

151539

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRO-EROZYONLA KALIPLARIN
İŞLENMESİNDE YÖNTEM
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ**

151539

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Cenk ERTÜRK
(503011094)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2004**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. ADNAN DİKİCİOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Erdem İMRAK (İ.T.Ü.)
Y.Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ (İ.T.Ü.)**

ADNAN DİKİCİOĞLU
ERDEM İMRAK
TURGUT GÜLMEZ

OCAK 2004

ÖNSÖZ

Hazırladığım bu çalışma boyunca yönlendirmeleri, anlayışı ve desteği için değerli tez danışmanı hocam sayın Prof. Dr. Adnan Dikicioğlu'na, deneysel kısımlarda yardımcı olan tüm Hatko A.Ş. personeline ve bu akademik çalışmaya verdiği önemi, desteği ve yardımlarıyla gösteren konusunda uzman bir firma olan İsviçre kökenli Agie Charmilles International SA firmasının satış müdürü sayın Guiseppe Maffei 'ye ve değerli asistanı sayın Sandra Spaeti'ye teşekkürlerimi bir borç bilirim. Emin olduğum bir konu var ki çok çaba, emek ve zaman harcayarak ortaya çıkardığım tez çalışmam, sözünü ettiğim değerli kurum ve şahsiyetler olmadan bu derece verimli olamazdı. Dolayısıyla bu çalışmanın başarısını söz konusu değerli kurumlara, şahsiyetlere ve destekleri ve anlayışlarına karşılık olarak tüm sevdiklerime adayacağım.

Aralık.2003

Cenk ERTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. İleri İmalat Yöntemleri ve Önemi	1
1.2. İleri İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması	2
2. İLERİ İMALAT YÖNTEMLERİNİN TANITILMASI	4
2.1. Kimyasal Yöntemler	4
2.1.1. Kimyasal İşleme	4
2.2. Mekanik Yöntemler	7
2.2.1. Su Jetiyle İşleme	7
2.2.2. Ultrasonik İşleme	11
2.3. Elektriksel Yöntemler	15
2.3.1. Elektrokimyasal İşleme	15
2.4. Termal Yöntemler	21
2.4.1. Elektron Demetiyle İşleme	21
2.4.2. Lazerle İşleme	22
2.4.3. Plazma Arkıyla İşleme	26
3. ELEKTROEROZYON YÖNTEMİ	29
3.1. Tarihçe ve Gelişim	29
3.2. Elektroerozyon (EDM) Nedir? Nasıl Çalışır?	31
3.3. Elektroerozyon Yönteminde Kıvılcım Oluşumu	33
3.4. Elektroerozyon Yönteminde Boşalma Hataları	39
3.4.1. Açık Devre Sinyalleri Hatası	39
3.4.2. Kısa Devre Hatası	39
3.4.3. Ark Hatası	40
3.4.4. Kapalı Aralık Hatası	41
3.5. Malzeme Kaldırılması ve Aşınma Mekanizmaları	42
3.6. Elektroerozyonda Yüzey Pürüzlülüğü-İşlem Parametreleri İlişkisi	47
3.7. Elektroerozyonda Güç Devreleri	51
3.8. Elektroerozyonda Elektrotlar	57
3.9. Elektrotların İmali	59
3.10. Elektroerozyonda Dielektrik Sıvılar ve Yıkama	60

	<u>Sayfa No</u>
3.11 Elektroerozyonda Kontrol Sistemi	66
3.12 Elektroerozyon Özellikleri ve Uygulama Alanları	68
3.13 Erozyon Parametreleri ve Etkileri	70
3.13.1. Güç Seviyesi	70
3.13.2. Ark Süresi	71
3.13.3. Ark Aralığı	72
3.13.4. Servo	72
3.13.5. Hassasiyet	73
3.13.6. Ark Koruma	74
3.13.7. Yıkama	74
4. ELEKTROEROZYON UYGULAMASI	75
4.1. Deney 1	78
4.2. Deney 2	79
4.3. Deney 3	80
4.4. Deney 4	81
4.5. Deney 5	82
4.6. Deney 6	84
4.7. Deney 7	85
4.8. Deney 8	86
4.9. Deney 9	87
5. DENEY SONUÇLARI ve YORUMLAR	89
KAYNAKLAR	91
EKLER	92
ÖZGEÇMİŞ	107

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Elektroerozyon Devreleri ve Karşılaştırılmaları	56
Tablo 3.2. Elektroerozyonda Kullanılan Bazı Dielektrik Sıvılar ve Özellikleri... ..	62
Tablo 3.3. Deney Tezgahındaki Güç Seviyeleri ve Akım Kademeleri	77
Tablo 3.4. Deney Tezgahındaki Ark ve Bekleme Süreleri Kademeleri ...	77
Tablo 3.5. 1. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	78
Tablo 3.6. 2. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	79
Tablo 3.7. 3. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	80
Tablo 3.8. 4. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	81
Tablo 3.9. 5. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	82
Tablo 3.10. 6. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	84
Tablo 3.11. 7. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	85
Tablo 3.12. 8. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	86
Tablo 3.13. 9. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar	87
Tablo B.1. Elektroerozyonda Kullanılan Elektrotlar ve Özellikleri	105
Tablo B.2. Elektroerozyonda Kullanılan Dielektrik Sıvılar ve Özellikleri ...	106

