasonik bir dalgayla taranır. Bu sistem Japonya'da bulunan Tokyo Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mitsubishi elektrik laboratuvarlarında geliştirilmiştir [136].

4.2. Elektrokimyasal Taşlama Yöntemi

Elektrokimyasal taşlama işleminde, elektro kimyasal etki ve metal bağlı olan aşındırıcı zımpara taşının hareketinin birleşimi ile metal iş yüzeyinden talaş kaldırır (Şekil 4.20). İş parçası yüzeyinden kaldırılan talaşın yaklaşık % 90'ı elektro kimyasal etki ile geri kalan % 10'u ise zımpara taşının mekanik hareketi ile gerçekleştirilir. Elektrolitik taşlama işlemi, elektrokimyasal işleme (ECM) yönteminin özel bir şeklidir. Elektrokimyasal işleme yönteminde, işlenecek parçaya göre şekillendirilmiş bir takım kullanılırken, taşlama işleminde elektriksel iletken bir aşındırıcılı zımpara taşı katot olarak kullanılır. Yöntemde özellikle, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları, tungsten karbür, ısıl-işlem görmüş (sertliği 60 – 65 Rc

veya daha yüksek) çeliklerin yanı sıra kırılğan parçalar, gerilim yığılmasız ve çapaksız olarak üretilmektedir [137].



Şekil 4.20 Elektrolit taşıma prensibi.

4.2.1. Yöntemin Özellikleri

Şekil 4.20’ de elektrokimyasal taşlama yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, iş parçası artı kutup (anot) ve zımpara taşı eksi kutup (katot) olarak kullanılmaktadır. Bu iki elektrot, doğru akım kaynağı ile birleştirilmiş ve pozitif ve negatif yüklü iyonlar ihtiva eden iletken bir iyonik çözelti (elektrolit) içine batırılmıştır. Elektrik akımı uygulandığında, pozitif yüklü iyonlar katoda ve negatif iyonlar ise anoda geçerler. Katotta elektrolitin pozitif iyonları elektronları alırlar (azalma) ve nötr atomlar ve moleküller olarak deşarj olurlar. Anotta ise negatif iyonlar elektronu serbest bırakırlar (oksidasyon) ve nötr atomları ve molekülleri olarak boşalırlar. Elektroliz meydana geldiğinde, anottaki iş parçası yüzeyinde bir oksit filmi oluşur. Bu oksit filmi elektriksel olarak yalıtkan bir dielektriktir ve iş parçasının yüzeyinde kaldığı müddetçe, filmin gözenekliğine ve direncine bağlı olarak akım geçimi yavaşlatır ve işlemi durdurabilir. Katot olan zımpara taşındaki abrasiv parçacıklar ise sürekli oksidasyona maruz kalan malzeme üzerindeki oksijeni temizler. Taşın oksit filmini yüzeyden temizlemesi, daha az enerji harcanmasına yardımcı olur. Yöntemde düşük gerilim (3

– 15V) ve yüksek akım yoğunluğu (yaklaşık 1000A) ile talaş kaldırılır. Taş aşınmasının minimum ve yüzey özelliklerinin iyi olabilmesi için uygun voltaj ayarlarının yapılması gerekmektedir. Kullanılan zımpara taşı tipine bağlı olarak uygun gerilim, 10-15V arasında olmalıdır.

Yöntemde, taşın bakır yüzeyi ile iş parçasının yüzeyi temas halinde değildirler. Çok küçük bir miktarda, aşındırıcı tanelerin yüzeye değdiği kabul edilmektedir. Dolayısıyla, taş ile iş parçası arasındaki kesme kuvveti, aşındırıcı/iş parçası temas alanına bağlı olarak, çok düşük olmaktadır. Elektrolit, iş parçası ve taş arasındaki boşluğa sürekli olarak pompalanır. Elektrolit sıvısı, iki elektrot arasında elektriksel devreyi tamamlar ve iş parçasından ayrılan parçacıklar, zımpara taşının dönme hareketi ve yüksek basınçlı bu sıvı çözelti ile uzaklaştırılır [138].

4.2.2. Talaş Kaldırma Oranı ve Akım

Elektrolit taşlama işleminde oldukça düşük doğru akım voltajı (yaklaşık 4-16V) ve yüksek amper (300-1000A veya daha fazla) kullanılır. Akım yoğunluğu, işlenen parçanın alanına bağlıdır. Akım yoğunluğunun, işleme aralığı ve gerilim ile doğrudan ilişkili olmasına rağmen, bu oran daha çok işlenen malzemenin özelliklerine bağlıdır. Taşlama oranının artırılabilmesi için, taşlama alanının büyük tutularak daha çok akım çekilmesi sağlanmalıdır.

İlerleme miktarının yavaş olduğu durumlarda, daha fazla talaş kaldırılır ve daha kötü yüzeyler elde edilir. Fakat ilerleme miktarının çok fazla olduğu durumlarda da taş aşınması artar. Yüzey pürüzlülüğü işlenecek malzemeye bağlı olmakla beraber genellikle 6 – 10 µm aralığında değişmektedir. Daha iyi yüzeylerin gerektiği durumlarda bitirme pasosu uygulanır. Bitirme pasosu için, 3 – 5V düşük voltaj ve 25 – 50 mm/dak yüksek ilerleme miktarı uygulanmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü, çelikler ve değişik alaşımlar için 0.2 – 0.5 µm aralığında değişmektedir. Daha yüksek alaşımlı malzemelerde, daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Bu değer, tungsten karbür için 0.25 – 0.3 µm olarak belirlenmiştir. Karbürlerin dalma usulü taşlanması halinde ise 0.2 – 0.254 µm' luk pürüzlülük değeri sağlanmıştır. Bu yüzey pürüzlülüğü bitirme talaşı gerekli olmadan sağlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen diğer bir faktör ise taş seçimidir. Taş tane boyutu, akım geçimi, elektrolit ve elektrolit akma oranını, özellikle hassas köşe taşlama işleminde uygun olmalıdır.

EKT işleminde güç kaynağı aşağıdaki özelliklere sahip olarak tasarlanmalıdır,

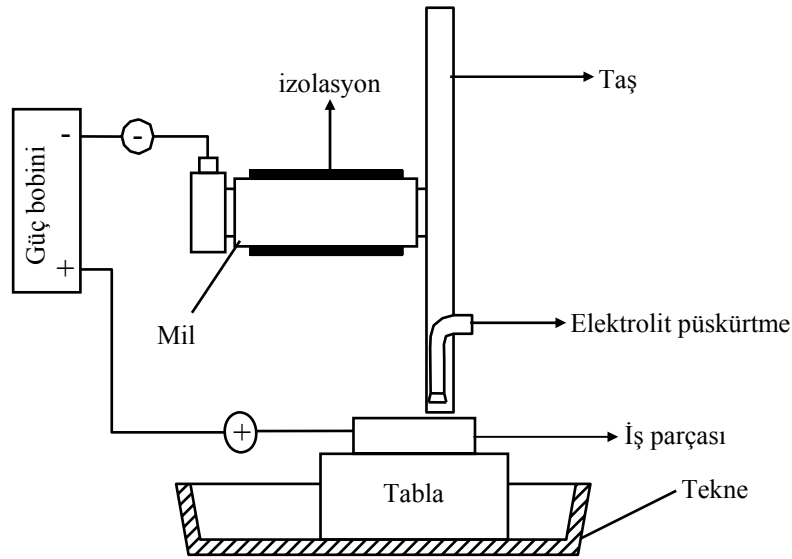
- Uygulama voltajı 0 – 15V aralığında sürekli değişken olmalıdır,
- Belli bir voltaj ayarı yapıldıktan sonra, taş ile iş parçası arasındaki temas alanına bağlı olarak, amper değişimi de kontrol edilebilmelidir,

- Akım değişimi mümkün olduğunca az olmalıdır. İşlem boyunca sürekli sabit akım şartları altında çalışma sağlanmalıdır.

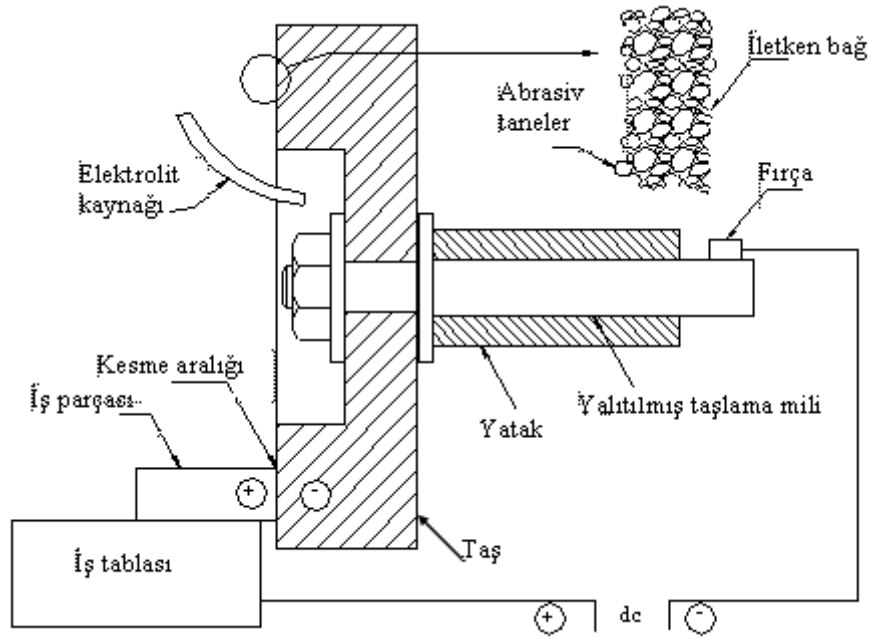
Çoğu malzemelerin taşlanması ortalama akım yoğunluğu 1000A olarak seçilir. Bu kadar yüksek bir akım kullanılmasına rağmen, yöntem çok özel parçaları taşıyabildiğinden ekonomik olmaktadır.

4.2.3. Aygıt ve Zımpara Taşı

Şekil 4.21 incelendiğinde, elektrokimyasal taşlama sisteminin temel kısımlarının elektrik sağlama, elektrolit akış sağlama, elektrolit, DC güç kaynağı, zımpara taşı ve iş parçası gibi elemanlardan oluştuğu görülmektedir. Yöntemde, her iki elektrot da (iş parçası ve taş), elektrolit içine tamamen batırılmadığı için, elektrolit çözeltisi iş parçası ve taş arasına yüksek basınçlarda pompalanmaktadır. Şekil 4.22’ de işlemde kullanılan taş ve iş parçası arasındaki etkileşim görülmektedir. Yöntemde kullanılan zımpara taşları iletken bir bağlayıcı elemanı ile değişik abrasiv malzemelerden yapılırlar.



Şekil 4.21 Tipik bir elektro kimyasal taşlama sistemi [138].



Şekil 4.22 EKT işlemi için aygıtın şematik görünümü [139].

Çoğu taşlarda abrasiv olarak Al_2O_3 parçacıklar ve iletken için de bakır impregne edilmiş reçineler kullanılır. Bunun yanında SiC ve elmas gibi abrasiv malzemelerde kullanılmaktadır. Taş mili bir grup temas fırçaları aracılığı ile doğru akım gücüne bağlanır ve yalıtım özelliği ile tezgahın diğer kısmı izole edilir (Şekil 4.22). Tungsten karbürler, sertliği 60 – 65 Rc olan sertleştirilmiş çelikler ve ince kanalların taşlanmasında metal bağlı elmas taşlar kullanılırken, metal bağlı Al_2O_3 taşlar bütün elektriksel iletken malzemelerin taşlanması için kullanılmaktadır. Taş yüzeyindeki aşındırıcı taneler önemli fonksiyonları yerine getirir. Bunlar;

- İş parçası yüzeyinde oluşan oksit filmlerini sürekli kaldırarak, yeni malzeme yüzeyleri sağlaması ve işlemin devamlılığını korumasına yardımcı olması,
- Taneler arasındaki boşlukların elektrolit sıvı ile dolması ve tanelerin iş parçası yüzeyine elektroliti taşımasıyla elektrokimyasal taşlamaya yardımcı olması olarak tanımlanabilir.

Çalışma boşluğu, iş parçası ve metal bağlı taş arasındaki mesafe ve katot olarak kullanılan zımpara taşı yüzeyindeki abrasiv parçacıklarının çıkıntı miktarı ile belirlenir. Taşlama tamliğini korumak, iyi talaş kaldırmak ve yüksek akım geçimini sağlayabilmek için taş, bir müddet sonra bilenmelidir. Taşın devir sayısı da önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek hızlarda, elektrolit taştan ayrılabilir ve işlemi durdurabilir. Uygun oranda elektrolit sağladığından emin olmak için akış kontrol valfi kullanılmalıdır.

4.2.4. İş parçası

İş parçası, devrenin anodu olup, iletken olmalıdır. İş parçası, tezgahın tablası vasıtası ile doğru akım güç kaynağına bağlanmış olur. İşlenmesi oldukça zor olan ve genellikle havacılık sanayisinde kullanılan birçok alaşım ve tungsten karbür bile bu yöntemle iletken olmak kaydıyla kolaylıkla taşlanabilir.

4.2.5. Elektrolit

Kimyasal taşlama yönteminde kullanılan elektrolitler, elektrokimyasal işleme (ECM) yöntemindeki elektrolitlerle benzer olup, elektriksel olarak iletken olan anorganik tuzların sulu çözeltileridir. Ancak, taşlanacak malzemeye göre bu çözeltiler farklı formülasyonlarda olabilirler. Elektrolit sıvısının iş parçası yüzeyinde daha hızlı bir oksit filmi oluşturması istenir. Genellikle bir elektrolit çözeltisinden aşağıdaki özellikler beklenir;

- Zımpara taşı ve iş parçası arasında akım iletkeni olarak davranması,
- İş parçasını ayrıştırması ile kimyasal reaksiyonu oluşturması şeklindedir.

Talaş kaldırma esnasında kaldırılan metal parçacıklar çözelti ile karışmaktadır ve elektrolit sıvısı sürekli bir sirkülasyon yaparak tank içine geri gönderilmektedir. Depodan tekrar işleme bölgesine pompalanan elektrolit sıvısı, filtreler aracılığı ile bu metal parçacıklardan ayrılmaktadır. Pompalan elektrolitin akma oranının sürekli sabit tutulması gerekir. Bu orandaki herhangi bir farklılık, aşırı taş aşınmalarına sebep olabilir. Akma basıncının az olması durumunda, talaş kaldırma miktarı düşer. Taşlama işleminde kullanılan elektrolit sıvısı genel anlamıyla şu özelliklere sahip olmalıdır;

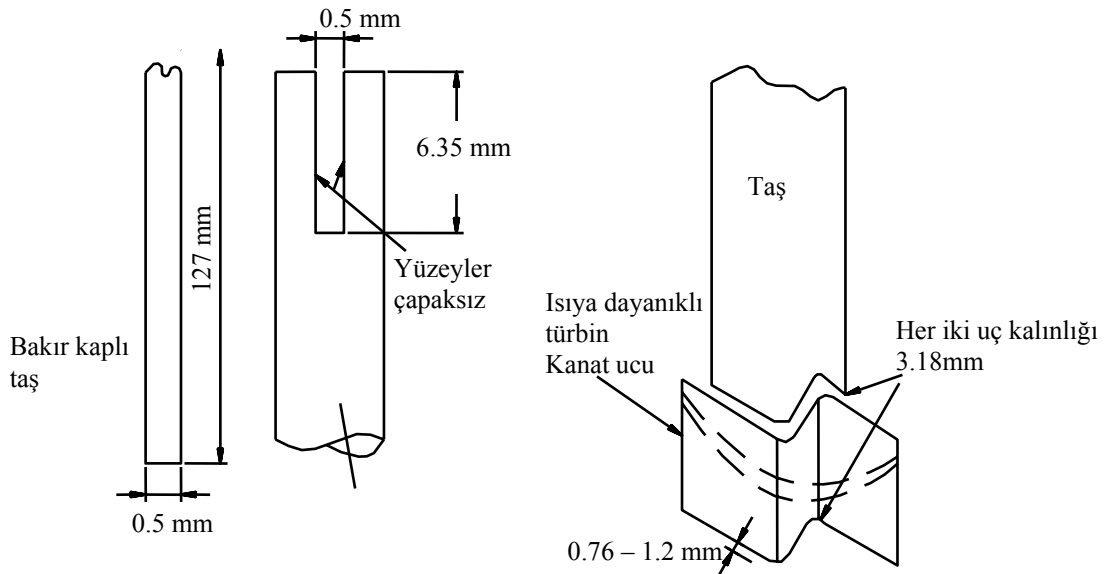
- Yüksek iletkenlik,
- Yüksek talaş kaldırma miktarı,
- İyi bitirme yüzeyi sağlamalı
- Korozyonu önleyici olmalı. Ancak bütün metaller için bu özelliği sağlamak mümkün olamamaktadır.

4.2.6. Elektrolit Taşlama Metotları

Günümüzde 5 farklı taşlama metodu uygulanmakta olup bunlar; silindirik taşlama, alın taşlama, yüzey taşlama, dalma taşlama, delik ve form taşlama metotlarıdır. Silindirik taşlama yönteminde, zımpara taşı ile iş arasındaki temas alanı diğer yöntemlere nazaran daha küçüktür. Dolayısıyla silindirik taşlama metodunda daha az miktarda akım geçimi olmakta ve metot en yavaş metot olmaktadır. Dalma taşlama yöntemi ise genellikle kaba işlemlerde kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemde genellikle bir bitirme pasosuna ihtiyaç duyulmaktadır. Form taşlama

yönteminde ECM yöntemine benzer şekilde taşlanacak malzemenin şekline göre özel taşlar kullanıldığından, yöntem oldukça pahalıdır. Form taşlamada genellikle, Al_2O_3 taşlar kullanılmaktadır. Yüzey taşlamada, taş sabit iken iş parçası taş altında doğrusal hareket yapmaktadır. Geleneksel taşlama yönteminden farklı olarak, yüzey taşlama işlemlerinde 2.5 mm' ye kadar talaş verilebilmektedir. Dolayısıyla artan talaş derinliği elektrotun işleme alanı aralığı değişmektedir ve talaş derinliğinin yüksek olmasıyla daha fazla akım elde edilebilmektedir. Tezgah kapasitesine bağlı olarak, büyük çaplı taş kullanılması tavsiye edilmektedir. Tablanın enine ilerleme miktarı, yeterli akım olduğu sürece taşın genişliğine bağlı değildir. İlerleme miktarının taş aşınması ve talaş kaldırmaya olan etkisini dengede tutabilmek için mümkün olduğu kadar otomatik ilerleme ile çalışılmalıdır.

Şekil 4.23' de alın ve dalma taşlama yöntemleri görülmektedir. Bu tip taşlama işlemlerinde taş, iş parçası yüzeyine karşı ilerlemektedir. Taş aşınmasının bütün yüzey boyunca homojen olmasını sağlamak için, taş titreşimli bir şekilde hareket ettirilir. Diğer metotlarda taşın doğrusal hareketinden dolayı iş parçası yüzeyinde spiral tarzda görüntüler elde edilirken bu metotlarda daha iyi yüzeyler elde edilebilmektedir. Alın taşlama hızlı bir metot olup taşın bütün yüzeyi temas sağladığından maksimum akıma ulaşılır. Enine taşlama genellikle, freze çakıların bilenmesinde kullanılır. Daha verimli enine taşlama işlemi için genellikle temas alanını arttırmak için taş yüzeyine 1- 2° açı verilir. Enine ilerleme miktarları, salınım açısı, taş yüzeyi genişliği ve mevcut akım miktarına bağlıdır. Delik taşlama, geleneksel delik taşlamaya benzerdir.



Şekil 4.23 Elektrolitik taşlama tipleri.

4.2.7. Elektrolitik Taşlamanın Avantaj ve Dezavantajları

Geleneksel işleme metotlarına göre elektrolitik taşlama işleminin bir çok avantajları mevcut olup bunlar kısaca şöyle özetlenebilir;

- Klasik taşlama yöntemlerinden farklı olarak, abrasiv taneler çok az bir miktar talaş kaldırdığından, taş maliyeti daha azdır,
- Taşın aşınması daha az ve talaş kaldırma oranı daha yüksektir,
- Taşlama işlemi esnasında hiç ısı oluşmadığından, iş parçalarında burulma ve yanma meydana gelmez,
- Zımpara taşı parçaya temas etmediği için burulma ve kırılma olmadan ince, uzun ve kırılabilir iş parçaları kolaylıkla taşlanabilir,
- Farklı metaller elektrik iletkenliği olmak kaydıyla taşlanabilir. Tungsten karbür ve süper alaşımlar hızlı ve kolayca taşlanabilir. Zirkonyum, titanyum ve berilyum gibi işlenmesi zor olan malzemeler, sertliğine bakılmaksızın veya termal iletkenliği dikkate alınmadan işlenebilir,
- İş malzemesinde gerilme oluşmaz ve iş sertleşmesi meydana gelmez,
- Freze çakıları bitirme işlemine gerek kalmadan l pasoda yeniden bilenebilir,
- Malzeme, taş ve diğer parametrelere bağlı olarak 0.125 – 1 µm yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir,

Bunun yanı sıra, elektrokimyasal taşlama yönteminin bazı dezavantajları da aşağıda belirtilmiştir.

- Sadece iletken olan malzemeler işlenir. Zımpara taşları, özellikle metal bağlı elmas taşlar normal taşlara göre daha pahalıdır.
- Elektrokimyasal etki esnasında fazla kesme olduğu için köşe yarıçapı 0.25-0.40 mm'den daha küçük olan parçalar taşlanamaz. Bu işlemin tamlığı 0.01 mm civarındadır.

Uygulama alanı olarak günümüzde elektrokimyasal taşlama işleminin en büyük kullanımı, türbin pervaneleri ve uçak kanatları üretimi yanında işlenmesi güç olan makine alaşımları, özellikle titanyum, paslanmaz çelikler ve uzun delikli parçaların işlenmesinde de kullanılmaktadır. Sonuç olarak, elektrolitik işleme metodu üretimi basitleştirmekte ve hem işleme zamanı hem de zımpara taşı maliyetlerini azaltmaktadır. Yeni metal bağlı zımpara taşları, güç kaynakları ve elektrolitler geliştirildiği zaman bu işlem daha fazla uygulama alanları bulacağı beklenmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışmanın Amacı

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), esas olarak termal bir yöntemdir. Bu işlemin mekaniği, dielektrik sıvı ortamında şiddetli elektron çarpışmaları, yüksek basınç ve ısı gibi faktörlerin de etkisiyle oldukça karmaşık bir ilişkiye dayanmaktadır. Yöntemde; vurum süresi, vurum ara süresi, dielektrik sıvı basıncı, iş parçası ve elektrot malzemelerinin özellikleri gibi birçok parametre aynı anda etki etmekte ve bu faktörlerin izafi tesirleri yöntemin tam olarak anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı, EEİ yönteminde, uygun parametre seçimi genellikle imalatçı firma tarafından önerilen şartlarda ve kullanıcı tecrübelerine dayanılarak yapılmaktadır [140].

İşlenen bir makine elemanının yüzeyinin, mikro ve makro düzeyde kalitesi, o makine elemanının performansı ile doğrudan ilişkilidir. Teknolojinin gelişmesi ve çeşitlenmesi sonucu yapı elemanlarından boyutsal hassasiyetlerinin yanı sıra sıcaklık, korozif etkenler, aşınma ve çeşitli yük ve momentlere karşı dayanım gibi beklentiler artmaktadır. Örneğin, bu faktörler arasında dinamik yükleme birçok modern yapıların tasarımında temel bir faktördür ve malzemelerin yorulma karakteristikleri ile sınırlıdır. Bu ve buna benzer nedenlerden dolayı, makine elemanlarının yüzey karakteristiklerine daha fazla önem verilme gereği ortaya çıkmaktadır.

Herhangi bir makine elemanı, klasik veya klasik olmayan imalat yöntemleriyle işlenirken, dikkat edilmesi gereken ilk husus boyutsal hassasiyetin yanı sıra yüzey özelliklerinin ihtiyaçlara uygun olmasıdır. Yüzey yapısı, iki açıdan ele alınabilir. Birincisi; yüzey pürüzlülüğünü de kapsayan yüzey geometrisi, ikincisi ise talaş kaldırma esnasında malzemenin yüzey tabakalarında meydana gelen gerilme şartları ve metalürjik değişimlerdir. Bu değişikliklerin başlıca sebepleri, yüksek sıcaklıklar, plastik deformasyon, kimyasal reaksiyonlar, aşırı elektrik akımları veya yöntemdeki aşırı enerji yoğunlukları olabilir. Bunun sonucu olarak, plastik deformasyon, mikro ve makro düzeyde çatlaklar, rekristalizasyon, sertlik değişimi, faz dönüşümleri ve artık gerilmeler gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilir.

Yukarıda belirtilen gerekçelerden hareket ederek, bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı, kullanım alanları da dikkate alınarak, elektro erozyon yöntemi ile farklı elektrot malzemeleri ve işlem parametrelerinde işlenerek malzeme yüzeyinde meydana gelen pürüzlülük ve mikroyapısal hataların bir bitirme işlemi olan elektro kimyasal taşlama işleminde, bu yöntemdeki değişik parametrelerin denenerek giderilmesi ve matematiksel modelleme ile optimize edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, uygun parametre seçiminin kullanıcı tecrübelerine bağlı olduğu dikkate alındığında, bu çalışmanın sanayideki uygulamalara da yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

5.2. Deneysel Tasarım ve Planlama

Deney yapma işlemi pek çok temel araştırmada ve ürünün geliştirilmesinde gerekli olan ve belirli bir sistematığe dayanan bir metottur. Deneysel teknikler, fiziksel parametrelerin duyarlılığı ve işlem değişkenlerinin kontrolü için önem arz etmektedir. Başarılı deneyler yapabilmek için temel prensipler ile ilgili sağlam bilgiye sahip olmak gerekir. Yapılacak deneyleri tasarlamak için, işleme etki eden parametrelerin rollerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Performans üzerinde etkisi olmayan parametrelerin kullanılması ile zaman ve mali kayıplar yaşanabilir.

Mevcut birçok deneysel tasarım yöntemlerine karşın, Taguchi dizinleri olarak bilinen yöntem oldukça ekonomik, az deney gerektiren ve bu tür çalışmalarda tercih edilen, bir yöntemdir. Bu deneysel tasarım metodu, verileri belirli bir sistematiğe toplayan, daha sonra doğru ölçümlerden sapmaları belirleyen ve verileri analiz eden bir tekniktir.

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işleme için, L_{16} , elektrokimyasal taşlama deneyleri için ise L_{27} denilen ortogonal dizinler uygun bulunmuş ve kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan ölçülen değerler, varyans analizi ile incelenerek işlem parametrelerinin etkileri belirlenmiştir. Deneysel değerler kullanılarak, işleme parametreleri ile performanslar arasındaki ilişkiler, lineer regresyon yöntemi ile modellenmiştir. İstatistiksel analiz ve modelleme ile ilgili gerekli tablo ve denklemler Minitab R14, Matlab ve JMP 5.0 paket programları kullanılarak elde edilmiştir.

5.3. Elektro Erozyon Deneyleri

Elektro erozyon deneyleri, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İmalat ve Konstrüksiyon Ana bilim Dalı laboratuvarında bulunan Furkan marka, M25A tip bir dalma erozyon tezgahında gerçekleştirildi. Deneylerde kullanılan elektro erozyon tezgahı Şekil 5.1’de görülmektedir. Bu tezgaha ait teknik bilgiler www.furkan.com.tr adresinden temin edilebilir.



Şekil 5.1 Deneylerde kullanılan elektro erozyon tezgahı.

Deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımı, 4.87 mm kalınlığında haddelenmiş bir plaka olarak temin edilmiştir. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 5.1’ de ve mekanik özellikleri ise Tablo 5.2’de verilmiştir. Numuneler $4.87 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$ ebatlarında freze tezgahında işlenmiş ve işlenecek yüzeyler parlatma diskinde parlatılarak pamukla sarılmış ve deneyler için muhafaza edilmiştir.

Tablo 5.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%).

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053

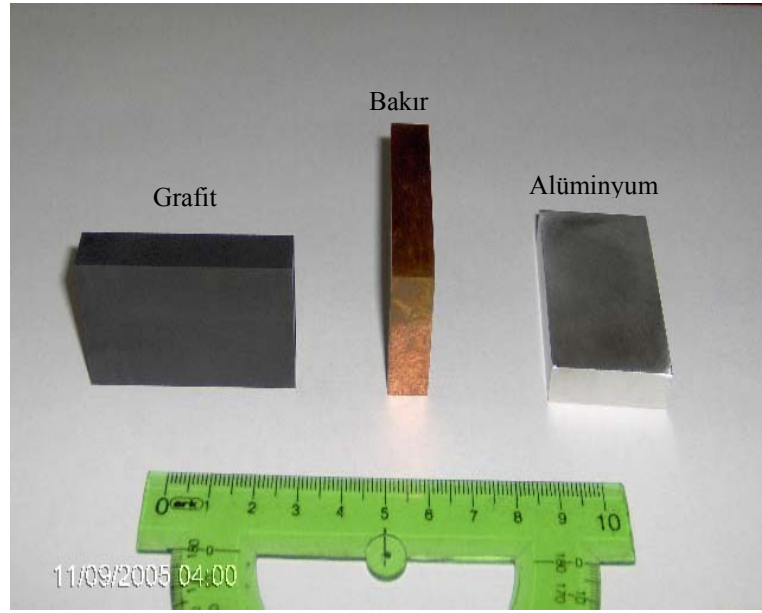
Tablo 5.2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.

Sertlik (HV)	600
Erime noktası (°C)	1660
Maksimum çekme dayanımı (Mpa)	832
Akma dayanımı (Mpa)	745
Çentik darbe tokluğu (J)	34
Elastik modülü ($\times 10^6 \text{ Mpa}$)	11.3

Elektro erozyon ile işlemede farklı elektrotların işlem performansına olan etkilerini araştırmak amacıyla bu çalışmada üç farklı elektrot malzemesi kullanıldı. Bunlar; grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlardır. Kullanılan elektrotların fiziksel özellikleri Tablo 5.3’ de verilmiştir. Elektrotlar, $10 \times 30 \times 50 \text{ mm}^3$ ölçülerinde hazırlanmıştır. Şekil 5.2’ de kullanılan elektrotlar görülmektedir.

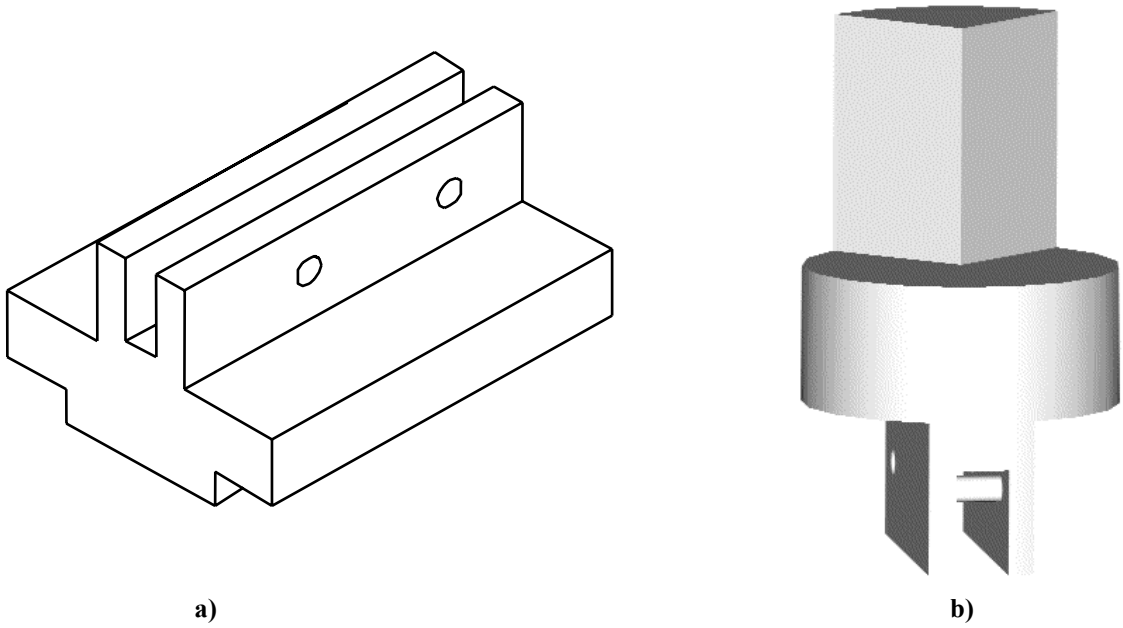
Tablo 5.3. Elektro erozyonda kullanılan elektrotların özellikleri.

Elektrot malzemesinin özellikleri	Elektrot malzemesi		
	Grafit	Bakır	Alüminyum
Yoğunluk (g/cm^3)	1.77	8.905	2.75
Erime noktası (°C)	3300	1083	660
Elektriksel direnç ($\mu\Omega.\text{cm}$)	1400	8.9	14.2
Sertlik (HB)	7	100	40

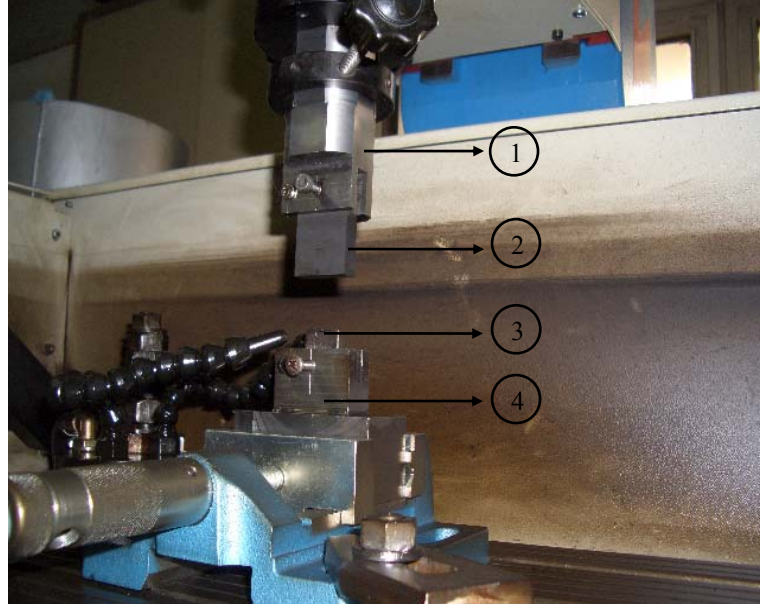


Şekil 5.2 Elektro erozyon işleminde kullanılan elektrotlar.

Elektro erozyon deneylerini kolaylaştırmak ve deneysel verimliliği artırmak amacıyla hem iş parçası hem de elektrotlar için birer tutucu yapılmıştır. Şekil 5.3’ de hazırlanan tutucuların şematik resimleri ve Şekil 5.4’de tutucuların tezgah üzerindeki konumları görülmektedir.



Şekil 5.3 İş parçası ve elektrot tutucuları (a: iş parçası tutucusu, b: elektrot tutucu).



Şekil 5.4 Tutucuların tezgah üzerindeki konumları (1: Elektrot tutucu, 2: Elektrot, 3: İş parçası, 4: İş parçası tutucusu).

5.3.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Elektro erozyon yönteminde en etkin işleme parametreleri, akım (A), gerilim (V), vurum süresi (μs) ve vurum ara süresi (μs)'dır. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalarda [141,142], bu dört parametre içerisinde talaş kaldırma oranını ve yüzey yapısını etkileyen en önemli parametrelerin akım (A) ve vurum süresi (μs) olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da bu iki temel parametre seçilmiş ve bu parametrelerin kombinasyonlarına ve kullanılan tezgahın işleme aralıklarına göre bir deneysel tasarım yapılmıştır. Deneylerle ilgili detaylar Tablo 5.4' de verilmiştir. Deney numaraları ve kullanılan tüm işleme şartları Tablo 5.5' de verilmiştir.

Tablo 5.4. Elektro erozyon deneyleri ile ilgili detaylar.

İşleme parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Akım (A)	3	6	12	25
Vurum süresi (μs)	25	50	100	200
Vurum ara süresi (μs)	25	---	---	---
Dielektrik	Gazyağı			
Dielektrik püskürtme	Yandan tazyikli püskürtme			
Dielektrik püskürtme basıncı (Mpa)	0.6			
Elektrot malzemesi	Grafit	Elektrolitik bakır	Alüminyum	

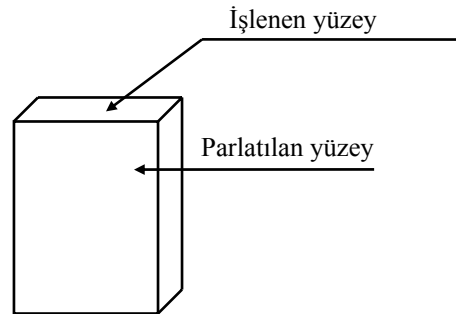
Deneylerde, sıvı sirkülasyon basıncı (0.6 Mpa), işleme gerilimi (80V) ve vurum ara süresi (25 μ s) sabit tutulmuştur. Elektrot malzemesinin iş parçasına 2 mm dalması esas alınmıştır. Her bir elektrot ile 16, toplam 48 deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneylerde ortamdaki kaynaklanabilecek ölçüm hatalarını indirmek için her bir deney 3 defa yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

Tablo 5.5. EEİ ile işlemede kullanılan işleme parametreleri.

Deney no	Akım (A)	Vurum süresi (μ s)
1	3	25
2	3	50
3	3	100
4	3	200
5	6	25
6	6	50
7	6	100
8	6	200
9	12	25
10	12	50
11	12	100
12	12	200
13	25	25
14	25	50
15	25	100
16	25	200

5.3.2. Metalografik İncelemeler

Deneyler sonucunda, numunelerin yüzey görüntüleri, ısıdan etkilenen bölgeleri ve mikroyapılarını belirlemek için, işlenen yüzeye komşu bir yüzey seçilmiş ve seçilen yüzey sırasıyla, 200, 400, 600, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalar kullanarak taşlanmış ve daha sonra 3 μ m'luk elmas pasta kullanılarak çuhayla parlatılmıştır (Şekil 5.5). Parlatılan yüzeyler, kimyasal olarak daldırma yöntemiyle Keller çözeltisi (2ml HF, 10ml HNO₃ ve 88ml saf su) kullanılarak dağlanmış. Numuneler dağlayıcı içerisinde yaklaşık 20 saniye bekletilmiştir. Dağlama işlemi sonrası, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 5.5 Metalografik İnceleme Bölgeleri.

SEM mikroskop çalışmaları, Kırıkkale Üniversitesi, Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan JEOL JSM – 5600 marka mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.1. XRD ve EDS Analizleri

SEM ile birlikte, elektro erozyon ile işlenmiş numunelerin yüzeylerinde oluşan elementer içerikleri ve fazları tespit etmek için EDS (energy dispersive spectrograph) ve XRD (X – ray diffraction) analizleri yapılmıştır. EDS ve XRD analizleri, Kayseri Erciyes Üniversitesi, Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.2. Mikrosertlik Ölçümleri

Elektro erozyon ile işleme neticesinde, numunelerde meydana gelen ısıdan etkilenen bölge derinliğinde sertlik değişimini belirlemek amacıyla, yüzeyden ve enine kesit boyunca mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Mikrosertlik ölçümleri, Leica Q500/W mikrosertlik cihazında Vickers sertlik skalası ile 10 gr'lık yük kullanılarak yapılmıştır. Her bir numune üzerinde, yüzeyden itibaren 25 µm aralıklarla, ana malzeme sertliğine ulaşmaya kadar sertlik ölçümü yapılmıştır.

5.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ölçüm hatalarını minimize etmek için bir numune tutucu hazırlanmış ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı için bir altlık geliştirilmiştir. Ölçümler, Mitutoyo SurfTest – 211 cihazında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm uzunluğu olarak cihazda mevcut olan üç farklı aralık da kullanılmış ve her bir aralık için toplam 5 ölçüm alınmıştır. Ölçümler yüzeye paralel ve dik olarak alınmış ve bu değerlerin ortalaması ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmiştir.

5.3.4. Elektrot Aşınması ve Talaş Kaldırma Oranlarının Belirlenmesi

Elektrot aşınması ve talaş kaldırma oranlarını belirlemek amacıyla, elektro erozyon işleminde kullanılan takım elektrotlarının ve iş parçalarının işlem öncesi ve sonrası ağırlıkları 10^{-4} hassasiyete sahip bir teraziyle ölçülmüştür. Elektro erozyon deneylerinde takım elektrotunun iş parçasına 2 mm dalması esas alınmış ve her bir deney için işleme süresi elektronik kronometre ile belirlenmiştir. İşlem sonrası talaş kaldırma oranı, birim zamanda malzeme yüzeyinden kaldırılan toplam malzeme hacmi ve elektrot aşınması ise, işlem öncesi ve sonrası ağırlık kaybı cinsinden bulunmuştur. Ağırlık ölçümlerinde grafit elektrotun toz yapısından dolayı sıvıyı emdiği ve ağırlığının arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu grup elektrotlar, 300 °C' de 4 saat kurutulmuş ve ağırlıkları tekrar ölçülmüştür.

5.4. Elektrokimyasal Taşlama Deneyleri

Kimyasal taşlama deneylerindeki amaç, elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerde oluşan istenmeyen tabakaların yüzeyden kaldırılmasıdır. Dolayısı ile yöntem bir bitirme işlemidir. Bu yöntemde en etkin parametreler, gerilim (V), elektrolit konsantrasyonu (gr/lt), elektrolit akma hızı (m³/dak) ve tabla ilerleme miktarıdır. Kullanılan tezgahın teknik kapasitesi ve operatör deneyimleri dikkate alındığında kimyasal taşlama için yapılan deney şartları Tablo 5.6’ da verilmiştir.

Elektrokimyasal taşlama deneyleri Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığı Tusaş Motor A.Ş. (TEİ) merkez atölyesinde bulunan Anocut (ECG – SG12X36 Model) marka bir kimyasal taşlama tezgahında gerçekleştirilmiştir. Bu kurumda uygulanan askeri kurallar gereği kullanılan tezgahın görüntüleri alınamamıştır.

Kimyasal taşlama deneylerinin incelemeleri, elektro erozyon deneyleri ve incelemelerini müteakip, aynı numunelerin elektro erozyon deneysel çalışmalarına benzer şekilde incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.6. Elektrokimyasal taşlama deney şartları.

İşleme şartları	1. durum	2. durum	3. durum	4. durum
İşleme voltajı (V)	2	4	6	8
Talaş derinliği (µm)	50	-	-	-
Tabla ilerleme miktarı (mm/dak)	6	12	18	24
Elektrolit	NaNO ₃			
Elektrolit akma oranı (l/saat)	500	1000	1500	2000
Elektrolit konsantrasyonu (g/lt)	180	-	-	-
Elektrolit iletkenliği (S/cm)	0.20	-	-	-
Elektrolit sıcaklığı (°C)	29	-	-	-
Taşlama taşı (Bakır)	EC BOND A100V4CD (Ticari ismi)			
Taş boyutu (cm ³)	305 × 6.5 × 77			
Taş imalatçı firma	CopperDyne			
Taşa abrasiv giydirme firması	Westboro, MA			

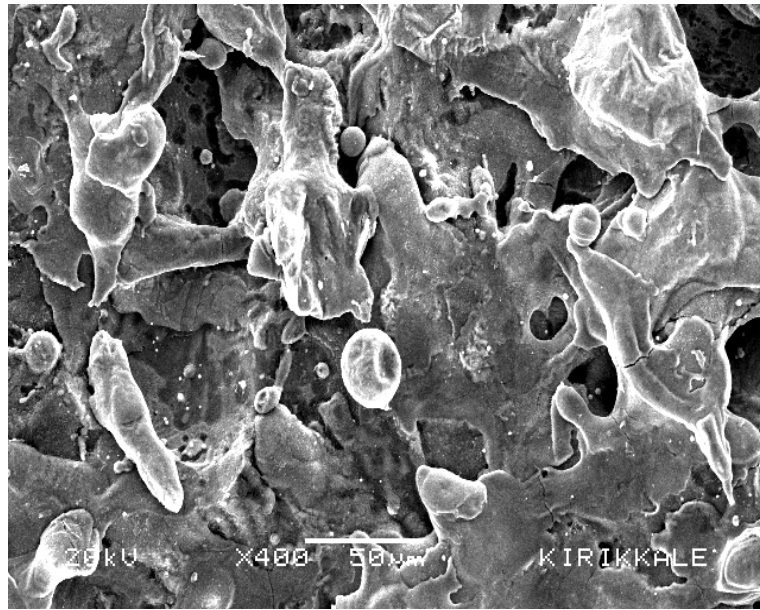
6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

6.1. Elektro Erozyon Deney Sonuçları

6.1.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları

6.1.1.1. Yüzey Yapısı

Şekil 6.1’ de elektro erozyon ile işlenmiş tipik bir yüzeyin görüntüsü verilmiştir. Yüzey, klasik işleme yöntemlerinde olduğu gibi, yönlü ve damarlı bir yapıda değildir. Yüzey karakteristikleri incelendiğinde, elektro erozyon yönteminin titanyum alaşımı üzerinde büyük hasarlara yol açtığı görülmektedir. Yüzey, malzemeden kaldırılan ve sıvı basıncı ile ara bölgeden uzaklaştırılamayan küresel taneciklerden, eriyerek yüzeye damla şeklinde yapışan döküntülerden, çatlak, kalıntı ve farklı ebatlarda gelişmiş güzel dağılmış kraterlerden oluşmaktadır. Bu kraterler, işleme esnasında her bir kıvılcımın etkisi ile yüzeyden kaldırılan küresel talaşların meydana getirdiği oyuklar olarak nitelendirilmektedir. Elektro erozyon ile işlemede, her bir elektriksel boşalım neticesinde oldukça yüksek bir ısı meydana gelmekte ve bu ısının etkisi ile iş parçasının yüzeyi yerel olarak ergitilmekte veya buharlaşmaktadır. Her bir kıvılcım ile iş parçasının yüzeyinde bir krater oluşurken, elektrot yüzeyinde de küçük bir miktar malzeme aşınır. Dolayısıyla, elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerin yönsüz bir yüzey profiline sahip olduğu söylenebilir. Bu yöntemde daha önce yapılan çalışmalarda [143 – 145]da elde edilen yüzeylerin benzer özellikler sergilediği belirtilmiştir. Yüzey görünümü açısından, farklı elektrot malzemeleri kullanılarak işlenmiş yüzeylerin benzer, ancak işlem şartlarına bağlı olarak farklı yoğunluklarda olduğu tespit edilmiştir.

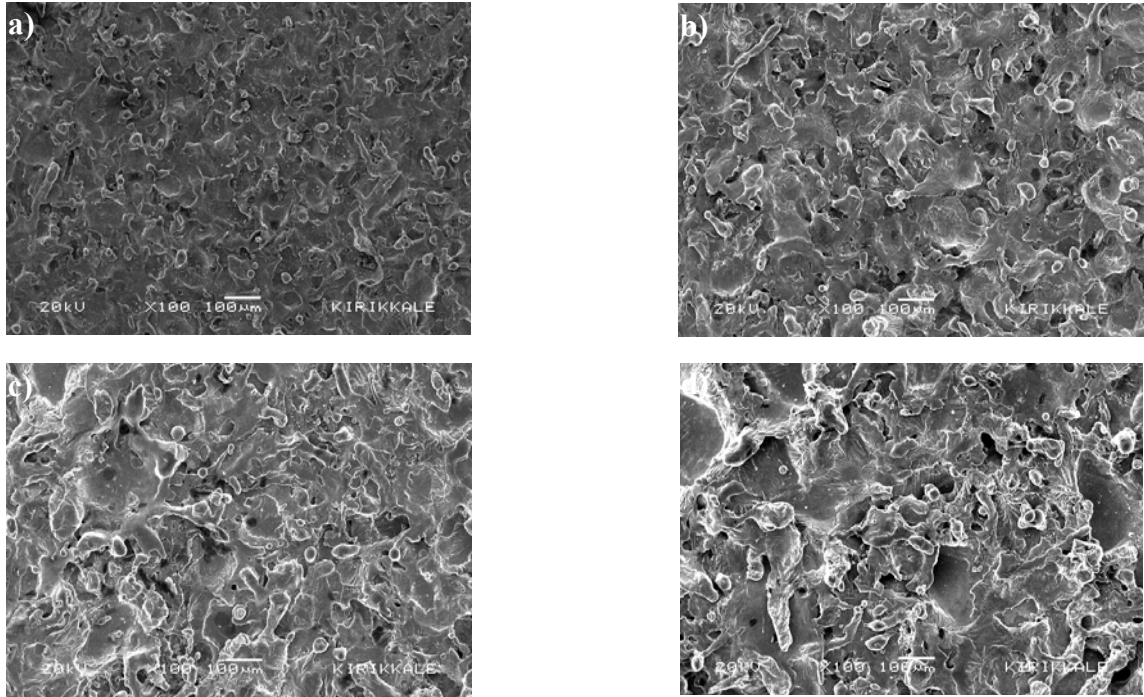


Şekil 6.1 Elektro erozyon ile işlenmiş tipik bir yüzey görüntüsü (Elektrot : Grafit, Akım : 6A, vurum süresi : 100µs).

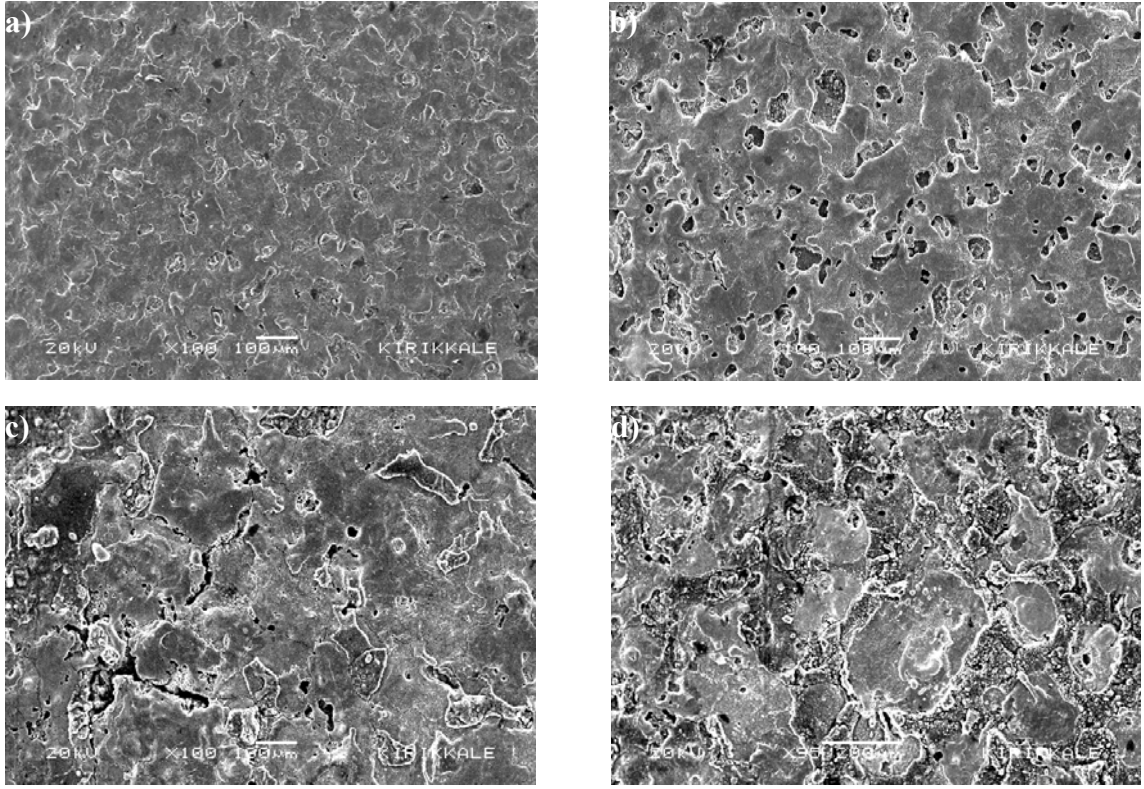
6.1.1.1.1. Akımın Yüzey Yapısına Etkisi

Şekil 6.2 – 6.4’ de sırasıyla farklı elektrot malzemeleri kullanılarak yapılan deneylerde diğer parametrelerin sabit tutulup akımın değişimi ile elde edilen yüzeyler görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, bütün elektrotlar için, akımın artmasıyla oluşan yüzey hasarları da artmaktadır. Akım şiddetinin artması, iş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olmasına yol açmakta ve bunun sonucu olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmaktadır. Yüzeyden kaldırılan talaş miktarının artması, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de kötüleştirmektedir [146 – 148].