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : İleri İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	3
Şekil 2.1.1 : Kimyasal İşleme Aşamaları.....	5
Şekil 2.1.2 : a) Kimyasal İşleme Ekipmanları.....	6
Şekil 2.1.2 : b) Kademeli Kimyasal İşleme	6
Şekil 2.1.3 : Kimyasal İşlenmiş Uzay Sanayi Uygulamaları.....	6
Şekil 2.2.1 : Su Jeti ile İşlemede Kullanılan Ekipmanlar.....	8
Şekil 2.2.2 : Aşındırıcılı Su Jeti ile İşlemede Kullanılan Ekipmanlar	9
Şekil 2.2.3 : Aşındırıcılı Su Jeti Uygulaması.....	9
Şekil 2.2.4 : Aşındırıcılı Su Jetinde Kesme Derinliği-Meme Basıncı Değişimi	10
Şekil 2.2.5 : Ultrasonik İşleme Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları.....	11
Şekil 2.2.6 : Ultrasonikle(siz) Açılan Delik Sayısının Süreyle Değişimi.....	12
Şekil 2.2.7 : Dönel Ultrasonik İşleme Yöntemi Çalışma Prensibi.....	13
Şekil 2.2.8 : Ultrasonik İşleme Yöntemi Uygulamaları.....	14
Şekil 2.2.9 : Ultrasonik İşleme-Lazerle İşleme Karşılaştırması	14
Şekil 2.3.1 : Elektrokimyasal İşleme Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	15
Şekil 2.3.2 : Elektrokimyasal İşlemede Düz Akışlı Sistem.....	16
Şekil 2.3.3 : Elektrokimyasal İşlemede Ters Akışlı Sistem	17
Şekil 2.3.4 : Elektrokimyasal İşlemeyle Yapılmış Kalıplar	17
Şekil 2.3.5 : Elektrokimyasal İşlemeyle Silah Namlusu İmalı	18
Şekil 2.3.6 : Elektrokimyasal Taşlama Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	19
Şekil 2.3.7 : Elektrokimyasal İşlemeyle Yapılmış Bazı Uygulamalar	20
Şekil 2.4.1 : Elektron Demetiyle İşleme Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	21
Şekil 2.4.2 : Lazer Demetiyle İşleme Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	23
Şekil 2.4.3 : Gaz Lazerlerinde Oluşum Evresi	24
Şekil 2.4.4 : Lazerle Algılama Uygulamaları.....	25
Şekil 2.4.5 : Plazma Demetiyle İşleme Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	26
Şekil 2.4.6 : Plazma Arkıyla Tornalama	27
Şekil 2.4.7 : Plazma Arkıyla Al'nin İşlenmesinde Genel Koşullar.....	28
Şekil 2.4.8 : Plazma Arkıyla Karbon ve Paslanmaz Çeliklerinin İşlenmesinde Genel Koşullar	28
Şekil 3.1 : 1954 Yılında İsviçre Agie Firmasının ilk EDM Makinesi	29
Şekil 3.2 : 1956 Yılına Ait İsviçre Agie Firmasının EDM Makinesi.....	30
Şekil 3.3 : 1959 Yılına Ait İsviçre Agie Firmasının İlk W-EDM Makinesi .	30
Şekil 3.4 : Dalma Erozyon Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	32
Şekil 3.5 : Tel Erozyon Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları	33
Şekil 3.6 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-1	34
Şekil 3.7 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-2	34
Şekil 3.8 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-3	35
Şekil 3.9 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-4	35