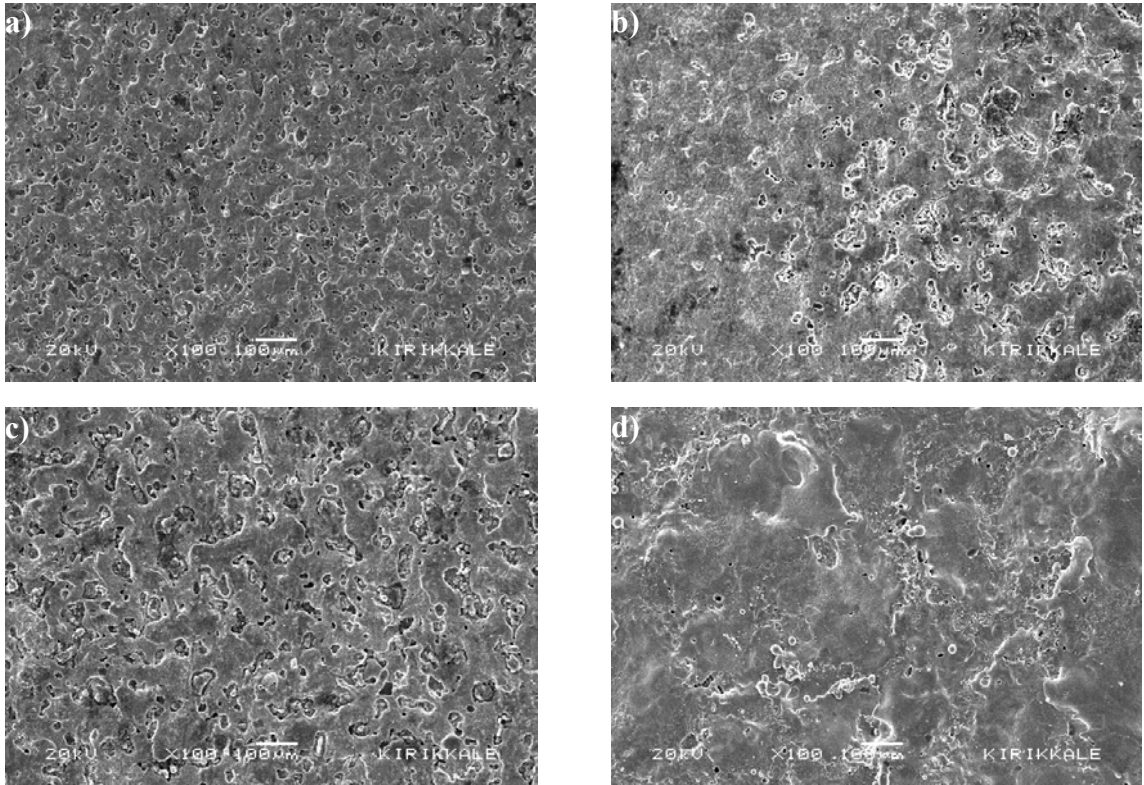
Aynı akım değerlerinde yapılan deneylerde, en kaba yüzeylerin grafit elektrot ile işlenmiş numunelerde elde edildiği, bunu bakır ve alüminyum elektrotlarla işlenen yüzeylerin takip ettiği görülmektedir. Bu eğilim, hem düşük hem de yüksek akım değerlerinde korunmaktadır. Bu durum, elektrot malzemelerinin termal iletkenlikleri ile ilişkilendirilebilir. Grafit düşük iletkenlik ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olduğundan, ara bölgede oluşan ısının daha yoğun bir şekilde iş parçasına etkimesi ile yüzeyde oluşan kraterler daha derin ve geniş olmaktadır. Buna karşın, bakır grafitte nazaran daha yüksek iletkenliğe sahip olduğundan, sıcaklık elektrot üzerinden daha hızlı bir şekilde uzaklaşmaktadır. Alüminyum elektrotlarda ise, termal iletkenliğin bakıra nazaran daha düşük olmasına karşın, ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı, elektrot aşınması ve yüzeye sıvanma eğilimi artmaktadır. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün nispeten iyileşmesine yol açmaktadır.



Şekil 6.2 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Grafit, Vurum süresi: 100µs).



Şekil 6.3 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Bakır, Vurum süresi: 100 μ s).

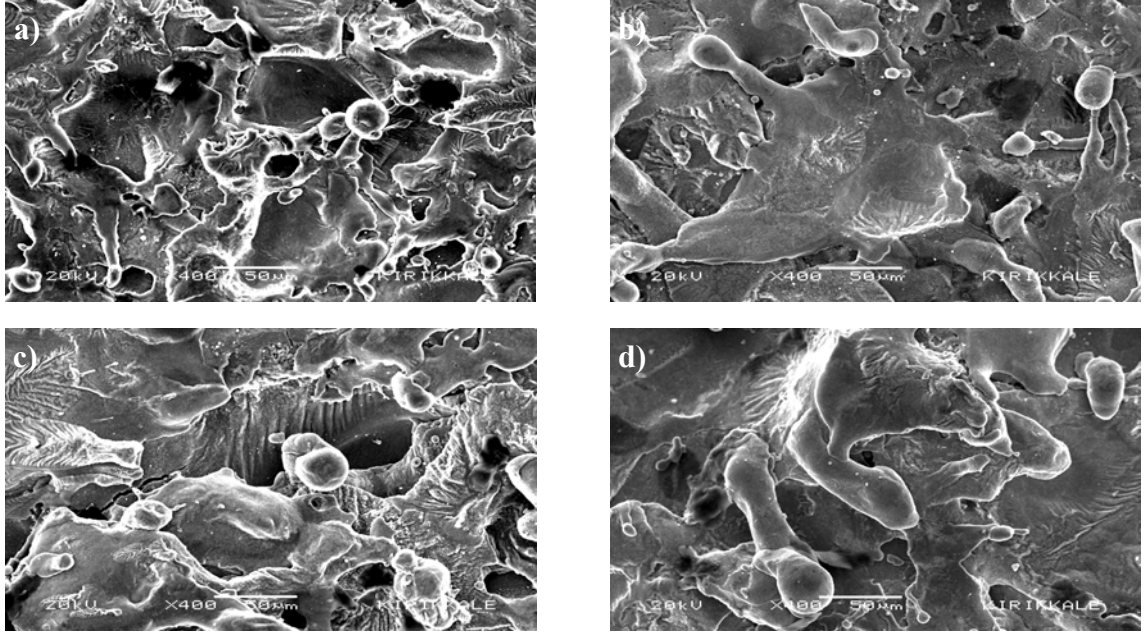


Şekil 6.4 Akım parametresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Alüminyum, Vurum süresi: 100 μ s).

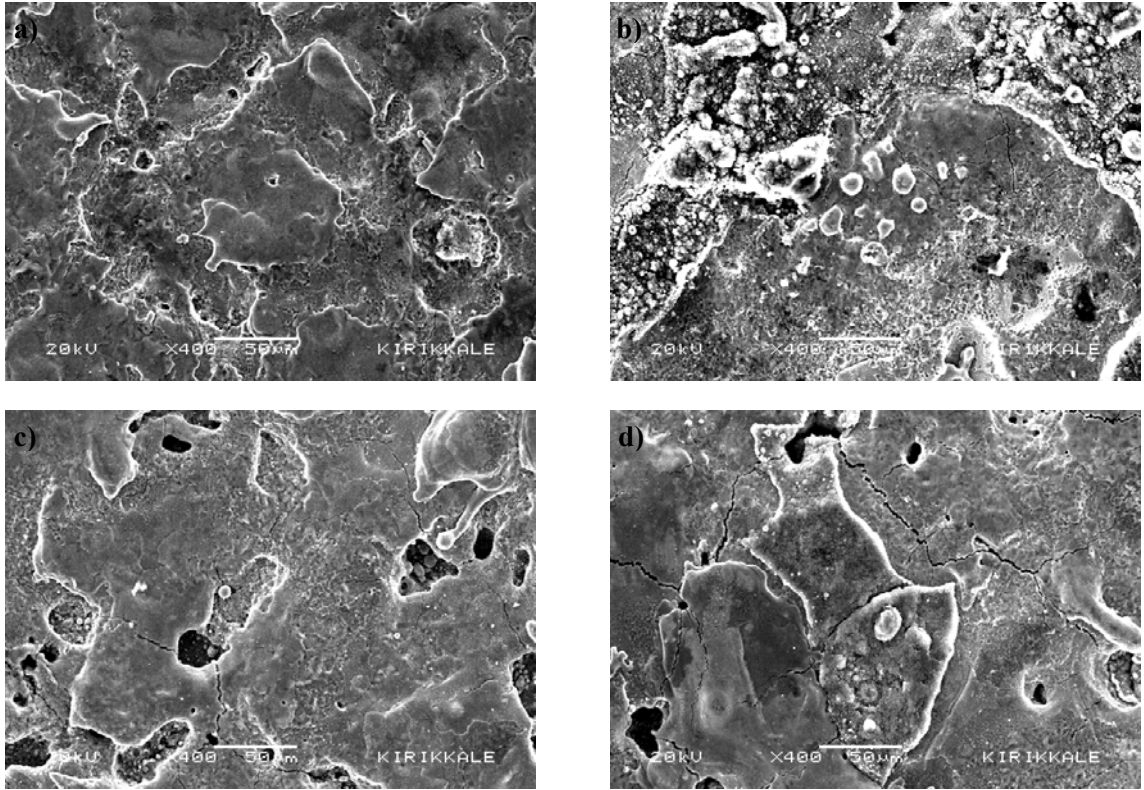
6.1.1.1.2. Vurum Süresinin Yüzey Yapısına Etkisi

Şekil 6.5’ de sabit akım değerlerinde vurum süresinin değişimi ile farklı elektrotlar kullanılarak elde edilen yüzeyler görülmektedir. Yüzey hasarları akımın etkisine benzer şekilde vurum süresinin artmasıyla artmaktadır. Ancak, vurum süresinin 200 μ s olduğu durumda yüzeyler, bir miktar iyileşmektedir. Vurum süresi, elektrota uygulanan elektrik zamanının uzunluğudur. Bir başka ifade ile boşalmanın gerçekleştiği aralıktır. Dolayısıyla bu parametredeki artış, iş parçasının yüzeyine daha fazla bir ısı enerjisinin transfer edilmesine yol açmakta ve daha fazla malzemenin erimesine neden olmaktadır. Elektro erozyon ile işlemede, elektriksel boşalım plazma kanalı denilen bir aralıktan iş parçasının yüzeyine aktarılmaktadır. Literatürde bu kanalın ortamdaki sıvı ile çevrelendiği ve akım geçimini müteakip, vurum ara süresi boyunca parçalandığı ve yeni boşalmanın başlaması ile tekrar oluştuğu belirtilmektedir. Bu kanal, ısının da etkisiyle genişleyen bir buhar balonu içerisinde iş parçası ile elektrot arasında bir köprü olmakta ve akım geçimini sağlamaktadır. Lee ve diğ. [149] yaptıkları çalışmada, akım parametresini sabit tutarak vurum süresinin değişimi ile oluşan plazma kanalının yarıçapını araştırmıştır. Çalışmada, plazma kanalındaki genişleme ile iş parçası yüzeyine daha az miktarda enerji geçiminin olduğunu ve talaş kaldırma miktarının azaldığı belirtilmiştir. Vurum süresinin daha fazla artması ile benzer etkininin daha da göze çarptığına değinilmiştir. İşlem anında vurum süresi boyunca yüzeyden kaldırılan metal eriyik halde kraterlerin iç kısımlarında bulunmaktadır. Vurum ara süresinin başlaması ile özellikle kraterlerin en derin noktalarındaki metaller dışarı atılmadan kraterlerin iç kısmında katılaşmaktadır. Dolayısıyla oluşan krater derinliği azalmakta ve daha geniş fakat yayvan kraterler yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmektedir.

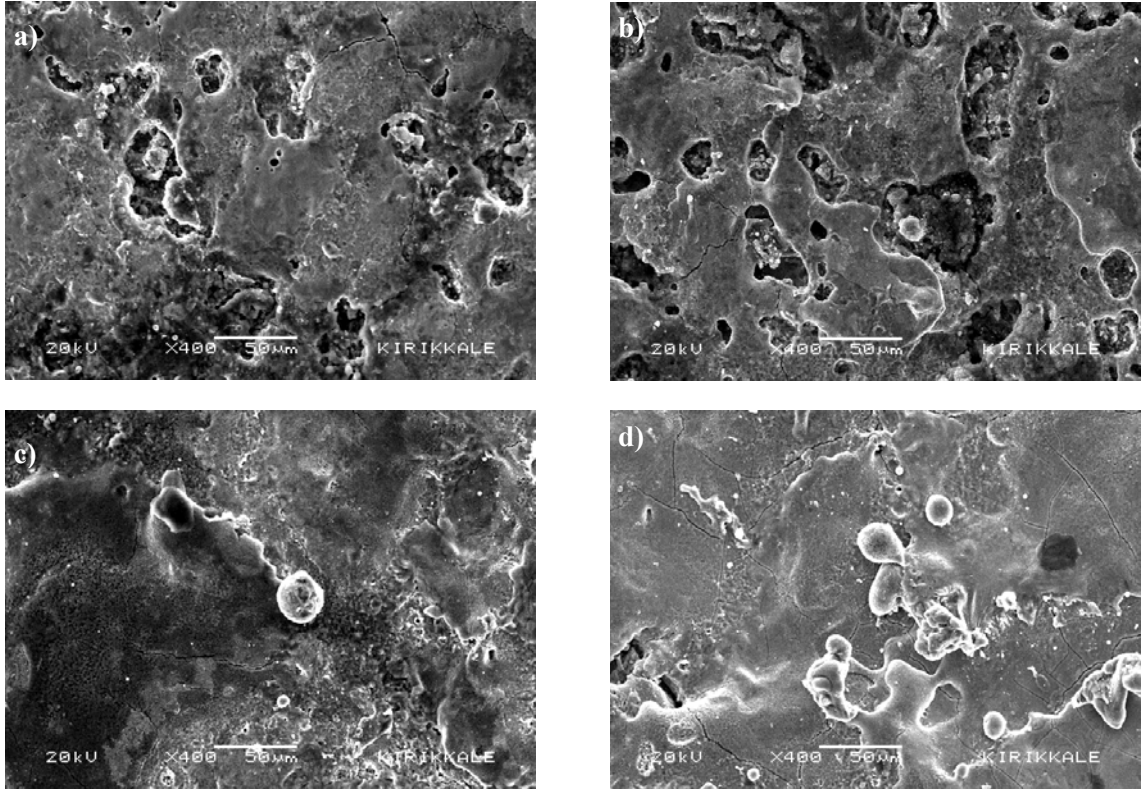
Elektrot malzemesi açısından şekiller değerlendirildiğinde, akımın etkisine benzer şekilde grafit elektrot ile işlenmiş yüzeylerin yine en kaba olduğu, bunu bakır ve alüminyum elektrotların izlediği görülmektedir.



Şekil 6.5 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25 μ s, b: 50 μ s, c: 100 μ s, d: 200 μ s, Elektrot: Grafit, Akım: 12A).



Şekil 6.6 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25 μ s, b: 50 μ s, c: 100 μ s, d: 200 μ s, Elektrot: Bakır, Akım: 12A).

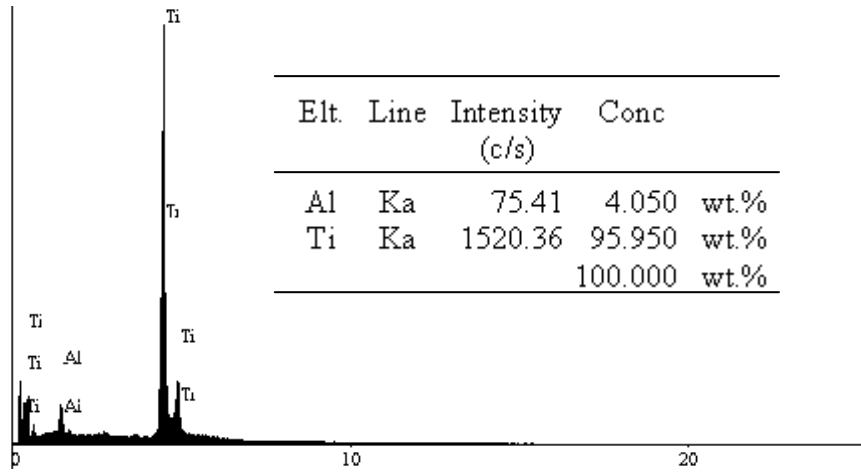


Şekil 6.7 Vurum süresinin yüzey yapısına olan etkisi (a: 25 μ s, b: 50 μ s, c: 100 μ s, d: 200 μ s, Elektrot: Alüminyum, Akım: 12A).

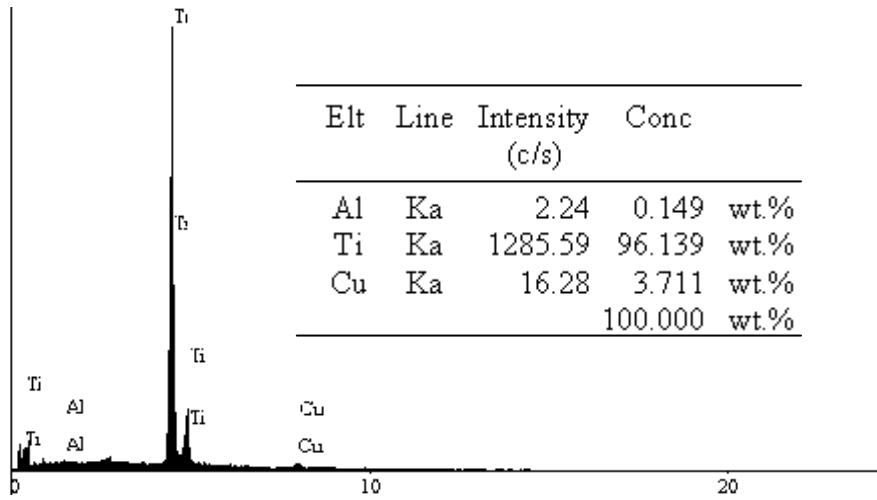
6.1.1.2. EDS ve XRD Sonuçları

Şekil 6.8 – 6.10’ da farklı elektrotlarla işlenmiş yüzeylerden alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, işlenmiş yüzeylerin, ağırlıklı olarak iş parçası malzemesi ve bir miktar da elektrot malzemesinden oluştuğu görülmektedir. Elektrot malzemelerinin ergime sıcaklıkları dikkate alındığında, elektrot malzemesinden iş parçası yüzeyine elektrot malzemesi geçimi alüminyum elektrotlarda daha fazla olmaktadır . Bu durum, takım aşınmasının artmasına karşın, yüzey pürüzlülüğünün nispeten iyileşmesine yola açmaktadır.

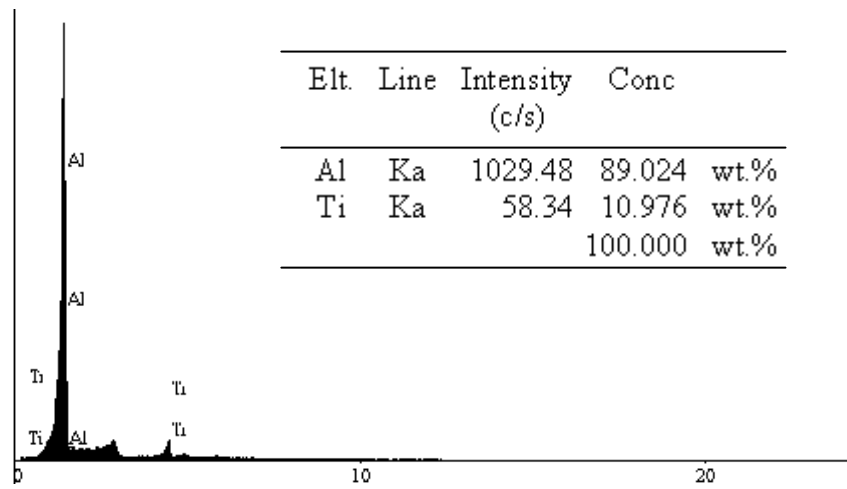
Elektrotlar arasında akım geçimi tamamlandıktan sonra, plazma kanalı ve buhar balonu söner. Buhar balonu içindeki iş parçası ve bir miktar elektrot malzemesi eriyiği ve dielektrik sıvıdan buharlaşan bir miktar gaz ortam içerisinde (işleme bölgesi) dağılırlar. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bu karmaşık patlama, bir miktar elektrot malzemesinin de iş parçası yüzeyine yapışmasına neden olur [150].



Şekil 6.8 Grafit elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.



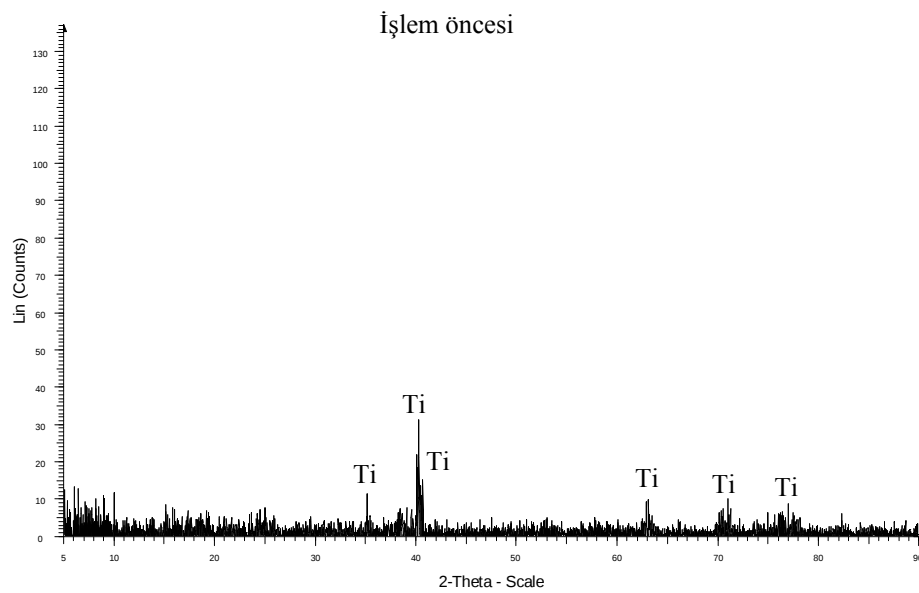
Şekil 6.9 Bakır elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.



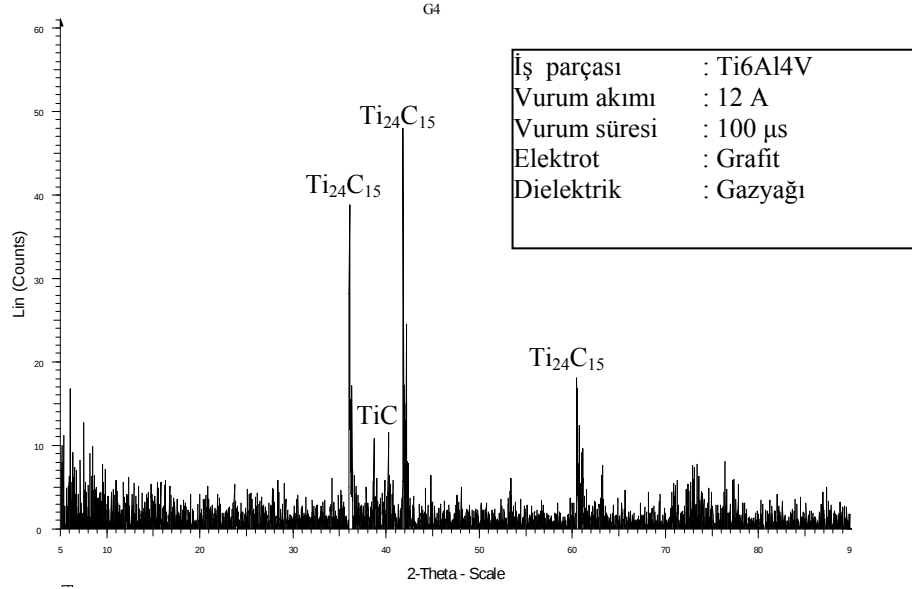
Şekil 6.10 Alüminyum elektrot ile işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.

Numunelerin işlem sonrasında yüzeylerinde oluşan fazları belirlemek amacıyla, ayrıca XRD analizleri alınmıştır. Şekil 6.11 – 6.14’ de sırasıyla numunelerin işlem öncesi ve farklı elektrot malzemeleri ile işlenmeleri neticesinde yüzeylerinden alınan XRD analizleri verilmiştir. Şekil 6.11 incelendiğinde, numunenin işlem öncesi XRD analizi neticesinde yüzeyde oluşan piklerin tamamı Ti pikleridir. En yüksek pik, 40.272 2θ değerinde elde edilmiştir. Numunelerin işlem sonrası analizleri değerlendirildiğinde, bütün elektrot malzemeleri için yüzeyde farklı 2θ değerlerinde ve yoğunluklarda $Ti_{24}C_{15}$ ve TiC karbürleri taranmıştır. Dolayısıyla yüzey karbür oluşumu ve yoğunluğunun elektrot malzemesine göre değiştiği söylenebilir.

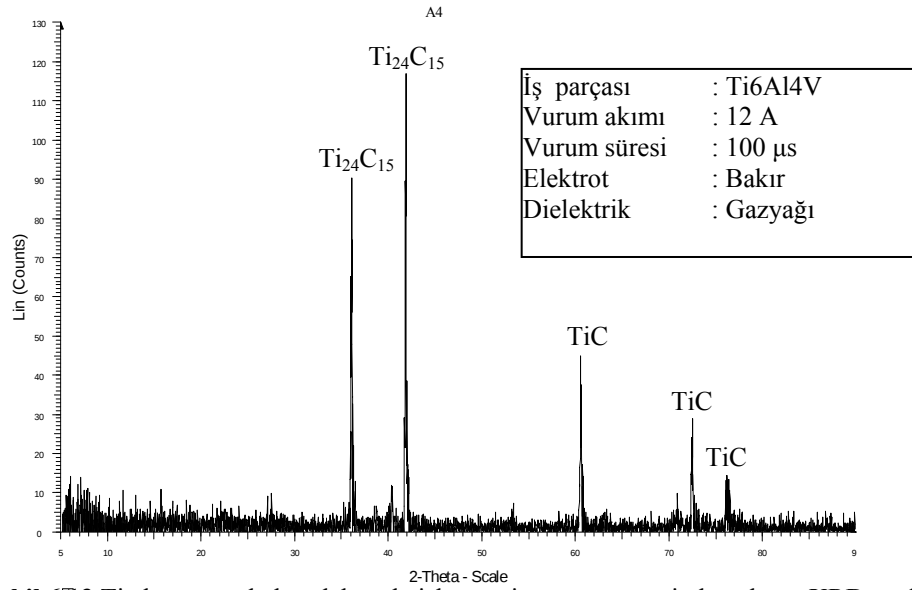
Elektro erozyon deneylerinde kullanılan dielektrik sıvı gazyağı olduğundan, yüzeyde $Ti_{24}C_{15}$ ve TiC karbürlerinin oluşması gayet doğaldır. İşlem anında elektrik kıvılcımları, gazyağını hidrojen ve karbon şeklinde bileşenlerine ayırmakta, dolayısıyla ayrışan karbon iş parçası yüzeyine, işlenen malzemenin cinsi ve uygulama şartlarına bağlı olarak difuze olmaktadır [151].



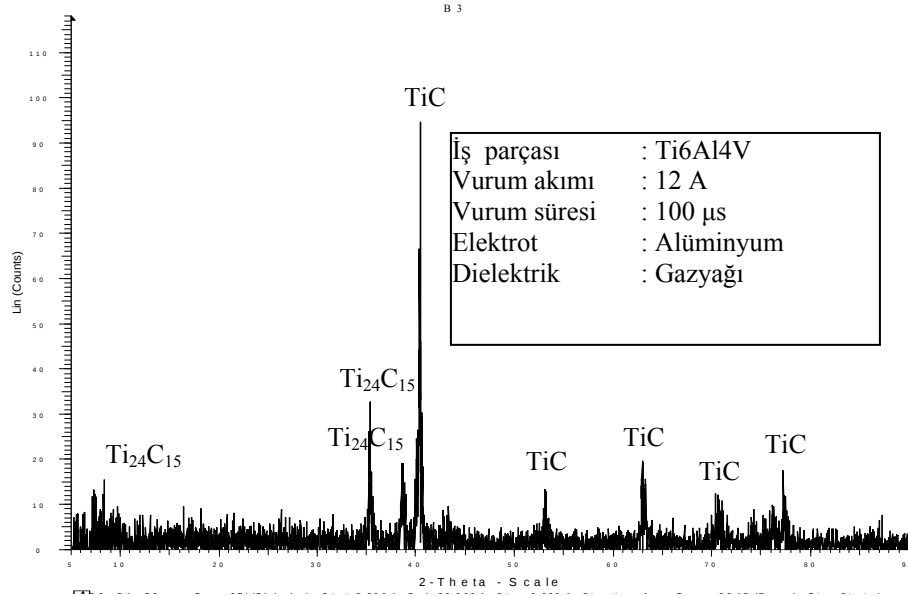
Şekil 6.11 Ti alaşımının işlem öncesi yüzeyinden alınan XRD analizi.



Şekil 6.12 Ti alaşımının grafit elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.



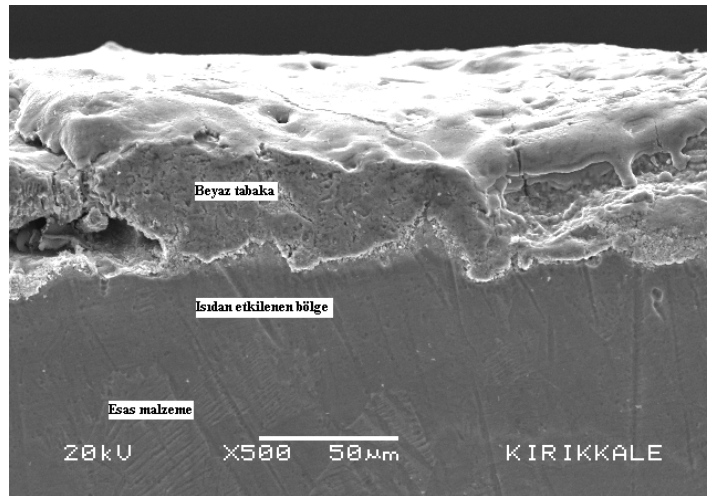
Şekil 6.13 Ti alaşımının bakır elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.



Şekil 6.14 Ti alaşımının alüminyum elektrotla işlenmesi sonucu yüzeyinden alınan XRD analizi.

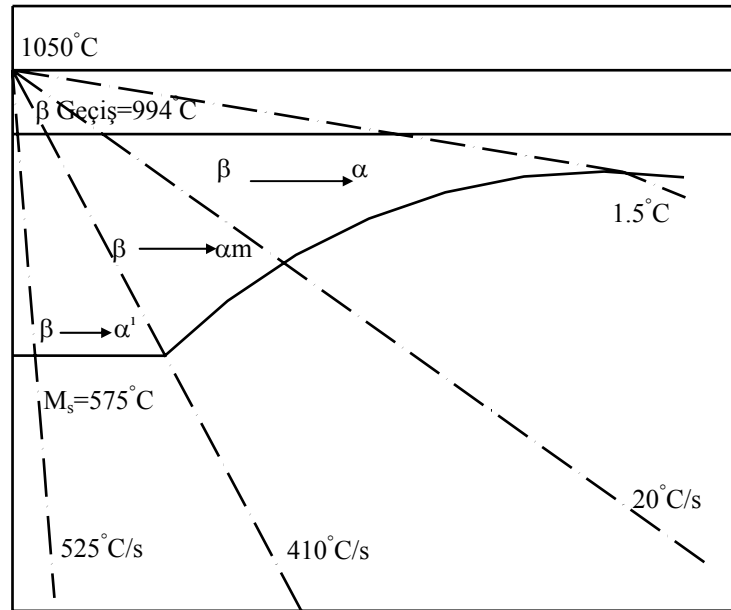
6.1.1.3. Beyaz Tabaka Kalınlığı ve Yüzey Çatlakları

Şekil 6.15’de işlenmiş bir yüzeyin komşu yüzeyinden alınan SEM görüntüsü görülmektedir. Fotoğraf incelendiğinde, üç farklı tabaka göze çarpmaktadır. En üstte bulunan tabaka beyaz tabakadır. Bu tabaka, elektro erozyon ile işlemede çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan ve yüzeyden kaldırılan ergimiş metalin dielektrik sıvısı ile ara bölgeden uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılaşması neticesinde oluşmaktadır. Bu tabaka, optik mikroskop altında beyaz renkte görüldüğünden ve standart dağlayıcılara karşı çok dirençli olduğundan beyaz tabaka ismini almaktadır.



Şekil 6.15 İşlenen yüzeye komşu yüzeydeki etkilenen bölgeler.

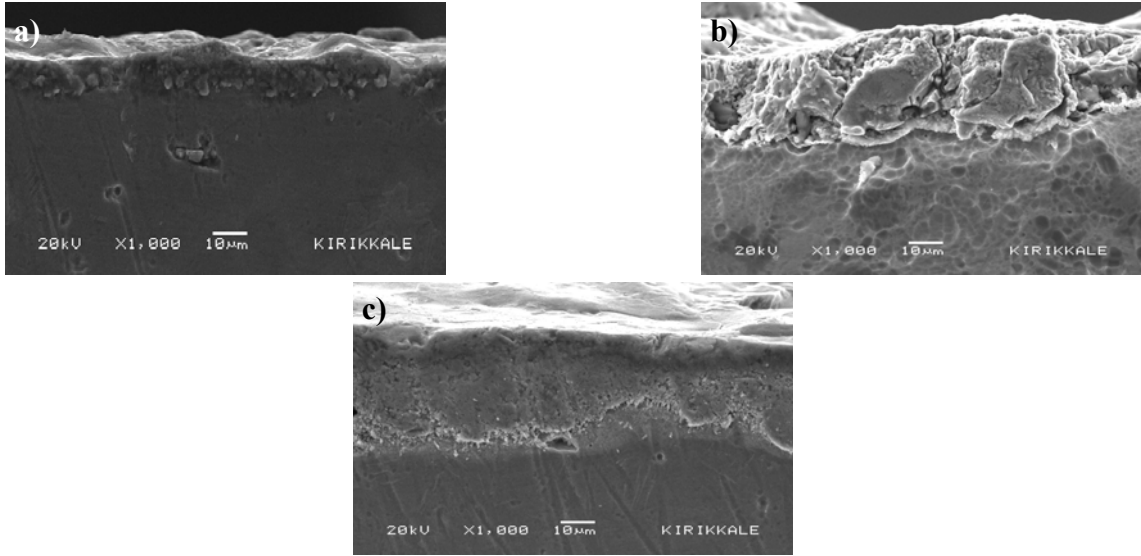
Şekil 6.15’ de görüldüğü gibi beyaz tabakanın metalografik ve mikroyapısal karakteristikleri ana malzemeden tamamen farklıdır. Şekil 6.16’da titanyum alaşımının soğuma oranına bağlı olarak faz dönüşüm diyagramı görülmektedir [152]. Şekil incelendiğinde, elektro erozyon ile işleme anında ara bölgede oluşan sıcaklık değerleri de dikkate alınarak, beyaz tabakanın mikroyapısının hegzagonal martenzitik α' olduğu tahmin edilebilir. Faz dönüşümü, işlenen malzemenin ısısal davranışına bağlıdır. İşlenen titanyum alaşımı düşük termal iletkenliğe sahip olduğundan ve yüzey altındaki bölgelerde nispeten daha yavaş ısınma ve soğuma sonucunda beyaz tabakanın altında ısıdan daha az etkilenen veya çok az temperlenmiş bir bölge olarak da adlandırılabilir bir tabaka bulunmaktadır. Son olarak esas malzeme gelmektedir. Tanımlanan bu üç farklı tabaka içerisinde en büyük önemi beyaz tabaka arz etmektedir [153]. Çünkü makine elemanlarından ortamla direk temas halinde olan tabaka sadece beyaz tabakadır. Dolayısıyla bu tabakanın kalınlığı işleme parametrelerine bağlı olarak tanımlanmalıdır.



Şekil 6.16 Ti6Al4V alaşımının soğuma hızına bağlı olarak faz yapısındaki değişim grafiği [152].

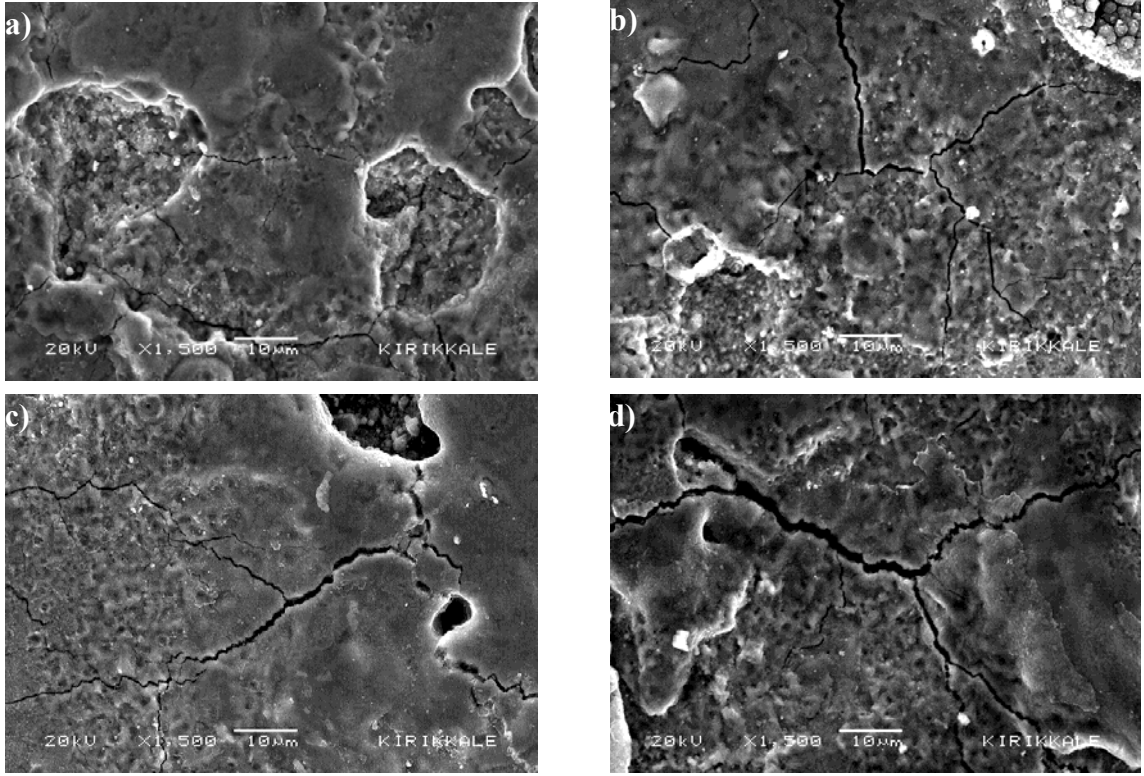
Şekil 6.17’de sabit akım ve vurum süreleri parametrelerinde farklı elektrot malzemeleri ile işlenmiş yüzeylerin kesitlerinden alınan ve beyaz tabaka kalınlıklarını gösteren SEM görüntüleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, en yüksek tabaka kalınlığı grafit elektrotla işlenmiş numunede meydana gelmekte, bunu bakır ve alüminyum elektrotlarla işlenmiş numuneler takip etmektedir. Beyaz tabakanın kalınlığı talaş kaldırma oranı ile doğrudan ilişkilidir. Kaldırılan talaş miktarındaki artışla birlikte bu tabakanın kalınlığı da

artmaktadır. İşlem anında yüzeyden kaldırılan malzemenin sadece % 15' i sıvı sirkülasyonu ile ara bölgeden atılabilmektedir. Geriye kalan kısmı yüzeyde yeniden katılaşmaktadır [153].

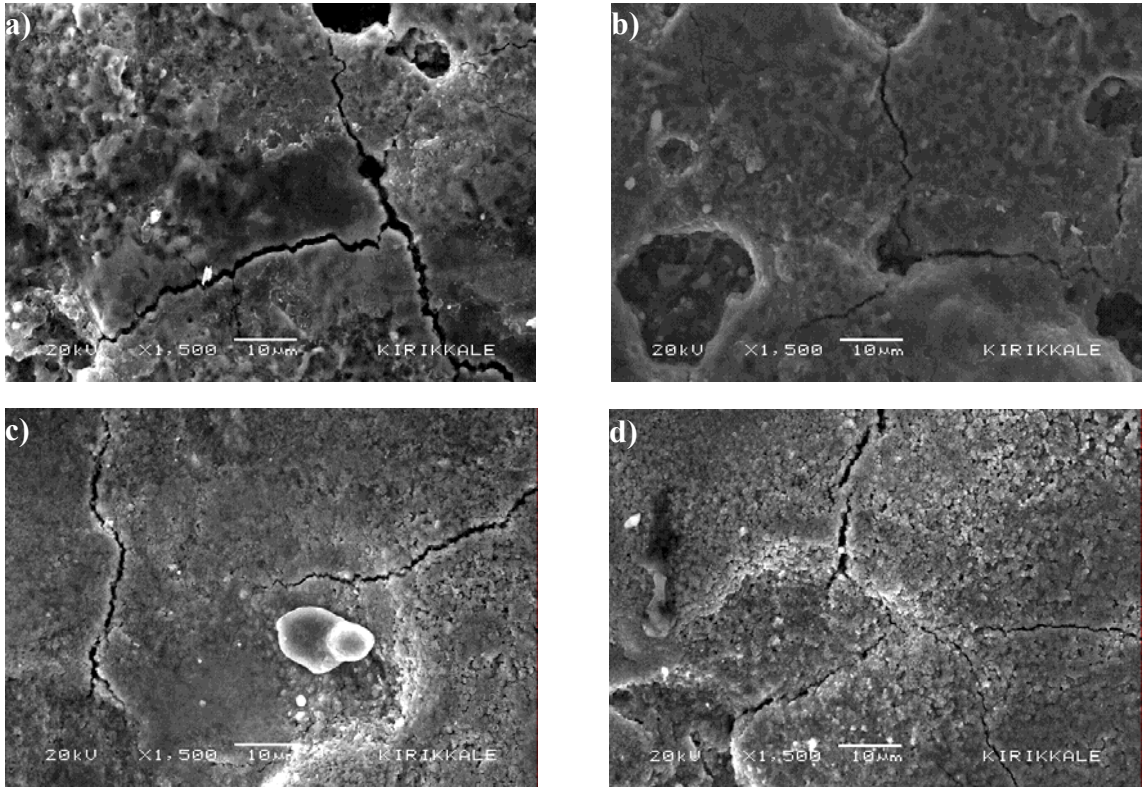


Şekil 6.17 Farklı elektrotlarla işlenmiş yüzeydeki beyaz tabaka kalınlıkları (a:Al, b: Cu, c: Gr).

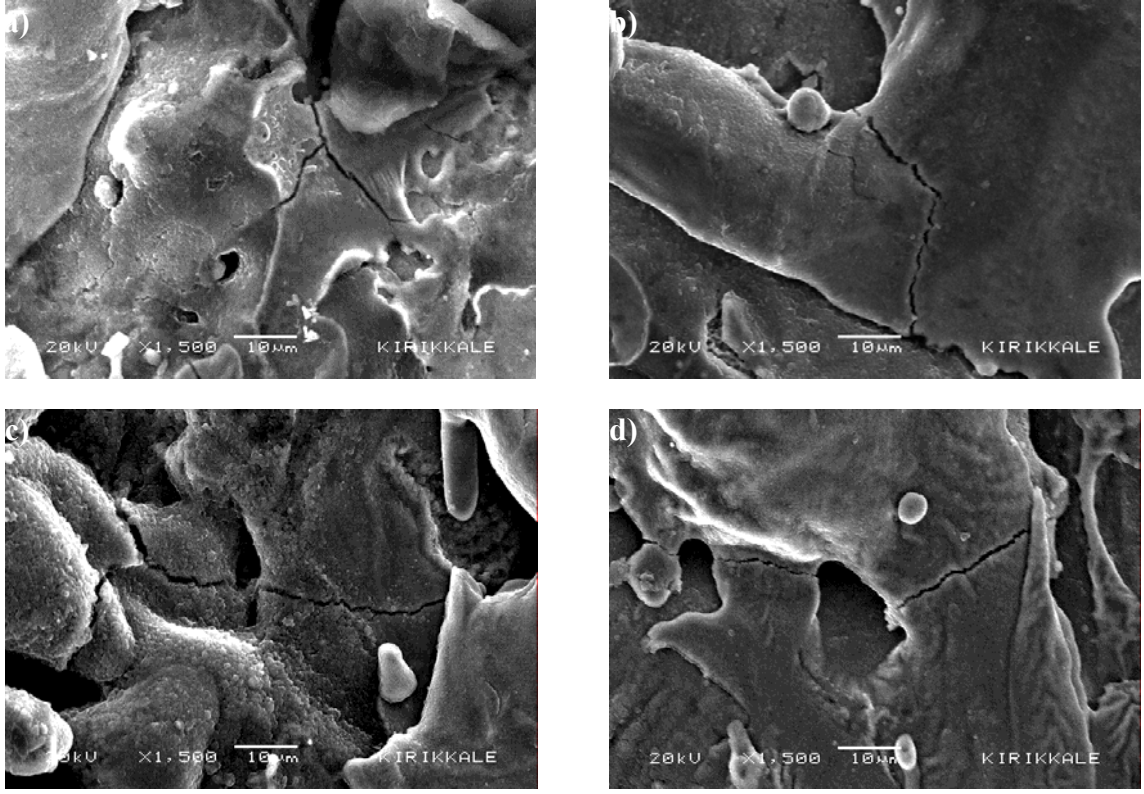
Termal etkinin bir sonucu olarak, iş parçasının yüzeyinde aynı zamanda çatlaklar da meydana gelmektedir. Şekil 6.18 – 6.20’de farklı elektrot malzemeleri ve işlem şartlarına bağlı olarak, yüzeylerde oluşan çatlak görüntüleri verilmiştir. Bu çatlaklar, plastik deformasyondan kaynaklanabildiği gibi, ayrıca malzemenin maksimum çekme mukavemetini aşan çok yüksek ısıl gerilmelerin oluşumundan kaynaklanmaktadır [153]. Yüzey çatlaklarının aynı zamanda beyaz tabakadan başlayıp esas malzemeye dik bir şekilde ilerlediği bilinmektedir. İşlem anında yüzeyde meydana gelen ani ısınma ve soğuma süreci akma gerilmelerinin hızlı bir şekilde artmasına yol açmaktadır. Isınma esnasında plastik olarak deformasyona uğramış bölgeler, eski haline geri dönememekte ve dolayısıyla çekme gerilmeleri yüzeye paralel bir şekilde dağılmakta ve bu da çatlakların yüzeye dik bir şekilde oluşmasına neden olmaktadır [154]. Literatürde, yüzeydeki çatlak yoğunluğu, birim alana düşen ortalama çatlak uzunluğu şeklinde tanımlanmaktadır [155].



Şekil 6.18 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Bakır, Vurum Süresi : 100µs).



Şekil 6.19 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Alüminyum, Vurum Süresi : 100µs).



Şekil 6.20 Akım parametresinin yüzey çatlamlarına olan etkisi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A, Elektrot: Grafit, Vurum Süresi : 100µs).

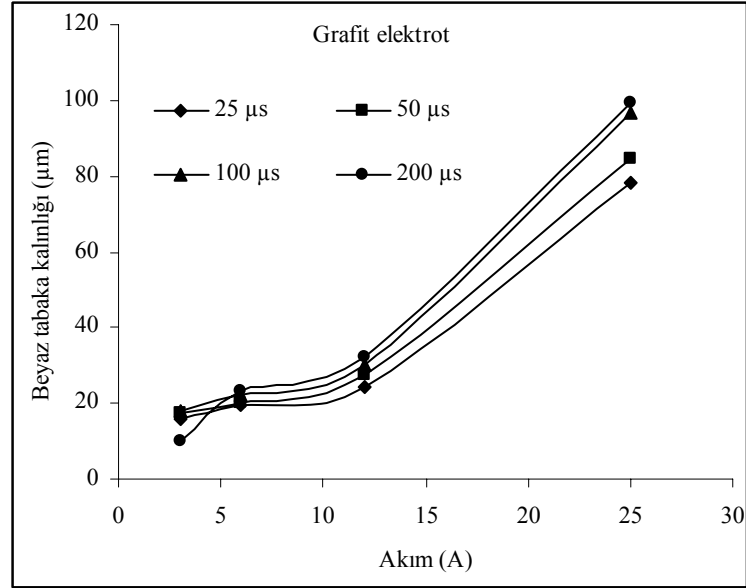
6.1.2. Beyaz Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

6.1.2.1. Akımın Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi

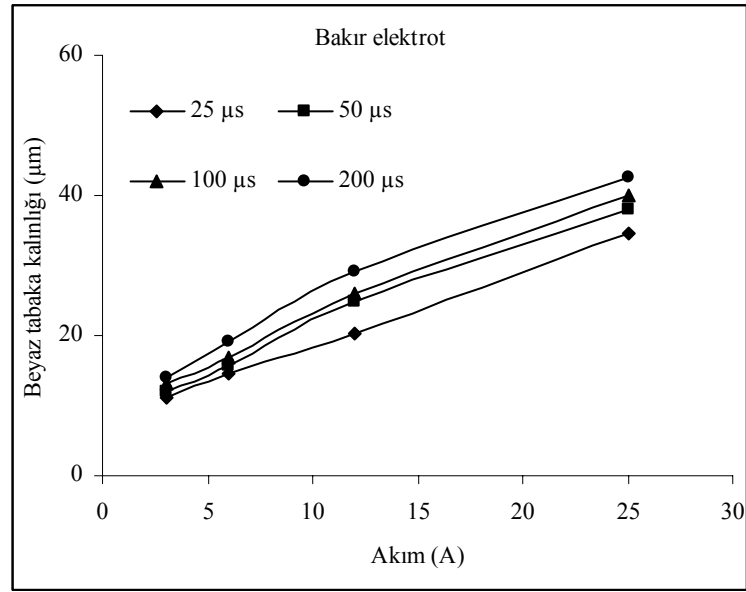
Tablo 6.1’de numunelerden ölçülen ortalama beyaz tabaka kalınlıkları toplu şekilde verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 6.21 – 23’de görülmektedir. Tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi, ortalama beyaz tabaka kalınlığı, sabit vurum süresi şartlarında, akım değerindeki artış ile önemli derecede artırmaktadır. Bu artış miktarı 3 ila 12 amper arasında daha az iken, akım miktarının 25 amper’e ulaşması ile daha da keskinleşmektedir. Akımın artmasıyla, yüzey sıcaklığı malzemenin erime sıcaklığına daha düzenli bir şekilde ulaşmakta ve daha fazla malzeme ergitilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak beyaz tabaka kalınlığı da artmaktadır. Beyaz tabaka kalınlıkları grafit elektrot ile işleme neticesinde 16.08 ila 99.18µm arasında değişirken, bakır elektrot ile işlenmiş yüzeylerde bu aralık 11.6 – 42.66µm’a düşmektedir. Alüminyum elektrot ile işlem neticesinde yüzeylerde oluşan beyaz tabaka kalınlıkları ise 5.43 - 34.66µm aralığındadır. Benzer sonuçlar, Ramasawmy ve diğ. [156]’ tarafından da belirtilmiştir.

Tablo 6.1. EDM sonrasında ölçülen ortalama beyaz tabaka kalınlıkları.

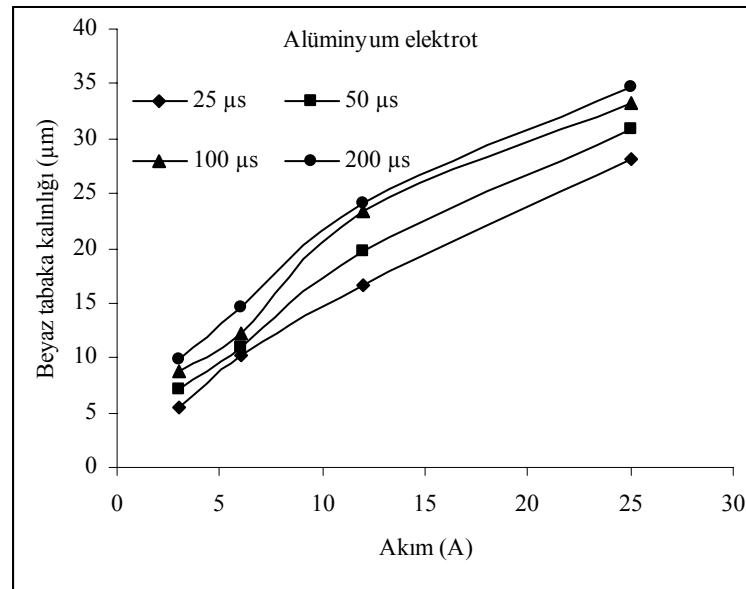
Deney no	Vurum Süresi (μs)	Ortalama beyaz tabaka kalınlığı (μm)		
		Grafit	Bakır	Alüminyum
1	25	16.08	11.16	5.43
2	50	17.62	12	7.12
3	100	18	13.17	8.76
4	200	19.03	14.07	9.89
5	25	19.76	14.69	10.25
6	50	20.18	15.73	11.01
7	100	22	17	12.23
8	200	23.26	19.18	14.68
9	25	24.12	20.15	16.71
10	50	27.36	24.73	19.66
11	100	30	26	23.31
12	200	32.43	29.19	24.18
13	25	78.32	34.66	28.16
14	50	84.63	38.11	30.89
15	100	96.89	40	33.32
16	200	99.18	42.66	34.66



Şekil 6.21 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Grafit).



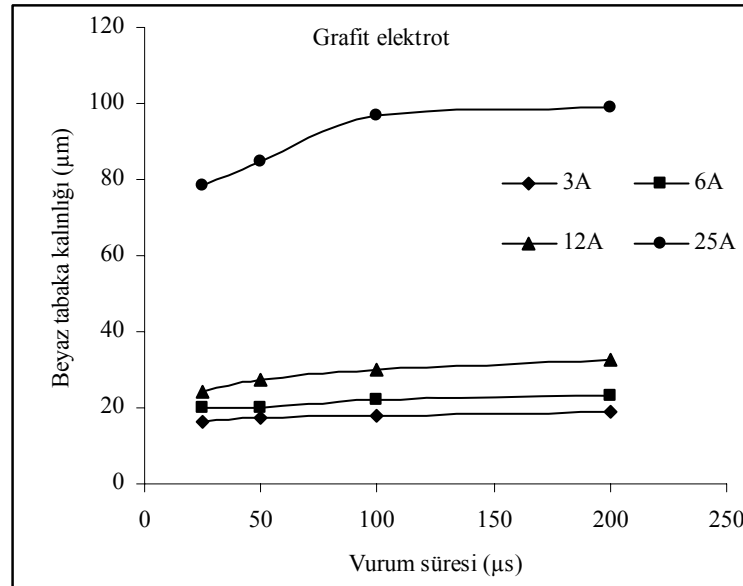
Şekil 6.22 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Bakır).



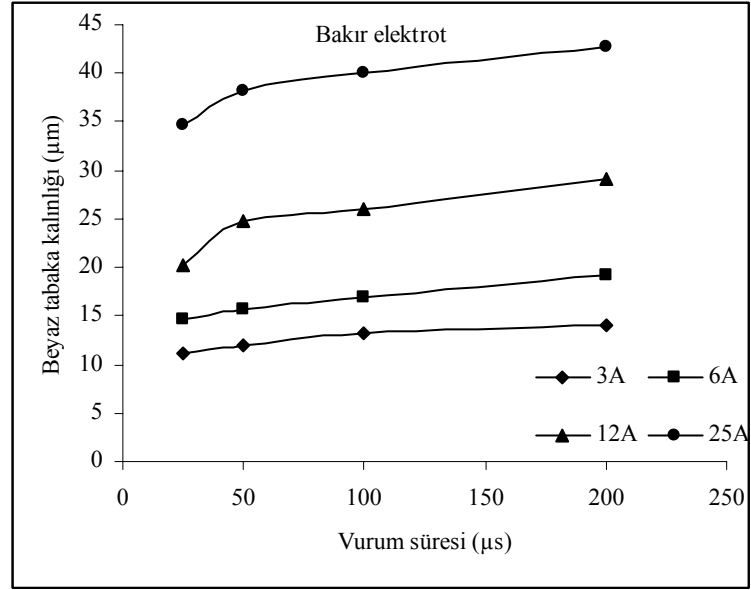
Şekil 6.23 Akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Alüminyum).

6.1.2.2. Vurum Süresinin Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi

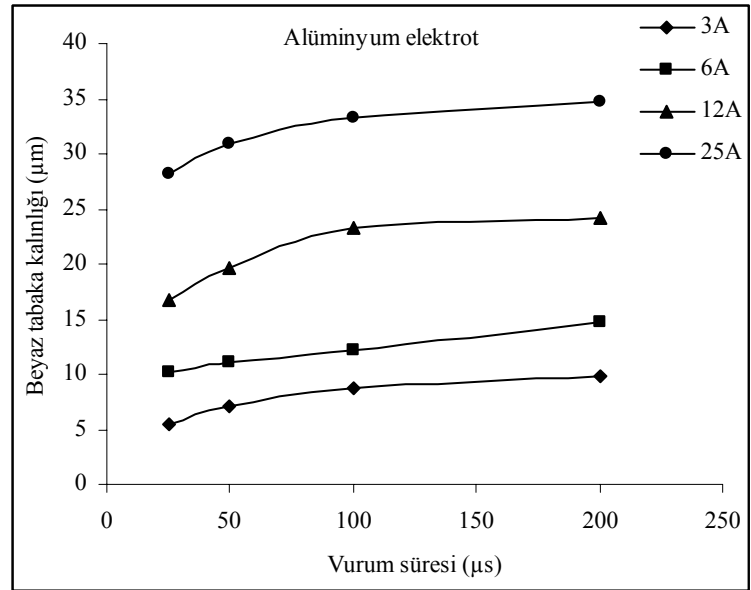
Tablo 6.1’de aynı zamanda vurum sürelerinin değişimi ile yüzeylerde oluşan beyaz tabaka değerleri verilmiştir. Şekil 6.24 – 6.26’ da ise farklı elektrot malzemeleri ile işlemede vurum sürelerinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına olan etkileri görülmektedir. Akımın etkisine benzer şekilde, sabit akım şartlarında, vurum süresinin artması ile ortalama beyaz tabaka kalınlığı da artmaktadır. Ancak bu artış miktarı akım parametresinin etkisi kadar etkili değildir. Grafiklerdeki farklı akım değerleri için çizilen eğriler dikkate alındığında, herhangi bir akım değeri için vurum süresinin artması, beyaz tabaka kalınlığını önemsiz derecede de olsa arttırmaktadır. Her üç elektrot malzemesi için de, vurum süresinin 25 μ s’den 200 μ s’ye artması ile beyaz tabaka kalınlıklarındaki artış miktarı ancak 3 – 5 μ m kadardır. Dolayısı ile akım parametresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığı üzerinde vurum süresine nazaran daha etkili olduğu söylenebilir. Beyaz tabaka kalınlığındaki bu artış, vurum süresinin artmasıyla ara bölgede oluşan daha fazla ısı ile ilişkilendirilebilir. Ara bölgede oluşan yüksek ısı miktarı ile, yüzeyden ergitilen malzeme miktarı da artmaktadır. Vurum süresinin artmasıyla, malzemenin izotermal eğrileri malzeme alt tabakalarına doğru daha fazla yayılmakta ve yüzey altında yayılan ısı miktarı malzeme içine doğru daha fazla bir bölgeyi kapsamaktadır [157]. Bu da, daha geniş bir bölgenin ısı tesiri altında kalmasına ve ortalama beyaz tabaka kalınlığının artmasına yol açmaktadır.



Şekil 6.24 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Grafit).

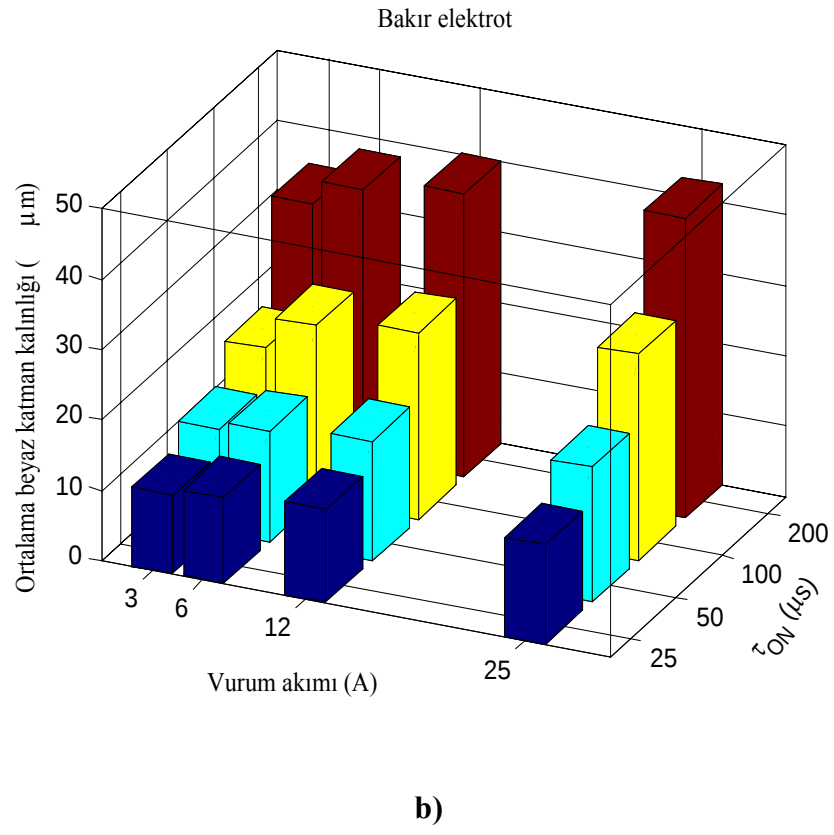
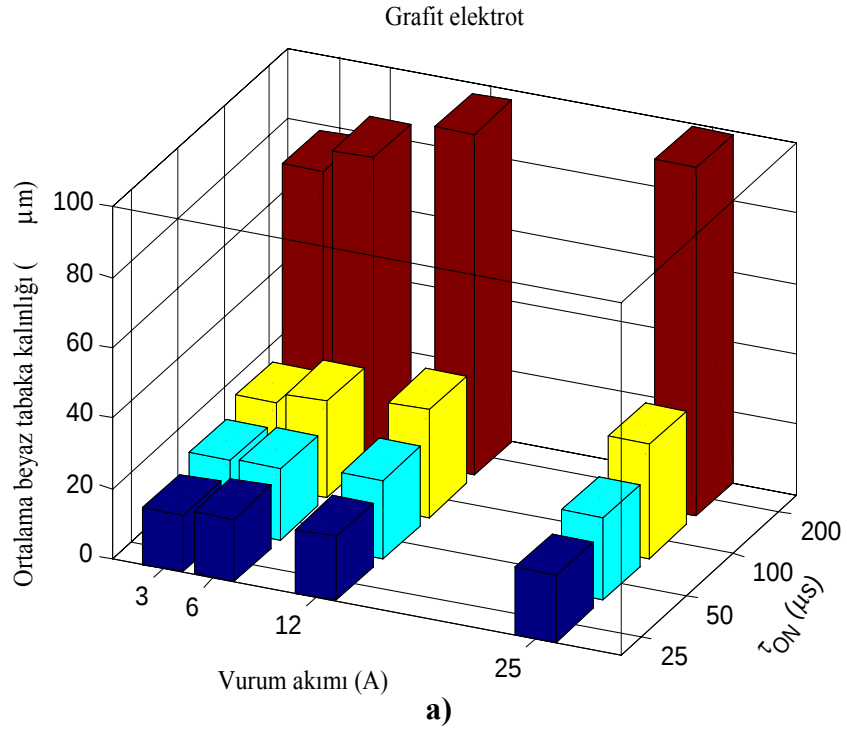


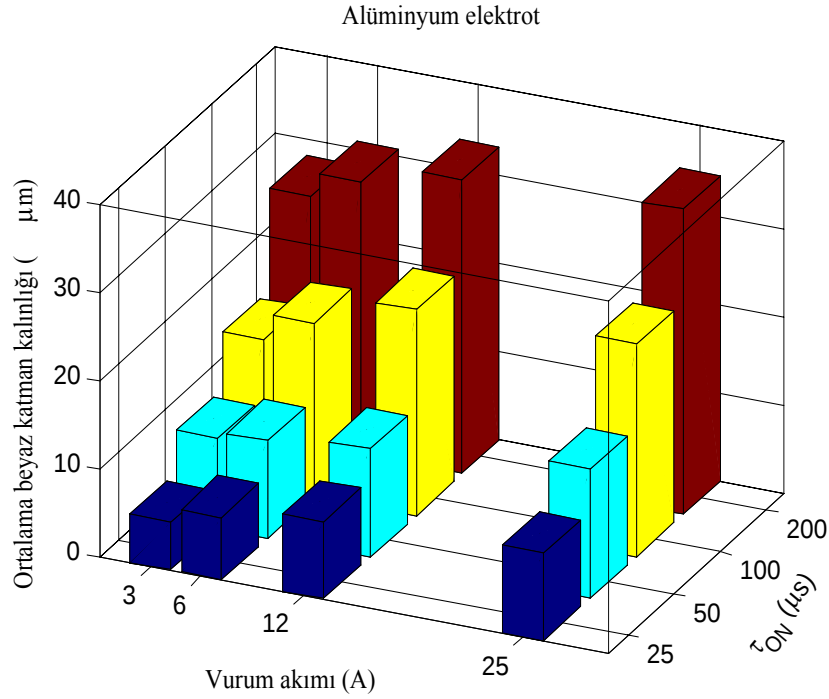
Şekil 6.25 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Bakır).



Şekil 6.26 Vurum süresinin ortalama beyaz tabaka kalınlığına etkisi (Elektrot: Alüminyum).

Beyaz tabaka kalınlıklarına ait değerlerin grafiksel olarak toplu gösterimi Şekil 6.27’de görülmektedir. Bu grafikler yardımı ile akım ve vurum süreleri parametrelerinin birbirleri ile olan etkileşimleri ve ortalama beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki izafi etkileri daha net bir şekilde görülmektedir.





c)

Şekil 6.27 Ortalama beyaz tabaka kalınlığının işlem parametreleriyle değişimi (a: Grafit elektrot, b: Bakır elektrot, c: Alüminyum elektrot).

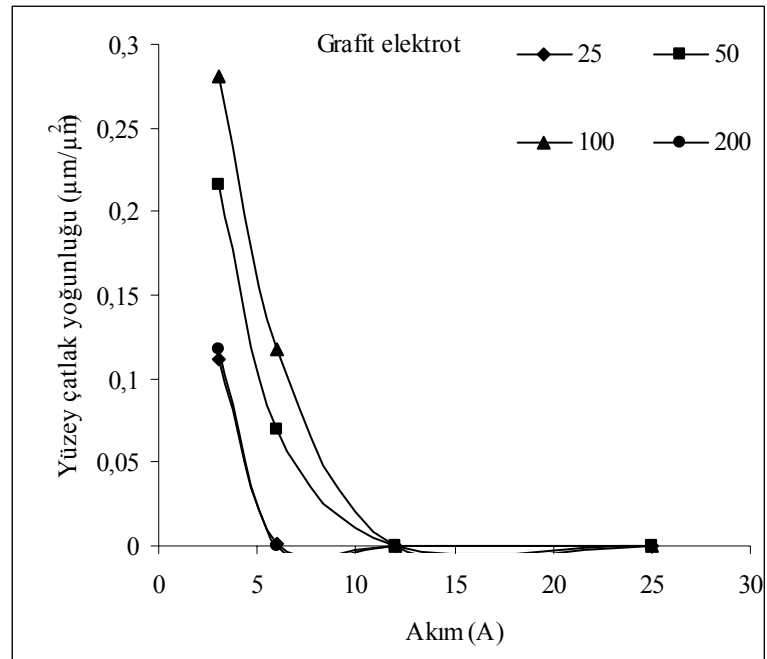
6.1.3. Yüzey Çatlak Yoğunluğu Ölçüm Sonuçları

6.1.3.1. Akımın Yüzey Çatlak Yoğunluğuna Etkisi

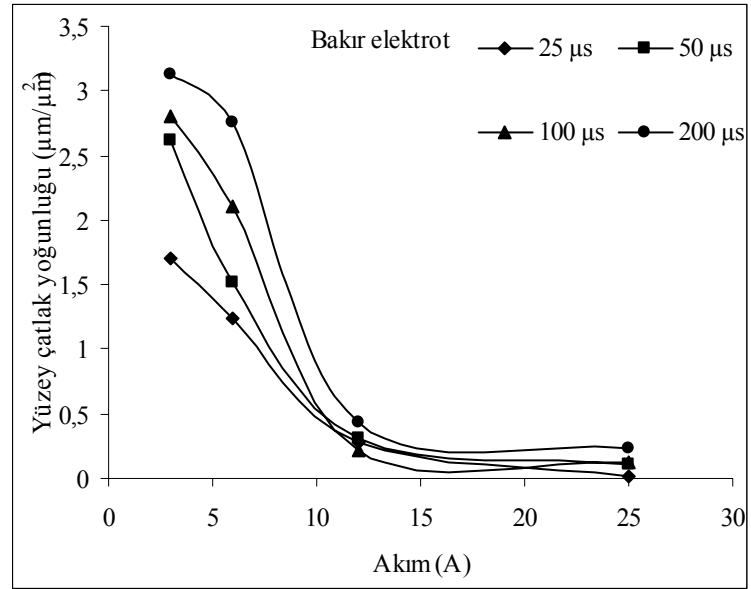
Tablo 6.2’de numunelerden ölçülen yüzey çatlak yoğunlukları verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 6.28 – 30’da görülmektedir. Tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi, yüzey çatlak yoğunluğu, sabit vurum süresi şartlarında, akım değerindeki artış ile önemli derecede azalmaktadır. Bu azalma miktarı 3 ila 6 amper arasında daha az iken, akım değerlerinin 12 ve 25 ampere ulaşması ile daha net şekilde görülmektedir. $1\mu^2$ ’ye düşen ortalama çatlak uzunluğu grafit elektrot ile işlenmiş yüzeylerde en fazla $0.200\mu m$ iken, bakır ve alüminyum elektrotlarda bu değer sırasıyla $3.125\mu m$ ve $1.965\mu m$ ’ ye yükselmektedir. Bu durum, bakır elektrot ile işlenmiş numunelerin yüzey çatlak yoğunluklarının alüminyum elektrot ile işlenmiş numune yüzey çatlak yoğunluklarının 1.590 katı, grafit ile işlenmiş numunelerin yüzey çatlak yoğunluklarının ise 15.625 katı olduğunu göstermektedir. Bu durum bakırın grafitte nazaran oldukça yüksek termal ve elektrik iletkenliği ile ilişkilidir. Dolayısı ile yüzey çatlak yoğunluğu açısından, grafit elektrotun oldukça avantajlı olduğu söylenebilir.

Tablo 6.2. EDM sonrasında ölçülen yüzey çatlak yoğunlukları.

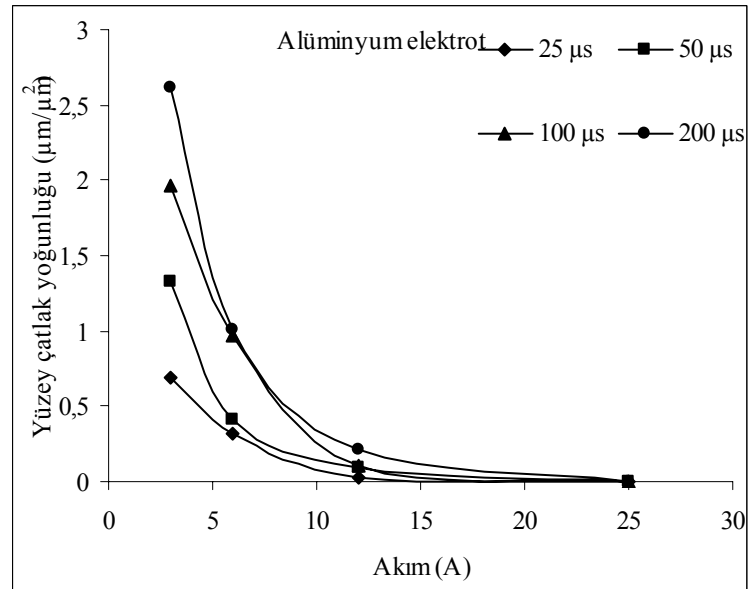
Deney no	Yüzey çatlak yoğunluğu ($\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$)		
	Grafit	Bakır	Alüminyum
1	0,112	1,701	0,685
2	0,216	2,618	1,326
3	0,281	2,804	1,965
4	0	3,125	2,618
5	0,001	1,235	0,316
6	0,007	1,520	0,415
7	0,118	2,112	0,965
8	0,200	2,761	1,012
9	0	0,286	0,025
10	0	0,312	0,096
11	0	0,215	0,101
12	0	0,436	0,216
13	0	0,009	0
14	0	0,101	0
15	0	0,118	0
16	0	0,226	0



Şekil 6.28 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Grafit).



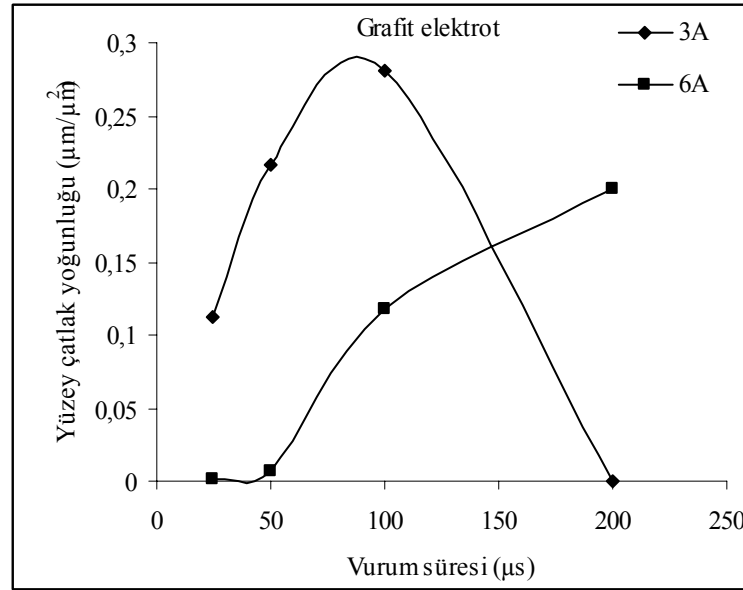
Şekil 6.29 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Bakır).



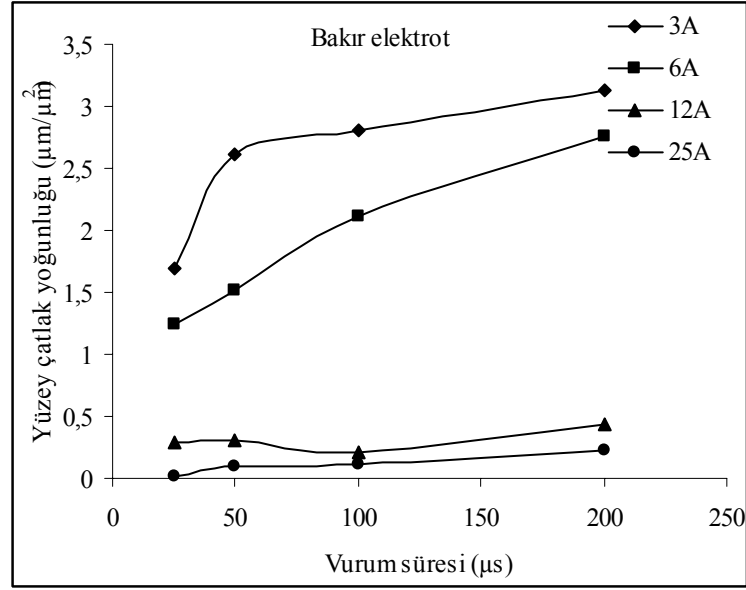
Şekil 6.30 Akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Alüminyum).

6.1.3.2. Vurum Süresinin Yüzey Çatlak Yoğunluğuna Etkisi

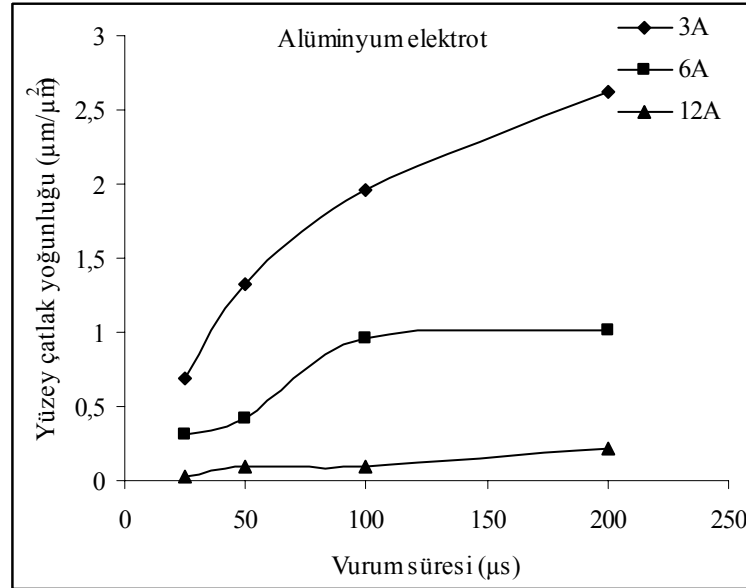
Tablo 6.2’de aynı zamanda vurum sürelerinin değişimi ile yüzeylerde oluşan çatlak yoğunluğu değerleri verilmiştir. Şekil 6.31 – 6.33’ de ise farklı elektrot malzemeleri ile işlemede vurum sürelerinin yüzey çatlak yoğunluğuna olan etkileri görülmektedir. Akımın etkisine zıt şekilde, akım sabit iken, vurum süresinin artması ile yüzey çatlak yoğunluğu artmaktadır. Bu artış miktarı, bütün vurum süreleri değerleri için kademeli ve doğrusaldır. Şekil 6.31 incelendiğinde, 12 ve 25 amper değerleri için vurum süresi ile yüzey çatlak yoğunluğunun değişimini gösteren eğrilerin olmadıkları görülmektedir. Grafit elektrot ile işlemede 12 ve 25 amper akım değerlerinde, bütün vurum süreleri için yüzey çatlak yoğunluklarının tamamen kaldırıldığı görülmektedir. Benzer durum alüminyum elektrot ile işlemede, 25 amper için geçerlidir (Şekil 6.33). Ancak bakır elektrot ile işlemede bütün işleme koşulları altında yüzeylerin çatlak içerdiği söylenebilir.



Şekil 6.31 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Grafit).



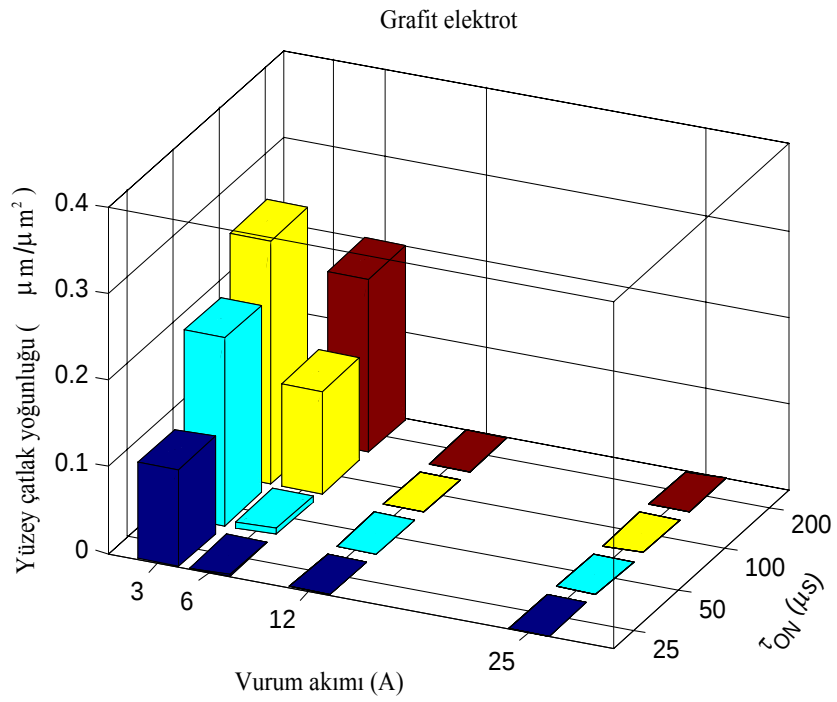
Şekil 6.32 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Bakır).



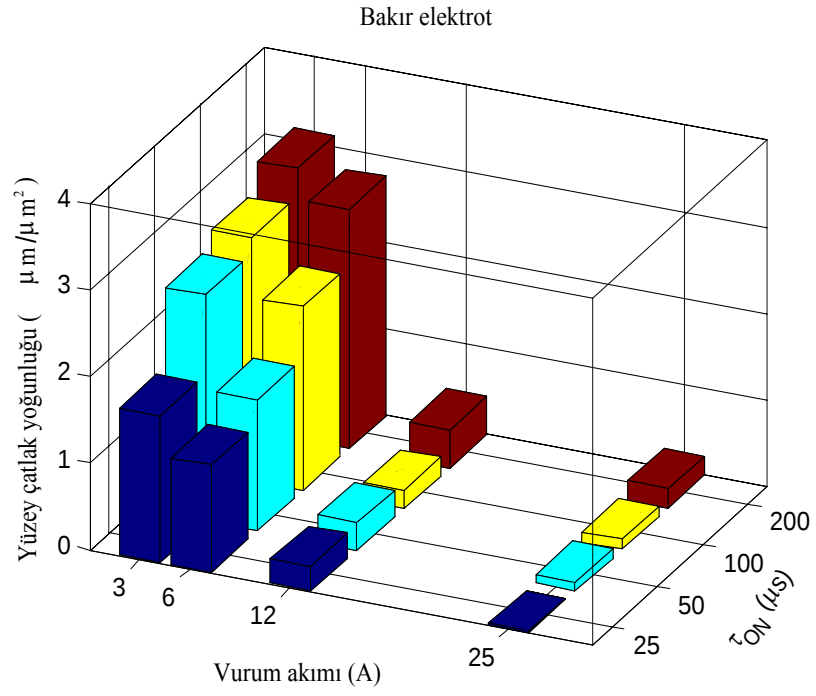
Şekil 6.33 Vurum süresinin yüzey çatlak yoğunluğuna etkisi (Elektrot: Alüminyum).

Yüzey çatlak yoğunluklarına ait değerlerin grafiksel olarak toplu gösterimi Şekil 6.34’de görülmektedir. Bu grafikte vurum süresi ve akım parametrelerinin izafi etkileri birlikte değerlendirilebilir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüzey çatlak yoğunluğu vurum süresinin artması ve akım değerinin azalmasıyla artmaktadır. Akımın artmasıyla yüzeyde oluşan çatlakların genişliği artmakta ve uzunluğu azalmaktadır. Şekil 6.35’ de kullanılan her bir elektrot

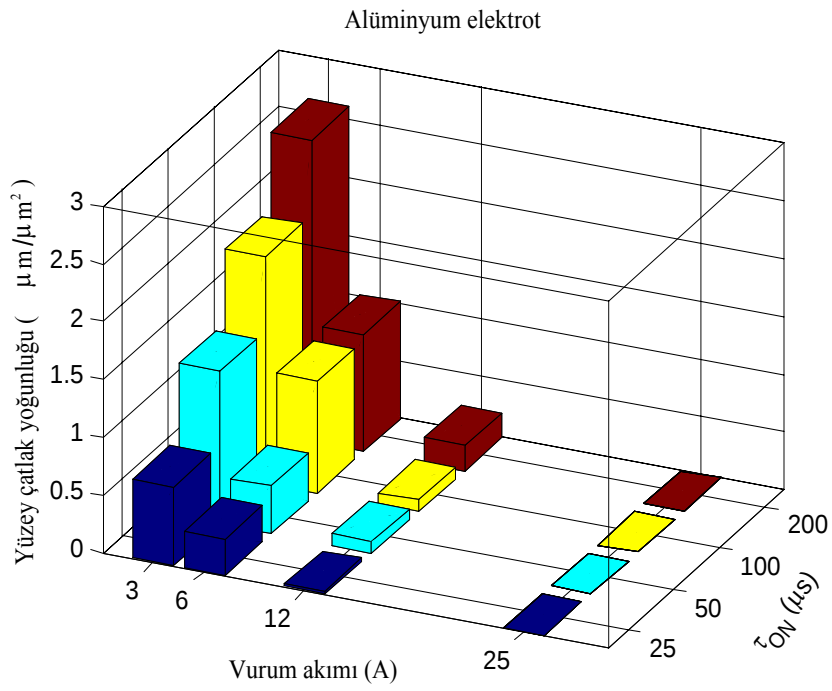
malzemesi ve işleme parametrelerine göre yüzey çatlaklarını ve çatlak genişliğini tahmin edebilecek bir çatlak tahmin haritası geliştirilmiştir. Yüzeyde oluşması muhtemel çatlaklar ve tipleri bu harita üzerinde farklı sembollerle ifade edilmektedir. Haritalardan da görüldüğü gibi, akım parametresinin artırılması ve vurum süresinin azaltılmasıyla yüzey çatlamları engellenebilir. Bu durumda, akım parametresinin yüzey çatlak yoğunluğunda, vurum süresinin ise oluşan çatlakların genişliğinde etkili olduğu söylenebilir.



a)

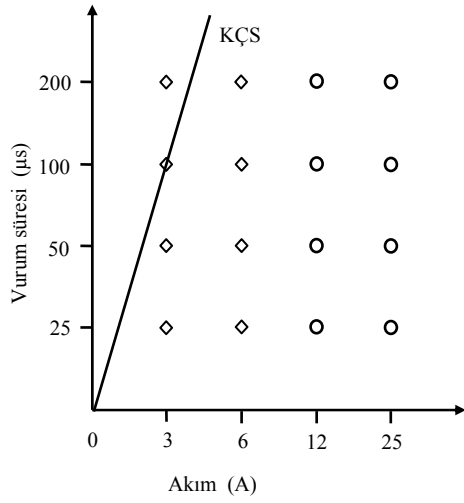


b)

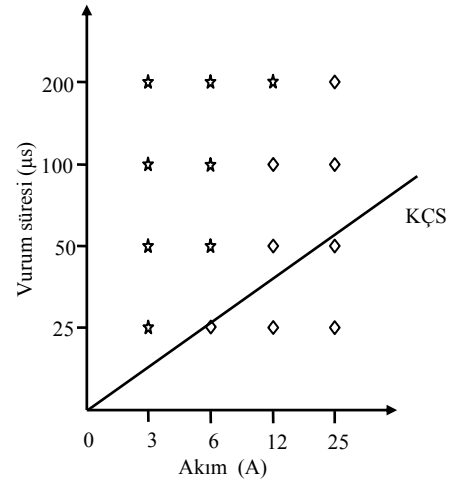


c)

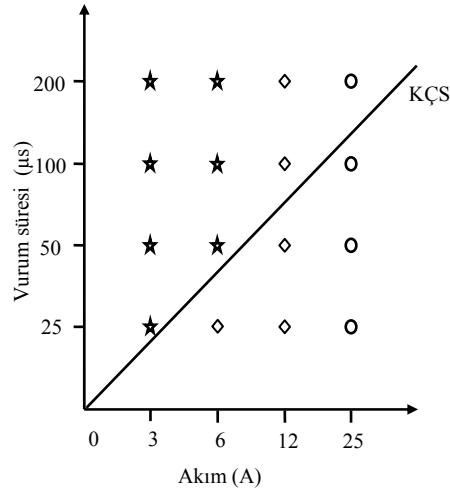
Şekil 6.34 Yüzey çatlak yoğunluğunun elektrot malzemesi ve işleme parametreleriyle değişimi (a: Grafit Elektrot, b: Bakır elektrot, c: Alüminyum elektrot).



a)



b)



c)

Şekil 6.35 Yüzey çatlak tahmin haritaları (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).

Şekil 6.35’ deki haritalar üzerinde, ★ sembolü oldukça geniş çatlak, ◇ sembolü normal genişlikteki çatlak ve ○ sembolü ise çatlakın oluşmadığını göstermektedir. Şekil üzerinde aynı zamanda kullanılan her bir elektrot malzemesi için kritik çatlak sınırı (KÇS) belirlenmiştir. Bu sınırın altında kalan bölgeler, üst taraftaki bölgelerden daha güvenlidir. Akımın artmasıyla yüzey çatlak yoğunluğunun azalmasına rağmen, bakır elektrotlar kullanılarak yapılan deneylerde, en yüksek akım değeri olan 25A’ de dahi yüzey çatlaklarının yok edilemediği görülmektedir. Dolayısıyla, bakır elektrot için, uygulanan tüm deney şartları altında elde edilen yüzeylerin daima çatlak içerdiği söylenebilir. Bu durum, bakırın grafit ve alüminyumdan daha yüksek olan ısı ve elektrik iletkenliği ile ilişkilendirilmektedir. Yüzey çatlak yoğunluğu, aynı zamanda ortalama beyaz tabaka kalınlığı ile de ilişkilidir [155]. Ortalama beyaz tabaka

kalınlığının artmasıyla, tabaka alanı da artmakta ve buna karşın yüzey çatlak yoğunluğu da azalmaktadır.

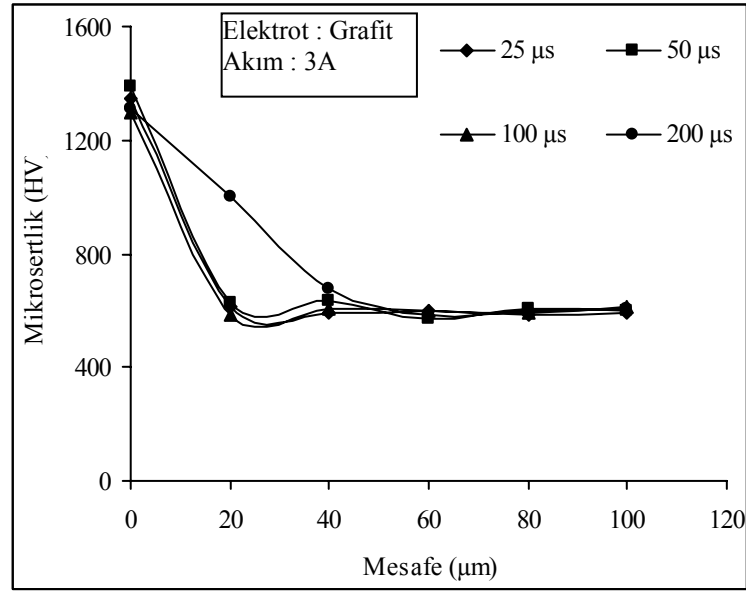
Yüzey çatlaklarının hasar için başlangıç noktaları gibi davranması muhtemeldir. Özellikle dinamik yüklemeler altında çalışan makine elemanlarında dayanımı düşürebileceği söylenebilir. Bu yüzden, beyaz tabaka veya yüzeyde yeniden katılmış tabaka olarak adlandırılan bölgelerde bulunan çatlakların bir taşlama veya parlatma gibi bir yöntemle yüzeyden kaldırılması gerekmektedir.

6.1.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

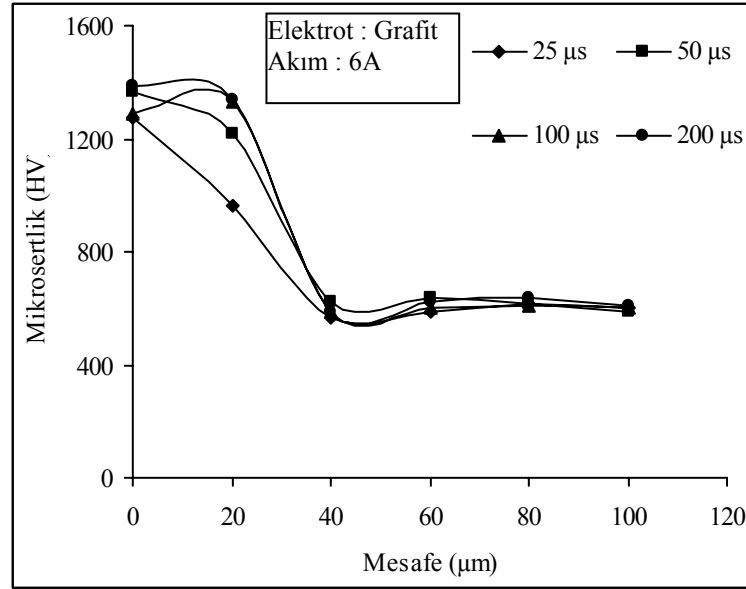
Tablo 6.3’ de grafit elektrot ile işlenmiş yüzeylerden alınan mikrosertlik değerleri, Şekil 6.36 – 6.39’ da ise bu değerlere ait grafikler verilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri yüzeyden itibaren 20 µm mesafe aralıklarla alınmıştır. Mikrosertlik ölçüm sonuçları metalografik inceleme sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, beyaz tabakanın hegzagonal martenzitik α' mikroyapısı ve yüzeyde yoğun derecede oluşan $Ti_{24}C_{15}$ ve TiC karbürlerinin etkisiyle, beyaz tabaka sertliğinin esas malzemedan önemli derecede yüksek olduğu görülmektedir. Numunelerin yüzey sertlikleri 1195 – 1466HV arasında değişmektedir. Mikrosertlik değerlerinin elektrot malzemesine göre değiştiği görülmektedir. Yüzey sertliklerindeki bu artış miktarının alüminyum elektrot ile işlenmiş yüzeylerde nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, eriyerek yüzeye yapışan/sıvanan elektrot malzemesiyle açıklanabilir.

Tablo 6.3. Grafit elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.

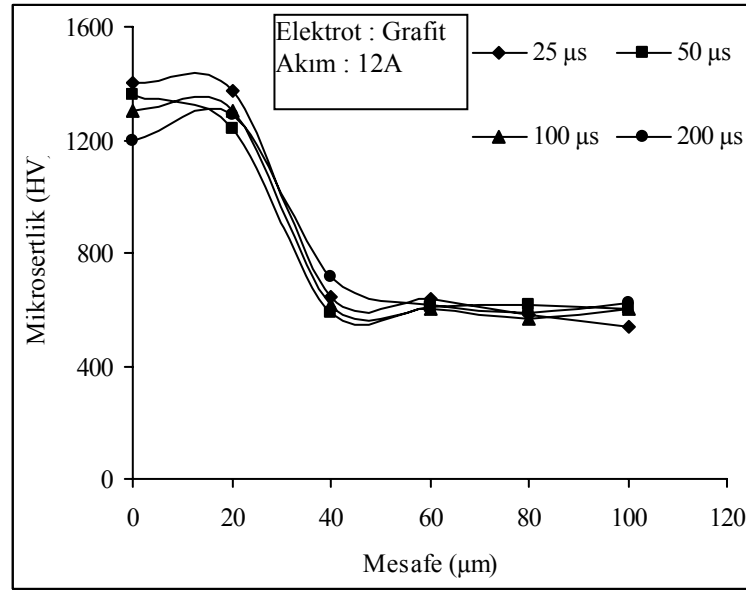
Numune adı	Parametreler		Mesafe (µm) / Mikrosertlik (HV)					
	Akım (I_p)	Vurum süresi (µs)	0	20	40	60	80	100
G1	3	25	1345	612	594	601	582	591
G2	3	50	1386	624	635	574	605	600
G3	3	100	1299	586	603	600	595	616
G4	3	200	1312	1000	678	584	600	608
G5	6	25	1275	966	568	591	618	604
G6	6	50	1366	1218	621	638	619	591
G7	6	100	1285	1329	590	601	612	600
G8	6	200	1390	1335	586	622	635	610
G9	12	25	1401	1376	645	636	581	541
G10	12	50	1356	1238	591	608	613	603
G11	12	100	1300	1305	614	605	566	600
G12	12	200	1195	1286	712	618	591	626
G13	25	25	1465	1408	1389	916	603	572
G14	25	50	1442	1386	1305	1286	1192	612
G15	25	100	1378	1413	1289	1418	666	638
G16	25	200	1466	1395	1423	1285	1375	1000



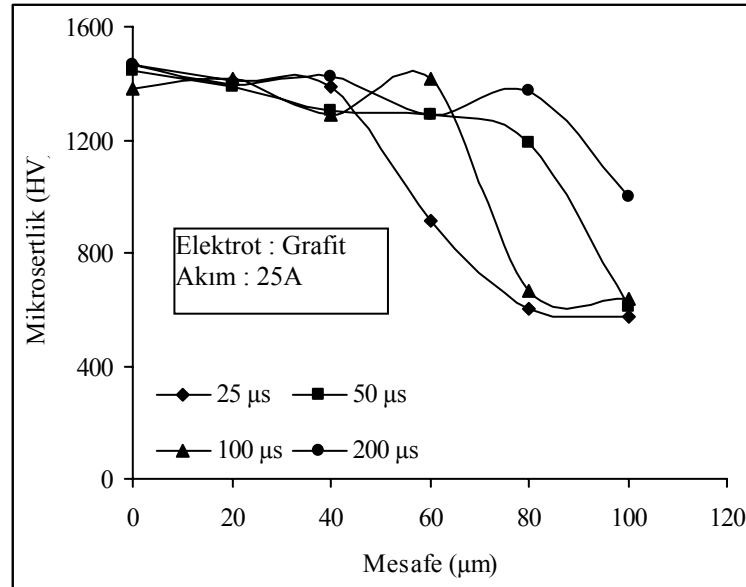
Şekil 6.36 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.37 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.38 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



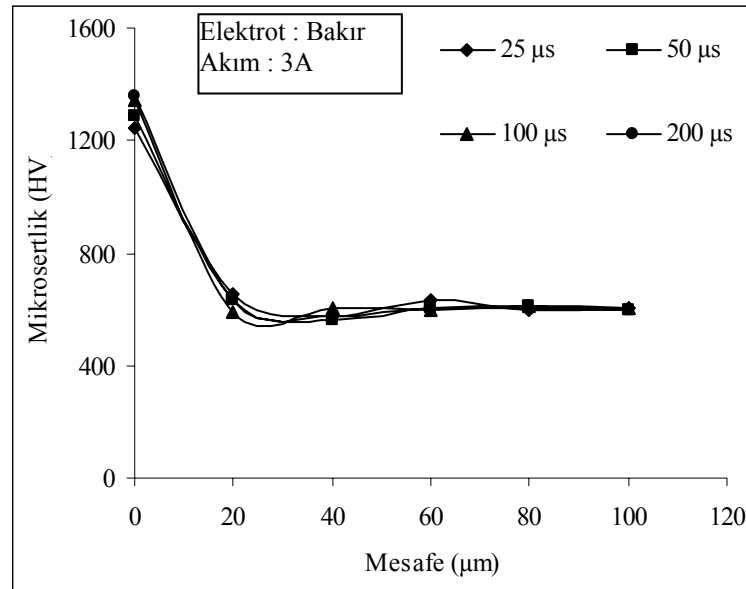
Şekil 6.39 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.

Tablo 6.4' de bakır elektrot ile işlenmiş yüzeylerden alınan mikrosertlik değerleri görülmektedir. Şekil 6.40 – 6.43' de ise bu değerlere ait grafikler verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, beyaz tabaka sertliğinin 1245 – 1458HV arasında değiştiği görülmektedir. Aynı zamanda, ortalama beyaz tabaka kalınlığının 20μm civarında olduğu tespit edilmiştir. Sertlik

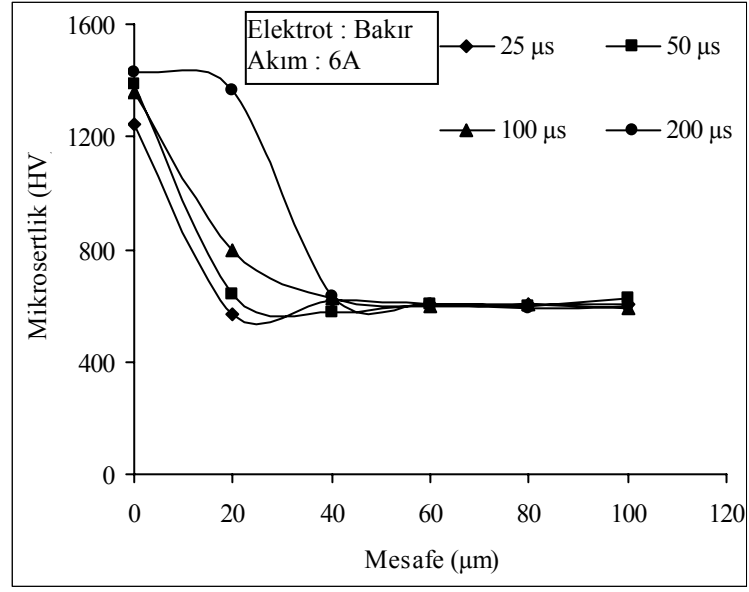
değerlerinin esas malzemeye doğru derinliğine değişimi aynı zamanda ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğini de takriben belirlemek amacıyla kullanılabilir. Şekillerden de görüldüğü gibi bu bölgenin genişliği işlem şartlarına bağlı olmakla beraber 60µm dolaylarındadır.

Tablo 6.4. Bakır elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.

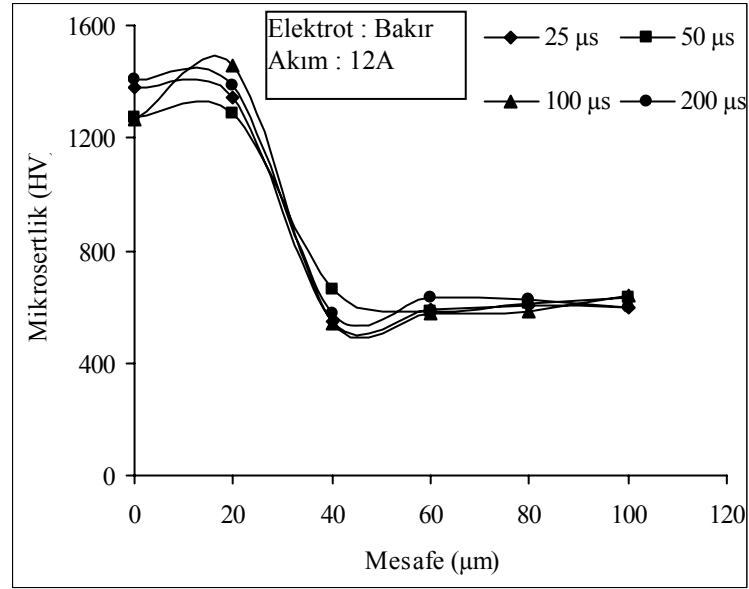
Numune adı	Parametreler		Mesafe (µm) / Mikrosertlik (HV)					
	Akım (I_p)	Vurum süresi (µs)	0	20	40	60	80	100
B1	3	25	1247	653	575	631	597	605
B2	3	50	1287	632	560	608	612	597
B3	3	100	1342	589	603	600	612	607
B4	3	200	1356	631	574	604	601	600
B5	6	25	1245	567	616	603	606	601
B6	6	50	1389	638	578	602	600	626
B7	6	100	1360	800	624	597	607	588
B8	6	200	1432	1368	635	605	589	600
B9	12	25	1379	1345	545	589	603	600
B10	12	50	1275	1289	658	583	615	632
B11	12	100	1269	1456	540	579	582	638
B12	12	200	1407	1387	578	635	628	600
B13	25	25	1404	1342	632	619	605	606
B14	25	50	1218	1365	579	604	601	568
B15	25	100	1458	1325	1259	589	601	621
B16	25	200	1379	1242	1135	539	604	600



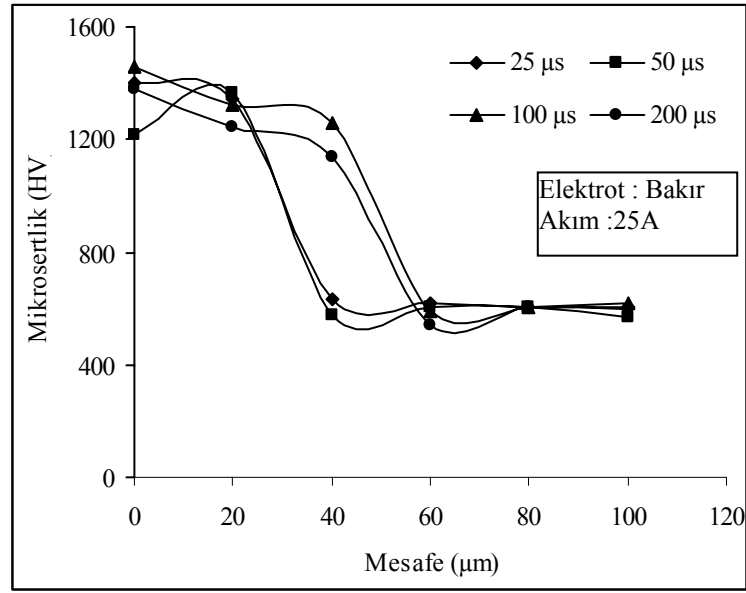
Şekil 6.40 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.41 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.42 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.

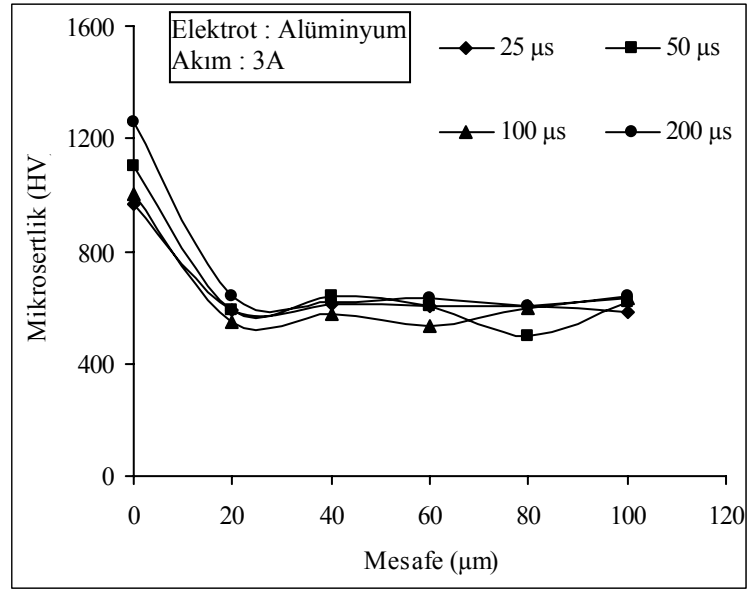


Şekil 6.43 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.

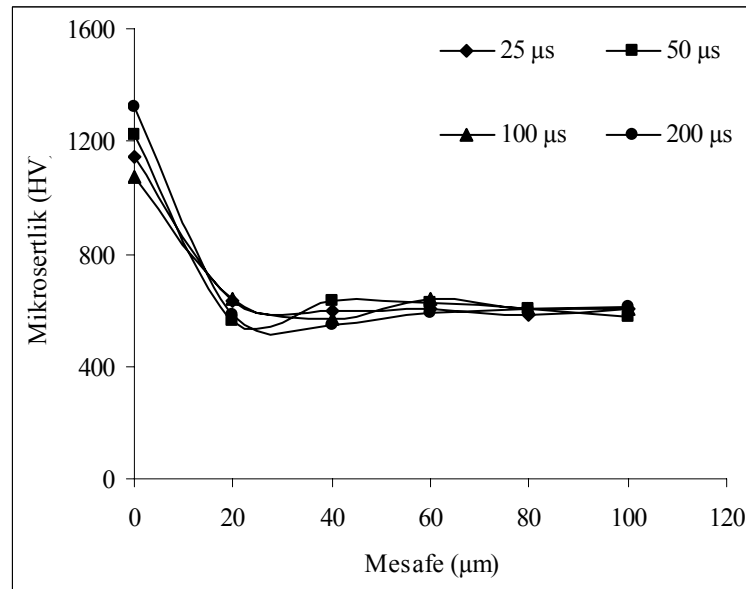
Tablo 6.5’ de alüminyum elektrot ile işlenmiş yüzeylerden alınan mikrosertlik değerleri görülmektedir. Şekil 6.44 – 6.47’ de ise bu değerlere ait grafikler verilmiştir. Mikrosertlik değerleri 967 – 1416HV arasında değişmektedir. Isı tesiri altındaki bölge genişliği ise takriben 40μm dolaylarındadır.

Tablo 6.5. Alüminyum elektrot ile işlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri.

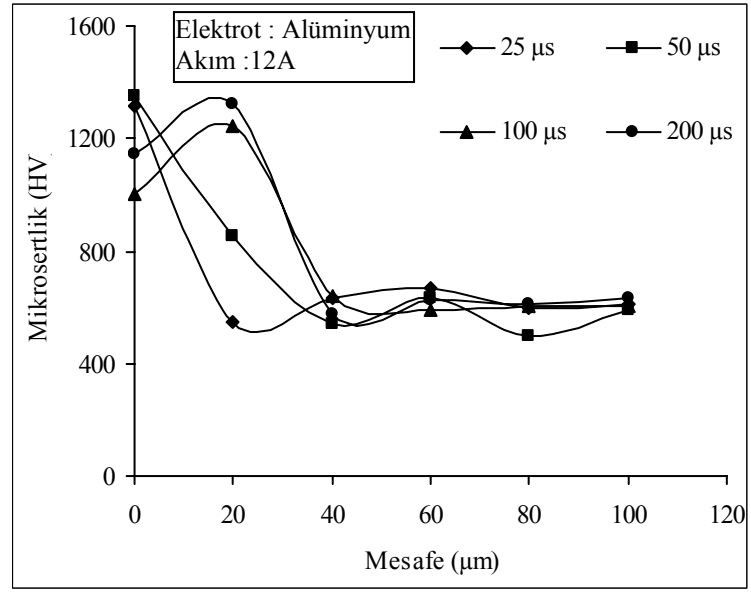
Numune adı	Parametreler		Mesafe (μm) / Mikrosertlik (HV)					
	Akım (I_p)	Vurum süresi (μs)	0	20	40	60	80	100
A1	3	25	967	587	614	605	603	586
A2	3	50	1100	589	643	608	497	620
A3	3	100	1000	547	578	536	597	634
A4	3	200	1256	639	621	630	602	642
A5	6	25	1148	636	600	604	584	601
A6	6	50	1222	565	633	625	606	573
A7	6	100	1071	639	568	642	602	601
A8	6	200	1326	583	546	592	605	609
A9	12	25	1319	548	635	671	597	610
A10	12	50	1352	856	538	631	497	588
A11	12	100	1000	1246	639	587	603	601
A12	12	200	1146	1325	579	624	612	633
A13	25	25	1258	1242	639	626	600	600
A14	25	50	1111	1158	590	587	632	611
A15	25	100	1359	1241	582	579	521	492
A16	25	200	1416	1263	630	629	600	539



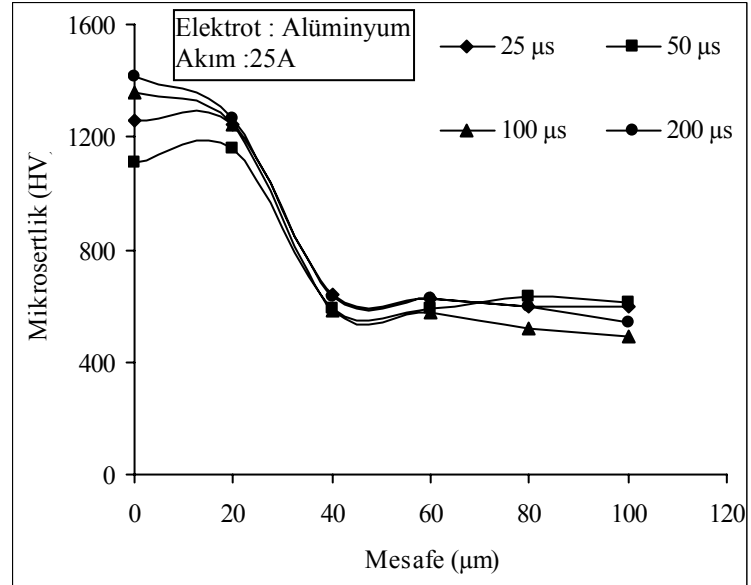
Şekil 6.44 3A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.45 6A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



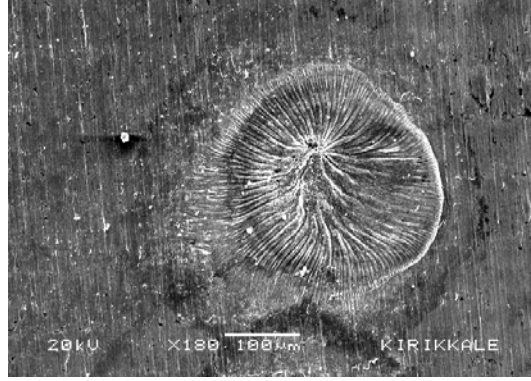
Şekil 6.46 12A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.



Şekil 6.47 25A işleme şartlarında mikrosertlik değerlerinin vurum süresine bağlı değişimi.

6.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Elektro erozyonla işlenmiş bir yüzeyin pürüzlülük değeri, kıvılcımların yüzeye çarpması neticesinde yüzeyden kaldırılan küresel talaşların oluşturduğu krater ebatlarına bağlıdır. Dolayısıyla bu yöntemdeki yüzey pürüzlülüğü uygulanan kıvılcımın şiddetine bağlıdır. Şekil 6.48’ de bir kıvılcımın yüzeye çarpmasıyla oluşan krater şekli görülmektedir. İşlem anında, bu kraterler yüzeye dağılmakta, ve yüzey geometrisini oluşturmaktadır.



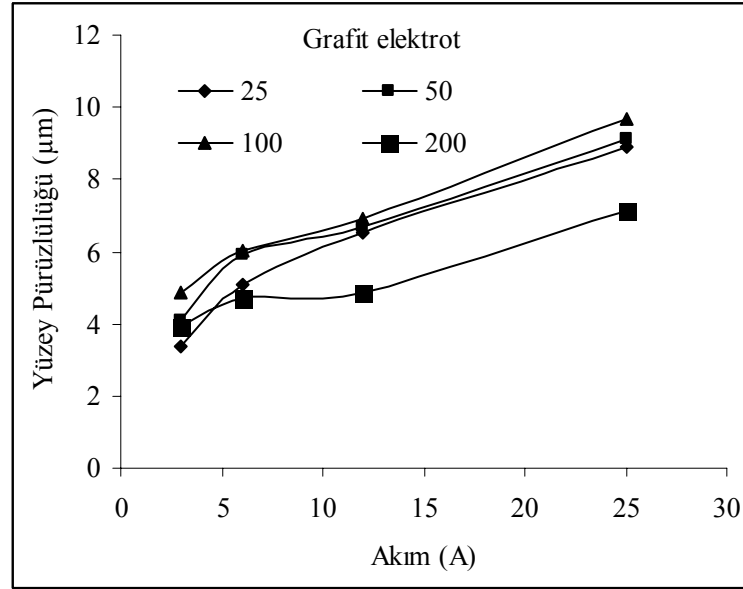
Şekil 6.48 Tek bir kıvılcımın yüzeyde oluşturduğu krater şekli.

6.1.4.1. Akımın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

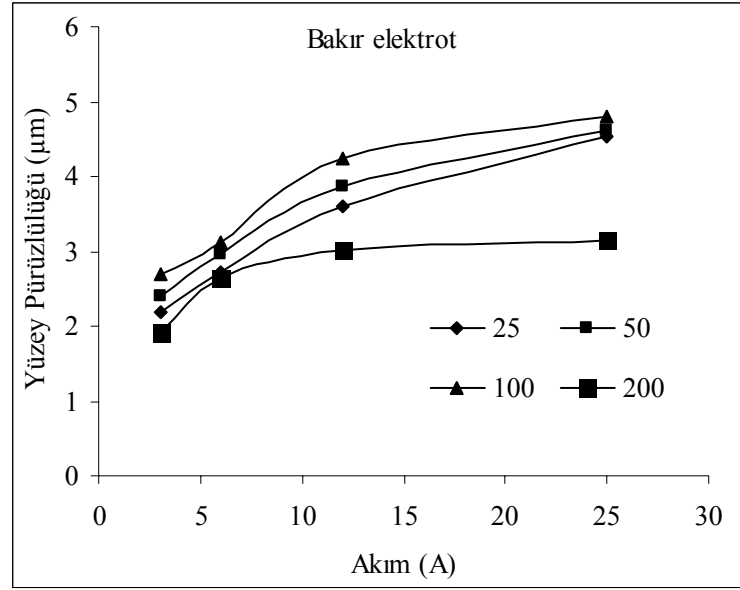
Tablo 6.6’da yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları toplu şekilde verilmiştir. Şekil 6.49 – 51’ de ise farklı elektrot malzemeleri ile işlem neticesinde sabit vurum süresi şartlarında akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, alüminyum elektrotla ile işlenmiş numuneler en iyi yüzey pürüzlülüğünü verirken, grafit elektrotun en kötü değerleri sergilediği görülmektedir. Bakır elektrot ile işlenen yüzeyler, grafit ile alüminyum arasında kalmaktadır. Akım parametresinin artmasıyla, bütün elektrotlar için yüzey pürüzlülüğü kötüleşmektedir. Akımın artmasıyla, daha büyük bir boşalım yoğunluğu ve daha güçlü kıvılcımlar daha büyük bir kuvvet yoğunluğuna yol açmakta ve yüzeyde oluşan kraterlerin çapı ve derinliği artmaktadır. Düşük akım değerlerinde ise yüzeyde oluşan kraterler daha sık ve yayvan olmakta ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Akımın artmasıyla, yüzey pürüzlülüğündeki kötüleşme Şekil 6.52’ de görülmektedir.

Tablo 6.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.

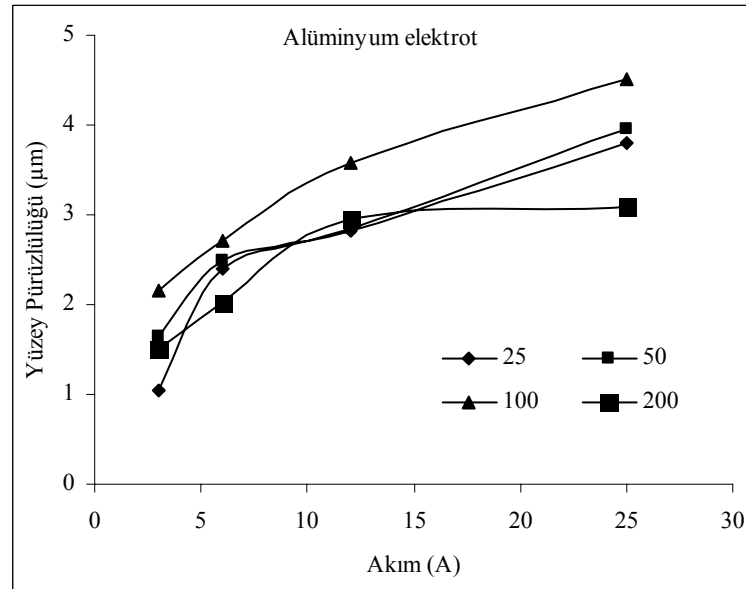
Deney no	Yüzey pürüzlülüğü (μm)		
	Grafit	Bakır	Alüminyum
1	3.40	2.18	1.04
2	4.07	2.40	1.64
3	4.88	2.69	2.16
4	3.92	1.91	1.52
5	5.10	2.72	2.39
6	5.89	2.96	2.50
7	6.04	3.11	2.70
8	4.71	2.64	2.02
9	6.55	3.61	2.83
10	6.69	3.86	2.85
11	6.91	4.25	3.58
12	4.86	3.01	2.96
13	8.88	4.54	3.81
14	9.12	4.61	3.96
15	9.68	4.79	4.52
16	7.16	3.16	3.10



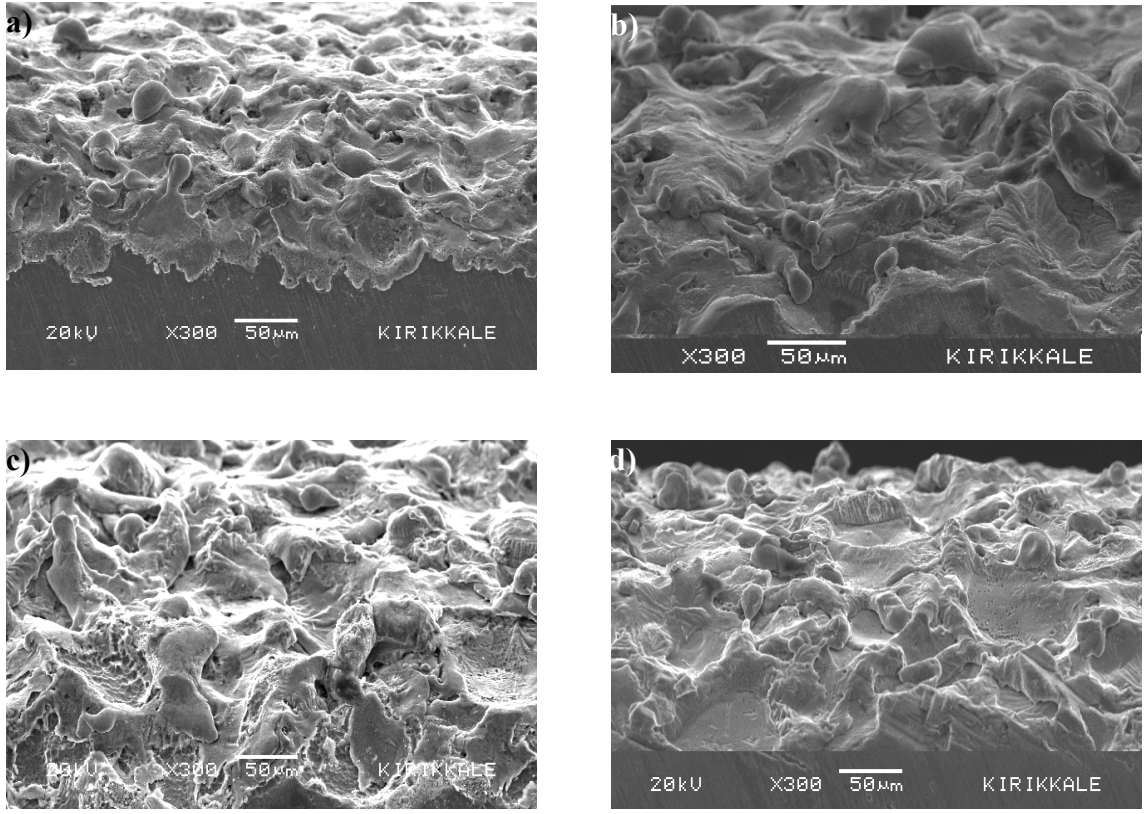
Şekil 6.49 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Grafit).



Şekil 6.50 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Bakır).



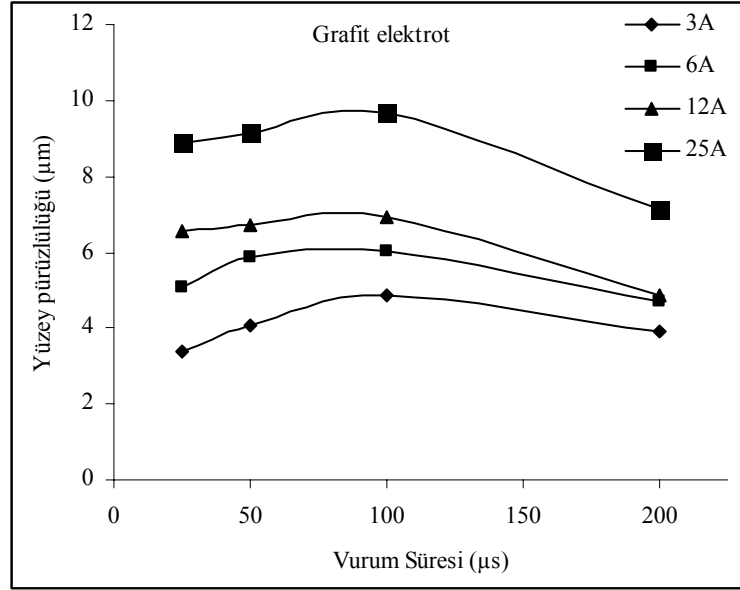
Şekil 6.51 Akım parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Alüminyum).



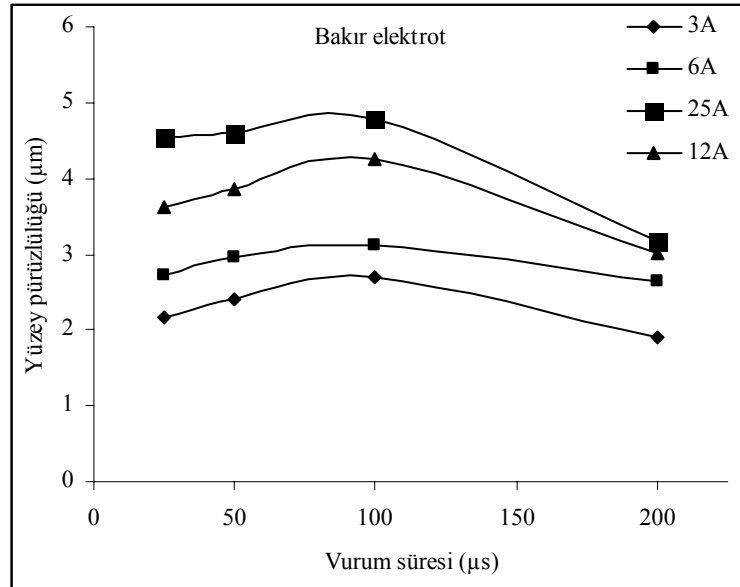
Şekil 6.52 Akımın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün kötüleşmesi (a: 3A, b: 6A, c: 12A, d: 25A).

6.1.4.2. Vurum Süresinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

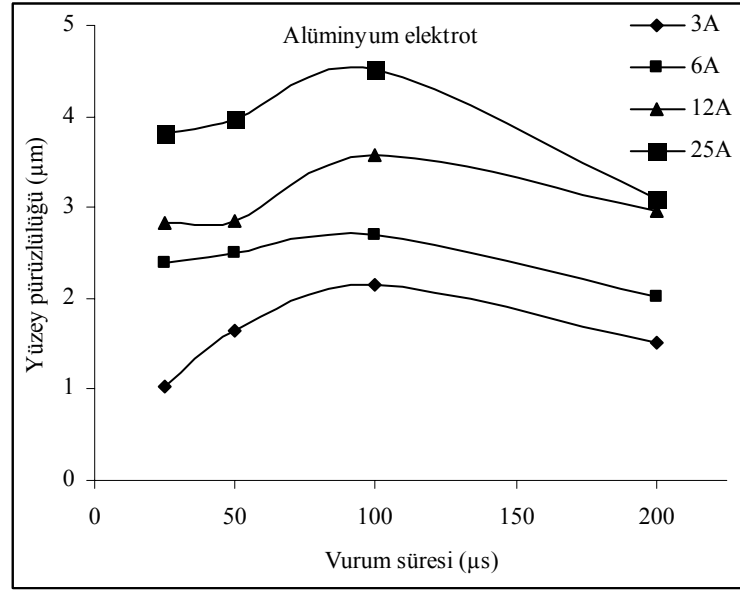
Şekil 6.53 – 6.55’de Tablo 6.6’daki değerlere ait grafikler görülmektedir. Grafikler, sabit akım şartlarında vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini belirtmektedir. Akımın etkisine benzer şekilde, vurum süresinin artmasıyla, yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Fakat şekillerden de görüldüğü gibi, vurum süresi 200 μ s olarak kullanılan en yüksek değerini aldığı anda yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Bu durum, elektriksel boşalım anında iki elektrot arasında akımın geçimine yol açan ve dielektrik sıvı ile çevrelenen plazma kanalındaki genişlemeyle ilişkilendirilebilir. Akım geçiminde, bu kanalın dar olması yüzeye daha fazla enerji taşımaktadır. Fakat fazla uzun vurum sürelerinde ortaya çıkan ısınnın da etkisiyle bu kanal genişlemekte ve iş parçası yüzeyine daha az enerji transfer olmaktadır. Oluşan kıvılcımlar daha cılız olmakta, boşalım kuvvetleri daha etkisiz olmakta ve kaldırılan talaş miktarı da azalmaktadır.



Şekil 6.53 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Grafit).

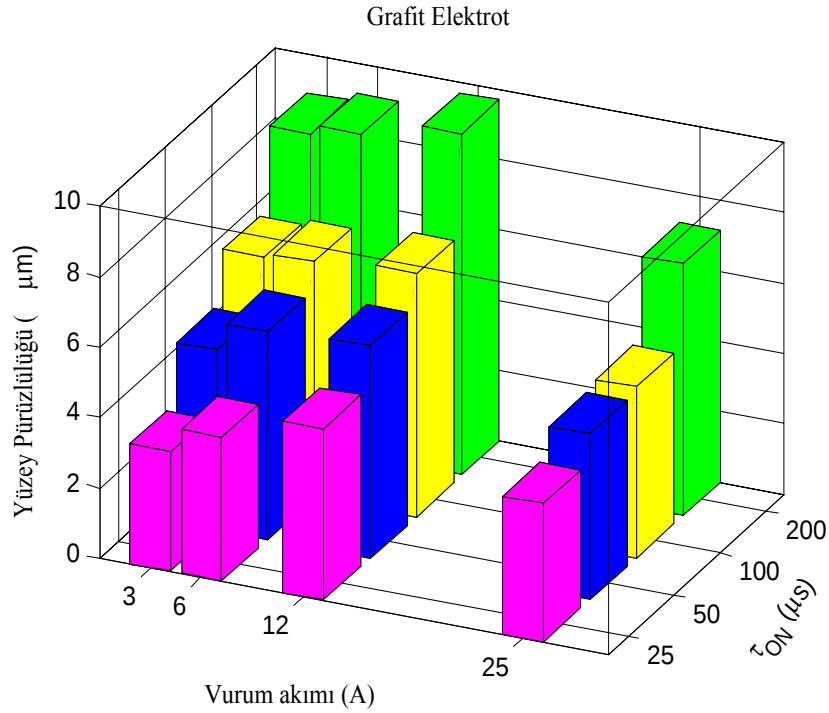


Şekil 6.54 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Bakır).

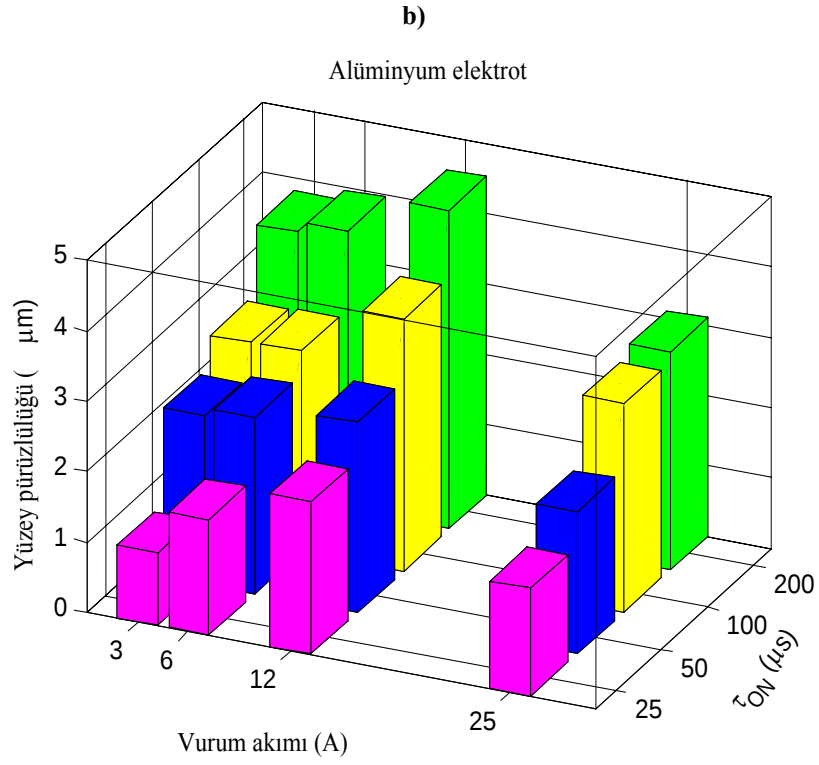
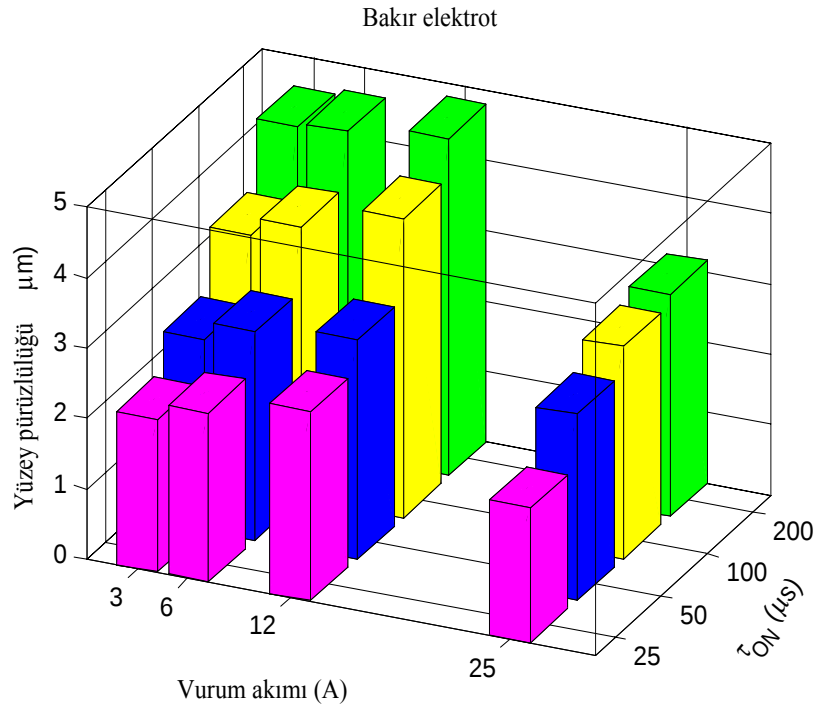


Şekil 6.55 Vurum süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Elektrot: Alüminyum).

Şekil 6.56’da akım ve vurum sürelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri birlikte görülmektedir. Her bir elektrot malzemesi ile yapılan işlemler ve her bir deneyin sonucu bu grafikler yardımıyla daha net bir şekilde değerlendirilebilir.



a)



c)

Şekil 6.56 İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).

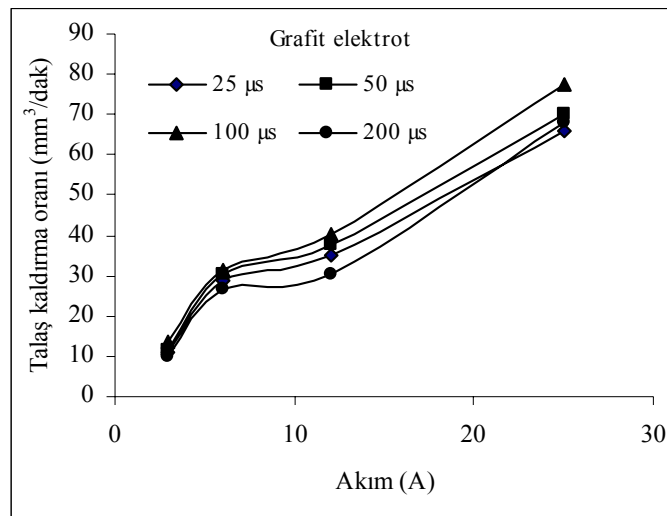
6.1.5. Talaş Kaldırma Oranı Sonuçları

6.1.5.1. Akımın Talaş Kaldırma Oranına Etkisi

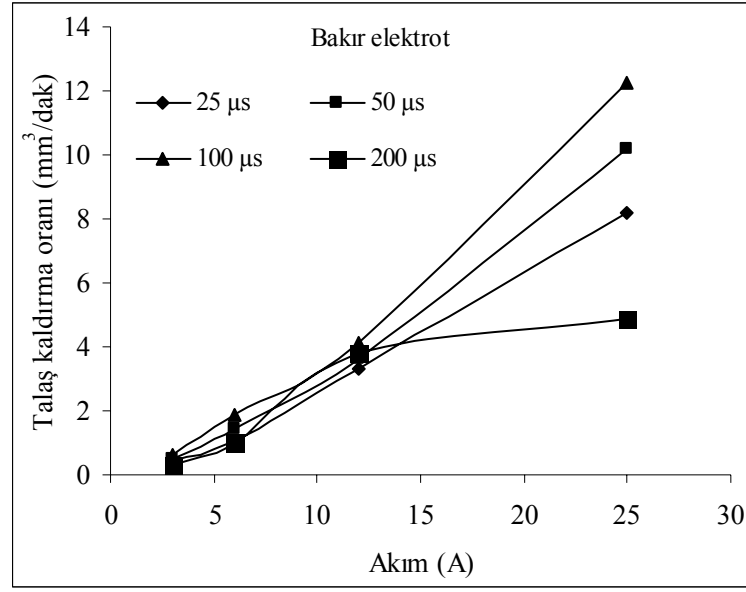
Tablo 6.7’de talaş kaldırma oranı ölçüm sonuçları toplu şekilde verilmiştir. Şekil 6.57 – 59’ da ise farklı elektrot malzemeleri ile işlem neticesinde vurum süresi sabit iken akım parametresinin talaş kaldırma oranına olan etkisi görülmektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, akım parametresi ile talaş kaldırma oranı arasında doğru bir orantının olduğu görülmektedir. Akım değerinin en yüksek değeri almasıyla ($I= 25A$), grafit elektrotta talaş kaldırma oranı maksimum olmaktadır ($77.181 \text{ mm}^3/\text{dak}$). Bu değer, grafit elektrotun işleme hızının bakır elektrottan 6.28 kat, alüminyum elektrottan ise 10.05 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.7. Talaş kaldırma oranı ölçüm sonuçları.

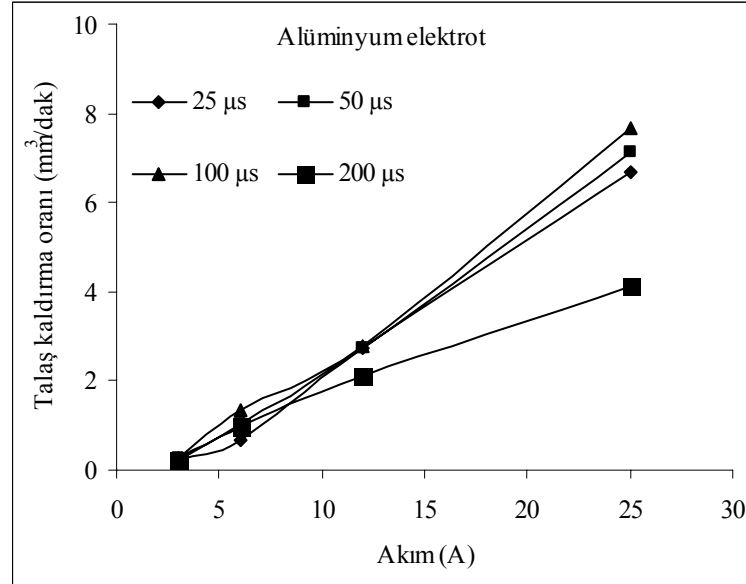
Deney no	Talaş kaldırma oranı (mm^3/dak)		
	Grafit	Bakır	Alüminyum
1	10.854	0.435	0.241
2	11.641	0.496	0.248
3	13.544	0.594	0.259
4	9.812	0.316	0.225
5	28.612	1.092	0.671
6	30.181	1.426	1.012
7	31.186	1.855	1.367
8	26.516	1.012	0.975
9	35.009	3.342	2.721
10	37.818	3.646	2.741
11	40.128	4.133	2.764
12	30.126	3.815	2.121
13	66.186	8.186	6.666
14	70.016	10.181	7.141
15	77.181	12.271	7.679
16	68.011	4.866	4.133



Şekil 6.57 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Grafit).



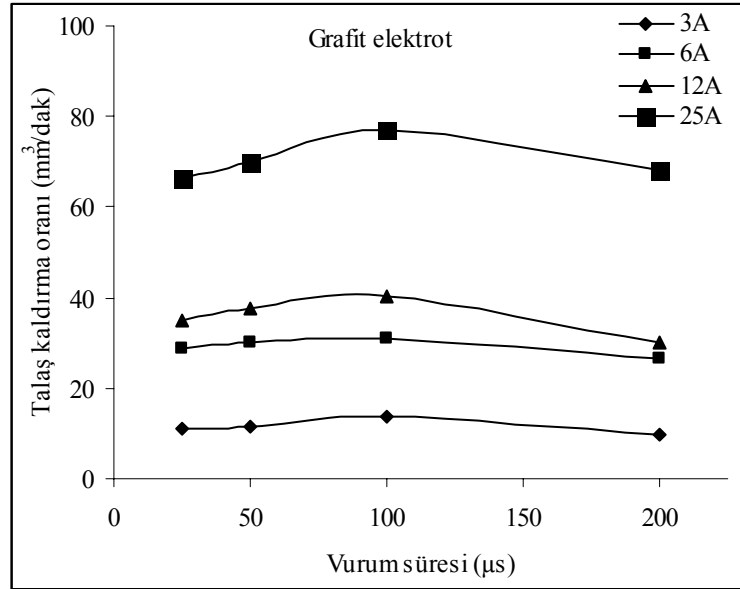
Şekil 6.58 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Bakır).



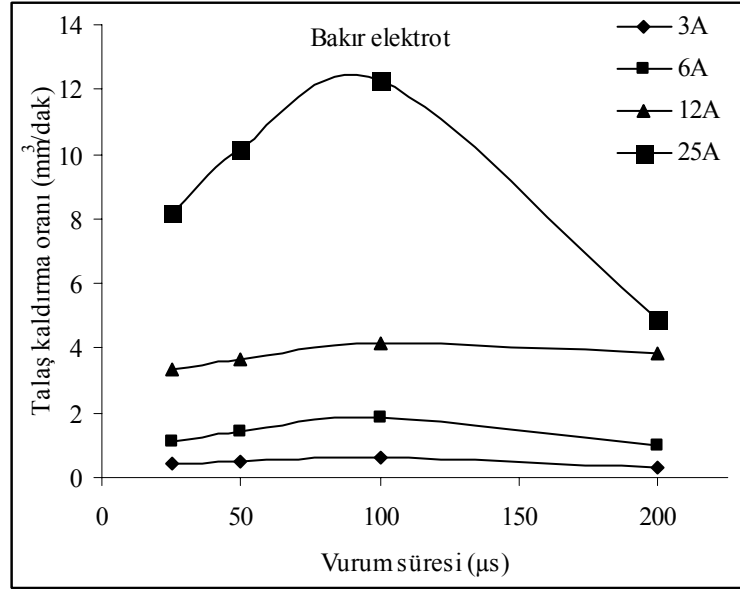
Şekil 6.59 Akım parametresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Alüminyum).

6.1.5.2. Vurum Süresinin Talaş Kaldırma Oranına Etkisi

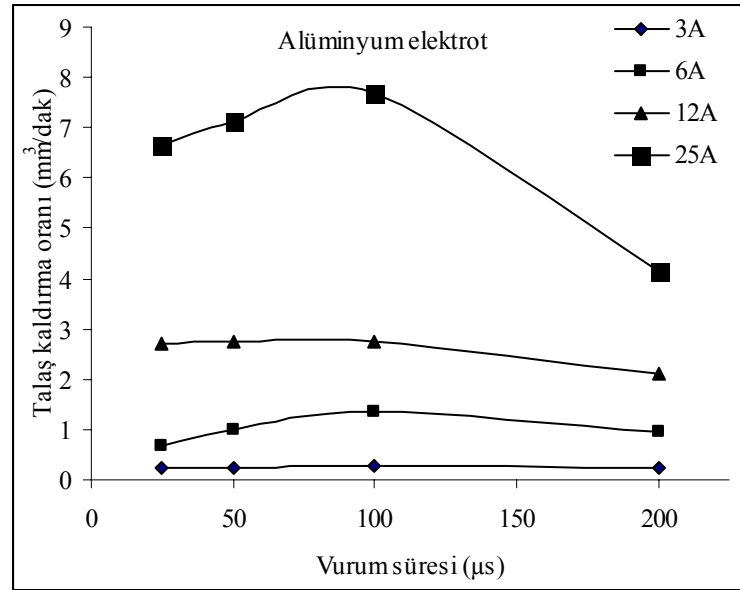
Şekil 6.60 – 6.62’de Tablo 6.7’deki değerlere ait grafikler görülmektedir. Grafikler, vurum süresinin talaş kaldırma oranına olan etkisini belirtmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi talaş kaldırma oranı akımın etkisine benzer şekilde vurum süresi ile artma eğilimindedir. Ancak bu artış vurum süresinin 200 μ s değerine ulaşmasıyla azalmaktadır. İşlem anında, boşalım esnasında plazma kanalındaki genişlemenin yanı sıra, yüksek vurum sürelerinde özellikle ısının da artmasıyla elektrot yüzeylerinde bir karbon tabakasının biriktiği gözlenmiştir. Bu tabaka, elektrot boşalım yüzeyini kaplamakta ve etkin bir boşalımın gerçekleşmesini engellemektedir. Dolayısıyla talaş kaldırma oranı azalmaktadır [158].



Şekil 6.60 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Grafit).

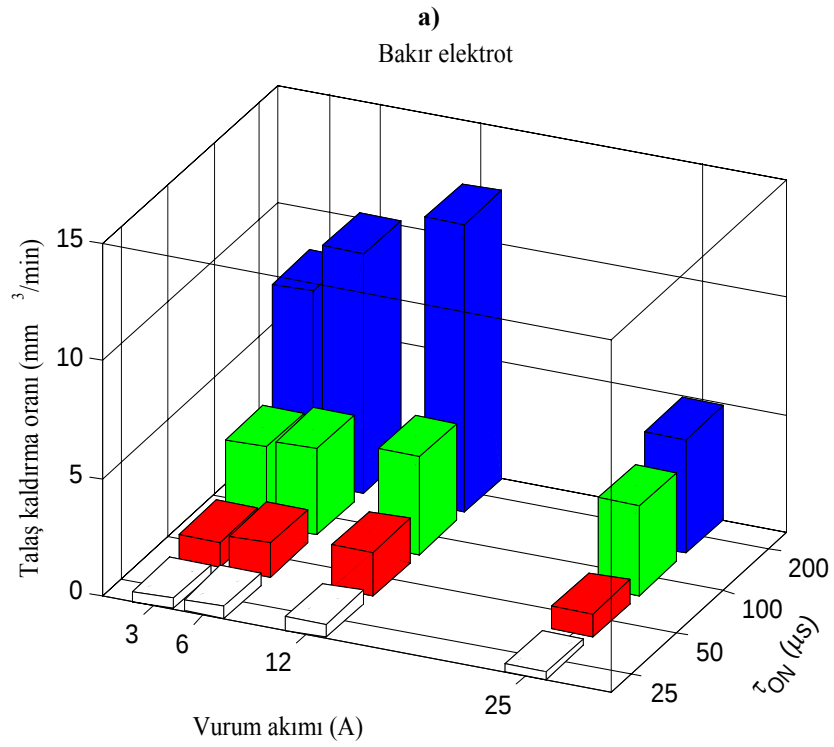
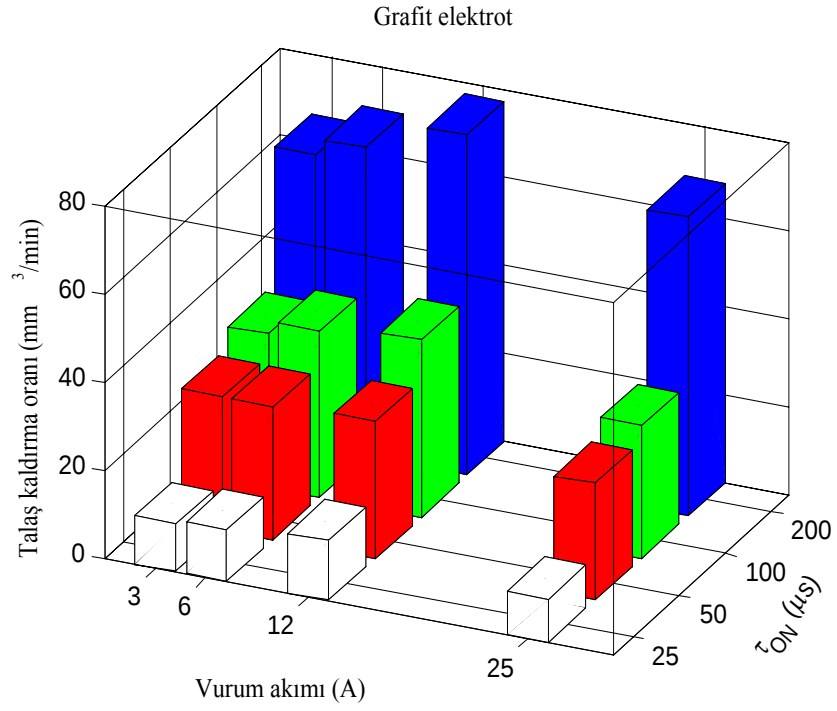


Şekil 6.61 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Bakır).

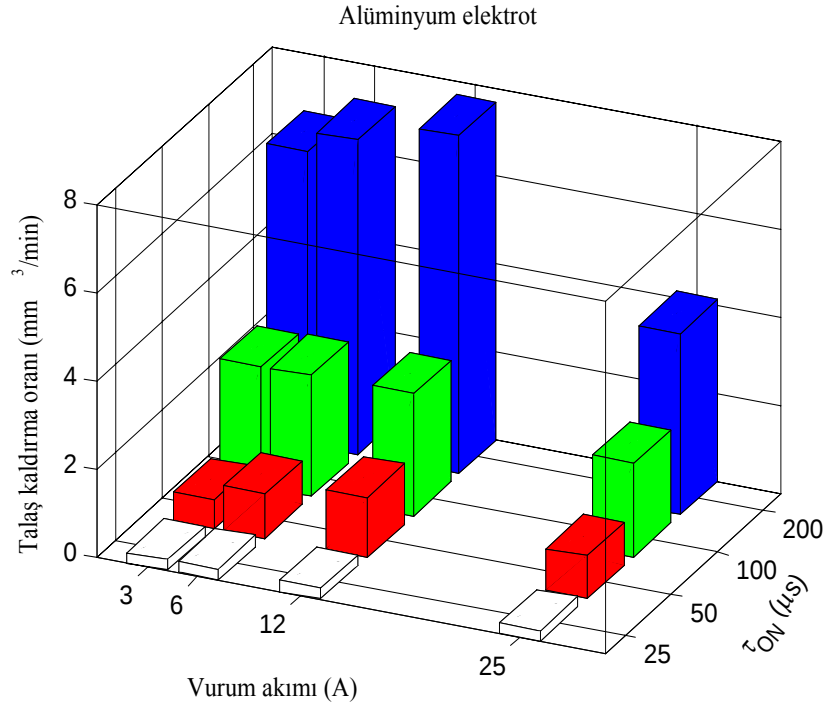


Şekil 6.62 Vurum süresinin talaş kaldırma oranına etkisi (Elektrot: Alüminyum).

Şekil 6.63’de talaş kaldırma oranı ile işlem parametreleri arasındaki ilişki toplu olarak çizgi grafiğinde verilmiştir.



b)



c)

Şekil 6.63 İşlem parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkileri (a: Grafit, b: Bakır, c: Alüminyum).

6.1.6. Elektrot Aşınması Ölçüm Sonuçları

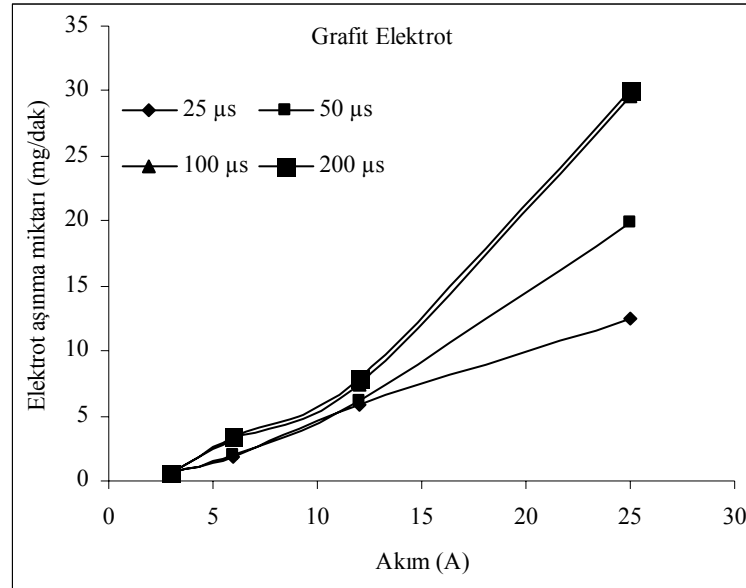
6.1.6.1. Akımın Elektrot Aşınmasına Etkisi

Tablo 6.8’de elektrot aşınması ölçüm sonuçları toplu şekilde verilmiştir. Şekil 6.64 – 66’ de ise vurum süresi sabit iken akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi görülmektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, akım parametresi ile elektrot aşınma miktarı arasında doğru bir orantının olduğu görülmektedir. Bir elektrot malzemesinden beklenen en önemli gereksinimler, iyi elektrik iletkenliği ve az aşınma gösterebilmesidir [159]. Elektrot aşınması, kullanılan elektrot malzemesinin cinsi ve uygulanan boşalımın enerji yoğunluğuna bağlıdır. Dolayısıyla, elektrot malzemesinin erime sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşınma oranı da o nispette azaltılmış olur [160](Erime noktaları, Gr: 3300 °C, Cu: 1083 °C, Al: 660 °C). Şekillerden aynı zamanda en fazla aşınmanın alüminyum elektrotta, en az aşınmanın ise grafit elektrotta gerçekleştiği görülmektedir. Aynı zamanda, işlenen malzeme yüzey karakteristiklerinin de elektrot aşınması üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Daha önce de ifade edildiği gibi malzeme yüzeyinde oluşan $Ti_{24}C_{15}$ karbürleri, elektrot aşınması ve talaş kaldırma oranını önemli derecede azaltmaktadır. $Ti_{24}C_{15}$ karbürlerinin erime noktaları yaklaşık

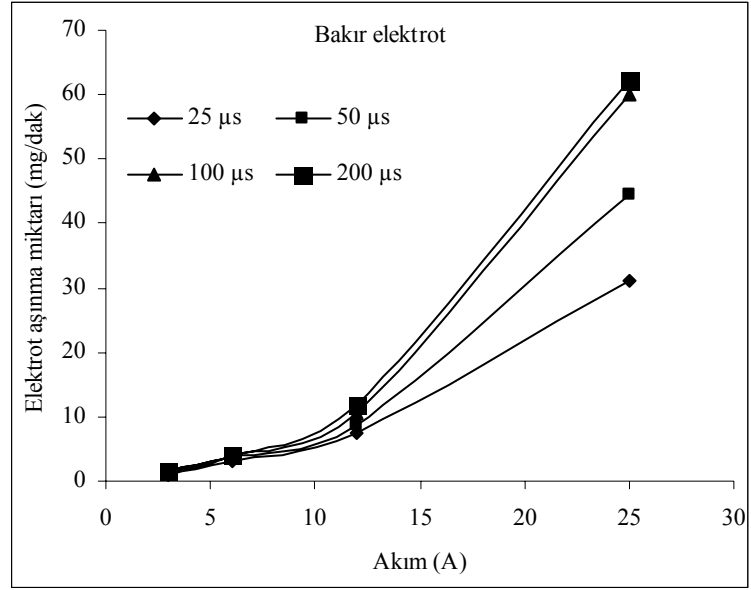
3150 °C’ dir. Bu değ er titanyumun erime noktasının yaklaşık iki katıdır. Dolayısıyla, talaş kaldırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [161].

Tablo 6.8. Elektrot aşınması ölçüm sonuçları.

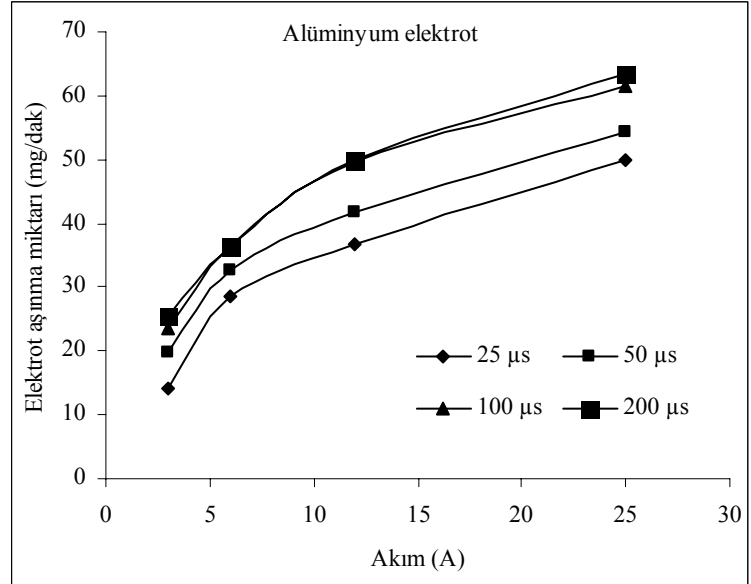
Deney no	Elektrot aşınması (mg/dak)		
	Grafit	Bakır	Alüminyum
1	0.57	0.99	14.02
2	0.61	1.16	19.63
3	0.63	1.46	23.64
4	0.69	1.67	25.46
5	1.79	3.09	28.54
6	1.96	3.62	32.71
7	3.28	3.94	36.28
8	3.32	4.12	36.42
9	5.88	7.46	36.64
10	6.13	8.61	41.80
11	7.46	10.46	49.71
12	7.93	11.82	49.93
13	12.48	31.18	50.00
14	19.85	44.51	54.31
15	29.57	60.05	61.46
16	30.12	62.08	63.40



Şekil 6.64 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Grafit).



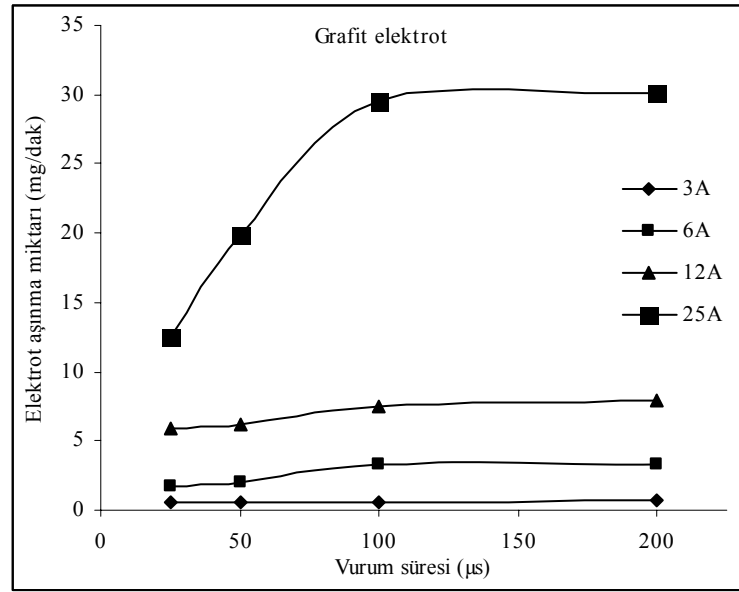
Şekil 6.65 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Bakır).



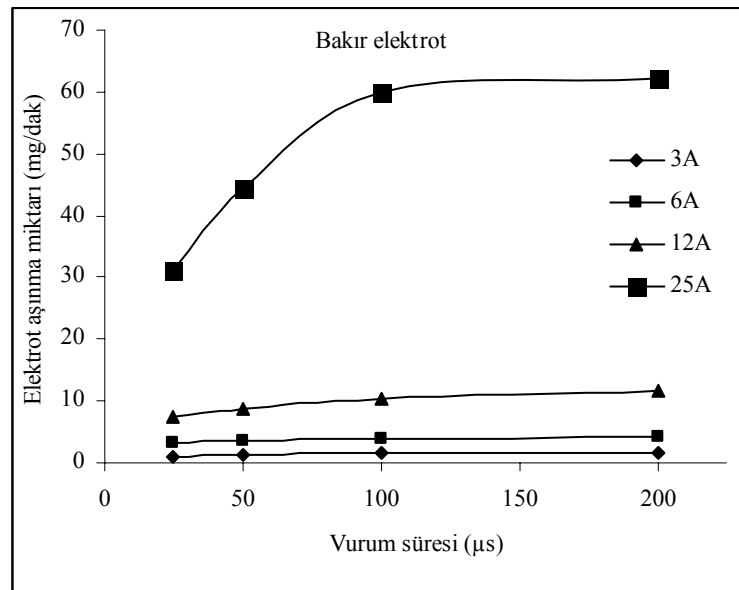
Şekil 6.66 Akım parametresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Alüminyum).

6.1.6.2. Vurum Süresinin Elektrot Aşınmasına Etkisi

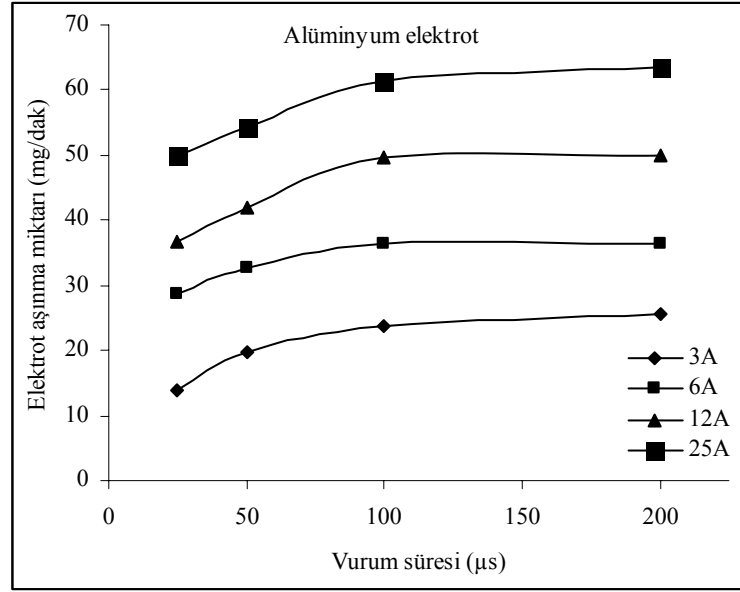
Şekil 6.67 – 6.69’da Tablo 6.8’deki değerlere ait grafikler görülmektedir. Grafikler, vurum süresinin elektrot aşınma miktarına olan etkisini belirtmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi elektrot aşınma miktarı akımın etkisine benzer şekilde vurum süresi ile artma eğilimindedir. 3, 6 ve 12 amper akım değerlerinde elektrot aşınmasındaki miktarlar birbirlerine yakın iken, akımın 25 amper olması ile grafit ve bakır elektrotlarda ani bir artış görülmektedir. Alüminyum elektrotta, akımın her seviyesi için orantılı bir aşınma görülmektedir. Bu durum elektrotların ergime sıcaklıkları ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 6.67 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Grafit).



Şekil 6.68 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Bakır).

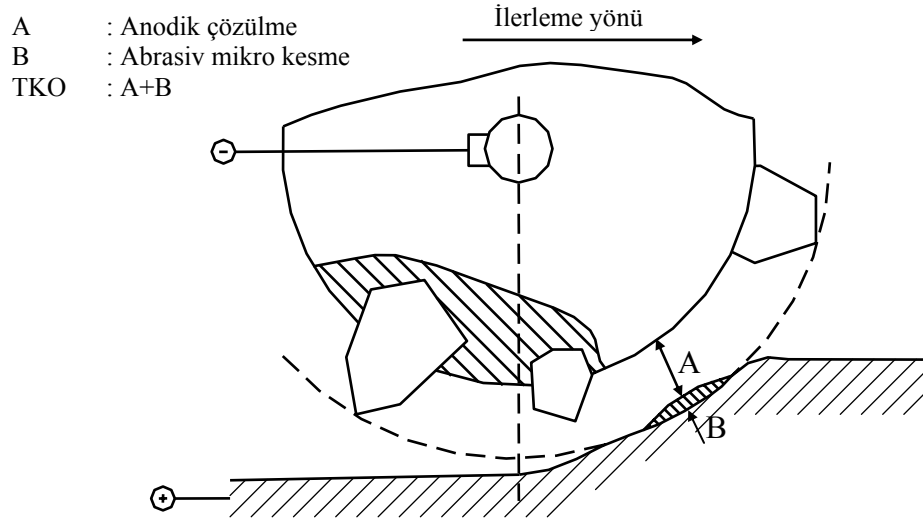


Şekil 6.69 Vurum süresinin elektrot aşınmasına olan etkisi (Elektrot: Alüminyum).

Sonuç olarak, grafit elektrotun talaş kaldırma oranının en yüksek, fakat yüzey kalitesinin en düşük olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu elektrotların sadece kaba işlemlerde kullanılması önerilebilir. Alüminyum elektrotun düşük erime noktasına sahip olmasından dolayı aşınma miktarı ve talaş kaldırma oranı en azdır fakat yüzey kalitesi en yüksektir. Dolayısıyla bu elektrot bitirme işlemlerinde kullanılabilir.

6.2. Elektrokimyasal Taşlama Deney Sonuçları

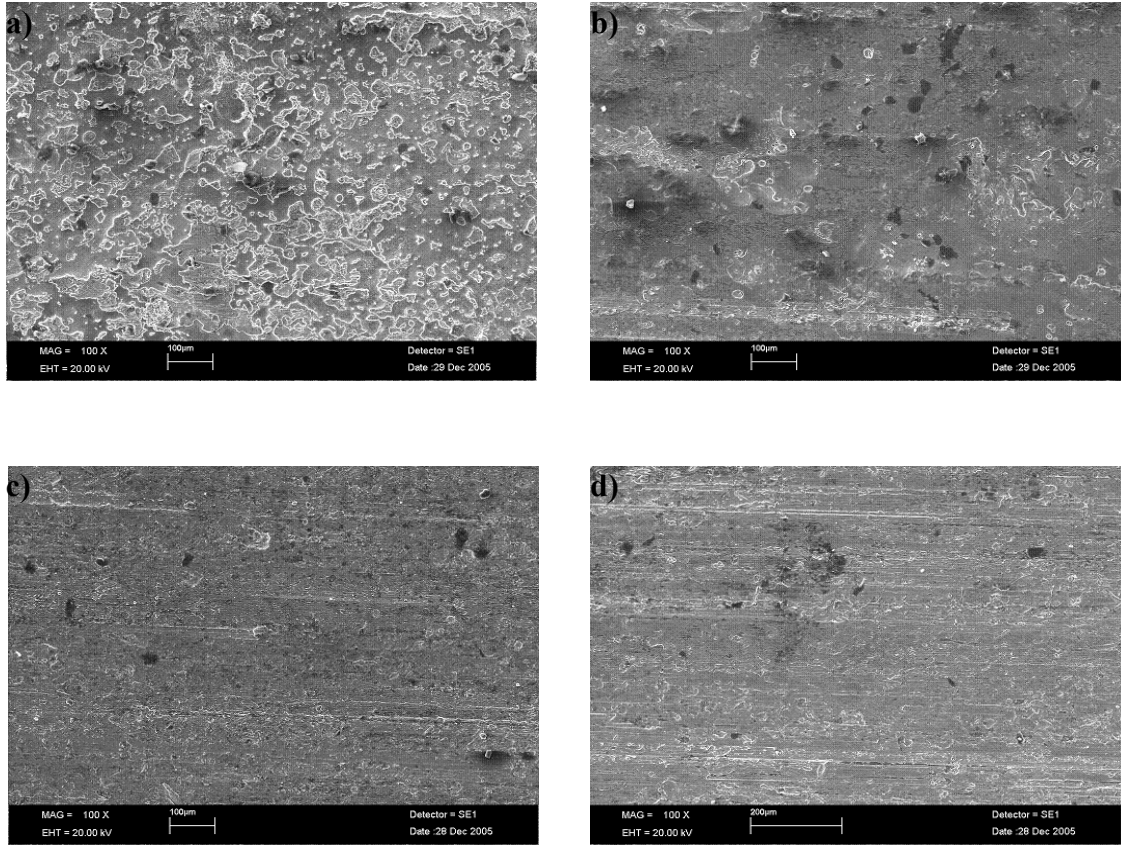
Elektro erozyon ile işlenmiş numunelerin yüzey özellikleri ve artık tabaka kalınlıkları işlem parametreleri ile değiştiğinden, kimyasal taşlama deneylerinin karşılaştırma açısından standartlaştırılması için bütün numuneler (aynı elektro erozyon işlemi görmüş) aynı seçildi. Elektrokimyasal taşlama işleminde, taş ile iş parçası arasındaki etkileşim Şekil 6.70’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, talaş kaldırma mekanizması anodik çözünme ve abrasiv tanelerin mekanik olarak kaldırdığı talaş miktarının toplamından oluşmaktadır. Anodik çözülme, taşın bakır yüzeyi ile iş parçasının yüzeyi arasındaki A aralığında, abrasiv tanelerin talaş kaldırma etkinliği ise en yüksek abrasiv tanelerin yüzeyleri ile iş parçası yüzeyi arasındaki B aralığında oluşmaktadır. Talaş kaldırma oranı, bu aralıkların yanı sıra uygulanan Elektrokimyasal taşlama parametrelerine bağlıdır. İşleme parametrelerinin yüzey özelliklerine olan etkileri aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 6.70 Elektrokimyasal taşlama işleminde talaş kaldırma mekanizması.

6.2.1. İşleme Voltajının Etkisi

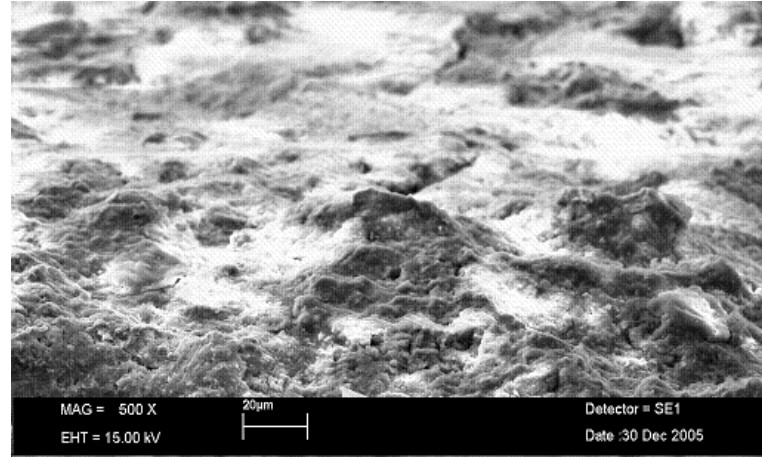
İşleme voltajının yüzey yapısına olan etkisi Şekil 6.71’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, işleme voltajının 2V olduğu durumda, Elektrokimyasal taşlama işleminin yüzey üzerinde pek etkin olmadığı, yüzeyden çok az bir miktar veya hiç talaş kaldırılamadığı ve yüzeyin elektro erozyon yüzeyine benzer olduğu görülmektedir. Elektro erozyon yönteminin meydana getirdiği yüzey hasarları yüzeyden kaldırılamamıştır. İşleme voltajının artmasıyla bu hasarlar giderek yok olmakta ve voltajın 8V olduğu durumda, yüzeyden tamamen kaldırılmaktadır.



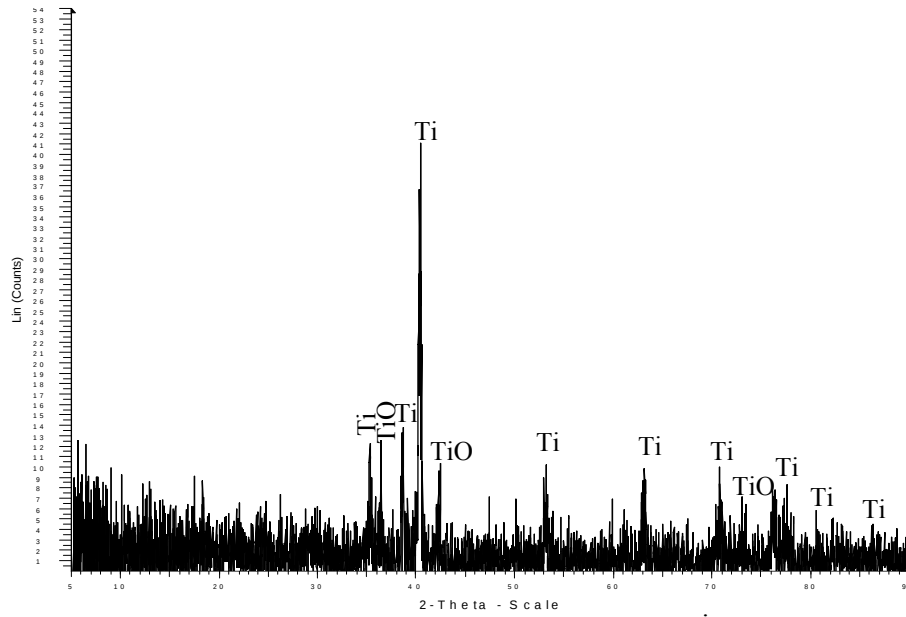
Şekil 6.71 İşleme voltajının yüzey yapısına olan etkisi (a: 2V, b: 4V, c: 6V, d: 8V).

2V işleme şartlarında, oluşan yüzeye açılı bakıldığında, yüzey üzerinde beyaz bir tabakanın olduğu görülmektedir (Şekil 6.72). Bu yüzeyden alınan XRD analizi ise Şekil 6.73’de verilmiştir. XRD analiz sonucuna göre bu tabakanın TiO olduğu görülmektedir. Bu beyaz oksit filmi, yüzeye kuvvetli bir şekilde bağlanmış ve elektrolit akış basıncı veya abrasiv tanelerin mekanik hareketi ile yüzeyden kaldırılamamıştır. Bu film, taşın bakır yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasında bir engel olmakta, yüzeyi pasifleştirmekte ve iki elektrot arasında akım geçimini engellemektedir. Ayrıca, oksit filmi, düzensiz akım yoğunluklarına yol açmakta ve çift fazlı titanyum alaşımının farklı fazlarının çözünmesine neden olmaktadır. İşleme voltajının artmasıyla, bu film kırılmakta ve daha temiz yüzeyler elde edilmektedir. Oksit filminin kırılmasının yanı sıra voltaj artışı elektrolitin iletkenliğini artırmakta ve daha fazla anodik çözünmenin gerçekleşmesine yol açmaktadır. İşleme voltajının 4V ve 8V olduğu durumlarda taşlanmış yüzeylerden alınan EDS analizleri sırasıyla Şekil 6.74 ve 6.75’ de verilmiştir. Düşük voltaj altında titanyum alaşımının sadece α fazı anodik çözülürken, 8V da alaşımın bütün elementlerinin çözüldüğü görülmektedir. Yüzeyde ayrıca tuz (Na) ve hava (O) bileşenleri de bulunmaktadır.

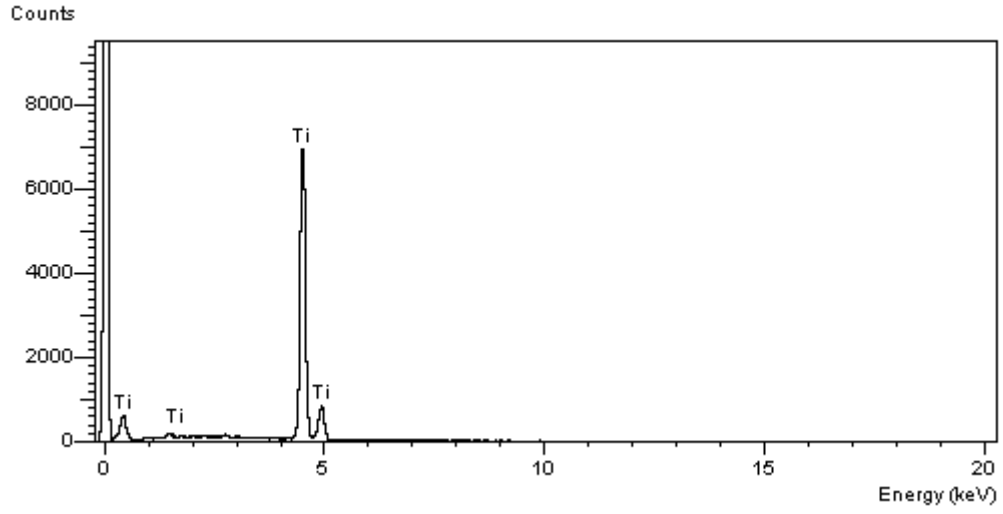
İşleme voltajının artmasıyla, akım yoğunluğu da artmaktadır [162]. Faraday yasasına göre, talaş kaldırma oranı akım yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Bu şartlarda, aktif metal çözünürlüğünün yaklaşık 4V değerinde başladığı ve voltajın artmasıyla talaş kaldırma oranında keskin bir artışın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elektro erozyonla işlenmiş yüzey hasarları voltaj ile azalmaktadır. Dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Fakat artık tabakanın tamamen kaldırılmasının ardından talaş kaldırma oranının artmasıyla yüzey tekrar kötüleşmektedir.



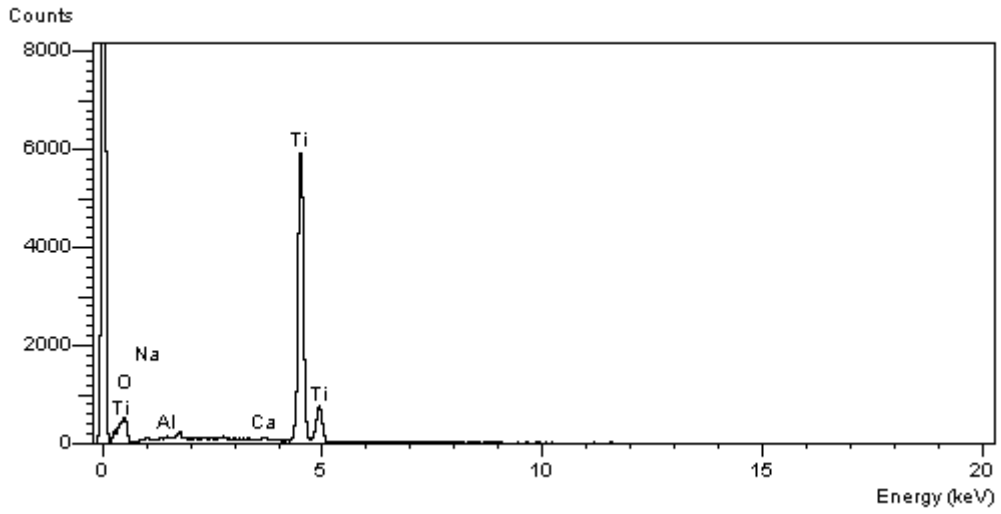
Şekil 6.72 Yüzeye bağlanan beyaz oksit filmi (İşleme voltajı: 2V).



Şekil 6.73 2V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan XRD analizi (İşleme voltajı: 2V).



Şekil 6.74 2V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.

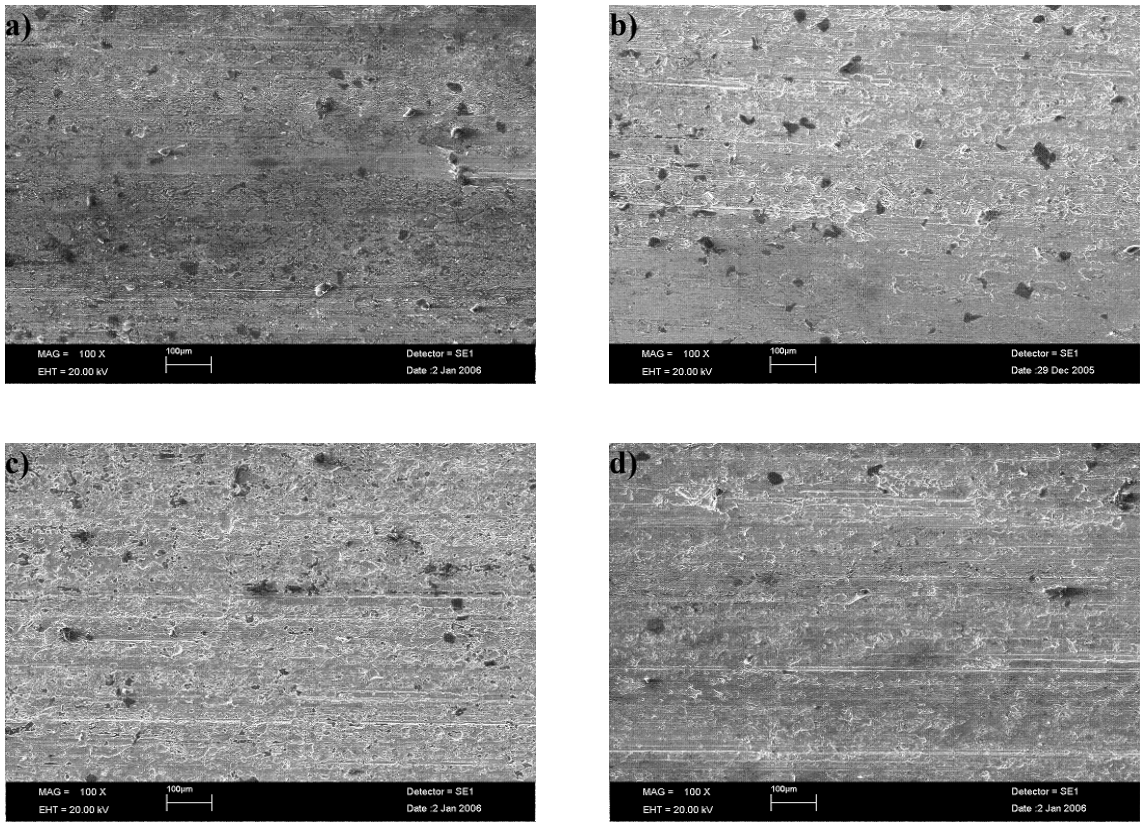


Şekil 6.75 8V şartlarında işlenmiş yüzeyden alınan EDS analizi.

6.2.2. Elektrolit Akma Oranının Etkisi

Elektrokimyasal taşlama işleminde kullanılan elektrolit, akım geçiminin yanı sıra yüzeyden parçalanarak iyon forma dönüştürülmüş metal parçalarının da taşlama bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Elektrolit akma oranının yüzey yapısına olan etkisi Şekil 6.76’da verilmiştir. Elektrolit akma oranının düşük olmasıyla daha kötü yüzeylerin oluştuğu görülmektedir. Kimyasal taşlama esnasında, akım geçimi ve elektrolit şartlarına bağlı olarak

anodik çözülme sırasında bazı gazlar açığa çıkmaktadır (genellikle hidrojen). Açığa çıkan bu gazlar, keskin abrasiv taneler ile bağlayıcı arasındaki bağlanmayı zayıflatmakta ve abrasiv tanelerin kırılmalarına yol açmaktadır. Kırılan taneler ara bölgede abrasiv aşınma şartları oluşturarak yüzeye gelişigüzel batmaktadır. Elektrolit akma oranının düşük olduğu durumlarda, bu taneler ara bölgeden etkin bir biçimde süpürülememektedir. Akma debisinin artmasıyla, açığa çıkan gaz kabarcıkları hızlı bir şekilde kaldırılmakta ve kırılan tane oranı azaltılmaktadır. Bu durumda, daha az miktardaki taneler yüksek akma oranı ile ara bölgeden etkin bir şekilde uzaklaştırılmaktadır ve daha temiz yüzeyler elde edilebilmektedir.



Şekil 6.76 Elektrolit akma oranının yüzey yapısına olan etkisi (a: 500 l/s, a: 1000 l/s, a: 1500 l/s, a: 2000 l/s)

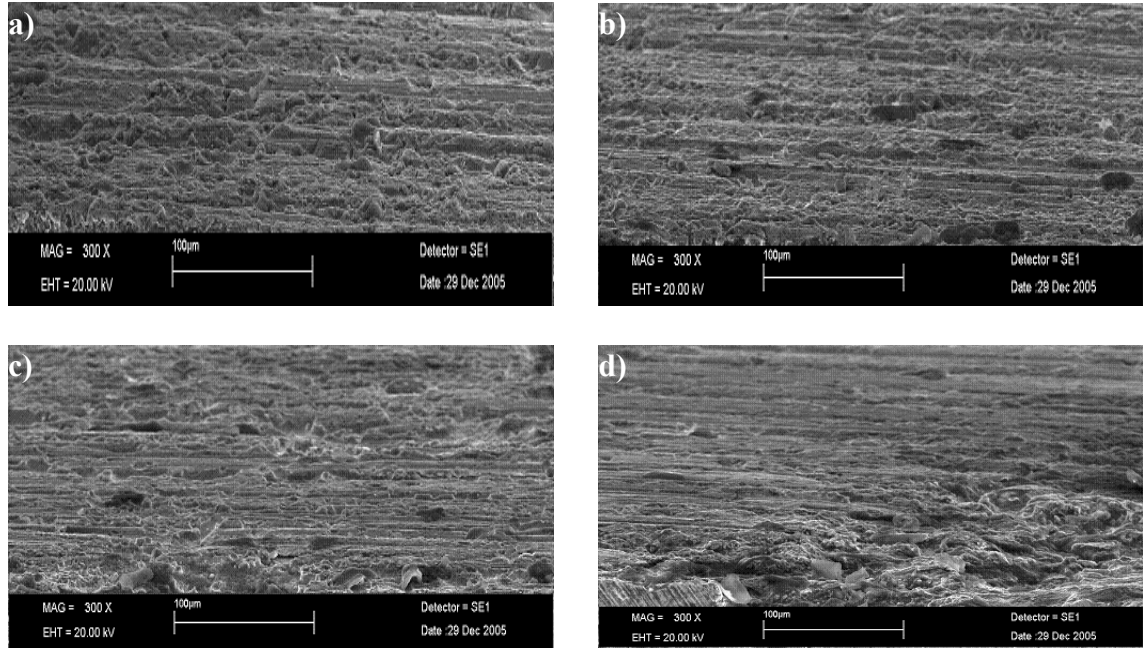
Ayrıca, yüksek akış hızlarında taş ile iş parçası arasında oluşan elektrolit filmi, yüzeylere daha paralel olmakta ve ideal anodik çözülme şartları gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yüzeyden daha homojen bir şekilde talaş kaldırılmaktadır.

Diğer yandan, akma debisi akış şeklini de etkilemektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada [163], elektrolit akma oranının artmasının yüzeyde türbülans oluşturabileceği

belirtilmiştir. Akış hızı, akışkanın reynolds sayısını arttırmaktadır. Dolayısıyla yüzeyde yerel türbülanslar oluşmaktadır. Bu türbülanslar talaş kaldırma işlemine yardımcı olmaktadır.

6.2.3 Tabla İlerleme Miktarının Etkisi

Şekil 6.77’de tabla ilerleme hızının yüzey yapısına olan etkisi verilmiştir. Bu parametre, anodik talaş kaldırmadan ziyade, abrasiv tanelerin talaş kaldırmaya olan etkisini daha fazla etkilemektedir. Düşük ilerleme değerlerinde, yüzey yapısı abrasiv tanelerin yüzeyi çizmesi ve oyması şekline gerçekleşmiş ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. İlerleme miktarı arttıkça, daha yayvan ve hasarsız yüzeyler elde edilmektedir. Çünkü, daha fazla ilerleme miktarı ile taşın bakır yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasındaki en küçük aralık, en büyük abrasiv tanenin yüksekliğinden daha büyüktür. Dolayısıyla abrasiv mikro talaş kaldırmanın toplam talaş kaldırmaya katkısı azalmaktadır. Dolayısıyla artan ilerleme ile daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmektedir [164].



Şekil 6.77 Tabla ilerleme miktarının yüzey yapısına olan etkisi (a: 6 l/s, a: 12 l/s, a: 18 l/s, a: 24 l/s)

6.3. Yüzey Pürüzlülüğü İyileşme Oranı

Elektrokimyasal taşlama işleminden önce, numuneler bakır elektrot ile 25 A ve 100 µs vurum süresi şartlarında elektro erozyon yöntemi ile işlenmiştir. Bu işlem neticesinde numunelerin taşlama öncesi yüzey pürüzlülük değerleri, taşlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülükleri ve yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları Tablo 6.9’ da toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 6.9. EDM, AEKT deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin toplu gösterimi.

Taşlama deney no	İşleme voltajı (V)	Elektrolit akma basıncı (gr/l)	Tabla ilerleme miktarı (mm/dev)	İşlem öncesi yüzey pürüzlülüğü (μm)	Taşlama sonrası yüzey pürüzlülüğü (μm)	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (%)
1	2	500	6	5.73	5.12	10.64
2	2	500	12	5.0	4.14	17.20
3	2	500	24	4.79	3.76	21.50
4	2	1000	6	5.73	4.43	22.68
5	2	1000	12	4.98	4.12	17.26
6	2	1000	24	5.04	3.88	23.01
7	2	2000	6	5.09	3.79	25.54
8	2	2000	12	4.76	2.96	37.81
9	2	2000	24	4.80	3.38	29.58
10	4	500	6	4.57	1.72	62.36
11	4	500	12	5.10	1.68	67.05
12	4	500	24	5.02	1.54	69.32
13	4	1000	6	5.01	1.48	70.45
14	4	1000	12	4.94	1.12	77.32
15	4	1000	24	4.90	1.10	77.55
16	4	2000	6	5.11	1.10	78.47
17	4	2000	12	5.08	0.98	80.70
18	4	2000	24	4.84	0.77	84.09
19	8	500	6	4.72	0.68	85.59
20	8	500	12	4.93	0.72	85.39
21	8	500	24	4.69	0.64	86.35
22	8	1000	6	4.81	0.57	88.14
23	8	1000	12	5.12	0.52	89.84
24	8	1000	24	4.84	0.48	90.08
25	8	2000	6	5.11	0.31	93.93
26	8	2000	12	5.0	0.23	95.40
27	8	2000	24	4.96	0.12	97.58

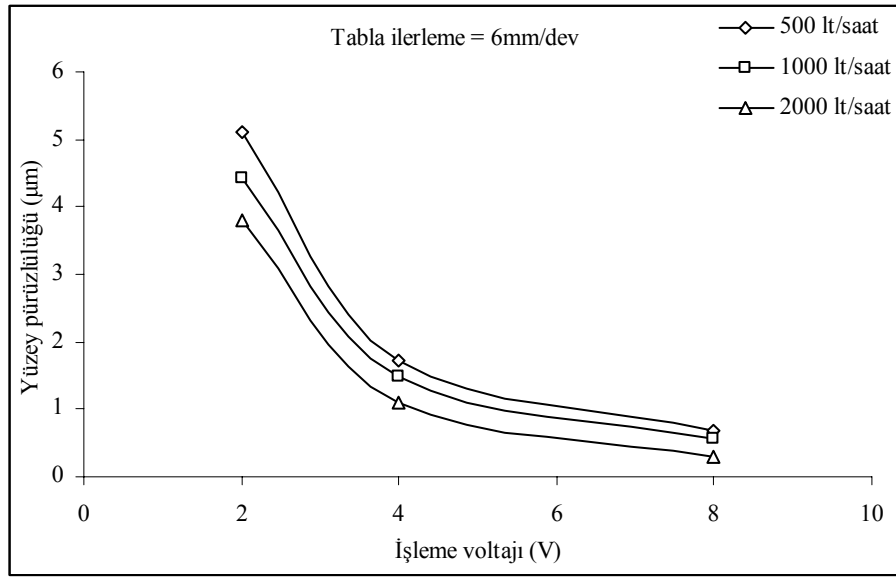
Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş bir parçanın kalite oranını belirlemekte kullanılan bir parametredir. Yapılan benzer çalışmalarda, işlenmiş yüzeylerin başka yöntemlerle iyileştirilmesi durumunda yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme dikkate alınmıştır [47]. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranı;

$$YPIO = \frac{YP_{EDM} - YP_{AEKT}}{SR_{EDM}} \times 100(\%) \text{ şeklinde hesaplanmıştır. Burada, } YPIO,$$

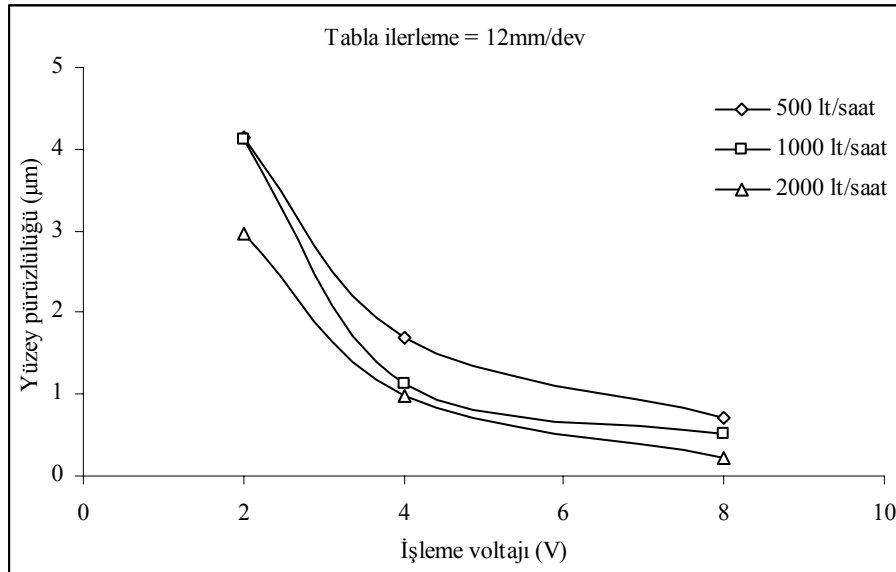
yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı, YP_{EDM} elektro erozyon ile işlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülükleri ve YP_{AEKT} abrasiv elektrokimyasal taşlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleridir.

Tablo 6.3'deki değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 6.78 – 6.80' de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, diğer parametreler sabit iken işleme voltajının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. İşleme voltajının 2V olduğu durumda (Şekil 6.78) yüzey pürüzlülüğü

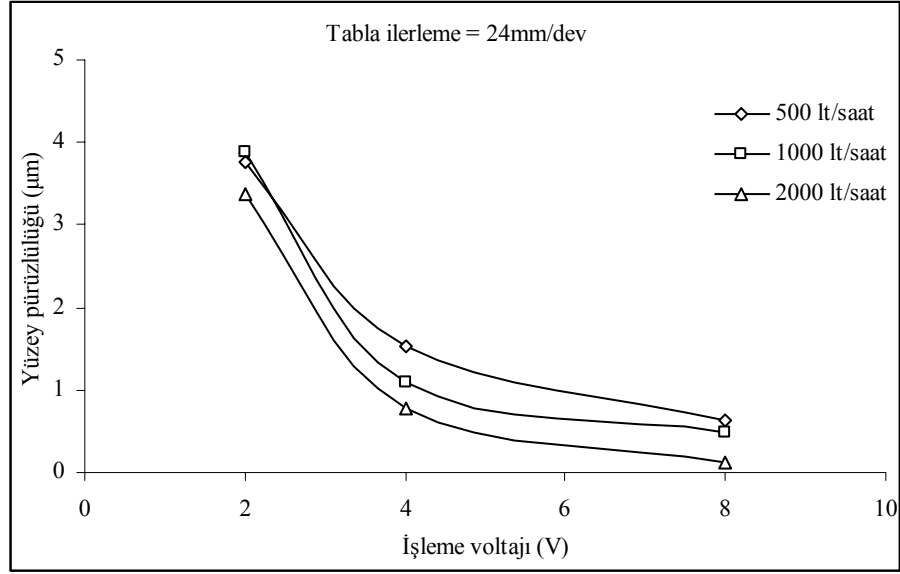
5.73 μm ' den 5.12 μm ' ye düşmüştür. Bu azalma sadece % 10.64 oranında yüzeyi iyileştirmiştir. İşleme voltajının 8V olmasıyla bu oran % 97.58 olmaktadır. Parametreler kendi aralarında değerlendirildiklerinde en önemli iyileşmenin işleme voltajı ile gerçekleştiği görülmektedir. Diğer parametreler, sabit işleme voltajı şartlarında yüzey pürüzlülüğünü az miktarda iyileştirmektedirler. Dolayısıyla elektro erozyonla işlenmiş yüzey hasarlarının işleme voltajının 8V olması durumunda tamamen yüzeyden kaldırıldığı söylenebilir. Yüzey pürüzlülük değerleri dikkate alındığında aktif metal çözülmenin 4 V işleme voltajında başladığı görülmektedir. 2V şartlarında yüzeyden ihmal edilebilecek düzeyde talaş kaldırılmıştır.



Şekil 6.78 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.

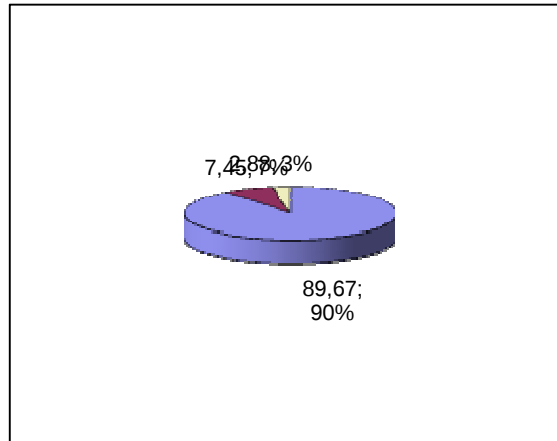


Şekil 6.79 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.



Şekil 6.80 Yüzey pürüzlülüğünün taşlama parametreleriyle değişimi.

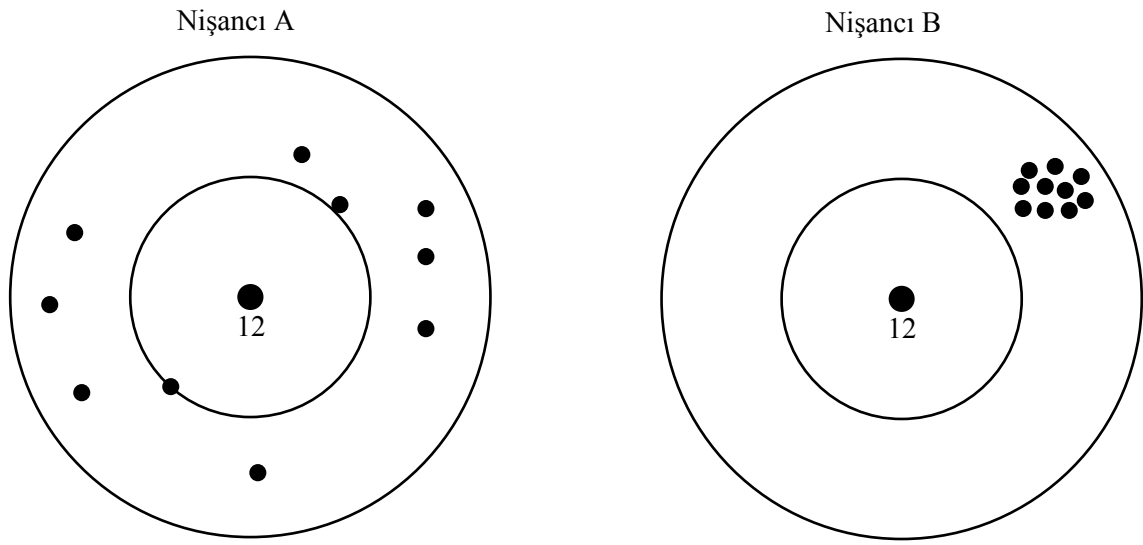
Elektrokimyasal taşlama işlemi sonucunda $0.12 \mu\text{m}$ derecesinde yüzeyler elde edilebilmektedir. Bu değer oldukça düşük bir değerdir. Elektro erozyon yönteminin özellikle kalıpcılık alanında kullanıldığı dikkate alındığında, kalıp uygulamalarında yüzey pürüzlülüğünün $0.8 \mu\text{m}$ veya bitirme (ayna yüzey) yüzeyinin $0.02 \mu\text{m}$ olması gerekmektedir [165]. Geleneksel işleme yöntemlerinde en iyi şartlarda bile yüzey pürüzlülüğü $0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ arasında elde edilebilmektedir. Dolayısıyla taşlama yönteminin yüzey bitirme yeteneğinin uygun olduğu söylenebilir. Şekil 6.81’ de işleme parametrelerinin YPIÖ’ na katkısı görülmektedir. İşleme voltajı ortalama % 90, elektrolit basıncı % 7 ve tabla ilerleme miktarı % 3 oranında katkıda bulunmaktadır.



Şekil 6.81 Taşlama parametrelerinin YPIÖ’ na katkısı.

7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ

Bu çalışmada, elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme deney sonuçlarının analizinde varyans analizi metodu kullanılmıştır. Varyans analizi yöntemi (ANOVA), işleme parametrelerinin işlem performansları üzerinde istatistiksel olarak ne kadar bir etkiye sahip olduklarına bakmak için kullanılır. Varyasyon, hedef değerden sapma olarak değerlendirilebilir. Varyasyon kavramını daha iyi anlamak için, Taguchi Şekil 7.1’de görüldüğü gibi “Kim daha iyi nişancı”, başlıklı örneği sunmuştur.



Şekil 7.1. Kim daha iyi nişancı ?

Bu örnekte her iki nişancı da onar atış yaparlar. Nişancı A’nın ortalama pozisyonu hesaplanırsa, ortalamanın hedefte veya hedefe çok yakın olduğu görülmektedir. Diğer yandan nişancı B’nin ortalaması, hedeften çok uzaktır ancak, atışları çok tutarlıdır. Her iki nişancı için varyasyon hesaplandığında, nişancı A’nın varyasyonunun çok daha fazla olduğu görülecektir. B’nin atışlarını bir ayarla düzeltebilirken, A’yı iyi bir nişancı yapmak için çok uğraşmak gerekecek; belki de A hiçbir zaman iyi bir nişancı olamayacaktır [166].

Varyans analizinde deneysel değerler ile arzu edilen değerler arasındaki bu sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu (loss function) kullanılır. Bu kayıp fonksiyon, performans karakteristiğini ölçmek için kullanılır. Kayıp fonksiyonu, işaret/gürültü (S/N – signal/noise) oranına dönüştürülür. S/N oranı, süreç değişkenliğinin bir ölçüsüdür. Taguchi’ye göre S/N oranı kullanılarak sürecin optimize edilmesi sağlanır. Genellikle, S/N oranının analizinde üç çeşit performans karakteristiği kullanılmaktadır. Bunlar, daha düşük – daha iyidir, daha yüksek –

daha iyidir ve ortalama – daha iyidir şeklinde tanımlanmaktadır. İşlemede elde edilmek istenilen duruma göre bu performanslardan bir tanesi seçilmektedir. Örneğin, yüzey pürüzlülüğünün incelendiği bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün en düşük olması istenir veya takım ömrünün en yüksek olmasının istendiği çalışmada en yüksek en iyidir seçimi tercih edilir. S/N oranlarının belirlenmesinde her bir durum için aşağıdaki farklı formüllerden yararlanılır;

$$\text{Ortalama en iyidir} \quad : S / N_{NB} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (7.1)$$

$$\text{Daha yüksek daha iyidir (maksimize)} \quad : S / N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7.2)$$

$$\text{Daha düşük daha iyidir (minimize)} \quad : S / N_{SB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7.3)$$

burada, $\bar{y}$, ölçülen değerlerin ortalaması, s_y^2 , y 'nin varyansı, n , deney sayısı ve y de ölçülen değerdir. Yukarıdaki kategorilerin hepsi için, elde edilen S/N oranı ne kadar yüksek olursa, performans da o kadar yüksek demektir. Dolayısıyla, işleme parametrelerinin optimum seviyeleri aynı zamanda en yüksek S/N oranının olduğu durumdur.

7.1. Elektro Erozyon Deneylerinin İstatiksel Analizi

Bu çalışmada, titanyum alaşımının elektro erozyon yöntemi ile işlenmesi neticesinde, yüzey pürüzlülüğü, beyaz tabaka kalınlığı ve elektrot aşınması gibi performans çıktılarının varyans analizlerinde “daha düşük daha iyidir” (lower is better) ve talaş kaldırma oranının analizinde ise “daha yüksek daha iyidir” (higher is better) kayıp fonksiyonları kullanılmıştır. Deney sonuçlarının S/N oranlarının tespitinde Tablo 7.1’de görülen faktörler ve seviyeleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, elektro erozyon deneyleri için vurum akımı ve vurum süresi olmak üzere iki kontrol faktörü bulunmaktadır. Her bir faktör dört farklı seviyeye sahiptir. Deneyler sonucunda yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler, Minitab Release 14 ve JMP 5.0 paket programları kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 7.1. Elektro erozyon işleme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	Elektro erozyon işleme parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Vurum akımı	A	3	6	12	25
B	Vurum süresi	μs	25	50	100	200

7.1.1. Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi

Elektro erozyon deneylerinde grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum olmak üzere üç farklı elektrot malzemesi kullanılmıştır. Tablo 7.1’de verilen elektro erozyon işleme parametrelerinin herbir seviyesine göre farklı elektrot malzemeleri için yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri sırasıyla Tablo 7.2 – 7.4’de verilmiştir. İşleme parametrelerinin herbir seviyesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.2 – 7.4’de görülmektedir. Şekillerdeki A1, A2, A3 ve A4 vurum akımının, B1, B2, B3 ve B4 vurum süresinin kullanılan herbir seviyesini göstermektedir (Tablo 7.1).

Tablo 7.2. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-12.114 ^a	-14.659	-15.839	-18.746
Vurum süresi (B)	-15.019	-15.826	-16.474	-14.039 ^a

Toplam ortalama S/N oranı = -15.3395 dB

^aOptimum seviyeler

Tablo 7.3. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-7.147 ^a	-9.101	-11.255	-12.504
Vurum süresi (B)	-9.938	-10.509	-11.156	-8.404 ^a

Toplam ortalama S/N oranı = -10dB

^aOptimum seviyeler

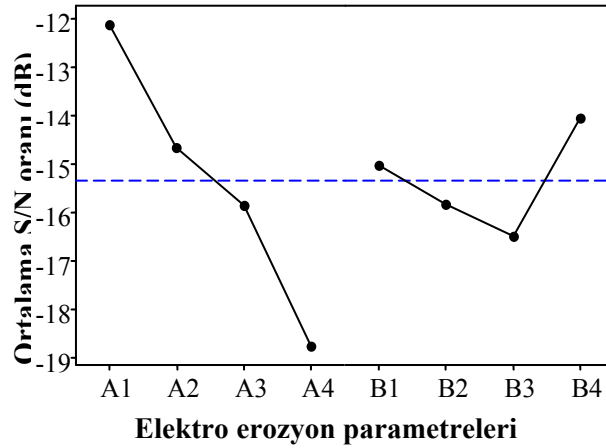
Tablo 7.4. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	1.5900	2.4025	3.0550	3.8475 ^a
Vurum süresi (B)	2.5175	2.7375	3.2400 ^a	2.4000

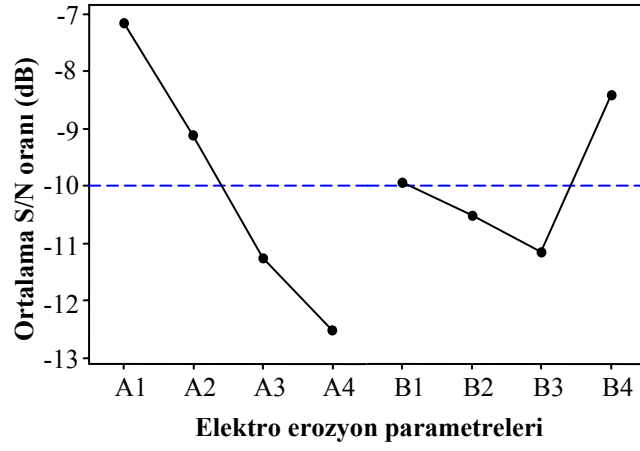
Toplam ortalama S/N oranı = 2.7237dB

^aOptimum seviyeler

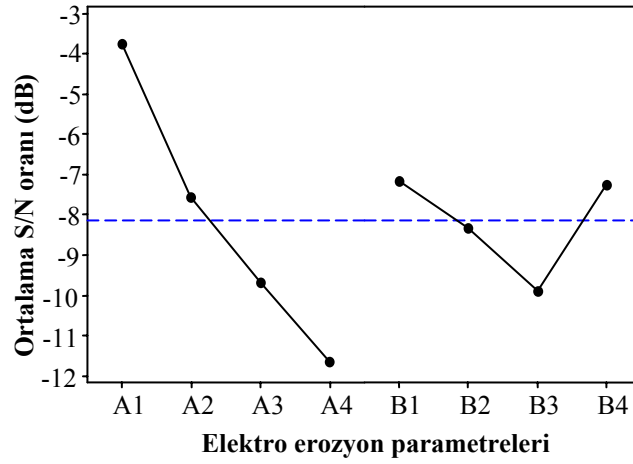
Tablo 7.2 – 7.4’ de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, herbir elektrot malzemesi için titanyum alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için işleme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Minimum yani optimum yüzey pürüzlülüğü tablolarından da görüldüğü gibi grafit ve elektrolitik bakır elektrotlar ile yapılan işlemlerde 3 A akım ve 200 µs vurum sürelerinde elde edilirken alüminyum elektrot ile yapılan işlemlerde 25 A akım ve 100 µs vurum süresinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır.



Şekil 7.2. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.



Şekil 7.3. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.



Şekil 7.4. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

Şekil 7.2 – 7.4 farklı elektrot malzemeleri ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt grafiğidir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) yüzey pürüzlülüğü değerlerini vermektedir. Şekillerdeki vurum akımı dikkate alındığında (A1, A2, A3 ve A4) akımın artmasıyla S/N oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün artması anlamına gelmektedir. Grafiklerdeki ortalama çizgisi, çalışmada kullanılan elektro

erozyon parametrelerinin seviyeleri içerisinde elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin elde edileceği ortalama değerleri göstermektedir [167].

Varyans analizi, işleme etki eden faktörlerin performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir karar aracıdır. Bu analiz neticesinde serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler vb. gibi nicelikler hesaplanmaktadır. Faktörler arasındaki etkileşimler düşünüldüğünde bu hesaplamalar Tablo 7.5’deki şekilde gösterildiği gibi yapılmaktadır.

Tablo 7.5. Varyans analizi hesap tablosu [166].

$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{A \times B} + SS_C$	SS_T : Toplam kareler toplamı SS_A : A faktörüne ait kareler toplamı SS_B : B faktörüne ait kareler toplamı $SS_{A \times B}$: AxB’ye ait kareler toplamı SS_C : Hata kareler toplamı
$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N}$	N : Gözlemlerin toplam sayısı y_i : i. gözlem T : Tüm gözlemlerin toplamı
$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$	k_A : A faktörünün seviye sayısı A_i : A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı n_{Ai} : A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı
$SS_{A \times B} = \left[\sum_{i=1}^c \frac{(A \times B)_i^2}{n_{A \times B_i}} \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B$	c : Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı $(A \times B)_i$: A ve B faktörlerinin i. koşulu altındaki verilerin toplamı
$SS_C = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{A \times B}$	
$v_T = v_A + v_B + v_{A \times B} + v_C$ $v_T = N - 1$	v_A : A faktörünün serbestlik derecesi v_B : B faktörünün serbestlik derecesi $v_{A \times B}$: Etkileşimin serbestlik derecesi v_C : Hatanın serbestlik derecesi N : Deneme sayısı
$v_A = k_A - 1$ $v_B = k_B - 1$ $v_{A \times B} = (v_A)(v_B)$	k_A : A faktörünün seviye sayısı k_B : B faktörünün seviye sayısı

$V_C = \frac{SS_C}{v_C}$	V_C : Hata varyansı
$V_A = \frac{SS_A}{v_A}$	V_A : A faktörünün varyansı
$V_B = \frac{SS_B}{v_B}$	V_B : B faktörünün varyansı
$V_{A \times B} = \frac{SS_{A \times B}}{v_{A \times B}}$	$V_{A \times B}$: A $\times$ B etkileşimi için varyans
$F_A = \frac{V_A}{V_C}$ F_{α, v_1, v_2}	F_A : A faktörüne ait F değeridir. α : Risk $1-\alpha$: Güven aralığı v_1 : Payın serbestlik derecesi v_2 : Paydanın serbestlik derecesi
$SS'_A = SS_A - (V_C)(v_A)$	SS'_A : A faktörüne göre kareler toplamının beklenen değeri
$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100$	P : Katkı yüzdesi

Farklı elektrot malzemeleri ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 7.6 – 7.8’de görülmektedir. Bu tabloların % dağılım ve F değerleri sütunları incelendiğinde, her üç elektrot malzemesi için de akım parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde vurum süresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.

Tablo 7.6. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	90.89	30.30	13.231	83.38
Vurum süresi	3	13.27	4.42	1.930	12.17
Hata	3	6.87	2.29	-	4.45
Toplam	9	111.03	-	-	100

Tablo 7.7. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	67.16	22.39	9.777	77.61
Vurum süresi	3	16.58	5.53	2.414	19.16
Hata	3	6.87	2.29	-	3.23
Toplam	9	90.61	-	-	100

Tablo 7.8. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	11.045	3.682	1.607	82.88
Vurum süresi	3	1.656	0.552	0.241	12.43
Hata	3	6.87	2.29	-	4.69
Toplam	9	19.571	-	-	100

7.1.2. Beyaz Tabaka Kalınlığının İstatiksel Analizi

Tablo 7.1’de verilen işleme parametrelerinin herbir seviyesine göre beyaz tabaka kalınlıklarına ait S/N değerleri, farklı elektrot malzemeleri için sırasıyla Tablo 7.9 – 7.11’de verilmiştir. Farklı elektrotlarla işlemede, işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlıkları üzerindeki etkisi ise sırasıyla Şekil 7.5 – 7.7’de görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, her üç elektrot ile işlemede, beyaz tabaka kalınlıklarının minimuma indirilmesi için her iki işleme parametresinin de birinci seviyede olması gerekmektedir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır. S/N yanıt grafiklerinde akım ve vurum sürelerinin artmalarıyla S/N değerlerinin azalması, beyaz tabaka kalınlıklarının artmasını göstermektedir.

Tablo 7.9. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-24.935 ^a	-26.549	-29.038	-39.021
Vurum süresi (B)	-28.892 ^a	-29.578	-30.305	-30.767

Toplam ortalama S/N oranı = -29.8856 dB

^aOptimum seviyeler

Tablo 7.10. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-21.974 ^a	-24.385	-27.889	-31.765
Vurum süresi (B)	-25.294 ^a	-26.251	-26.835	-27.632

Toplam ortalama S/N oranı = -26.5031 dB

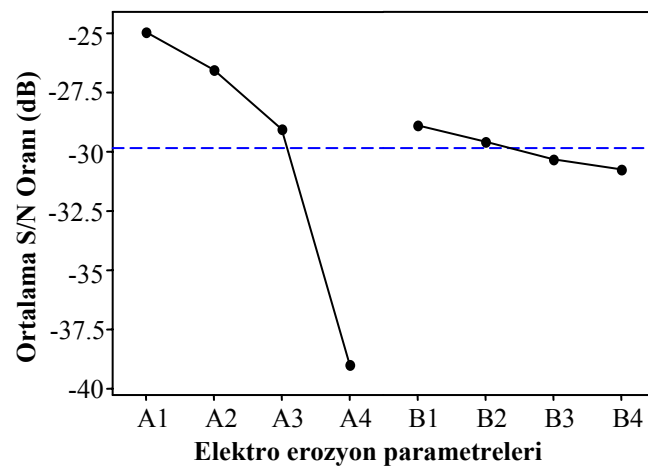
^aOptimum seviyeler

Tablo 7.11. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

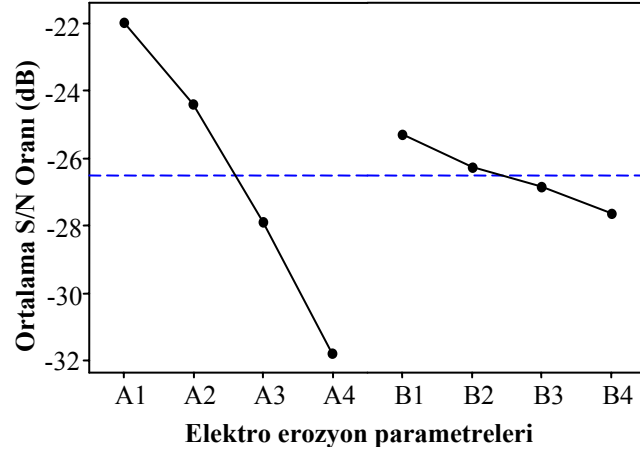
İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-17.625 ^a	-21.533	-26.338	-30.010
Vurum süresi (B)	-22.091 ^a	-23.388	-24.601	-25.426

Toplam ortalama S/N oranı = -23.8765 dB

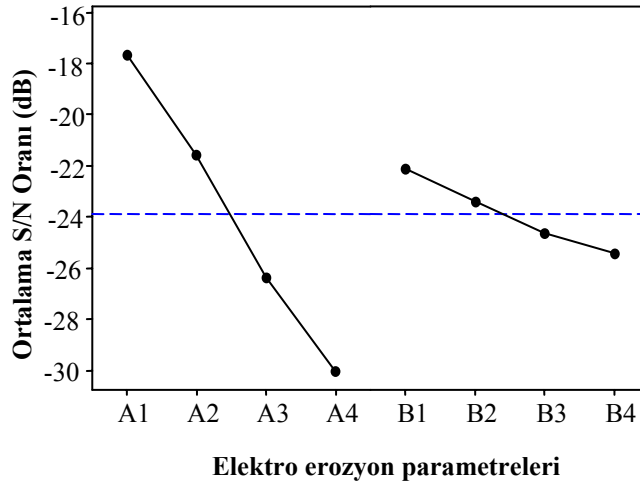
^aOptimum seviyeler



Şekil 7.5. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.



Şekil 7.6. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.



Şekil 7.7. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin beyaz tabaka kalınlığına etkisi.

Farklı elektrot malzemeleri ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 7.12 – 7.14’de görülmektedir. Bu tabloların % dağılım ve F değerleri sütunları incelendiğinde, her üç elektrot malzemesi için de akım parametresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde vurum süresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, beyaz tabaka kalınlığı için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.

Tablo 7.12. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	479.233	159.744	53.248	98.17
Vurum süresi	3	8.1	2.7	1.179	1.67
Hata	3	6.87	2.29	-	0.16
Toplam	9	494.203	-	-	100

Tablo 7.13. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	218.42	72.81	31.794	94.60
Vurum süresi	3	11.6	3.9	1.703	5.04
Hata	3	6.87	2.29	-	0.36
Toplam	9	236.89	-	-	100

Tablo 7.14. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	353	117.67	51.384	92.27
Vurum süresi	3	25.4	8.5	3.711	6.64
Hata	3	6.87	2.29	-	1.09
Toplam	9	385.27	-	-	100

7.1.3. Elektrot Aşınmasının İstatiksel Analizi

Tablo 7.1’de verilen işleme parametrelerinin herbir seviyesine göre elektrot aşınmalarına ait S/N değerleri, farklı elektrot malzemeleri için sırasıyla Tablo 7.15 – 7.17’de verilmiştir. Farklı elektrotlarla işlemede, işleme parametrelerinin elektrot aşınması üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.8 – 7.10’da görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, her üç elektrot ile işlemede, minimum elektrot aşınması için her iki işleme parametresinin de birinci seviyede olması gerekmektedir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır. S/N yanıt grafiklerinde akım ve vurum sürelerinin artmalarıyla S/N değerlerinin azalması, elektrot aşınmasının arttığını göstermektedir.

Tablo 7.15. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	4.103 ^a	-7.911	-16.644	-26.718
Vurum süresi (B)	-9.37 ^a	-10.81	-13.29	-13.69

Toplam ortalama S/N oranı = -11.7912 dB

^aOptimum seviyeler

Tablo 7.16. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-2.236 ^a	-11.295	-19.499	-33.569
Vurum süresi (B)	-14.26 ^a	-16.03	-17.79	-18.52

Toplam ortalama S/N oranı = -16.6498 dB

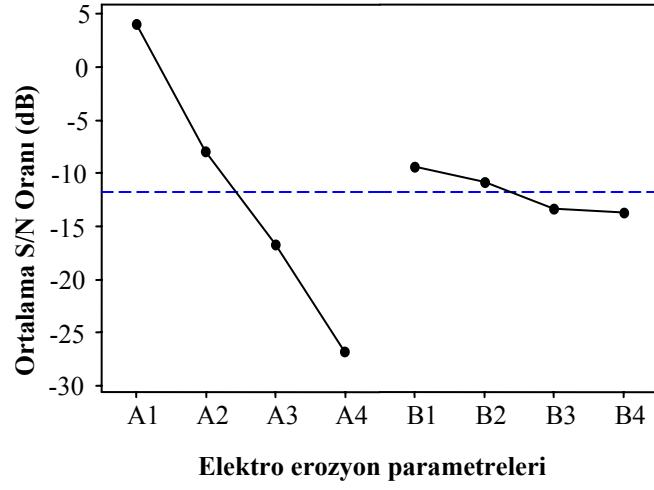
^aOptimum seviyeler

Tablo 7.17. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

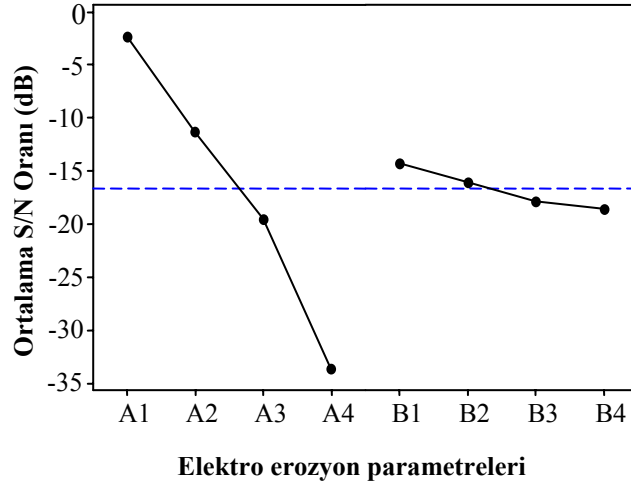
İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-26.096 ^a	-30.456	-32.900	-35.123
Vurum süresi (B)	-29.326 ^a	-30.818	-32.092	-32.338

Toplam ortalama S/N oranı = -31.1436 dB

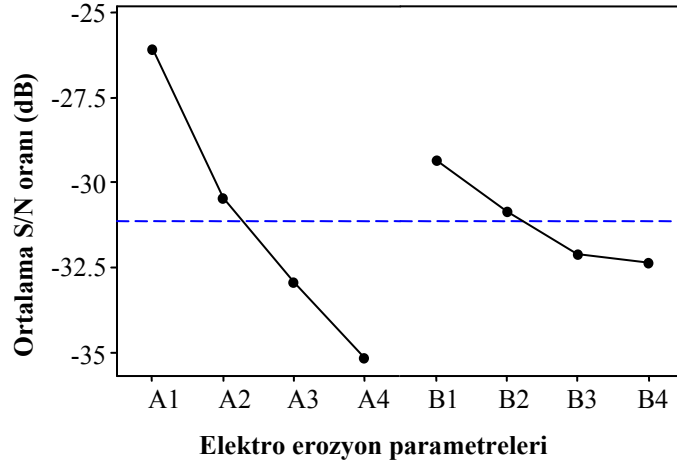
^aOptimum seviyeler



Şekil 7.8. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.



Şekil 7.9. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.



Şekil 7.10. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin elektrot aşınmasına etkisi.

Farklı elektrot malzemeleri ile işlemede elektrot aşınması için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 7.18 – 7.20’de görülmektedir. Bu tabloların % dağılım ve F değerleri sütunları incelendiğinde, her üç elektrot malzemesi için de akım parametresinin beyaz elektrot aşınması üzerinde vurum süresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, elektrot aşınması için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.

Tablo 7.18. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	2056.24	685.41	299.305	96.72
Vurum süresi	3	51	17	7.423	2.38
Hata	3	6.87	2.29	-	0.9
Toplam	9	2114.11	-	-	100

Tablo 7.19. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	2123.25	707.75	309.06	97.76
Vurum süresi	3	43	14	6.113	2
Hata	3	6.87	2.29	-	0.24
Toplam	9	2173.12	-	-	100

Tablo 7.20. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	179.48	59.83	26.126	87
Vurum süresi	3	22.9	7.6	3.318	11.12
Hata	3	6.87	2.29	-	1.88
Toplam	9	209.25	-	-	100

7.1.4. Talaş Kaldırma Oranının İstatistiksel Analizi

Tablo 7.1’de verilen işleme parametrelerinin herbir seviyesine göre talaş kaldırma oranlarına ait S/N değerleri, farklı elektrot malzemeleri için sırasıyla Tablo 7.21 – 7.23’de verilmiştir. Farklı elektrotlarla işlemede, işleme parametrelerinin elektrot aşınması üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.11 – 7.13’de görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlemede talaş kaldırma oranının maksimum olması için akım parametresinin dördüncü seviyede vurum süresi parametresinin ise üçüncü seviyede olması gerekirken, grafit elektrot ile işlemede her iki parametrenin de dördüncü seviyede olması gerektiği görülmektedir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır. S/N yanıt grafiklerinde akım ve vurum sürelerinin artmalarıyla S/N değerlerinin de artması, talaş kaldırma oranının arttığını göstermektedir.

Tablo 7.21. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	21.125	29.269	31.021	36.930 ^a
Vurum süresi (B)	-17.265	-9.122	-7.369	0 ^a

Toplam ortalama S/N oranı = 10.5736 dB

^aOptimum seviyeler

Tablo 7.22. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-6.963	2.329	11.418	18.485 ^a
Vurum süresi (B)	5.57	7.10	8.74 ^a	3.87

Toplam ortalama S/N oranı = 6.3186 dB

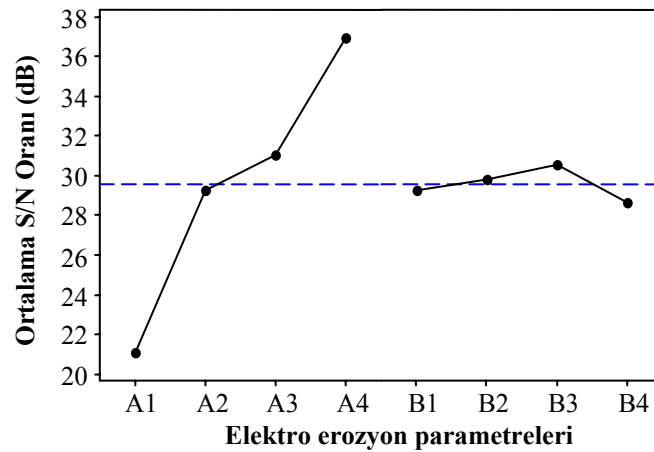
^aOptimum seviyeler

Tablo 7.23. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için herbir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).

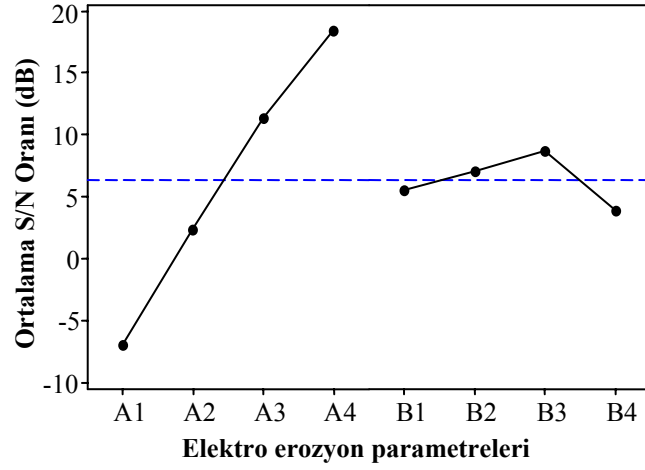
İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Vurum akımı (A)	-12.290	-0.217	8.204	15.896 ^a
Vurum süresi (B)	2.34	3.46	4.38 ^a	1.42

Toplam ortalama S/N oranı = 2.8991 dB

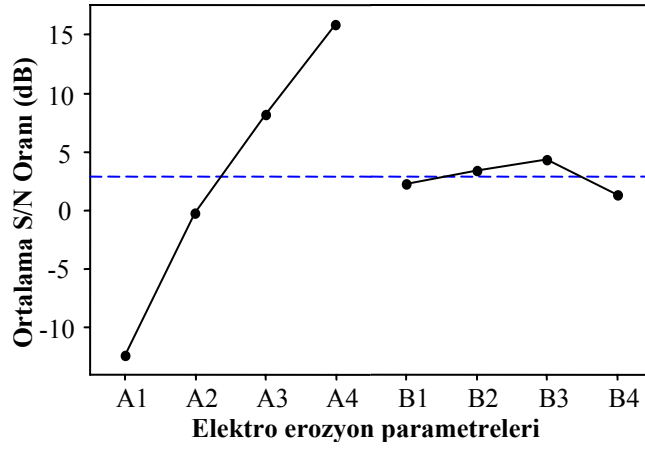
^aOptimum seviyeler



Şekil 7.11. Grafit elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.



Şekil 7.12. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.



Şekil 7.13. Alüminyum elektrot ile işlemede elektro erozyon parametrelerinin seviyelerinin talaş kaldırma oranına etkisi.

Farklı elektrot malzemeleri ile işlemede talaş kaldırma oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 7.24 – 7.26’da görülmektedir. Bu tabloların % dağılım ve F değerleri sütunları incelendiğinde, her üç elektrot malzemesi için de akım parametresinin talaş kaldırma oranı üzerinde vurum süresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, talaş kaldırma oranı için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.

Tablo 7.24. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	510.722	170.241	74.341	98.12
Vurum süresi	3	8.2	2.7	1.179	1.58
Hata	3	6.87	2.29	-	0.3
Toplam	9	525.792	-	-	100

Tablo 7.25. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	1465.29	488.	213.288	95.37
Vurum süresi	3	52	17	7.423	3.39
Hata	3	6.87	2.29	-	1.24
Toplam	9	1524.16	-	-	100

Tablo 7.26. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	% Dağılım
Vurum akımı	3	1749.92	583.31	254.720	97.68
Vurum süresi	3	20	7	3.056	1.12
Hata	3	6.87	2.29	-	1.2
Toplam	9	1776.79	-	-	100

7.2. Elektro Kimyasal İşleme Yönteminin İstatistiksel Analizi

Elektro kimyasal taşlama deneyleri sonrasında S/N oranlarının tespitinde Tablo 7.27’de görülen faktörler ve seviyeleri kullanıldı. Elektro kimyasal taşlama deneylerinde işleme voltajı, elektrolit akma oranı ve tabla ilerleme hızı olmak üzere üç farklı kontrol faktörü bulunmaktadır. Tablo 7.27’de verilen taşlama parametrelerinin her bir seviyesine göre yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri Tablo 7.28’de verilmiştir. Taşlama parametrelerinin her bir seviyesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ise Şekil 7.14’de görülmektedir. Analizde, en düşük en iyidir yaklaşımı seçilmiştir. Dolayısıyla, Şekil 7.14’de görüldüğü gibi taşlama parametrelerinin

seviyelerinin artmasıyla S/N oranlarında da artışların gözlenmesi yüzey pürüzlülüğünün azaldığı göstermektedir.

Tablo 7.24. Elektro kimyasal taşlama parametreleri ve seviyeleri

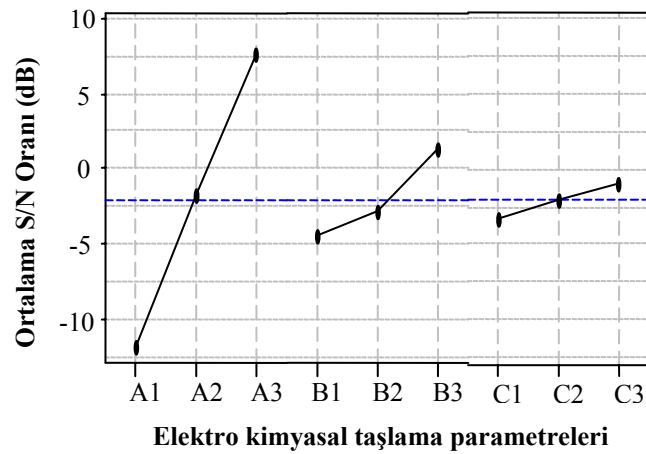
Sembol	Elektro erozyon işleme parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	İşleme voltajı	V	2	4	8
B	Elektrolit akma oranı	lt/dak	500	1000	2000
C	Tabla ilerleme miktarı	mm/dev	6	12	24

Tablo 7.25. Elektro kimyasal taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğü için herbir seviyedeki faktörlerin değerleri (S/N değerleri)

İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
İşleme voltajı	3.9533 ^a	1.2767	0.4744
Elektrolit akma oranı	2.222 ^a	1.967	1.516
Tabla ilerleme miktarı	-1.145 ^a	-1.448	-1.626

Toplam ortalama S/N oranı = 0.7989 dB

^aOptimum seviyeler



Şekil 7.14. Elektro kimyasal taşlama işleminde işleme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

7.3. Maliyet Analizi

Herhangi bir imalat yönteminde, işlenecek ürün maliyeti genellikle kullanılan tezgah için yapılan ilk yatırım maliyeti ve tezgahın çalışması esnasında gerekli makine işleme ve bakım maliyetlerinin toplamı şeklinde düşünülmektedir. İlk yatırım maliyeti, temel tezgah maliyeti, vergi, tecrübeli personel, sipariş, kurulum, kesici takım temini ve diğer yardımcı ekipmanların temini için harcanan miktar olarak değerlendirilebilir. Tezgah işleme ve bakım maliyeti ise, elektrik tüketimi, sigorta giderleri, idare ve yönetim maliyeti, programlama ve operatör ücretleri şeklinde değerlendirilebilir [168,169].

7.3.1. Elektro Erozyon Yöntemi İçin Maliyet Analizi

Elektro erozyon yönteminde, kullanılan tezgahın ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, bu tezgahın işleme maliyetini artırmaktadır. Yüksek teknolojiye sahip EDM tezgahlarının fiyatları kapasite, yetenek ve hassasiyetlerine göre 50000 ila 100000 YTL arasında değişmektedir. Dolayısıyla EDM yöntemi, karmaşık şekilli parçaları ve işlenmesi zor olan malzemeleri işleyebilme yeteneğinden ötürü ekonomik olmaktadır. Klasik freze ile işlemekten farklı olarak bu tezgahlar genellikle CNC kontrollü olduklarından, tasarım ve programlama maliyetlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Fakat parça programlama maliyeti, işlenecek ürünün geometrisine göre değişmektedir. Titanyum alaşımının işlenmesinde, işlenen parçanın basit bir geometriye sahip olmasından dolayı, programlama maliyeti 30 YTL olarak kabul edilmiştir.

Elektro erozyon işleminde kullanılan tezgahın ilk yatırım ve 5 yıl içerisindeki toplam bakım maliyetleri aşağıdaki şekilde kabul edilmiştir.

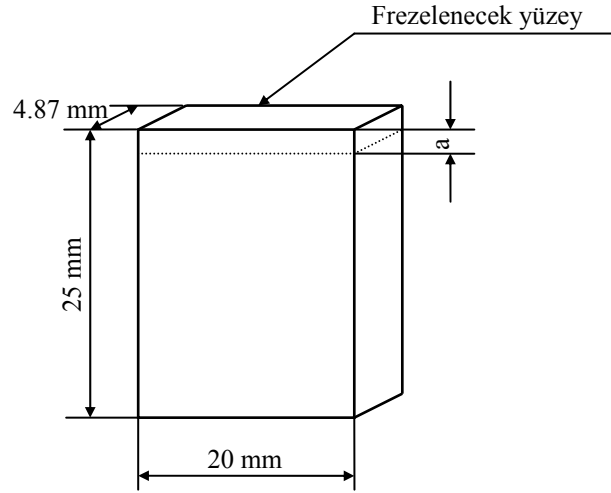
Tezgah Maliyeti (M_{Tez})	: 50000 YTL
Bakım Maliyeti (M_{Bak})	: 4000 YTL
Toplam Yatırım Maliyeti	: 54000 YTL

$$M_{STM} = \frac{54000}{5(\text{yıl}) \times 12(\text{ay/yıl}) \times 160(\text{saat/ay})} = 5,62 \text{ YTL/saat}$$

Elektro erozyon işlemi için gereken hazırlık zamanı aşağıdaki faktörlerin toplamı şeklinde hesaplanabilir;

$T_{Haz} =$	Programlama zamanı	: 15 dak
	İlave aparat hazırlama	: 45 dak
	Parça sökme takma	: 2 dak
	Takımı parçaya yaklaştırma	: 30 sn
	Ölçme ve kalite kontrol	: 5 dak
	TOPLAM	: 67,5 dak

Şekil 7.15’ de elektro erozyon yönteminde işlenecek parçanın boyutları verilmiştir. Titanyum alaşımının üst yüzeyinden 2 mm talaş alınacak şekilde işleme derinliği belirlenmiştir.



Şekil 7.15 Elektro erozyon ile işlenen parçanın boyutları.

Elektro erozyon ile işlemede, elektrot iş parçasına doğru belirli bir ilerleme miktarı ile ilerlemektedir. İşleme derinliği ile ilerleme miktarının oranı, işleme süresi şeklinde düşünüldüğünde;

$$T_i = \frac{\dot{I}_d}{f_{ort}} \quad \text{şeklinde yazılabilir.} \quad (7.4)$$

burada, $\dot{I}_d$ işleme derinliği (2 mm) ve f_{ort} ortalama ilerleme miktarı değerleridir. Elektro erozyon deney sonuçlarının açıklandığı bölümde, talaş kaldırma oranı (mm^3/dak) ile işleme süresi arasındaki ilişki kullanılarak, ortalama ilerleme miktarı 0.15 mm/dak olarak seçilebilir.

Toplam maliyet,

$\sum M = M_i + M_{STM} + M_{TK} + M_{IP} + M_D$ şeklinde yazılabilir. Burada, frezeleme işleminden farklı olarak dielektrik sıvısının maliyeti (M_D) dikkate alınmalıdır.

7.3.2. Elektro Kimyasal Taşlama Yöntemi İçin Maliyet Analizi

Elektro erozyon yöntemine benzer şekilde elektrokimyasal taşlama işlemi için gerekli tezgah ilk yatırım, hazırlık zamanı ve gerekli işleme süresi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

Tezgah Maliyeti (M_{Tez})	: 85000 YTL
Bakım Maliyeti (M_{Bak})	: 8000 YTL
Toplam Yatırım Maliyeti	: 93000 YTL

$$M_{STM} = \frac{93000}{5(\text{yıl}) \times 12(\text{ay/yıl}) \times 160(\text{saat/ay})} = 9,68 \text{ YTL/saat}$$

işlem için gerekli hazırlık zamanı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

T_{Haz}	{	Programlama zamanı	: 20 dak
		İlave aparat hazırlama	: 15 dak
		Parça sökme takma	: 2 dak
		Ölçme ve kalite kontrol	: 5 dak
		TOPLAM	: 42 dak

Elektrokimyasal taşlama işleminde talaş kaldırılması, abrasiv tanelerin mekanik hareketi ve elektrokimyasal etkinin bir toplamıdır. Mekanik olarak işleme tanımları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

İşleme süresi,

$$T_i = \frac{B}{S_b \times n_1} \times i \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (7.5)$$

burada, B taşın genişliği, S_b yanal hareket miktarı, n_1 iş parçası boyutları ve kesme hızı arasındaki etkileşim ve i paso sayısı şeklinde değerlendirilmiştir.

Taşlama esnasında, iş parçasının bütün yüzeyinin taşlanabilmesi için taşın en az $2/3'$ ünün iş parçasından dışarı çıkması gerekmektedir. Dolayısıyla B,

$$B = b + \frac{2B}{3} \text{ şeklinde yazılabilir. Burada, } b \text{ iş parçasının genişliğidir.} \quad (7.6)$$

Benzer şekilde, taşın iş parçası boyunca doğrusal yönde bir miktar dışarı çıkması gerekmektedir. Bu miktar (L),

$$L = l_a + l_u + l \text{ şeklinde yazılabilir.} \quad (7.7)$$

burada, l_a ve l_u taşın iş parçasının sağ ve sol taraflarından çıkması gereken aralıklar ve l ise iş parçasının uzunluğudur.

$$l_a = l_u = 20 \div 40 \text{ aralığında seçilebilir.}$$

Gerekli paso sayısı i ,

$$i = \frac{a_{TOP}}{a_{ince}} \text{ şeklinde yazılabilir. Burada } a_{TOP} \text{ toplam talaş derinliği ve } a_{ince} \text{ ise ince paso miktarıdır.}$$

Gerekli kabuller yerine yazıldığında, taşlama süresi aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$T_i = \frac{b + \frac{2B}{3}}{B \times \frac{2}{3} \times \frac{60 \times 1000 \times V}{2 \times (l_a + l_u + l)}} \times i \quad (7.8)$$

burada V kesme hızıdır.

Anodik çözünme ile talaş kaldırma için gerekli makine zamanı,

$$T_{ia} = \frac{\Delta m}{k \times \Delta I} \text{ şeklinde yazılabilir. Burada, } \Delta m \text{ toplam kaldırılan talaş kütlesi, } k \text{ Faraday sabiti}$$

(9.10^9) ve ΔI ise akım yoğunluğudur. Dolayısıyla toplam makine zamanı,

$$\sum T = T_{Haz} + T_i + T_{ia} \text{ şeklinde hesaplanabilir.}$$

Toplam maliyet,

$$\sum M = M_i + M_{STM} + M_{TK} + M_{IP} + M_{EI} \text{ şeklinde yazılabilir. Burada, } M_{EI} \text{ elektrolit maliyetidir.}$$

Tablo 7.26'da, ilgili denklemlerde değerlerin yerlerine yazılmasıyla, titanyum alaşımının farklı işleme yöntemlerinde işlenmesi için gerekli maliyetler görülmektedir.

Elektrokimyasal taşlama tezgahının ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşın, elektro erozyon ile işlem neticesinde yüzeyde oluşan hasarların giderilmesi için yöntemin ekonomik açıdan kabul edilebilir bir bitirme işlemi olduğu söylenebilir. Özellikle uçak parçalarında kullanılan titanyum alaşımının hassas yüzey özelliklerinde ve makul bir maliyette taşlanması yöntemi cazip kılmaktadır.

Tablo 7.26 Titanyum alaşımını farklı yöntemlerle işleme maliyetleri.

Uygulanan yöntem	İşlem maliyeti (YTL)
Elektro erozyon	41.33
Elektrokimyasal taşlama	56

8. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bu çalışmada, elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak, elektro erozyon ile işlemede yüzey pürüzlülüğü, beyaz tabaka kalınlığı, talaş kaldırma oranı, elektrot aşınması ve elektro kimyasal taşlama işleminde ise yüzey pürüzlülüğü sonuçları modellenmiştir. Modeller oluşturulurken, çoklu lineer regresyon yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca regresyon yöntemi ile elde edilen modellerin uygun olup olmadıkları, varyans analizi (ANOVA) ve artık analizi yöntemleri ile incelenmiştir.

8.1. Çoklu Lineer Regresyon Yöntemi

Bir sistemde, Y bağımlı değişken, $x_1, x_2, \dots, x_p$ açıklayıcı (bağımsız) değişkenler, $\beta(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) \in \mathbb{R}^{p+1}$ parametre vektörü, ε_i ve $\mathcal{R}$ gözlenemeyen hata terimleri ve model fonksiyonu, $f(x_t; \beta) = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots + \beta_p x_{pt}$, $t = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere lineer regresyon modeli,

$$y_t = f(x_t; \beta) + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (8.1)$$

şeklinde tanımlanır. Bu model,

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \text{ gösterimi altında vektör gösterimi ile;}$$

$Y = X\beta + \varepsilon$ şeklinde ifade edilir. Burada, $Y_{n \times 1}$ bağımlı değişken vektörü, X

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}_{n \times (p+1)} \text{ şeklinde tasarım matrisi, } \beta_{(p+1) \times 1} \text{ bilinmeyen parametre}$$

vektörü ve $\varepsilon_{n \times 1}$ hata vektörüdür.

Regresyon modellerinin değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak için yeterli olup olmadığı veya ilişkiyi iyi açıklayıp açıklamadığı konusunda karar vermek için hata terimleri ile ilgili temel varsayımların da geçerli olması gerekmektedir. Varsayımların geçerli olmaması durumunda, tahmin edicilerde bulunmasını istediğimiz bazı özellikler sağlanmayabilir.

8.2. Elektro Erozyon Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi

8.2.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Matematiksel Modeli

Çoklu lineer regresyon yönteminde modelleme yapılırken genellikle ikinci dereceden polinomal denklem kullanılmaktadır. Bu tür denklemler, kuadratik denklem olarak da bilinmektedir. Elektro erozyon ile işleme neticesinde iş parçasında oluşan yüzey pürüzlülüğüne ait (R_a) matematiksel model elde edilirken; vurum akımı (I) ve vurum süresine (t_d) bağlı olarak lineer regresyon modeli:

$$R_a = a_0 + a_1.I + a_2.t_d + a_3.I^2 + a_4.t_d^2 + a_5.I.t_d \quad (8.2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemdeki a katsayıları MİNİTAB R14 paket programı yardımıyla elde edilmiştir. Elektro erozyon yönteminde grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlemede oluşan yüzey pürüzlülüklerinin matematiksel modellerine ait regresyon katsayıları Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede yüzey pürüzlülüğü modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.

Elektrot cinsi	Regresyon katsayıları						Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
Grafit	2.06116	0.33069	0.03835	-0.00300	-0.00017	-0.00050	96.8
Elektrolitik bakır	0.892329	0.258414	0.021172	-0.004946	-0.000092	-0.000321	98.8
Alüminyum	3.81610	1.03650	-0.07431	-0.58734	-0.76925	-0.20226	95.5

Bu katsayılar, denklem (8.2)’de yerine konulduğunda grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlem neticesinde yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel modeller:

$$R_a = 2.06116 + 0.33069.I + 0.03835.t_d - 0.00300.I^2 - 0.00017.t_d^2 - 0.00050.I.t_d \quad (8.3)$$

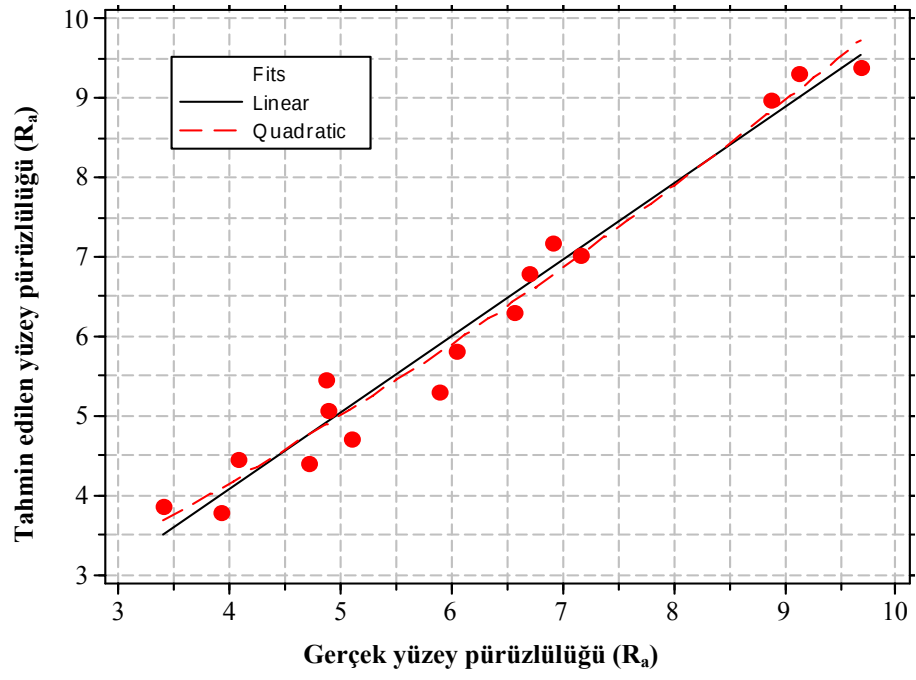
$$R_a = 0.892329 + 0.258414.I + 0.021172.t_d - 0.004946.I^2 - 0.000092.t_d^2 - 0.000321.I.t_d \quad (8.4)$$

$$R_a = 3.81610 + 1.03650.I - 0.07431.t_d - 0.58734.I^2 - 0.76925.t_d^2 - 0.20226.I.t_d \quad (8.5)$$

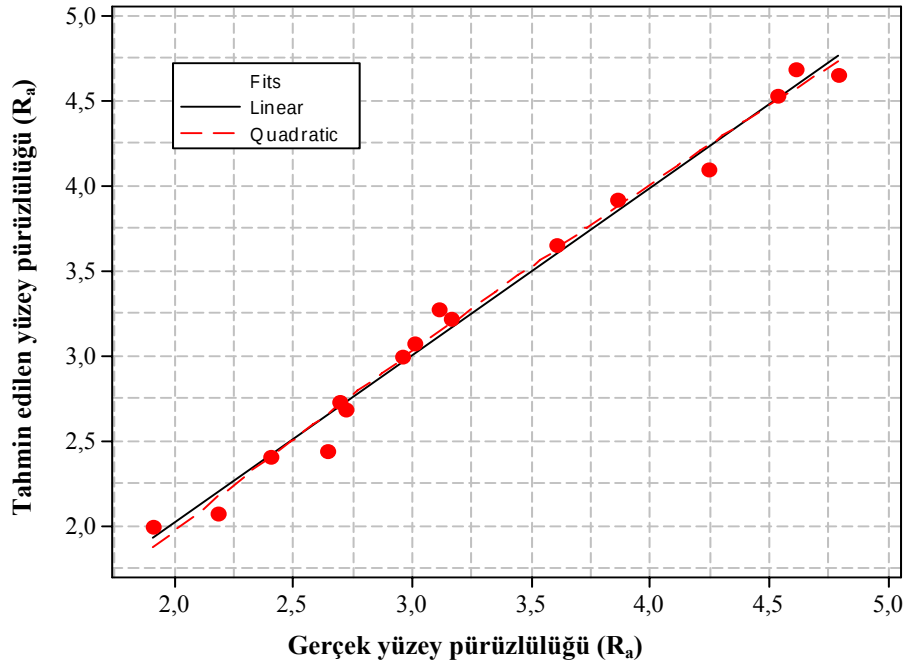
şeklinde elde edilir. Tablo 8.1’de modellere ait korelasyon katsayıları elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 8.2’de verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.1 – 8.3’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayılar değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir.

Tablo 8.2. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek yüzey pürüzlülükleri ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri.

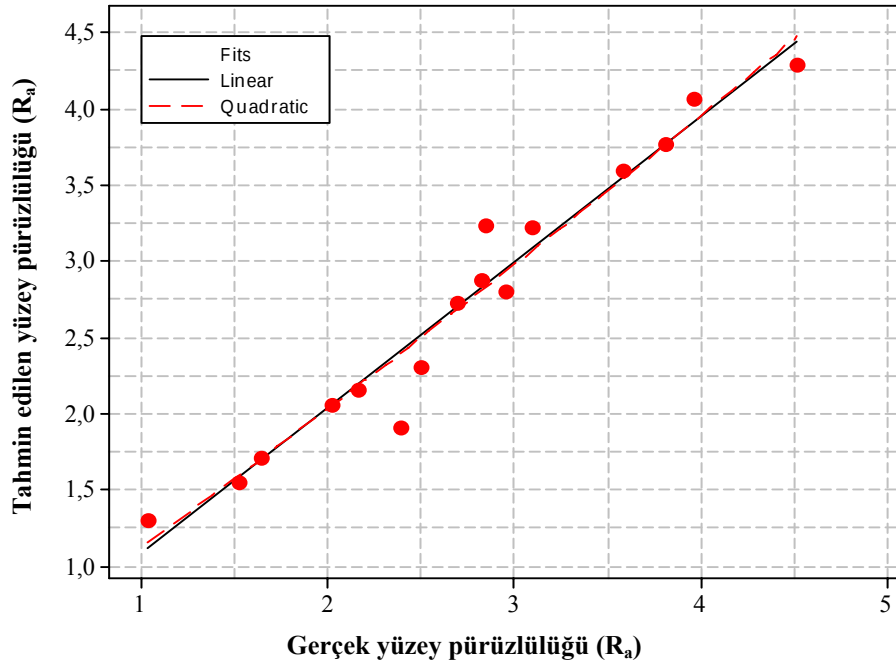
Deney numarası	Elektrot cinsi					
	Grafit		Elektrolitik bakır		Alüminyum	
	Gerçek Ra	Tahmin edilen Ra	Gerçek Ra	Tahmin edilen Ra	Gerçek Ra	Tahmin edilen Ra
1	3,40	3,84441	2,18	2,07091	1,04	1,29506
2	4,07	4,45585	2,40	2,40409	1,64	1,70839
3	4,88	5,05849	2,69	2,72641	2,16	2,15828
4	3,92	3,78280	1,91	1,99493	1,52	1,55096
5	5,10	4,71815	2,72	2,68850	2,39	1,90959
6	5,89	5,29229	2,96	2,99758	2,50	2,30716
7	6,04	5,82035	3,11	3,27171	2,70	2,72552
8	4,71	4,39548	2,64	2,44384	2,02	2,05516
9	6,55	6,30356	3,61	3,65658	2,83	2,87652
10	6,69	6,80312	3,86	3,91747	2,85	3,24257
11	6,91	7,18200	4,25	4,09521	3,58	3,59789
12	4,86	5,45878	3,01	3,07456	2,96	2,80145
13	8,88	8,99730	4,54	4,53234	3,81	3,77258
14	9,12	9,33525	4,61	4,68880	3,96	4,07034
15	9,68	9,39091	4,79	4,65770	4,52	4,28908
16	7,16	7,02126	3,16	3,21938	3,10	3,21946



Şekil 8.1. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.



Şekil 8.2. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.



Şekil 8.3. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.

Tablo 8.3 – 8.5’de farklı elektrot malzemeleri ile işlemede elde edilen matematiksel modeller için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları verilmiştir. Tabloların son sütunlarında P değerleri görülmektedir. Bu değerler modelin, modeldeki sabit, kuadratik ve çarpım terimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatiki etkilerini belirlemektedir. P değerleri değerlendirildiğinde ($p < 0.05$ olduğu durumlar) her üç elektrot için de elde edilen modeller ve modellerdeki terimlerin önemli etkiye sahip oldukları, sadece alüminyum ile işlemede oluşturulan modeldeki çarpım terimlerinin nispeten daha az etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 8.3. Grafit elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	52.4441	10.48883	61.11	0.000
Liner	2	46.7004	3.770040	21.97	0.000
Karesel terim	2	4.4774	2.23871	13.04	0.002
Çarpım terimi	1	1.2663	1.26627	7.38	0.022
Artık hata	10	1.7162	0.17162	-	
Toplam	15	54.1604	-		

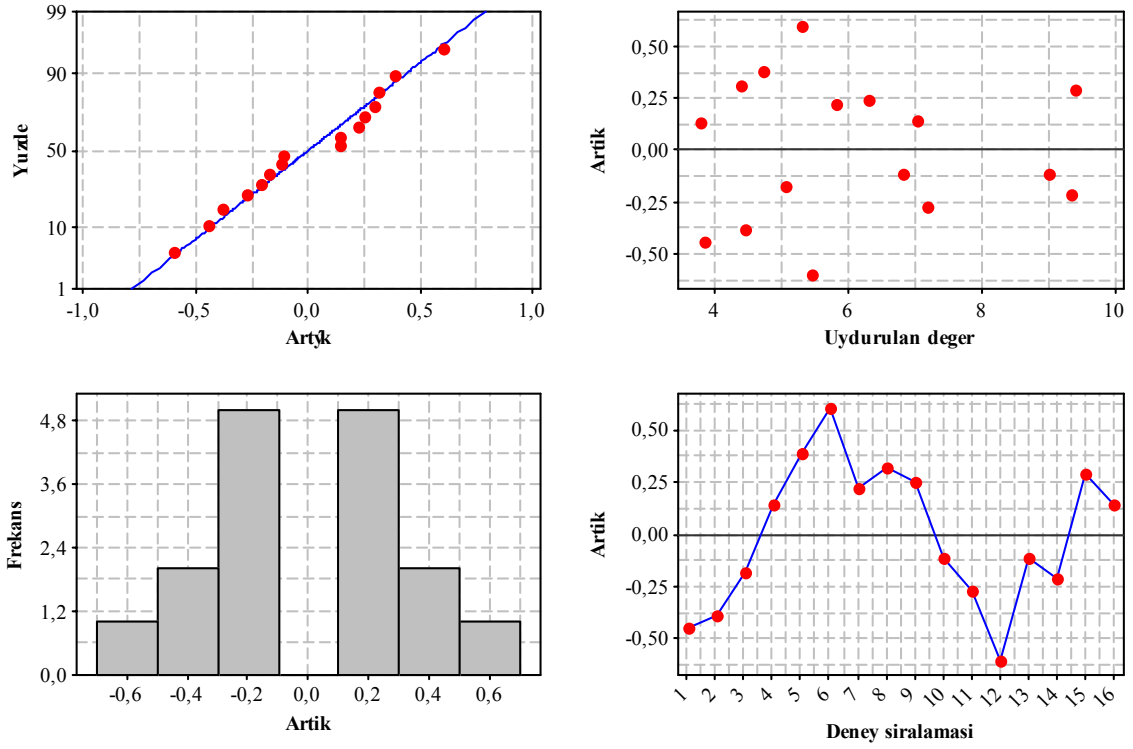
Tablo 8.4. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	12.0255	2.40510	162.08	0.000
Liner	2	9.3261	1.77568	119.67	0.000
Karesel terim	2	2.1708	1.08539	73.15	0.000
Çarpım terimi	1	0.5286	0.52865	35.63	0.000
Artık hata	10	0.1484	0.01484	-	
Toplam	15	12.1739	-		

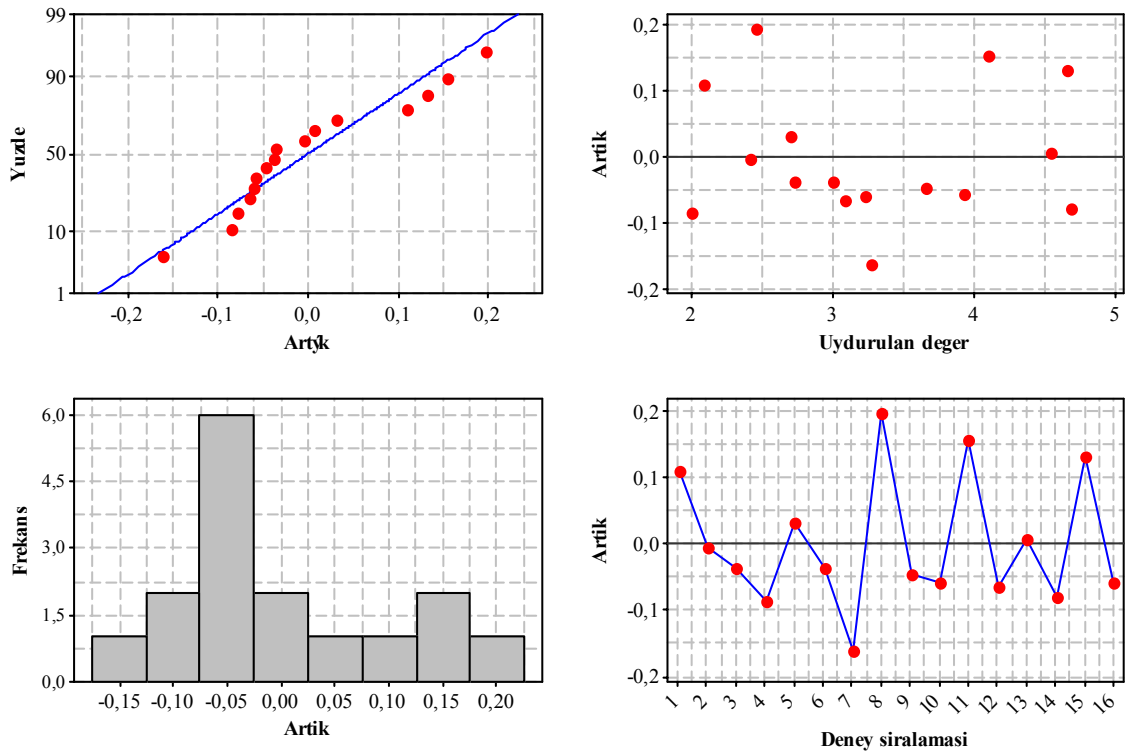
Tablo 8.5. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	12.7227	2.54454	42.17	0.000
Liner	2	10.1044	4.68624	77.65	0.000
Karesel terim	2	2.3922	1.19610	19.82	0.000
Çarpım terimi	1	0.2261	0.22613	3.75	0.082
Artık hata	10	0.6035	0.06035	-	
Toplam	15	13.3262	-		

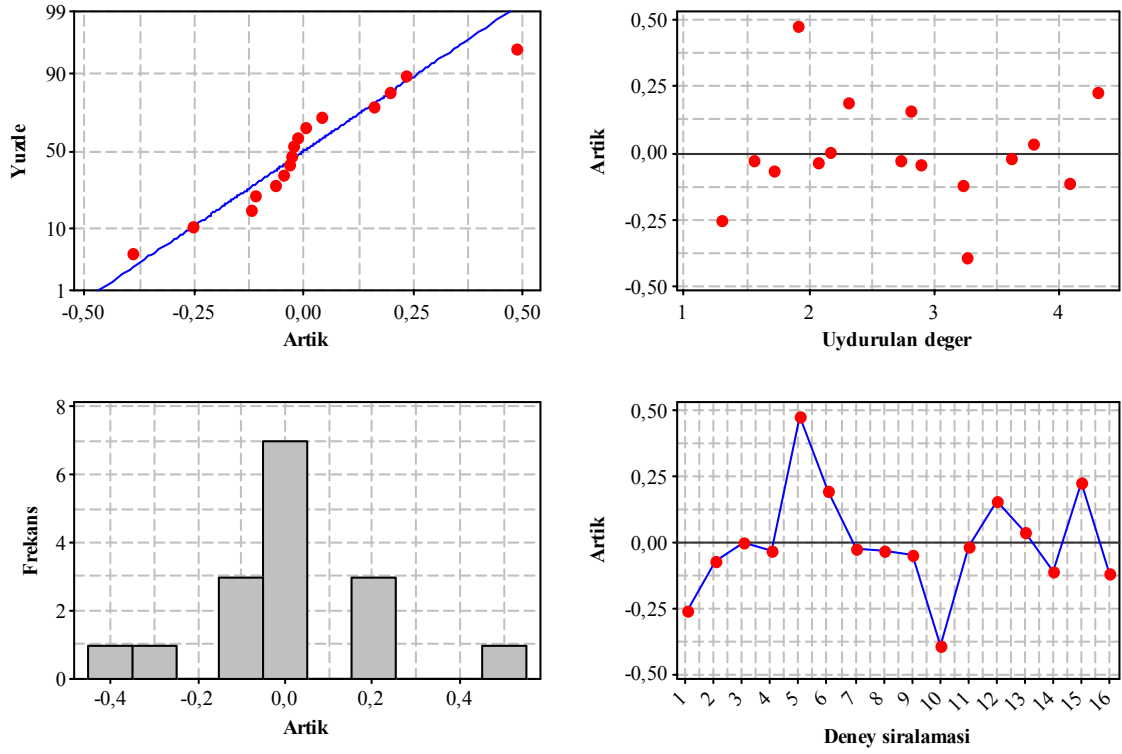
Şekil 8.4 – 8.6’da oluşturulan modeller için yapılan artık analiz sonuçları görülmektedir. Artıklar, deneysel değerler ile, elde edilen modeller kullanılarak tahmin edilen değerler arasındaki miktarlardır. Dolayısı ile korelasyon katsayısı yüksek uygun modellerdeki artık miktarları daha düşük olmaktadır. Bu yöntem, genellikle modellerin uygunlukları için yapılan bir testtir [170]. Bu analiz sonrasında, modeldeki artıkların muhtemel dağılımları, gerçek değerlerle olan ilişkileri ve deneylerin yapılma sırasına göre gösterdiği değişim gibi durumlar modelin uygunluğu hakkında bilgi vermektedir. Muhtemel artık dağılımı grafiklerinde, noktaların regresyon çizgisine olan yakınlığı, gerçek değerlerle olan ilişki grafiklerinde artıkların sıfır çizgisinden olan sapmaları (uzak dağılım) ve deney sıralamasına göre artıkların pozitif ve negatif bölgelerde gösterdiği yayılımlar, kullanılan modellerin uygunluğunu göstermektedir.



Şekil 8.4. Grafit elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

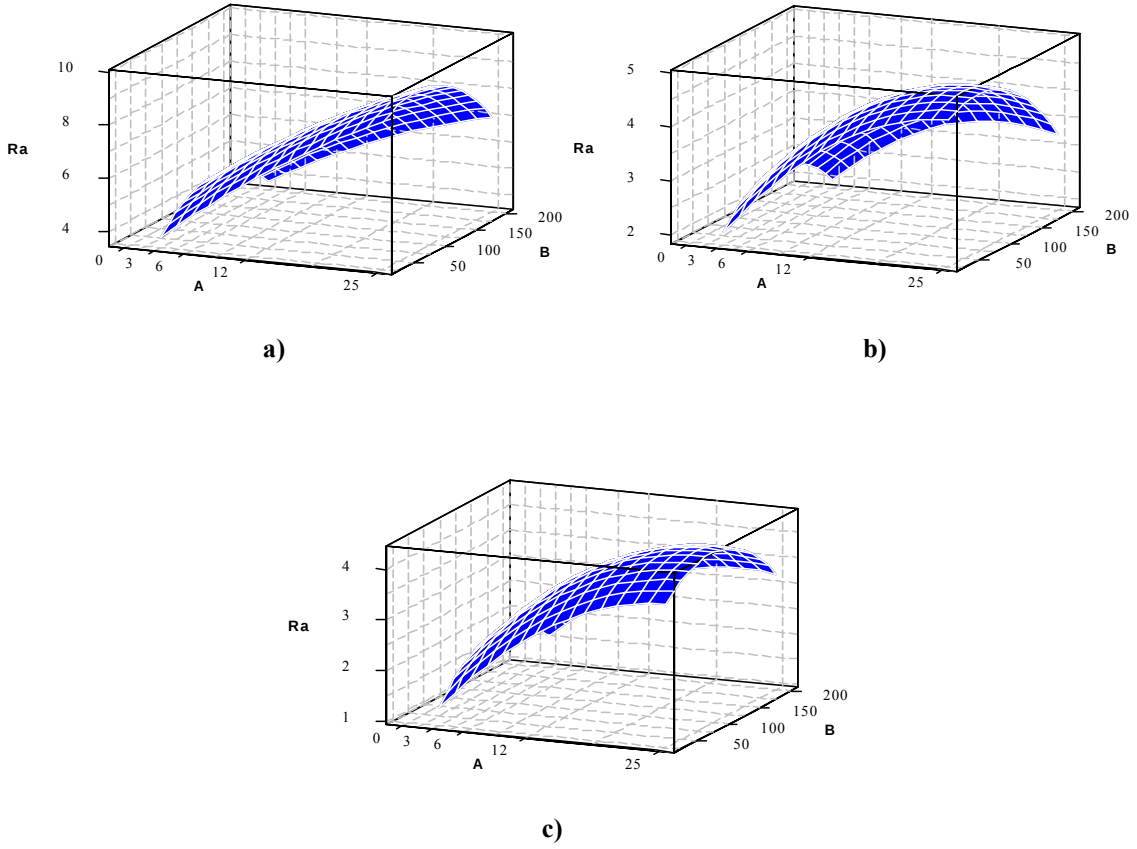


Şekil 8.5. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.



Şekil 8.6. Alüminyum elektrot ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

Lineer regresyon yönteminde, matematiksel modelleme basamaklarının en sonuncusu ise, ölçülen performansa (yüzey pürüzlülüğü) ait yanıt yüzeyi grafiği oluşturmaktır. Oluşturulan bu grafikler yardımı ile, işleme etki eden parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri daha net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Farklı elektrotlar ile işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan yanıt yüzey grafikleri Şekil 8.7’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi akım parametresinin ve vurum süresinin artmasıyla, yüzey pürüzlülük değerleri de artmaktadır.



Şekil 8.7. Yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot)

8.2.2. Beyaz Tabaka Kalınlığının Matematiksel Modeli

Elektro erozyon ile işleme neticesinde iş parçasında oluşan beyaz tabaka kalınlıklarına ait (BTK) matematiksel model elde edilirken; vurum akımı (I) ve vurum süresine (t_d) bağlı olarak polinomal regresyon modeli:

$$BTK = a_0 + a_1.I + a_2.t_d + a_3.I^2 + a_4.t_d^2 + a_5.I.t_d \quad (8.6)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen regresyon katsayıları Tablo 8.6'da verilmiştir. Bu katsayılar, denklem (8.6)'da yerine konulduğunda grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlem neticesinde beyaz tabaka kalınlıklarına ait matematiksel modeller:

Tablo 8.5. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede beyaz tabaka kalınlıkları modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.

Elektrot cinsi	Regresyon katsayıları						Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
Grafit	17.6390	-1.6121	0.0971	0.1570	-0.0004	0.0047	99.6
Elektrolitik bakır	4.45917	1.49280	0.06204	-0.01400	-0.00018	-0.00106	99.4
Alüminyum	-2.27079	1.84407	0.08218	-0.02813	-0.00025	0.00048	99.5

$$BTK = 17.6390 - 1.6121.I + 0.0971.t_d + 0.1570.I^2 - 0.0004.t_d^2 + 0.0047.I.t_d \quad (8.7)$$

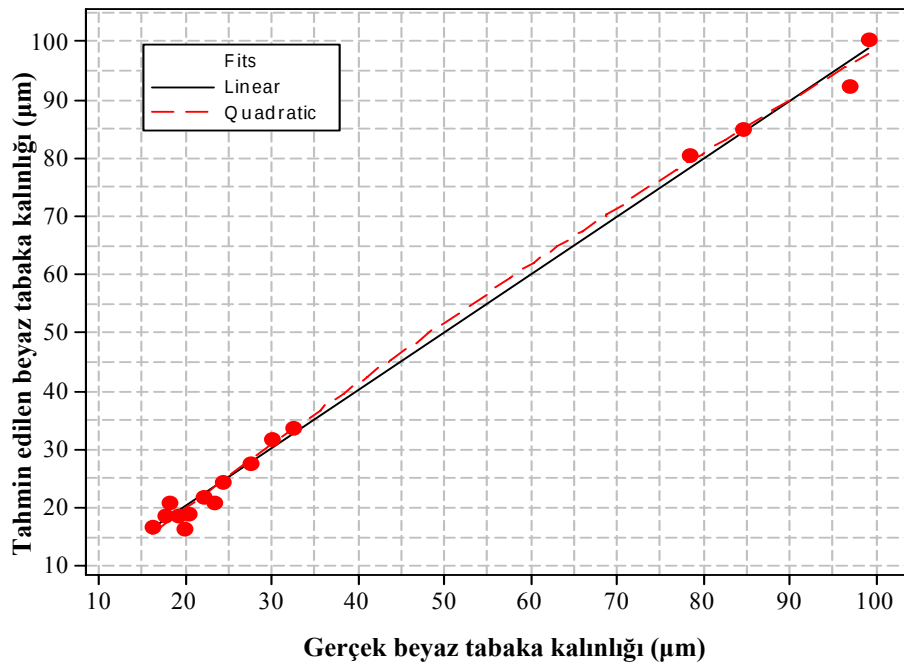
$$BTK = 4.45917 + 1.49280.I + 0.06204.t_d - 0.01400.I^2 - 0.00018.t_d^2 - 0.00106.I.t_d \quad (8.8)$$

$$BTK = -2.27079 + 1.84407.I + 0.08218.t_d - 0.02813.I^2 - 0.00025.t_d^2 + 0.00048.I.t_d \quad (8.9)$$

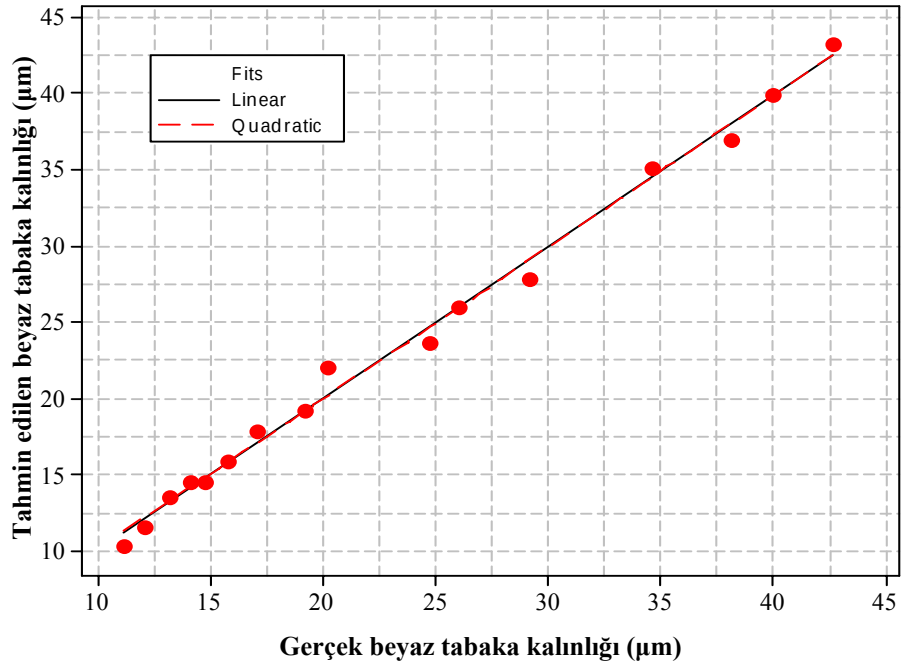
şeklinde elde edilir. Tablo 8.5’de modellere ait korelasyon katsayıları elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen beyaz tabaka değerleri Tablo 8.6’da verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.8 – 8.10’da görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayılar değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir.

Tablo 8.6. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek beyaz tabaka kalınlıkları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen beyaz tabaka kalınlık değerleri.

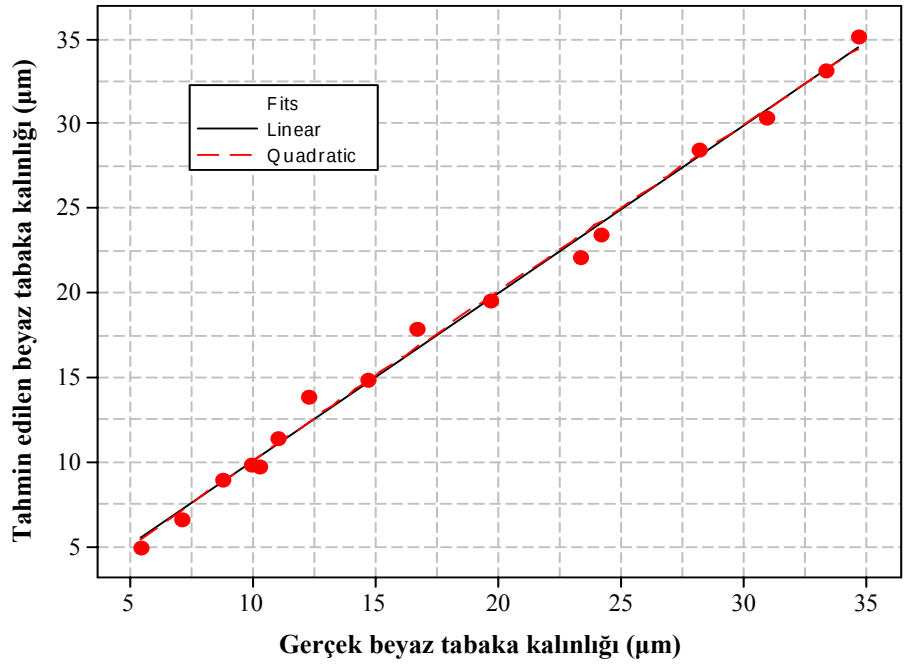
Deney numarası	Elektrot cinsi					
	Grafıt		Elektrolitik bakır		Alüminyum	
	Gerçek BTK	Tahmin edilen BTK	Gerçek BTK	Tahmin edilen BTK	Gerçek BTK	Tahmin edilen BTK
1	16,08	16,717	11,16	10,3265	5,43	4,9438
2	17,62	18,664	12,00	11,6106	7,12	6,5697
3	18,00	20,893	13,17	13,4864	8,76	8,8925
4	19,03	18,695	14,07	14,4685	9,89	9,8226
5	19,76	16,471	14,69	14,5062	10,25	9,7523
6	20,18	18,768	15,73	15,8695	11,01	11,4140
7	22,00	21,698	17,00	17,9038	12,23	13,8086
8	23,26	20,902	19,18	19,2029	14,68	14,8822
9	24,12	24,457	20,15	22,1098	16,71	17,8502
10	27,36	27,455	24,73	23,6316	19,66	19,5837
11	30,00	31,788	26,00	25,9829	23,31	22,1218
12	32,43	33,796	29,19	27,9159	24,18	23,4823
13	78,32	80,545	34,66	35,1268	28,16	28,4474
14	84,63	85,062	38,11	36,9920	30,89	30,3363
15	96,89	92,432	40,00	40,0301	33,32	33,1852
16	99,18	100,517	42,66	43,3366	34,66	35,1674



Şekil 8.8. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.



Şekil 8.9. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.



Şekil 8.10. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik beyaz tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.

Tablo 8.7 – 8.9’da elde edilen matematiksel modeller kullanılarak beyaz tabaka kalınlıkları için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları verilmiştir. Tabloların son sütunlarında P değerleri görülmektedir. Bu değerler modelin, modeldeki sabit, kuadratik ve çarpım terimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatiki etkilerini belirlemektedir. P değerleri değerlendirildiğinde ($p < 0.05$ olduğu durumlar) her üç elektrot için de elde edilen modeller ve modellerdeki terimlerin önemli etkiye sahip oldukları, sadece alüminyum ile işlemede oluşturulan modeldeki çarpım terimlerinin nispeten daha az etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 8.7. Grafit elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	14103.6	2820.714	466.86	0.000
Liner	2	13060.4	66.691	11.04	0.003
Karesel terim	2	931.3	465.670	77.07	0.000
Çarpım terimi	1	111.9	111.870	18.52	0.002
Artık hata	10	60.4	6.042	-	
Toplam	15	14164	-		

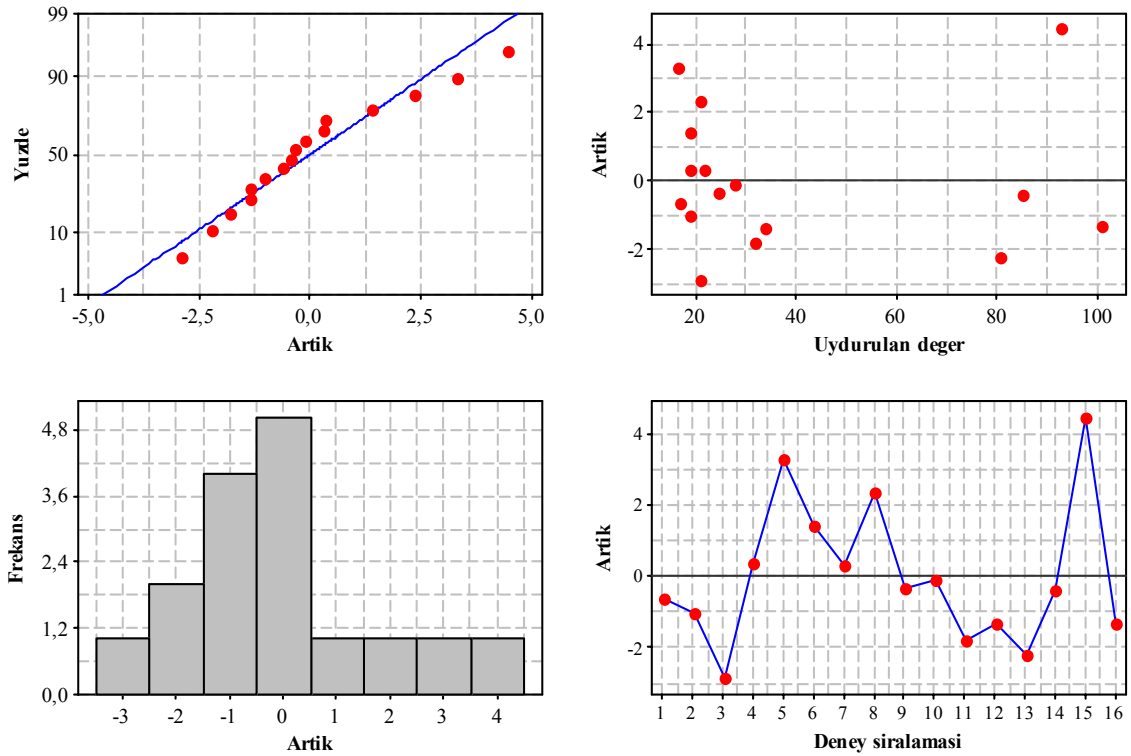
Tablo 8.8. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	1696.44	339.2873	320.89	0.000
Liner	2	1678.39	46.9715	44.42	0.000
Karesel terim	2	12.33	6.1664	5.83	0.021
Çarpım terimi	1	5.72	5.7168	5.41	0.042
Artık hata	10	10.57	1.0573	-	
Toplam	15	1707.01	-		

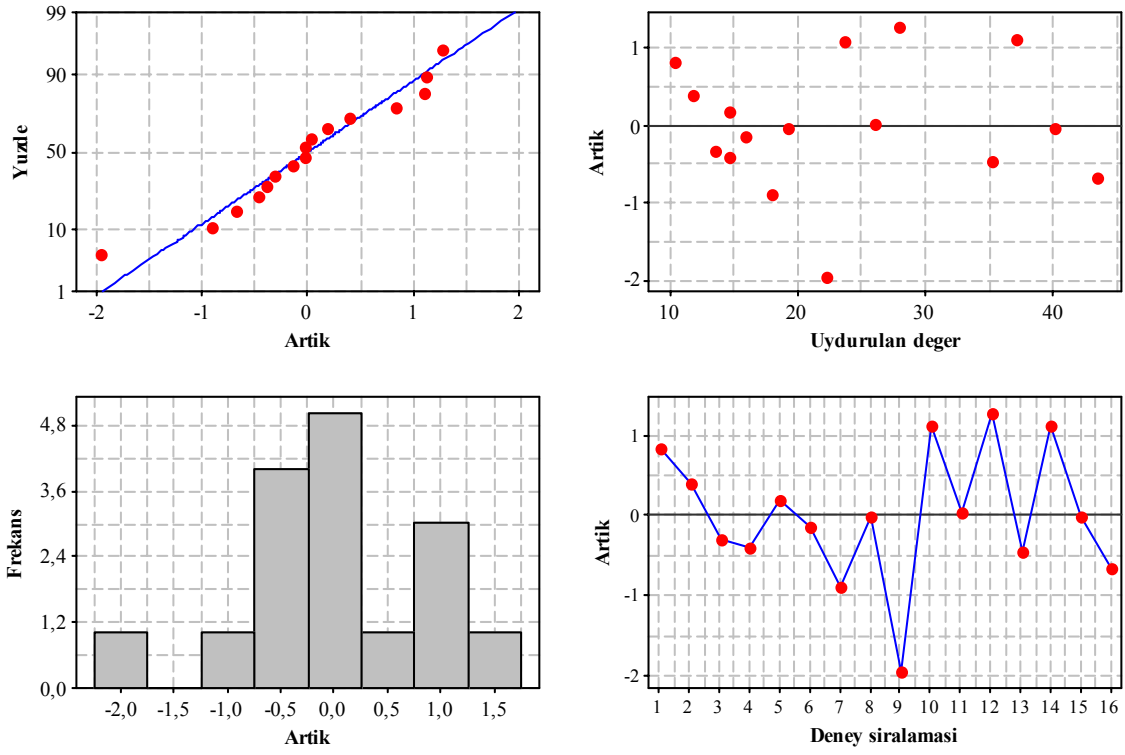
Tablo 8.9. Alüminyum elektrotla işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	1425.52	285.1034	386.59	0.000
Liner	2	1386.11	72.5849	98.42	0.000
Karesel terim	2	38.24	19.1196	25.93	0.000
Çarpım terimi	1	1.17	1.1712	1.58	0.236
Artık hata	10	7.37	0.7375	-	
Toplam	15	1432.89	-		

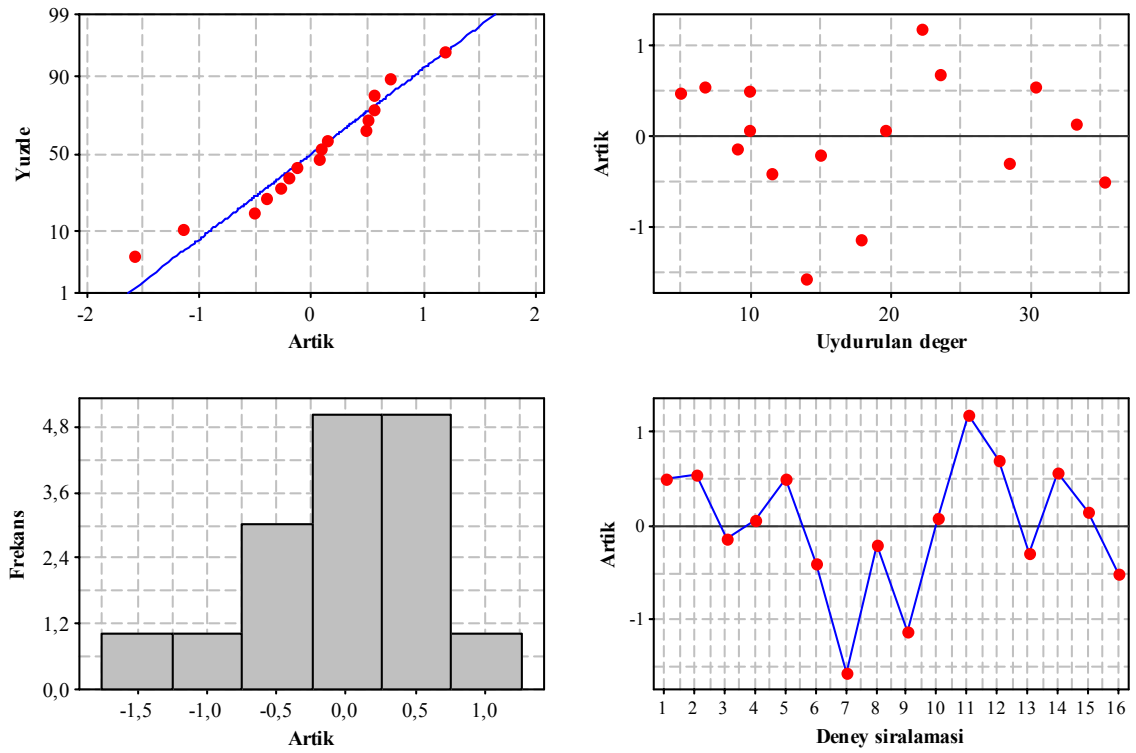
Şekil 8.11 – 8.13’da oluşturulan modeller için yapılan artık analiz sonuçları görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi modellerin uygunsuzluğu ile ilgili herhangi bir durum gözlemlenmemektedir.



Şekil 8.11. Grafit elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

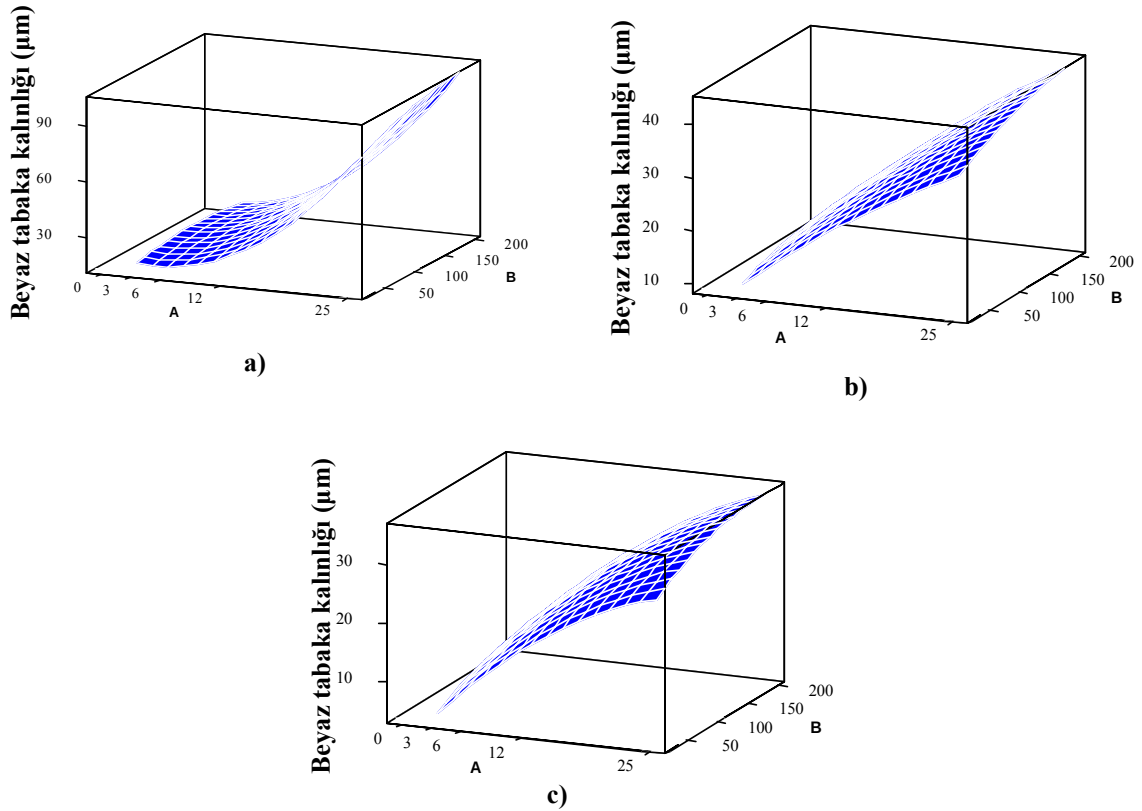


Şekil 8.12. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.



Şekil 8.13. Alüminyum elektrot ile işlemede beyaz tabaka kalınlığı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

Farklı elektrotlar ile işlemede beyaz tabaka kalınlıkları için oluşturulan yanıt yüzey grafikleri Şekil 8.14’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi akım parametresinin ve vurum süresinin artmasıyla, beyaz tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Akım parametresi, vurum süresine nazaran bu artış üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir.



Şekil 8.14. Beyaz tabaka kalınlığı için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot)

8.2.3. Elektrot Aşınmasının Matematiksel Modeli

Elektro erozyon ile işleme neticesinde takım elektrotunda oluşan aşınma miktarlarına ait (EA) matematiksel model elde edilirken; vurum akımı (I) ve vurum süresine (t_d) bağlı olarak polinomal regresyon modeli:

$$EA = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 \cdot t_d + a_3 I^2 + a_4 \cdot t_d^2 + a_5 \cdot I t_d \quad (8.10)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen regresyon katsayıları Tablo 8.10’da verilmiştir.

Tablo 8.10. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elektrot aşınma miktarı modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.

Elektrot cinsi	Regresyon katsayıları						Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
Grafit	-1.66121	-0.07496	0.06497	0.02473	-0.00037	0.00420	96.5
Elektrolitik bakır	1.12330	-1.23131	0.09800	0.09635	-0.00058	0.00742	97.8
Alüminyum	0.53131	3.70751	0.21994	-0.07899	-0.00075	0.00110	98.7

Bu katsayılar, denklem (8.10)’da yerine konulduğunda grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlem neticesinde elektrotlarda oluşan aşınma miktarlarına ait matematiksel modeller:

$$EA = -1.66121 - 0.07496.I + 0.06497.t_d + 0.02473.I^2 - 0.00037.t_d^2 + 0.00420.I.t_d \quad (8.11)$$

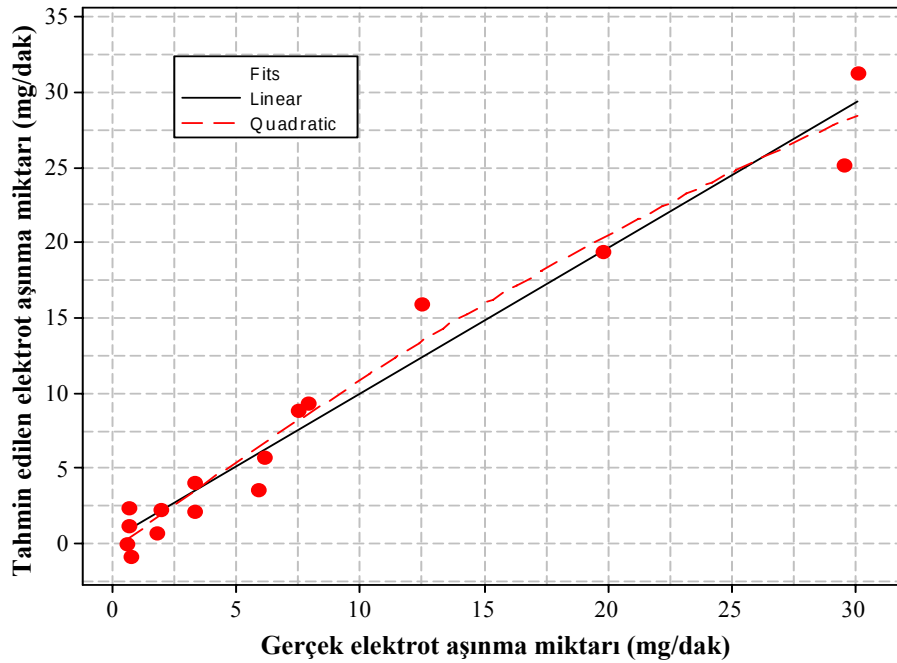
$$EA = 1.12330 - 1.23131.I + 0.09800.t_d + 0.09635.I^2 - 0.00058.t_d^2 + 0.00742.I.t_d \quad (8.12)$$

$$EA = 0.53131 + 3.70751.I + 0.21994.t_d - 0.07899.I^2 - 0.00075.t_d^2 + 0.00110.I.t_d \quad (8.13)$$

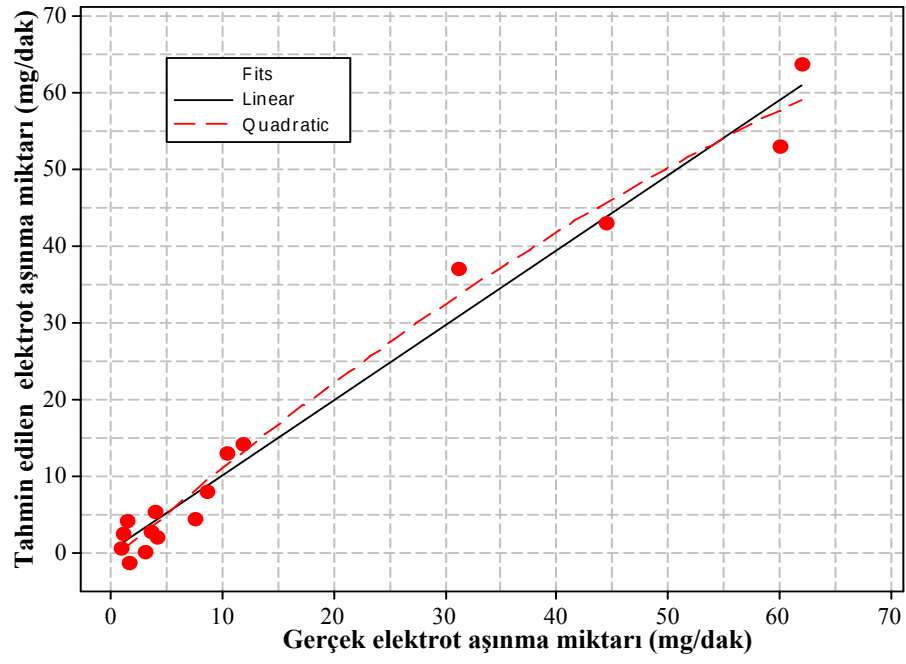
şeklinde elde edilir. Tablo 8.10’da modellere ait korelasyon katsayıları, elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen elektrot aşınması değerleri Tablo 8.11’de verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.15 – 8.17’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayılar değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir. Bu durum matematiksel modellerin uygunluğunu göstermektedir.

Tablo 8.11. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek elektrot aşınma miktarları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen elektrot aşınma değerleri.

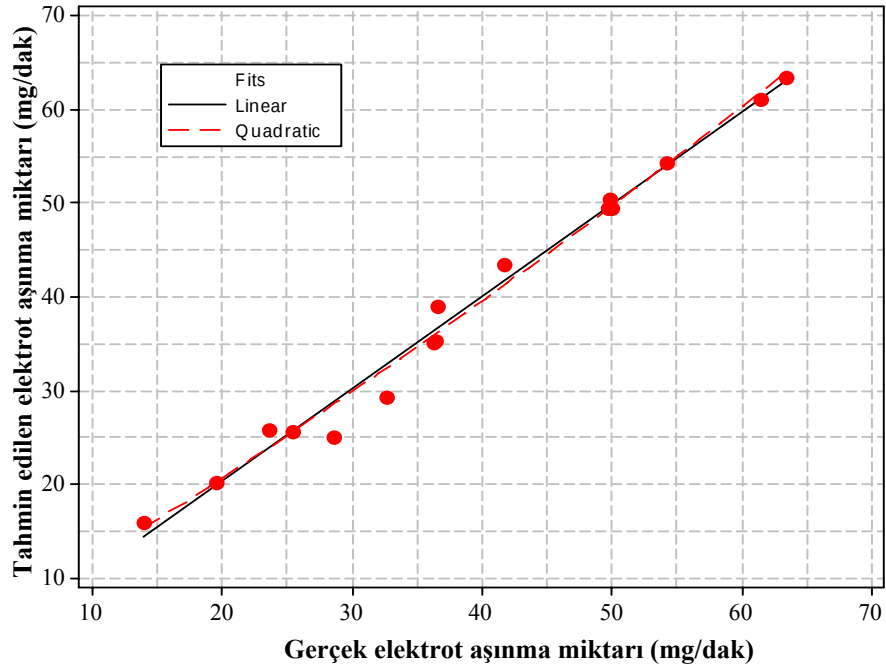
Deney numarası	Elektrot cinsi					
	Grafit		Elektrolitik bakır		Alüminyum	
	Gerçek EA	Tahmin edilen EA	Gerçek EA	Tahmin edilen EA	Gerçek EA	Tahmin edilen EA
1	0,57	0,0470	0,99	0,9387	14,02	16,0580
2	0,61	1,3001	1,16	2,8515	19,63	20,2407
3	0,63	2,4342	1,46	4,4893	23,64	25,8090
4	0,69	0,7859	1,67	0,9873	25,46	25,7572
5	1,79	0,8046	3,09	0,4031	28,54	25,1307
6	1,96	2,3726	3,62	2,8728	32,71	29,3962
7	3,28	4,1365	3,94	5,6242	36,28	35,1300
8	3,32	2,1758	4,12	2,3750	36,42	35,4093
9	5,88	3,6554	7,46	4,5349	36,64	39,0109
10	6,13	5,8530	8,61	8,1183	41,80	43,4419
11	7,46	8,8763	10,46	13,0970	49,71	49,5068
12	7,93	9,4345	11,82	14,3025	49,93	50,4483
13	12,48	15,9400	31,18	37,2861	50,00	49,5753
14	19,85	19,5021	44,51	43,2824	54,31	54,3650
15	29,57	25,2541	60,05	53,0871	61,46	61,1472
16	30,12	31,2697	62,08	63,9444	63,40	63,5234



Şekil 8.15. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.



Şekil 8.16. Elektrolitik bakır elektrotla elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.



Şekil 8.17. Alüminyum elektrotla elde edilen deneysel ve teorik elektrot aşınma miktarlarının karşılaştırılması.

Tablo 8.12 – 8.14’de elde edilen matematiksel modeller kullanılarak elektrot aşınma miktarları için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları verilmiştir. P değerleri değerlendirildiğinde ($p < 0.05$ olduğu durumlar) her üç elektrot için de elde edilen modeller ve modellerdeki terimlerin önemli etkiye sahip oldukları, ancak grafit ve elektrolitik bakır elektrotlarda modellerdeki liner terimlerin, alüminyum elektrotta ise çarpım teriminin nispeten daha az etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 8.12. Grafit elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	1408.29	281.6586	55.55	0.000
Liner	2	1275.38	5.6053	1.11	0.368
Karesel terim	2	42.66	21.3297	4.21	0.047
Çarpım terimi	1	90.25	90.2532	17.80	0.02
Artık hata	10	50.70	5.0704	-	
Toplam	15	1459	-		

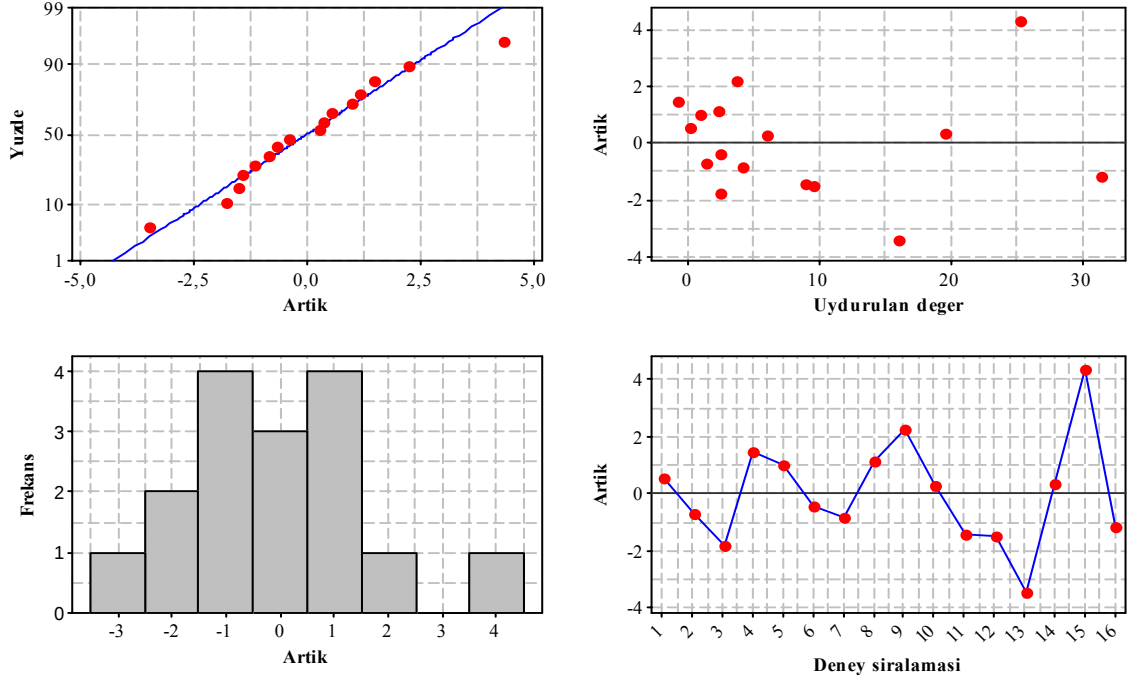
Tablo 8.13. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	6606.10	1321.220	90.85	0.000
Liner	2	5932.75	44.763	3.08	0.091
Karesel terim	2	391.06	195.532	13.45	0.001
Çarpım terimi	1	282.29	282.289	19.41	0.001
Artık hata	10	145.43	14.543	-	
Toplam	15	6751.52	-		

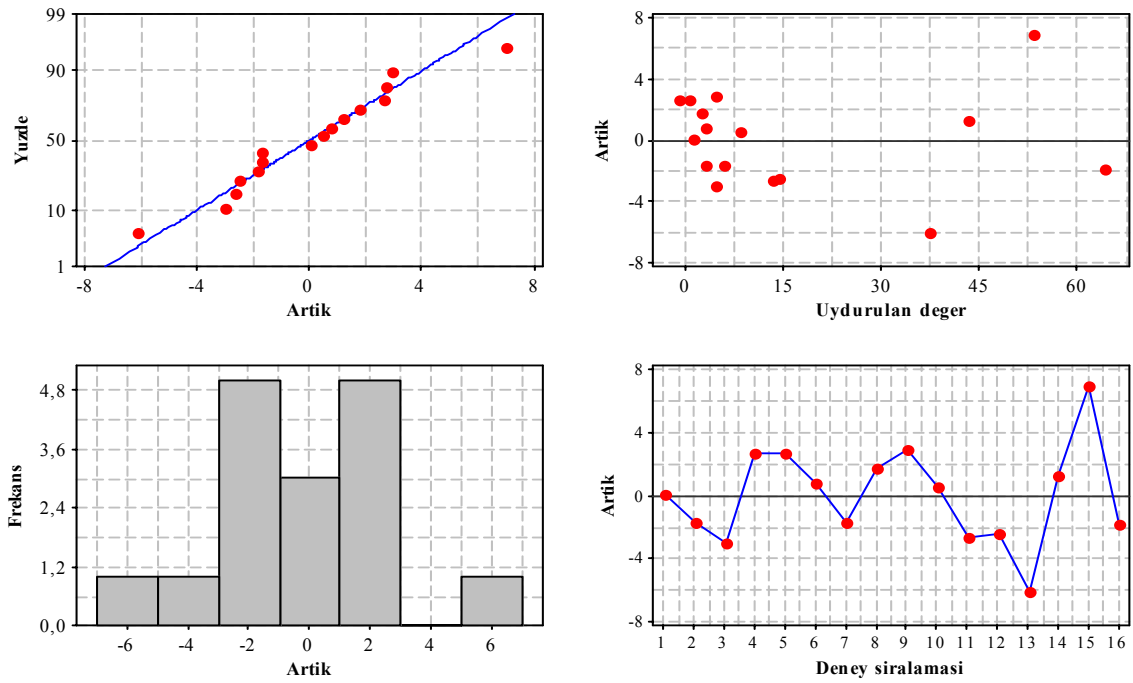
Tablo 8.14. Alüminyum elektrotla işlemede elektrot aşınma miktarı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	3241.08	648.217	150.08	0.000
Liner	2	2922.38	316.024	73.17	0.000
Karesel terim	2	312.47	156.234	36.17	0.000
Çarpım terimi	1	6.24	6.238	1.44	0.257
Artık hata	10	43.19	4.319	-	
Toplam	15	3284.28	-		

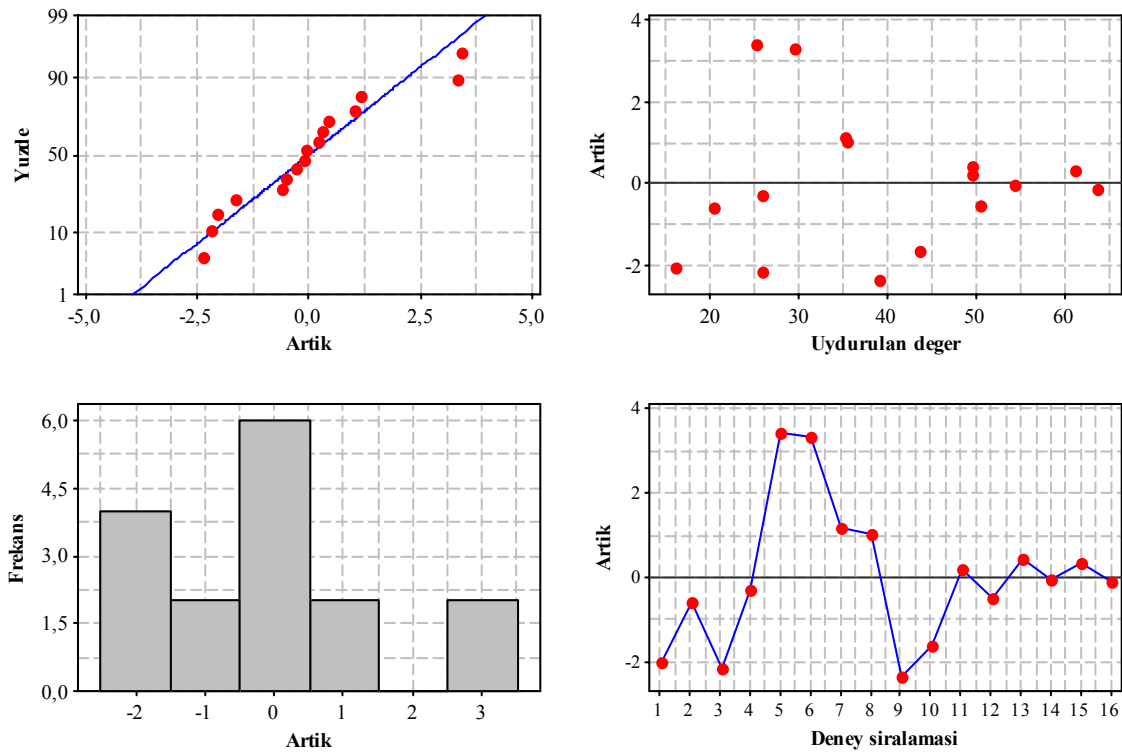
Şekil 8.18 – 8.20’de oluşturulan modeller için yapılan artık analiz sonuçları görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi modellerin uygunsuzluğu ile ilgili herhangi bir durum gözlemlenmemektedir.



Şekil 8.18. Grafit elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

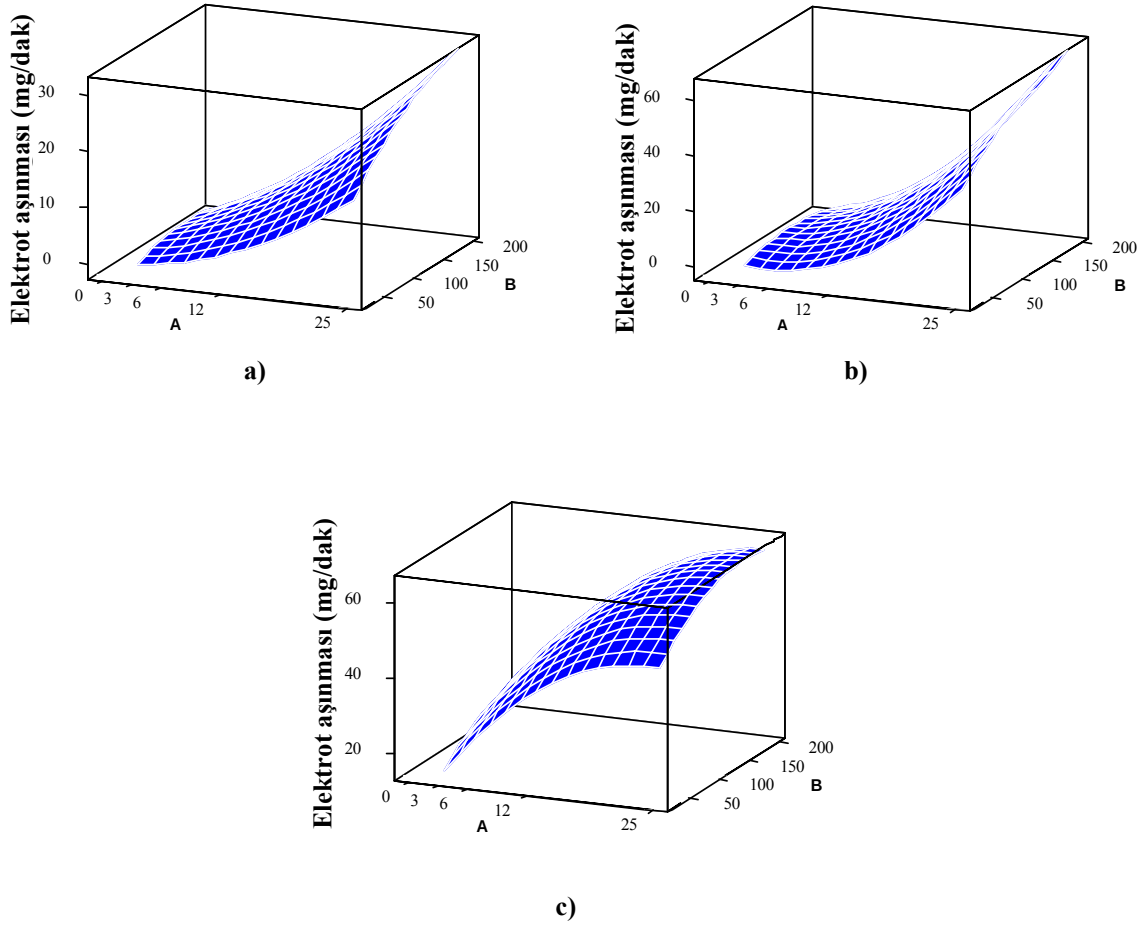


Şekil 8.19. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.



Şekil 8.20. Alüminyum elektrot ile işlemede elektrot aşınması için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

Farklı elektrotlar ile işlemede elektrot aşınma miktarları için oluşturulan yanıt yüzey grafikleri Şekil 8.21’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi akım parametresinin ve vurum süresinin artmasıyla, beyaz tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Akım parametresi, vurum süresine nazaran bu artış üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir.



Şekil 8.21. Elektrot aşınması için yanıt yüzey grafikleri (a: Grafit elektrot, b: elektrolitik bakır elektrot, c: alüminyum elektrot)

8.2.4. Talaş Kaldırma Oranının Matematiksel Modeli

Elektro erozyon ile işlemede talaş kaldırma miktarlarına ait (TKO) matematiksel model elde edilirken; vurum akımı (I) ve vurum süresine (t_d) bağlı olarak polinomal regresyon modeli:

$$TKO = a_0 + a_1 \cdot I + a_2 \cdot t_d + a_3 I^2 + a_4 t_d^2 + a_5 \cdot I \cdot t_d \quad (8.14)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen regresyon katsayıları Tablo 8.15’de verilmiştir.

Tablo 8.15. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede talaş kaldırma miktarı modellerine ait regresyon ve korelasyon katsayıları.

Elektrot cinsi	Regresyon katsayıları						Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
Grafit	1.91799	2.73766	0.16253	-0.01080	-0.00079	0.00070	96.4
Elektrolitik bakır	-3.21939	0.43866	0.06078	0.00161	-0.00023	-0.00105	92.8
Alüminyum	-1.71729	0.31032	0.02716	0.00151	-0.00010	-0.00077	98.1

Bu katsayılar, denklem (8.14)'de yerine konulduğunda grafit, elektrolitik bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlem neticesinde talaş kaldırma oranlarına ait matematiksel modeller:

$$TKO = 1.91799 + 2.73766.I + 0.16253.t_d - 0.01080.I^2 - 0.00079.t_d^2 + 0.00070.I.t_d \quad (8.15)$$

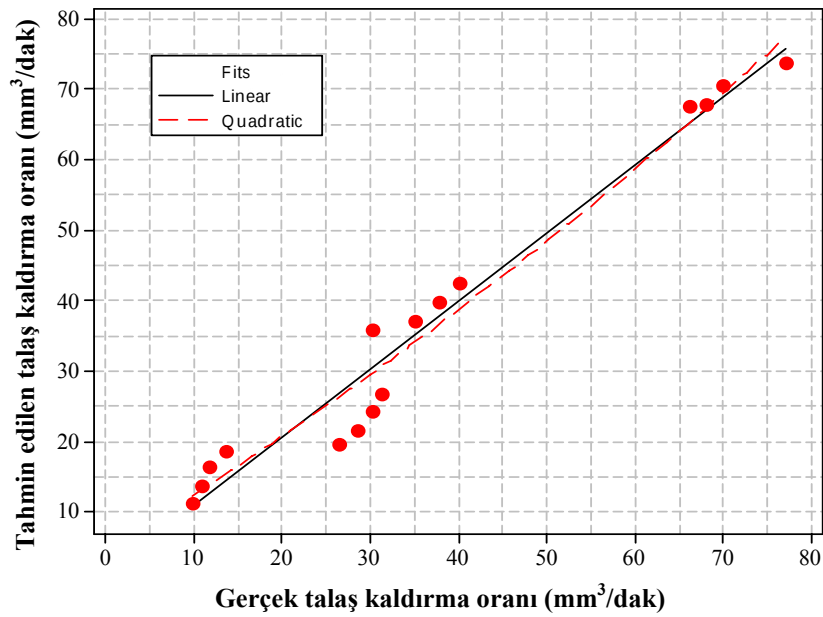
$$TKO = -3.21939 + 0.43866.I + 0.06078.t_d + 0.00161.I^2 - 0.00023.t_d^2 - 0.00105.I.t_d \quad (8.16)$$

$$TKO = -1.71729 + 0.31032.I + 0.02716.t_d + 0.00151.I^2 - 0.00010.t_d^2 - 0.00077.I.t_d \quad (8.17)$$

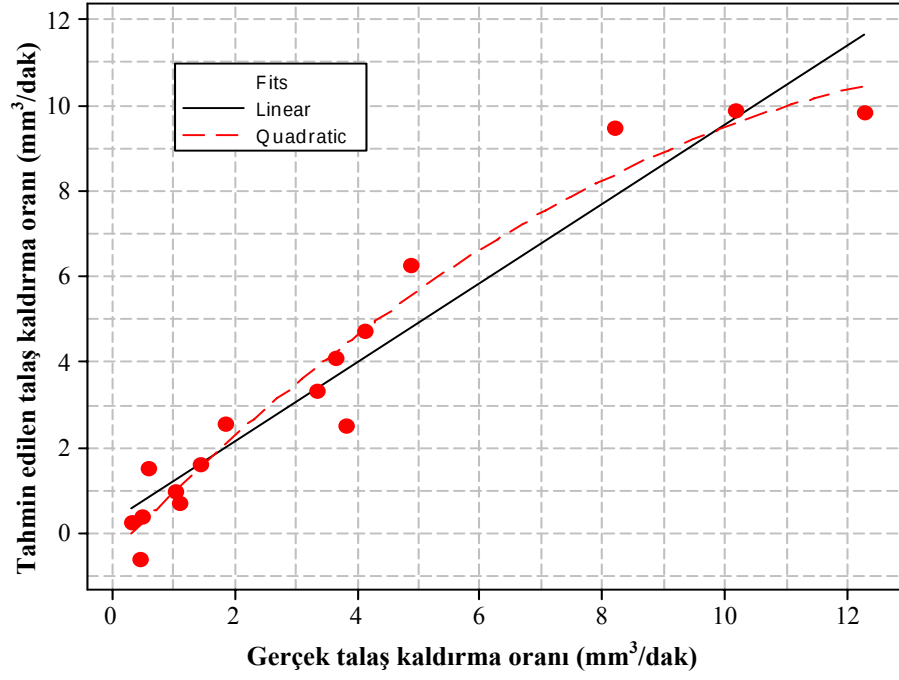
şeklinde elde edilir. Tablo 8.15'de modellere ait korelasyon katsayıları, elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen talaş kaldırma oranları Tablo 8.16'da verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.22 – 8.24'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayılar değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir. Bu durum matematiksel modellerin uygunluğunu göstermektedir.

Tablo 8.16. Elektro erozyon yönteminde farklı elektrotlarla işlemede elde edilen gerçek talaş kaldırma oranları ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen talaş kaldırma oranları.

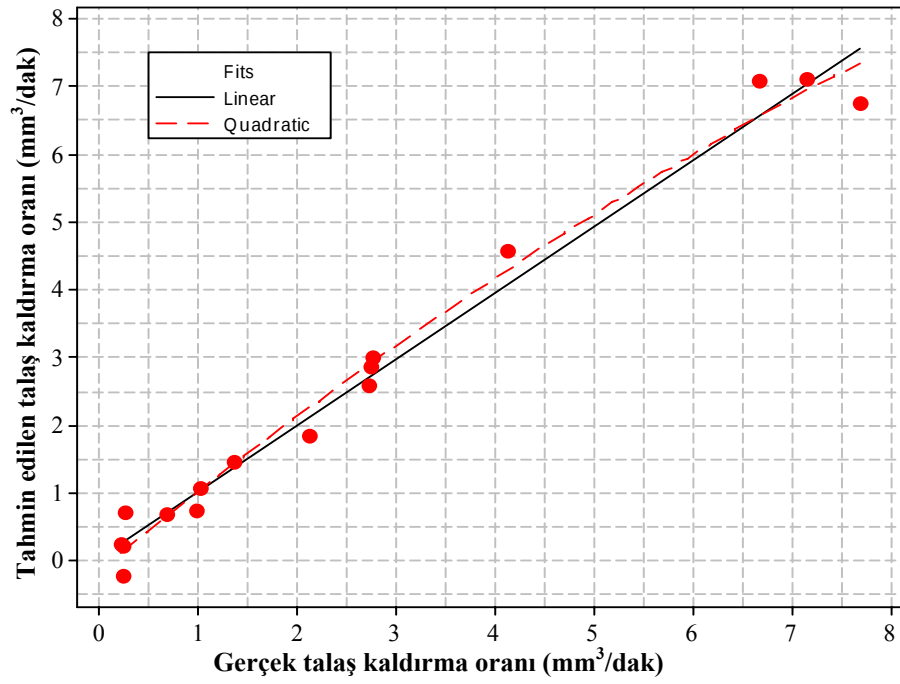
Deney numarası	Elektrot cinsi					
	Grafit		Elektrolitik bakır		Alüminyum	
	Gerçek TKO	Tahmin edilen TKO	Gerçek TKO	Tahmin edilen TKO	Gerçek TKO	Tahmin edilen TKO
1	10,854	13,6544	0,435	0,59465	0,241	0,21341
2	11,641	16,2852	0,496	0,40590	0,248	0,22274
3	13,544	18,5770	0,594	1,52589	0,259	0,72532
4	9,812	11,2817	0,316	0,24141	0,225	0,25165
5	28,612	21,6282	1,092	0,68648	0,671	0,70014
6	30,181	24,3115	1,426	1,60865	1,012	1,07823
7	31,186	26,7082	1,855	2,57187	1,367	1,46470
8	26,516	19,6229	1,012	0,97386	0,975	0,75883
9	35,009	36,9925	3,342	3,33586	2,721	2,60852
10	37,818	39,7807	3,646	4,10126	2,741	2,87050
11	40,128	42,3874	4,133	4,75094	2,764	3,02476
12	30,126	35,7219	3,815	2,5258	2,121	1,85446
13	66,186	67,6139	8,186	9,47464	6,666	7,11515
14	70,016	70,6295	10,181	9,90037	7,141	7,12557
15	77,181	73,6910	12,271	9,87072	7,679	6,77670
16	68,011	67,9350	4,866	6,28696	4,133	4,60014



Şekil 8.22. Grafit elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.



Şekil 8.23. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.



Şekil 8.24. Alüminyum elektrot ile işlemede elde edilen deneysel ve teorik talaş kaldırma oranlarının karşılaştırılması.

Tablo 8.17 – 8.19’da elde edilen matematiksel modeller kullanılarak talaş kaldırma oranları için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları verilmiştir. P değerleri değerlendirildiğinde ($p < 0.05$ olduğu durumlar) her üç elektrot için de elde edilen modeller ve modellerdeki terimlerin önemli etkiye sahip oldukları, ancak grafit ve elektrolitik bakır elektrotlarda modellerdeki karesel ve çarpım terimlerinin nispeten daha az etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 8.17. Grafit elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	7188.21	1437.641	53.95	0.000
Liner	2	7086.34	172.355	6.47	0.016
Karesel terim	2	99.36	49.680	1.86	0.205
Çarpım terimi	1	2.51	2.507	0.09	0.765
Artık hata	10	266.50	26.650	-	
Toplam	15	7454.70	-		

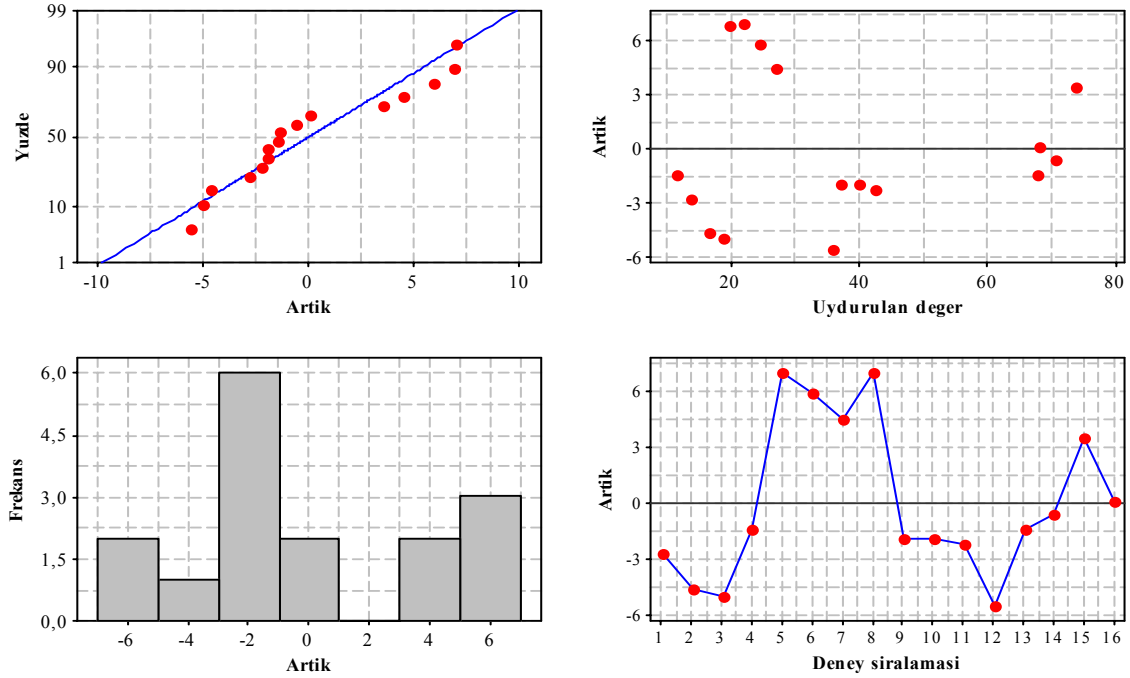
Tablo 8.18. Elektrolitik bakır elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	187.334	37.46684	25.97	0.000
Liner	2	173.274	7.95458	5.51	0.024
Karesel terim	2	8.466	4.23317	2.93	0.099
Çarpım terimi	1	5.594	5.59374	3.88	0.077
Artık hata	10	14.426	1.44263	-	
Toplam	15	201.761	-		

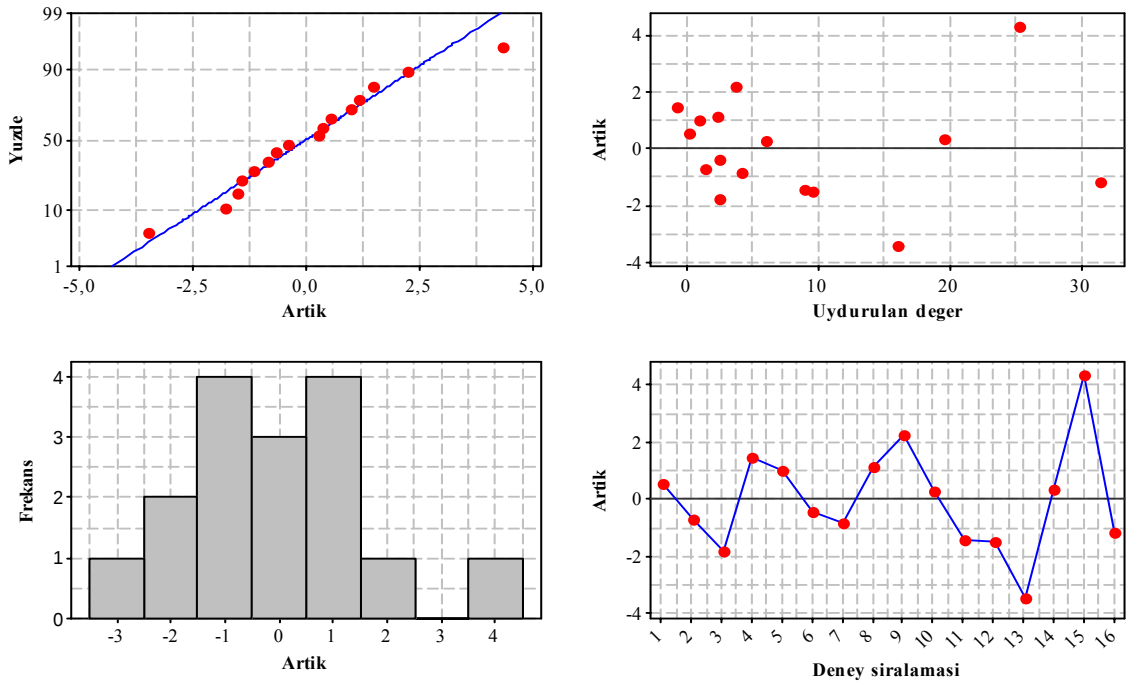
Tablo 8.19. Alüminyum elektrotla işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	5	96.2967	19.25935	101.92	0.000
Liner	2	91.6718	2.66597	14.11	0.001
Karesel terim	2	1.5566	0.77832	4.12	0.050
Çarpım terimi	1	3.0683	3.06827	16.24	0.002
Artık hata	10	1.8896	0.18896	-	
Toplam	15	98.1863	-		

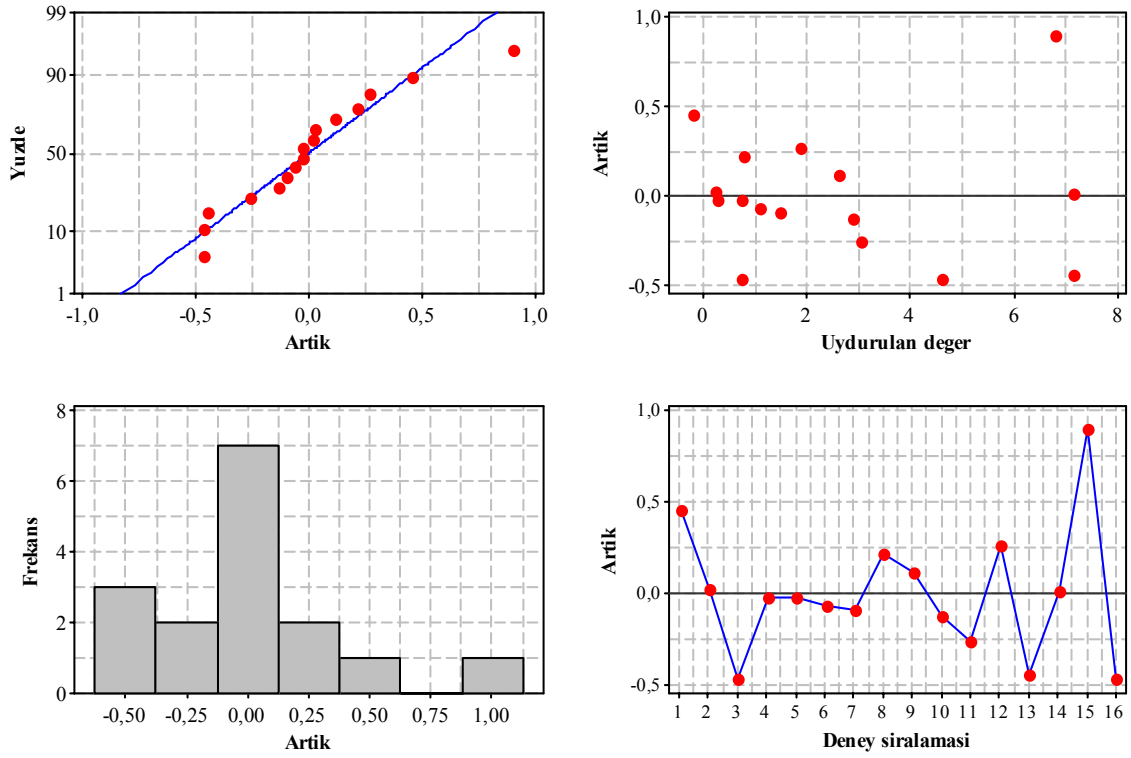
Şekil 8.25 – 8.27’de oluşturulan modeller için yapılan artık analiz sonuçları görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi modellerin uygunsuzluğu ile ilgili herhangi bir durum gözlemlenmemektedir.



Şekil 8.25. Grafit elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.



Şekil 8.26. Elektrolitik bakır elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.



Şekil 8.27. Alüminyum elektrot ile işlemede talaş kaldırma oranı için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

Farklı elektrotlar ile işlemede talaş kaldırma oranları için oluşturulan yanıt yüzey grafikleri Şekil 8.28’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi akım parametresinin ve vurum süresinin artmasıyla, beyaz tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Akım parametresi, vurum süresine nazaran bu artış üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir.

Tablo 8.20. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü modeline ait regresyon ve korelasyon katsayıları.

Regresyon katsayıları										Korelasyon katsayısı
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	98.8
10.1989	-2.6087	-0.0009	-0.1256	0.1896	0.000	0.0024	0.0001	0.0049	0.000	

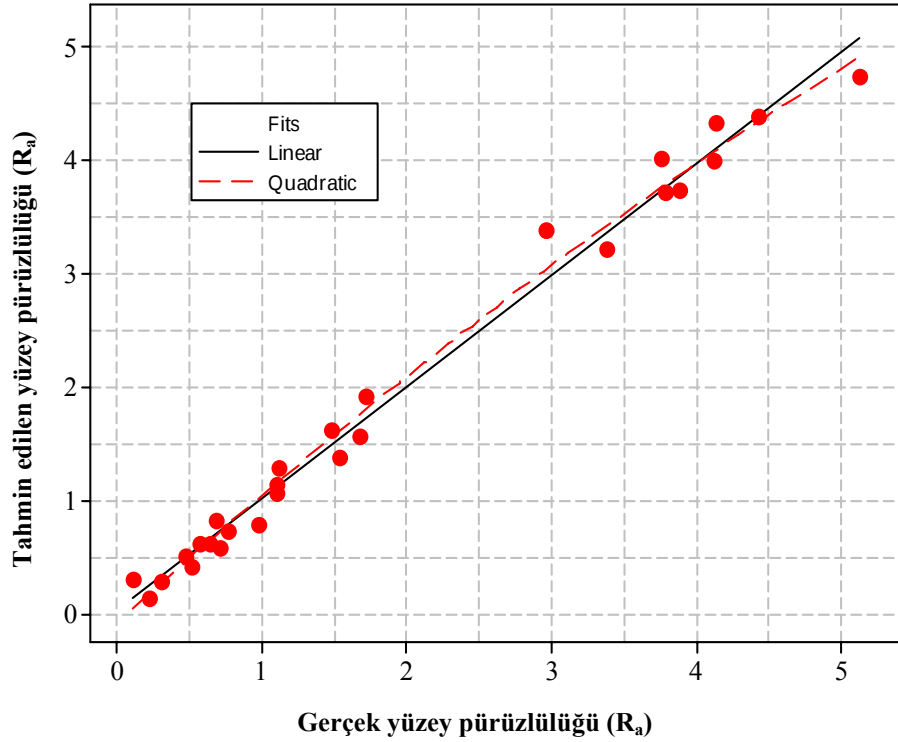
Bu katsayılar, denklem (8.18)'de yerine konulduğunda yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel model:

$$R_a = 10.1989 - 2.6087.V - 0.0009.v - 0.1256.f + 0.1896.V^2 + 0.0024.f^2 + 0.0001.V.v + 0.0049.V.f \quad (8.19)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem incelendiğinde, a_5 ve a_9 katsayılarının modelden çıkartıldığı görülmektedir. Dolayısı ile elektrolit akma oranı (v) parametresinin tek başına ve elektrolit akma oranı (v) ile tabla ilerleme miktarı (f) parametrelerinin etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilerinin olmadığı görülmektedir. Ayrıca, korelasyon katsayısının yüksek olması, modelin uygunluğunu göstermektedir. Deneysel değerler ile denklem (8.18) kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 8.21'de verilmiştir. Bu değerlere ait grafik ise Şekil 8.29'da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, deneysel değerler ile sayısal değerler oldukça yakın bir uyum içerisinde.

Tablo 8.21. Elektro kimyasal taşlama yönteminde gerçek yüzey pürüzlülükleri ve matematiksel model kullanılarak tahmin edilen yüzey pürüzlülükleri.

Deney numarası	Gerçek yüzey pürüzlülüğü (R_a)	Tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü (R_a)	Deney numarası	Gerçek yüzey pürüzlülüğü (R_a)	Tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü (R_a)	Deney numarası	Gerçek yüzey pürüzlülüğü (R_a)	Tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü (R_a)
1	5.120	4.750	10	1.720	1.912	19	0.680	0.817
2	4.140	4.337	11	1.680	1.568	20	0.720	0.579
3	3.760	4.030	12	1.540	1.376	21	0.640	0.621
4	4.430	4.389	13	1.480	1.616	22	0.570	0.622
5	4.120	4.000	14	1.120	1.286	23	0.520	0.408
6	3.880	3.740	15	1.100	1.142	24	0.480	0.497
7	3.790	3.727	16	1.100	1.065	25	0.310	0.292
8	2.960	3.386	17	0.980	0.762	26	0.230	0.125
9	3.380	3.221	18	0.770	0.733	27	0.120	0.310



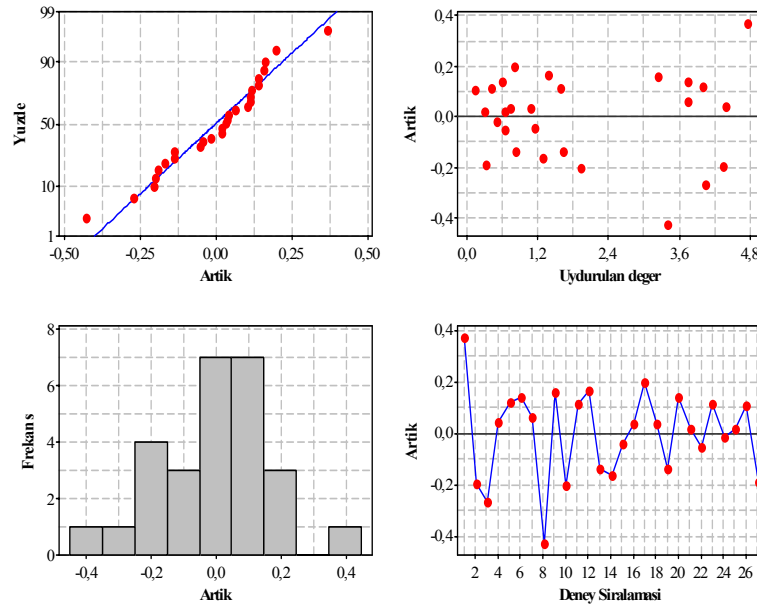
Şekil 8.29. Elektro kimyasal taşlama yönteminde deneysel ve teorik yüzey pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 8.22’de elde edilen matematiksel model kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları verilmiştir. P değerleri değerlendirildiğinde ($p < 0.05$ olduğu durumlar) modeldeki çarpım terimleri dışında bütün terimlerin önemli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

Tablo 8.22. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modelin varyans analizi sonuçları.

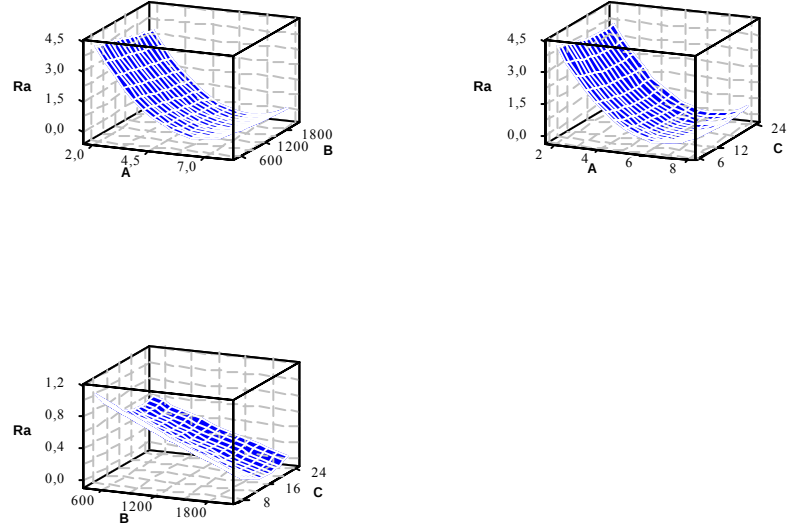
Terim	Serbestlik derecesi (v)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri
Regresyon	9	63.2569	7.02854	155.89	0.000
Liner	3	49.3082	6.85451	152.03	0.000
Karesel terim	3	13.4899	4.49664	99.73	0.000
Çarpım terimi	3	0.4587	0.15292	3.39	0.042
Artık hata	17	0.7665	0.04509	-	
Toplam	26	64.0233	-		

Şekil 8.30’da oluşturulan model için yapılan artık analiz sonuçları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi modelin uygunsuzluğu ile ilgili herhangi bir durum gözlemlenmemektedir.



Şekil 8.30. Elektro kimyasal işlemede yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel modele ait artık analizi.

Yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan yanıt yüzey grafikleri Şekil 8.31’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü tabla ilerleme miktarı ve elektrolit akma oranı parametreleri sabit iken, işleme voltajının artması ile yüzey pürüzlülüğü önemli derecede azalmaktadır.



Şekil 8.31. Elektro kimyasal taşlama yönteminde yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey grafikleri.

Yapılan bu matematiksel modeller kullanılarak, elektro erozyon ve elektro kimyasal taşlama yöntemlerinde incelenecek performanslar önceden yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu matematiksel modellerden yola çıkarak, deney yapmaya ihtiyaç duymadan, arzu edilen iş parçası yüzey pürüzlülüğü, beyaz tabaka kalınlığı, elektrot aşınması ve talaş kaldırma oranları için uygun olan işleme parametrelerini seçmek mümkün olacaktır.

9. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

9.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı, elektro erozyon ve elektrokimyasal taşlama yöntemleri ile işlenmiştir. Yapılan araştırma ve incelemelerde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Metalografik incelemeler dikkate alındığında, elektro erozyon yönteminin Ti6Al4V alaşım üzerinde önemli derecede hasarlar oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu hasarlar, yüzey fotoğraflarından da görüldüğü gibi, yüzeyden kaldırılan küresel talaşların ara bölgeden sıvı basıncı ile atılmadan tekrar katılaşması neticesinde yüzeye yapışması ile oluşan kalıntılardan, yüzeye yapışmış eriyiklerden, boşluklardan, çatlaklardan ve kraterlerden oluşmaktadır.
- Elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerin kesitleri incelendiğinde, beyaz tabaka, ısıdan daha az etkilenen bölge ve esas malzeme olmak üzere üç farklı tabakanın oluştuğu belirlenmiştir. Beyaz tabakanın kalınlığı özellikle işleme akımına bağlı olarak önemli derecede artmaktadır. Grafit elektrot kullanılarak yapılan deneylerde beyaz tabaka kalınlığı 16.08 – 99.18µm aralığında değişmektedir. Bakır elektrot kullanıldığında bu aralık 11.16 – 42.66µm olarak belirlenmiştir. Beyaz tabakanın kalınlıkları alüminyum elektrotlar ile yapılan deneylerde ise 5.43 – 34.66µm aralığında ölçülmüştür.
- Elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerden alınan EDS analizleri neticesinde, yüzeyde ve dolayısıyla beyaz tabaka içerisinde iş parçası malzemesinden farklı olarak elektrot malzemesine ait elementlerin de bulunduğu tespit edilmiştir. Soğuma oranına bağlı olarak faz dönüşümü dikkate alındığında, beyaz tabakanın mikroyapısının hegzagonal martenzitik α' olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca yüzeylerden alınan XRD analizleri neticesinde, TiC ve $Ti_{24}C_{15}$ karbürleri belirlenmiştir. beyaz tabakanın mikroyapısı ve yüzeylerde oluşan karbürler beyaz tabakanın sertlik değerini önemli derecede (esas malzemenin yaklaşık iki katı) artırmaktadır. Grafit, bakır ve alüminyum elektrotlar ile işlenmiş yüzeylerin sertlikleri sırasıyla 1195 – 1466 HV, 1245 – 1458 HV, 967 – 1416 HV arasında değişmektedir.
- Elektro erozyon yönteminde, talaş kaldırma oranı kullanılan elektrot malzemesine bağlı olarak değişmektedir. Talaş kaldırma oranını en çok etkileyen parametre akımdır. Sabit vurum süresi şartlarında, akımın artmasıyla talaş kaldırma oranı önemli derecede bir artış göstermektedir. Benzer şekilde vurum süresinin artması ile talaş kaldırma oranı 200µs değerine kadar artmakta, ancak bu değerden sonra bu artış oranı bir miktar azalmaktadır. Bu sonuç, plazma kanalındaki genişleme ve çok uzun sürelerde yüzeyde biriken karbon tabakası nedeniyle düzensiz boşalımın

oluşmasıyla ilişkilendirilmektedir. Akım değerinin en yüksek değeri almasıyla ($I=25A$), grafit elektrotta talaş kaldırma oranı maksimum olmaktadır ($77.181 \text{ mm}^3/\text{dak}$). Bu değer, grafit elektrotun işleme hızının bakır elektrottan 6.28 kat, alüminyum elektrottan ise 10.05 kat daha yüksek olduğunu göstermektedir.

- Elektro erozyon ile işlemede, yüzey pürüzlülüğü akım ve vurum sürelerine bağlı olarak artmaktadır. Yüzey pürüzlülük değerleri uygulanan deney şartlarına bağlı olarak 1.04 ile 9.68µm arasında değişmektedir. Arzu edilen yüzey pürüzlülüğü bu aralıklar arasında işleme parametrelerinin ve elektrot malzemesinin uygun seçimiyle elde edilebilir.
- Elektro erozyon ile işlenmiş yüzeylerde mikro çatlaklar meydana gelmektedir. Özellikle bakır elektrotlar ile işlenmiş yüzeylerde çatlak yoğunluğu daha fazla iken, grafit ve alüminyum elektrotlarda nispeten daha az yoğunlukta mikro çatlaklar oluşmaktadır. Akım parametresinin artırılması ve vurum süresinin azaltılması ile çatlaksız yüzeylerin elde edilmesi mümkündür. Yüzey çatlak yoğunluk haritaları ile daha az çatlak yoğunluğuna sahip yüzeyler elde etmek için, işlem öncesinde uygun parametrelerin seçilmesi mümkündür.
- Elektro erozyon yönteminde kullanılan elektrotların aşınma miktarları akım ve vurum süresine bağlı olarak artmaktadır. En az aşınan elektrot grafit iken, bunu bakır ve alüminyum elektrotlar takip etmektedir. Elektrot aşınma miktarları, elektrot malzemelerinin erime sıcaklıkları ve fiziksel özelliklerine bağlıdır.
- Elektro erozyon yönteminde, varyans analizi sonuçları dikkate alındığında, akım parametresinin; yüzey pürüzlülüğü, ortalama beyaz tabaka kalınlığı, elektrot aşınması ve talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak vurum süresi parametresinden daha etkili olduğu görülmüştür.
- Elektro erozyon yöntemi için elde edilen lineer regresyon modelleri, korelasyon katsayıları da dikkate alındığında uygun hata oranlarında tahminler vermektedir. Ayrıca, varyans ve artık analizleri bu modellerin uygun olduklarını göstermektedir.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, işleme voltajının artması ile talaş kaldırma oranı artmaktadır. İşleme voltajının 2V olduğu durumlarda, yüzey elektro erozyon yüzeylerine benzer olmakta ve çok az miktarda talaş kaldırılmaktadır. Aktif metal çözünme yaklaşık olarak 4V değerinde başlamakta ve bu değerden sonra artan işleme voltajı ile talaş kaldırma oranı daha da artmaktadır.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, işleme voltajının 2V olduğu deneylerde, XRD sonuçları da dikkate alındığında yüzeylerde beyaz bir oksit filminin olduğu gözlenmiştir. Talaş kaldırma oranı, bu filmin elektrik direnci ile değişmektedir.

- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, elektrolit akma oranının artması ile talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı artmaktadır. Elektrolit akma oranı metal çözmeden ziyade kaldırılan talaşların daha etkin bir şekilde ara bölgeden atılmasını sağlamakta ve daha temiz yüzeylerin oluşmasına yol açmaktadır.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, tabla ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, 0.12µm değerinde yüzeyler elde edilebilmektedir.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerinde en etkili parametre işleme voltajıdır (%90). Bunu, elektrolit akma oranı (%7) ve tabla ilerleme miktarı (%3) takip etmektedir.
- Elektro kimyasal taşlama yönteminde, elektro erozyon yöntemine benzer şekilde elde edilen lineer regresyon modelleri, korelasyon katsayıları da dikkate alındığında uygun hata oranlarında tahminler vermektedir.

9.2. Öneriler

- Elektro erozyon ile işlenmiş titanyum yüzeylerinin yorulma ve diğer mekanik özellikleri incelenebilir.
- Farklı dielektrik sıvıları, elektrolit sıvıları ve işlem parametreleri denenebilir.
- Alaşım, su jeti, lazer vb diğer alışılmamış işleme yöntemleri ile işlenebilir.
- Çıkış değerlerini tahmin etmek için farklı modelleme teknikleri uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ASM Handbook, properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, Volume :2, 1993
- [2] Peng, H, Jiu hai, Z., 1999, "Diffusion Bonding Technology of a Titanium Alloy to a Stainless Steel Web With a Ni Interlayer " , Materials Charecterisation :287-292.
- [3] Chen, S. L., Yan, B.H., Huang, F.Y., Infuence of Jerosene and Distilled Water as Dielectrics on The Electic Discharge Machining Characteristics of Ti-6Al-4V, Journal of Materials Processing Technology 87(1999) 107-111.
- [4] M.A Steinberg, "Materials for aerospace", Scientific American, Cilt255, No:4, Ekim 1986, s:58-64
- [5] W.F. Smith, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Cilt 2, (Cev: Dr. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım, Ankara 2001, s:447-496
- [6] Orhan, N., Khan, Tl. and Eroğlu, M., 2001. "Diffusion Bonding of a Microduplex Stainless Steel to Ti- 6Al-4V", Scripta Materialia 441-446
- [7] D.Arthur, "Titanium in engineering", Engineering (Technical File No:181), Cilt 229, No:9, 1989, s:33-34
- [8] Wang, A.C., Yan, B.H, Li, X.T., Huang, F.Y., Use of Micro Ultrasonic Vibration Lapping to Enhance the Precision of Microholes Drilled By Micro Elektro-Discharge Machining, International Journal of Machine Tool and Manufacture 42(2002) 914-923
- [9] Hong, S.Y., Ding, Y., Cooling Approaches and Cutting Temperatures in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V, International İHoural of Machine Tool and Manufacture 41 (2201) 1417-1437
- [10] Wanshenberg, Z., Zhenlong, W., Shichun, D., Guanxin, C., Hongyu, W., Ultrasonic and Electric Discharge Machining to Deep and Small Hole on Titanium Alloy, Journal of Materials Processing Tenhnology 120(2002) 101-106
- [11] Lei S., Liu, W., Hifh-Speed Machining of Titanium Alloys Using the Driven Rotary Tool, International Journal of Machine Tool and Manufacture 42 (2202) 653-661.
- [12] Çakır, O., Kıyak, M., Altan, E., "Titanyum ve Alaşımlarının Talaşlı şekillendirilmesi", II. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi (MATIT 2003) Bildiriler Kitabı, 2003, s:21-28
- [13] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, "Titanium alloys and theri machinability – a review", Journal of Materials Processing Technology, Cilt: 68, No :3, 1997, s:262-274
- [14] E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, "An overview of the machinability of aeroengine alloys", Journal of Materials Processing Technology, Cilt :134, No:2,2003,
- [15] Lenz,E., Konig, W., ANN.CIRP24(1975) 109.

- [16] Fu, C.T., Li, A.K., *Materials Chemistry and Physics* 39 (1994) 129.
- [17] Tsutsui, T., Tamura, T., *Bulletion of Hapan Society of Precision Engineering* 20(1986)60
- [18] Tsutsui, T., Tamura, T., *Bulletion of Hapan Society of Precision Engineering* 21(1986)70
- [19] Zeid, O.A.A., *Journal of Materials Processing Technology* 68(1997) 27.
- [20] Jeelani, S., Collins, M.R., *International Journal of Fatigue* 10 (1988) 121.
- [21] Iida, K., Tosha, K., *Bulletion of Japan Society of Precision Engineering* 22(1988) 195.
- [22] Hwang, J.U., Ogawa, T., Tokaji, K., *Fatigue Fracture Engineering and Materials Structure* 17 (1994) 839.
- [23] De la Cruz, P., Oden, M., Ericson, T., *Materials Science and Engineering A* 242 (1998) 181.
- [24] Rakitsky, A.A., Rios, E.R., Miller, K.J., *Fatigue Fracture Engineering and Materials Structure* 17(1994) 563.
- [25] Bello, J.M., Fernandez, B.J., Lopez, V., Ruiz, J., *Materials Science* 29(1994) 5213.
- [26] Rejda, E.F., Socie, D.F., Beardsley, B., *Fatigue Fracture Engineering and Materials Structure* 20(1997) 1043.
- [27] Lio, Y., Shimoda, K., *Journal of Materials Science Letters* 6 (1987) 1193.
- [28] Mazal, P., Dlouhy, I., Stolar, P., *Materials Manufacturing, Process* 12(1997) 83.
- [29] Freddi, A., Veschi, D., Bandini, M., Giovanni, G.- *Fatigue Engineering and Materials Structure* 20(1997)1147.
- [30] Buch, A., *Fatigue Strength Calculation*, Transition Technology, Switzerland, 1988.
- [31] Farrahi, G.h., Lebrun, J.L., Couratin, D., *Fatigue Fracture Engineering and Materials Structure* 18(1995)211.
- [32] Herr, W., Matters, B., Broszeit, E., Kloos, K.H., *Surface and Coating Technology* 57(1993)43.
- [33] Su, Y.I., Yao, S.H., Wie, C.S., Kao, W.H., Wu, C.T., *Materials Science Technology*. 15(1999)73.
- [34] Guu, Y.H., Hocheng, H., “Improvement of fatigue life of electrical discharge machined AISI D2 tool steel by TIN coating” , *Materials Science and Engineering A* 318(2001)155.
- [35] Nabhani, F., “Wear Mechanism of Ultra – Hard Cutting tools materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 115 (2001) 402—412.
- [36] Zhan, J.M., Zhao, J., Xu, S.X., Zhu, P.X., “Study of the contact force in free-form-surfaces compliant EDM polishing by root”, *Journal of Materials Processing Technology*, 129(2002)186—189.

- [37] Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., “EDM performance of CR/Cu based composite electrodes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43(3)(2003)245—252
- [38] Gangadhar, A., Sunmagam, M.S., Philips, P.K., “Surface modification in electro discharge processing with a powder compact tool electrode”, *Wear*, 143(1991)45—55.
- [39] Samuel, M.P., Philips, P.K., “Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(11)(1999)1625—1633
- [40] Simao, J., Lee, H.G., Aspinwall, D.K., Dewes, Aspinwall, E.M., “Workpiece surface modification using electrical discharge machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43(2)(2003)121—128.
- [41] Schumacher, B.M., “About the role of debris in the gap during electrical discharge machining”, *ANN CIRP* 39(1)(1990)197—200.
- [42] Tzeng, Y.F., Lee, C.Y., “Effect of powder characteristics on electro discharge machining efficiency”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(8)(2001) 586—592.
- [43] Jeswani, M.L., “Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining”, *Wear*, 70(1981)133—139.
- [44] Mohri, N., Saito, N., Higashi, M., “A new process of finish machining on free surface by EDM methods”, *ANN CIRP* 40 (1)(1991) 207—210.
- [45] Quan, Y.M., Liu, Y.H., “Powder—suspension dielectric fluid for EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, 52(1995)44—54.
- [46] Luo, Y.F., “The dependence of inter-space discharge transitivity upon the gap debris in precision electro discharge machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 68(1997) 121—131.
- [47] Lin, Y.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., “Surface improvement using a combination of electrical discharge machining with ball burnish machining based on the Taguchi method”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2001)673—682.
- [48] Hassan, A.M., “An investigation into the surface characteristics of burnished cast Al-Cu alloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(6)(1997) 813—821.
- [49] Hassan, A.M., “The effect of ball – and roller—burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals”, *Journal of Materials Processing Technology* 72(3)(1997)385—391.

- [50] Loh, N.H., Tam, S.C., Miyazama, S.. “Application of experimental design in ball burnishing”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 33 (6)(1993)841—852.
- [51] Loh, N.H., Tam, S.C., “Effects of a ball burnishing parameters on surface finish- a literature survey and dicision”, *Precision Engineering* 10(4)(1998)215—220.
- [52] Sun, J.J., Taylor, E.J., Srinivasan, R., “MREF – ECM process for hard passive materials surface finishing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 108(2001)356—368.
- [53] McGeough, J.A., De Silva, A. Senbel, H.A., Lee, S.C., Wang, J.Y., *Proc.13th ISEM, CIRP 1* (2001)327.
- [54] McGeourgh, J.A., Khayry, A.B., Munro, W., Crookall, J.R., *ANN CIRP*, 32(1)(1983)113
- [55] Khayry, A.B., McGeourgh, J.A., *Ann CIRP* 39(1)(1990)191.
- [56] Rajurkar, K.P., Zhu, D., McGeourgh, J.A., Kozak, J., De Silva, A., *Ann CIRP* 48 (2)(1999)567.
- [57] Koshimizu, S., Inasaki, I., *Journal of Mechanic Working Technology* 17(1998)333.
- [58] Uematsu, T., Suzuki, K.,- Yanase, T., Nakagawa, T, *International symposium on Machining of Advanced Ceramic Materials and Cmposites ASME, New York* 1998 335.
- [59] Murti, V.S.R., Philipsi, P.K., *Int.J.Prod.Res.*25(1987) 259.
- [60] Zhixin, J., Jianhua, A., Xing, A., *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(2)(1997)193.
- [61] Lin, Y.C., Yan, B.H., Chang., Y.S., *Journal of Materials Processing Technology*, 104(2001) 171.
- [62] Shu, K.M., Tu, G.C., “Study of electrical discharge grinding using metal matrix composite electrodes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (2203) 845—854.
- [63] Sakai, S., Masuzawa, S., “ECM finishing of surface products by EDM”, *Proceeding og the ISEM9, 1989*, 155—158.
- [64] Rajukar, K.P., Schnacker, C1., “Some aspects of EDM performance and control”, *Annals of the CIRP* 37(1)(1998) 183—186.
- [65] Ramasawmy, H., Blunt, L., “3D surface topography assement of the effext of different electorytes during electrochemical polishing of EDM surfaces”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2002) 567—574.
- [66] W.Theisen, A.Schuermann, “Electro discharge machining of nickel – titanium shape memory alloys”, *Materials Science and Engineering A* 348(2004) 200-204

- [67] Z.N. Guo, T.C. Lee, T.M. Lee, T.M. Yue, W.S. Lau, "A Study of ultrasonic aided wire electrical discharge machining" , Journal of Materials Processing Technology, 63 (1997) 823- 828
- [68] J. Zhixin, Z. Jianhua, A. Xing, "Ultrasonic vibration pulse electro discharge machining of holes in engineering ceramics" , Journal of Materials Processing Technology, 53 (1995) 811-816
- [69] Ogawa Hitoshi, Nogami Teruo, Marimoto Iwao, "Study of micro machining of metals by EDM with high frequency vibration", Takushima Perfectual Industrial Technology Center, 1999-2001.
- [70] Z.Wansheng, W. Zhenlong, D. Shichun, C. Guanxin, W. Hongyu, "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy", Journal of Materials Processing Technology 120(2002) 101-106
- [71] B.H. Yan, A.C. Wang, C.Y. Huang, F.Y. Huang, "Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1105-1112.
- [72] H. Huang, H. Zhang, L. Zhou, H.Y. Zheng, "Ultrasonic Vibration assisted electro –
- [73] M. Ghoreishi, J. Atkinson, "A comparative experimental study of machining characteristics in vibratory", Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 374-384.
- [74] K. Egashira, T. Masuzawa, "Micro ultrasonic machining by the application of work piece vibration", CIRP Annals --- Manufacturing Technology 48 (1999) 131-134.
- [75] C.Gao, Z.Liu, "A study of ultrasonic aided micro- electrical discharge machining by application of work piece vibration" ,Journal of Materials Processing Technology 139(2003) 226-228.
- [76] Guawan Setia Prihandana, M. Hamdi, Y.S. Wong, Kimiyuki Mitsui, "Effect of vibrated electro in electrical discharge machining", Proceedings of the first International Conference and Seventh AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing, 14-15 March 2006, Kuala Lumpur, pp. 133-138 (ISBN:983-42876-0-7).
- [77] Q.H. Zhang, R. Du, J.H. Zhang, Q. Zhang, "An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas", International Journal of Machine Tools & Manufacture DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.09.023.

- [78] Q.H. Zhang, J.H. Zhang, J.X. Deng, Y.Qin, Z.W. Niu, "Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas", *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002) 135-138.
- [79] Z.N. Guo, T.C. Lee, T.M. Yue, W.S. Lau, "Study on the machining mechanism of WEDM with ultrasonic vibration of the wire", *Journal of Materials Processing Technology* 69 (1997) 212-221.
- [80] Z.B. Yu, T. Jun, K. Masanori, "Dry electrical discharge machining of cemented carbide", *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 353-357
- [81] M.Kunieda, S. Furuoya, N. Taniguchi, "Improvement of EDM efficiency by supplying oxygen gas into gap", *CIRP Annals—Manufacturing Technology* 40(1991) 215-218.
- [82] M.Kunieda, S. Furuoya, N. Taniguchi, "Electrical discharge machining in gas", *CIRP Annals --- Manufacturing Technology* 46(1997) 143-146.
- [83] M.Yoshida, M.Kunieda, "Study on mechanism for minute tool electro wear in dry EDM", *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 65 (1999) 689-693.
- [84] Y. Zhanbo, J. Takahashi, N.Nakajima, S.Sano, K.Karato, M.Kunieda, "Feasibility of 3-D surface machining by dry EDM", (<http://www.sodic.co.jp/techim/article/s02.pdf> May 2006).
- [85] Q.H. Zhang, J.H. Zhang, S.F. Ren, Z.W. Niu, X. Ai, "A theoretical model of surface roughness in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining in gas", *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 7(2005) 381-390.
- [86] A. Curodeau, M. Richard, L. Frohn-Villeneuve, "Molds surface finishing with new EDM process in air with thermoplastic composites electrodes", *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 278-283.
- [87] C.Frudate, M. Kunieda, "Fundamental study on dry-WEDM", *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 67 (2001) 1180-1184.
- [88] T.Wang, M Kunieda, "Dry WEDM for finish cut", *Key Engineering Materials* 258-259(2004)562-566.
- [89] T.Wang, Y.Chen, M.Kunieda, "Study on wire-cut electrical discharge machining in gas", *Jixie Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Mechanical Engineering* 39 (2003) 76-80.
- [90] <http://www.scopus.com>
- [91] "3D form generating processing by dry EDM", ([http://www.tuat.ac.jp/_kuneieda/E-kenkyu/16E-kenkyu/3jigen%20\(shibayama\)/DRY-EDM%202004.htm](http://www.tuat.ac.jp/_kuneieda/E-kenkyu/16E-kenkyu/3jigen%20(shibayama)/DRY-EDM%202004.htm))

- [92] F.-L. Zhao, Z.-Z. Lu, H. Wang, Z.-Q. Qian, "Research on effecting mechanism of particles in powder-mixed EDM", *Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology* 45 (2005) 668-671.
- [93] Y.S. Wong, L.C. Lim, I.Rahaman, W.M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric", *Journal of Materials Processing Technology* 79(1998) 30-40.
- [94] B.H. Yan, Y.C. Lin, F.Y. Huang, C.H. Wang, "Surface modification of SKD 61 during EDM with metal powder in the dielectric", *Materials Transactions* 42(2001) 2597-2604.
- [95] P.Pecas, E. Henriques, "Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1465-1471.
- [96] M.L. Jeswani, "Effects of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining", *Wear* 70 (1981) 133-139.
- [97] B.-H. Yan, S.-L. Chen, "Effects of dielectric with suspended aluminium powder on EDM", *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series C/Chung-Kuo Chi Hsueh Kung Ch'eng Hsuebo Pao* 14 (1993) 307-312.
- [98] W.S. Zhao, Q.G. Meng, Z.L. Wang "The application of research on powder mixed EDM in rough machining", *Journal of Material Processing Technology* 129 (2002) 3033.
- [99] Y.F. Tzeng, C.Y. Lee, "Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17 (2001) 586-592.
_2970_18_ENG_043_074.pdf
Discharge machining of micro holes in Nitinol", *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13(2003) 693-700.
s:223-253
- [100] H.K.Kansal, S.Singh, P.Kumar, "Application of Taguchi method for optimization of powder mixed electrical discharge machining". *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 7 (2005) 329-341.
- [101] F.Klocke, D.Lung, G.Antonoglou, D. Thomaïdis, "The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electro discharge machining with small discharge energies", *Journal of Materials Processing Technology* 149(2004) 191-197.

- [102] K.L. Wu, B.H. Yan, F. Yuan Huang, S.C. Chen, "Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1195-1201.
- [103] S. Sharif, R.M.Y. Noordin, "Machinability modeling in powder mixed dielectric EDM of titanium alloy Ti-6246", *Proceedings of the First International Conference and Seventh AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material*
- [104] A. Yahya, C.D. Manning, "Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis", *Journal of Physics D: Applied Physics* 37 (2004) 1467-1471.
- [105] K.-M. Tsai, P.-J. Wang, "Semi-empirical model of surface finish on electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2001) 1455-1477.
- [106] P.-J. Wang, K.-M. Tsai, P.-J. Wang, "Semi-empirical model on work removal wear in electrical discharge machining", *Journal of Materials Processing Technology* 114 (2001) 1—17.
- [107] I. Gopal, K.P. Rajurkar, "Artificial Neural Network approach in modeling of EDM process", *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks* 2(1992) 845—850.
- [108] K.-M. Tsai, P.-J. Wang, "Comparisons of neural network models on material removal rate in electrical discharge machining", *Journal of Materials Processing Technology* 17 (2001) 111—124.
- [109] K. Wang, H.L. Gelgele, Y. Wang, Q. Yuan, M. Fang, "A hybrid intelligent method for modeling the EDM process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 995—999.
- [110] D.K. Panda, R.K. Bhoi, "Artificial neural network prediction of material removal rate in electro discharge machining", *Materials and Manufacturing Processes*, 20 (2005) 645 – 672.
- [111] G. Petropoulos, N.M. Vaxevanidis, C. Pandazaras, "Modeling of surface finish in electro – discharge machining based upon statistical multi – parameter analysis", *Journal of Materials Processing Technology* 155- 156 (2004) 1247—1251.
- [112] A.B. Puri, B. Bhattacharyya, "Modeling and analysis of white layer depth in a wire- cut EDM process through response surface methodology", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25 (2005) 301-307.

- [113] N.M. Abbas, D.G. Solomon, Md. F. Bahari, “A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Article in Press.
- [114] J.Wilson, “Practice and theory of electrochemical machining.(1971) 79—161.
- [115] K.P. Rajurkar, “Non traditional Manufacturing Processes”, *Handbook of Design. Manufacturing and Automation*, (Ed. R.C. Dorf, A. Kursak), John Wiley&Sons. Inc-newyork, ABD, 1972,s:211—2411.
- [116] Çakır,O.,Altan,E,”Elektrokimyasal İşleme Yöntemi” . *Metal-Makine Dergisi*. Sayı:56, 1994. s:40—46.
- [117] .Chikamori, “Possibilities of electrochemical machining”, *Int Jpn, Soc. Prec. Engg.* 32(1) (1998) 37—38.
- [118] A.K.M. De Silva, H.S.J. Atlena, J.A. McGeough. “Precision ECM by process modeling” , *Ann. CIRP* 49 (1) (2000) 151—155.
- [119] Der – Tau Chin, J., *Electrochem. Soc* 119(1972) 1043.
- [120] M.A. LaBoda, A.J.Chartrand, J.P. Hoare, C.R. Wiese, Kao-Wen Mao, J., *Electrochem. Soc.* 120(1973) 643.
- [121] B. Bhattacharyya, J. Munda., “Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain” *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 1301 –1310.
- [122] Kurt, B., “Ti—6Al—4V Alaşımı ile Farklı Tip Paslanmaz Çeliklerin Difüzyon Kaynağı”, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2005.
- [123] Nabhabi, F., “Machining of Aerospace Titanium Alloys”, *Torotics and Computer Integrated Manufacturing* 17 (2001), 99—106.
- [124] Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., “Titanium alloys and Their Machinability – a review”, *Journal of materials processing technology*, 68(1997) 262—274.
- [125] Schueller, J.K., Tlusty, J., Smith, S., Leigh, E., “Advanced machining techniques on titanium rotor parts”, *American Helicopter Society, 56th Annual form* , Virginia,VA,May 2000.
- [126] www2.coromant.sandwick.com/coromant/pdf/aerospace/gas_turbines/
- [127] Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., “Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü – I. Bölüm”, *Mühendislik ve Makine*, Cilt: 46, Sayı:546, 2005.
- [128] Kishawy, H.A., Wilcox, J., “Tool wear and chip formation during hard turning with self-propelled tools”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 43 (2003) 433 – 439.

- [129] Jawaid, A., Che – Haron, C.H., Abdullah, A., “Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti- 6246”, Journal of Materials Processing Technology, 92 – 93(1999) 329-334.
- [130] Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., “Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü – II. Bölüm”, Mühendislik ve Makine, Cilt: 46, Sayı:547,2005.
- [131] Kitagawa, T., Kubo, A.,Mackawa, K., “Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti --&A1-6V-2Sn”, Wear, 202(1997) 142 – 148.
- [132] Riberiro, M.V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., “Optimization of titanium alloy (6A1-4V) machining”, Journal of materials processing technology, 143—144(2003) 458—463.
- [133] Çaydaş, U., “WEDM yönteminde işlem parametrelerinin mikroyapı ve yüzey pürüzlüğüne etkisi”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [134] www.furkan.com.tr
- [135] Kocabaş, B., “Elektro erezyn ile işlemede iş parçası yüzey profilinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [136] www.engineersedge.com/edm.html
- [137] Electrochemical grinding, American Machinist, 2003 .
- [138] www.edmtt.com
- [139] Şahin, Y., “Talaş kaldırma prensipleri 2”, Nobel yayınları 2001.
- [140] Liao, Y.S., Huang, J.T., Su. H.C., “A study on the machining parameters optimization of wire electrical discharge machining”, Journal of Materials Processing Technology, 71 (1996) 487—493.
- [141] Lee, H.T., Yang, L.Y., Yeh, J.C, Bipng, C.C., “ Influence of EDM process parameters on surface defects and roughness”, Journal analysis of EDMed surfaces using Taguchi method approach”, Materials Manufacturing Process, 15(6) 2000 781.
- [142] Lee, H.T., Yur. J.P, “Characteristics analysis of EDMed surfaces using Taguchi method approach”, Materials Manufacturing Process, 15(6) 200 781.
- [143] C.H.C. Haron, A. Jawaid, “The effects of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6A1—4V”, Journal of Materials Processing Technology Article in pres.
- [144] Barry, J., Bryne, G., Lennon, D., “Observation on chip formation and acoustic emission in machining Ti –6A1 –4V alloy”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 41 (2001) 1055 – 1070.

- [145] Su, Y., He, L.L., Li, X.L., “An experimental investigation of effect of cooling/lubrication conditions on tool wear in high – speed end milling of Ti – 6Al – 4V”, *Wear*, (2006) Article in pres.
- [146] Lee, H.T., Hsu, F.C., Tai, T.Y., “Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper – tungsten electrode”, *Materials Science and Engineering A* 364 (2004) 346—356.
- [147] S.H.Lee,X.P.Li,”Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide”, *Journal of Materials Processing Technology* 115 (2001) 344—358.
- [148] B.H. Yan, H.C. Tsai, F.Y. Huang, “The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2005) 194—200.
- [149] H.T. Lee, F.C. Hsu, T.Y. Tai, “Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper – tungsten electrode”, *Materials Science and Engineering A*, 364 (1 – 2) (2004) 346 – 356.
- [150] Rebelo, J.C., Dias, A.M., Kremer, D., Lebrun, J.L., “Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels” , *Journal of Materials Processing Technology* 84 (1998) 90-96.
- [151] Ho, K.H., Newman, S.T., “State of the art electrical discharge machining (EDM)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(2003) 1287 – 1300.
- [152] Ahmed, T., Rack, H.J., 1998, “Phase Transformations During Cooling in α + β Titanium Alloys”, *Materials Science and Engineering A* 243, P, 206—211.
- [153] Puri, A.B., Bhattacharyya, B., “Modeling and analysis of white layer depth in a wire – cut EDM process through response surface methodology”, *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(2005) 301—307.
- [154] Kahng, C.H., Rajurkar, K.P., “Surface characteristics behavior due to rough and fine cutting by EDM”, *ANN CIRP* 25(1) 1997,77—82.
- [155] Lim, L.C., Lee,C.C., Wong, Y.S., Lu, H.H., *Materials Science and Technology* 7 (1991) 239
- [156] H.Ramasawmy, I. Blunt, K.P. Rajurkar, “Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in die sinking EDM process”, *Precision Engineering*(2005), in press.
- [157] Lee, H.T., Hsu, F.C., *Materials Science and Technology* 19(9) (2003) 1261.

- [158] Chen, S.L., Yan, B.H., Huang, F. Y., “Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti – 6Al –4V”, Journal of Materials Processing Technology 87(1999) 107—111.
- [159] Lee, S.H., Li, X.P., “Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in the electrical discharge machining of tungsten carbide” , Journal of Materials Processing Technology, 115(2001) 344-358.
- [160] Lau, W.S., Wang, M., Lee, W.B., “Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 30(1990) 297-308.
- [161] Chow, H.M., Yan, B.H., Huang, F.Y., “Micro slit machining using electro discharge machining with a modified rotary disk electro(RDE)”, Journal of Materials Processing Technology, 91(1999) 161—166.
- [162] Bhattachary, B., Munda, J., “Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micromachining domain”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (2003) 1301—1310.
- [163] Haisch, T., Mittemeijer, E., Schultze, J.W., “Electrochemical machining of the steel 100Cr6 in aqueous NaCl and NaNO₃ solutions; microstructure of surface films formed by carbides”, Electrochimica Acta 47(2001) 235—247.
- [164] Kozak, J., Oczos, K.E., “Selected problems of abrasive hybrid machining”, Journal of Materials Processing Technology, 109(2001) 360-366.
- [165] Srivastava, A.K., Rogers, D.B., Elbestawi, M.A “Workpiece burn and surface finish during controlled force robotic disk grinding”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 32(1992).
- [166] Canıyılmaz, E., “Kalite geliştirmede Tahuchi Metodu ve bir uygulama”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [167] Tosun, N., “Tel erozyon tezgahında tel aşımının ve yüzey pürüzsüzlüğünün deneysel olarak incelenmesi ve modellenmesi”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2001.
- [168] Gökler, M1., Ozanözü, “Experimental investigation of cutting parameters on surface roughness in the WEDM process”, International Journal of Machine, Tools and Manufacture, 40(2000) 1831 – 1848.
- [169] Savaş, V., “Takım Tezgahları Zaman ve Maliyeti Ders Notları”, 2005 Elazığ

- [170] H.Zarepour, A.F.Tehrani, D.Karimi, S.Amini, “Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies”, Journal of Materials Processing Technology, Article in press.

ÖZGEÇMİŞ

Ulaş ÇAYDAŞ, 03 Kasım 1978 yılında Muş'un Bulanık İlçesine bağlı Yoncalı Köyü'nde doğdu. İlk öğrenimini Yoncalı Köyü İlkokulu'nda tamamladı. Orta ve Lise öğrenimlerini Elazığ Atatürk Ortaokulu (1992) ve Elazığ Gazi Anadolu Teknik Lisesinde (1996) tamamladı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Öğretmenliği Programından mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisans eğitime başladı ve 2001 yılında aynı bölümde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl aynı ana bilim dalında doktora eğitimine başladı. 2007 yılında Öğretim Görevlisi olan Ulaş ÇAYDAŞ, evli ve 1 çocuk babasıdır.

Ulaş ÇAYDAŞ