Şekil 3.10 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-5	36
Şekil 3.11 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-6	36
Şekil 3.12 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-7	37
Şekil 3.13 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-8	37
Şekil 3.14 : Elektroerozyon Yönteminde Voltaj-Akımın Zamanla Değişimi	38
Şekil 3.15 : Malzeme Kaldırılması Çevriminde Akım-Voltaj Evreleri.....	38
Şekil 3.16 : Açık Devre Sinyalleri Hatası ve İdeal Boşalma.....	39
Şekil 3.17 : Kısa Devre Hatası ve İdeal Boşalma.....	40
Şekil 3.18 : Ark Hatası ve İdeal Boşalma	40
Şekil 3.19 : Kapalı Aralık Hatası ve İdeal Boşalma.....	41
Şekil 3.20 : İdeal Boşalma ve Olası Hatalar.....	41
Şekil 3.21 : İyonların ve Elektronların Çarptıkları Yüzeye Etkileri	42
Şekil 3.22 : İyonların ve Elektronların Çarptıkları Yüzeye Etkileri-2.....	43
Şekil 3.23 : İyonların ve Elektronların Çarptıkları Yüzeye Etkileri-3.....	44
Şekil 3.24 : Artan Akımla Malzeme Kaldırma Oranı ve Aşınma Değişimi....	44
Şekil 3.25 : Değişen Frekansla Yüzey Kalitesi ve Malzeme Kaldırma Oranının Değişimi	45
Şekil 3.26 : Çevrim Sırasındaki Evrelerin Gösterilmesi.....	45
Şekil 3.27 : Değişen Akımda Malzeme Kaldırma Oranının Zamanla Değişim	46
Şekil 3.28 : Değişen Akımda Takım Aşınmasının Zamanla Değişimi	46
Şekil 3.29 : İşlenen Yüzeydeki Pürüzlülük ve Sembolleri	47
Şekil 3.30 : Değişen Akımda Yüzey Pürüzlülüğün Zamanla Değişimi	48
Şekil 3.31 : Değişen Akımda Yüzey Pürüzlülüğün Zamanla Değişimi-2	48
Şekil 3.32 : Erozyonla İşlenmiş Farklı Malzemelerin Yüzey Görünümleri ...	49
Şekil 3.33 : Erozyonla İşlenmiş TiAl6V4 Alaşımının Yüzey Görünümleri ...	50
Şekil 3.34 : Elektroerozyon Devreleri-1	51
Şekil 3.35 : Elektroerozyon Devreleri-2	53
Şekil 3.36 : Elektroerozyonda Osilatörlü Vakum Tüpü Devresi.....	54
Şekil 3.37 : Elektroerozyonda Vakum Tüpü-Transformatör Devresi	55
Şekil 3.38 : Elektroerozyon Devreleri-3	55
Şekil 3.39 : Elektroerozyonda Elektrot Aşınma Çeşitleri.....	59
Şekil 3.40 : Elektroerozyonda Sıvı Pompalama Sistemleri	61
Şekil 3.41 : Elektroerozyonda Normal Akışlı Sistem	63
Şekil 3.42 : Elektroerozyonda Normal Akışlı Sistemdeki Sorun	65
Şekil 3.43 : Elektroerozyonda Püskürtmeli Sistem	66
Şekil 3.44 : Elektroerozyonda Takım-İş Parçası Boşluğunun Kontrolü	67
Şekil 3.45 : Takım-İş Parçası Boşluğu Kontrolünde Gecikme Süresi	67
Şekil 3.46 : Aralık Voltajı Karakteristiği	73
Şekil 3.47 : Deneyde Kullanılan Dalma Erozyon Tezgahı ve Özellikleri	76
Şekil 3.48 : 1. Deney Sonuçları Grafiği.....	78
Şekil 3.49 : 2. Deney Sonuçları Grafiği	79
Şekil 3.50 : 3. Deney Sonuçları Grafiği	80
Şekil 3.51 : 4. Deney Sonuçları Grafiği	81
Şekil 3.52 : 5. Deney Sonuçları Grafiği	82
Şekil 3.53 : Yüzey Pürüzlülüğü ve Malzeme Kaldırma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi	83
Şekil 3.54 : Yüzey Pürüzlülüğü-Bağıl Aşınma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi	83

	Sayfa No
Şekil 3.55 : 6. Deney Sonuçları Grafiği	84
Şekil 3.56 : 7. Deney Sonuçları Grafiği	85
Şekil 3.57 : 8. Deney Sonuçları Grafiği	86
Şekil 3.58 : 9. Deney Sonuçları Grafiği	87
Şekil 3.59 : Yüzey Pürüzlülüğü ve Malzeme Kaldırma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi	88
Şekil 3.60 : Yüzey Pürüzlülüğü ve Bağlı Aşınma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi	88
Şekil A.1 : Elektroerozyon Uygulaması-1	92
Şekil A.2 : Tel Erozyonla Kesilmiş Kalıp Kesme Lokmaları	92
Şekil A.3 : Elektroerozyon Uygulaması-2	93
Şekil A.4 : Elektroerozyon Uygulaması-3	93
Şekil A.5 : Elektroerozyon Uygulaması-4	94
Şekil A.6 : Elektroerozyonla Kesilmiş Çelik Bloğu-1	94
Şekil A.7 : Elektroerozyonla Kesilmiş Çelik Bloğu-2	95
Şekil A.8 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası ve Pirinç Bant	95
Şekil A.9 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası	96
Şekil A.10 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası	96
Şekil A.11 : Dalma Erozyon Tezgahı	97
Şekil A.12 : Dalma Erozyon Tezgahı Elektrot Kafası ve Dielektrik Haznesi	97
Şekil A.13 : Dalma Erozyon İçin Hazırlanmış Bakır Elektrotlar	98
Şekil A.14 : Tel Erozyon Tezgahı	98
Şekil A.15 : Tel Erozyon Tezgahı Tel Kafası ve Dielektrik Haznesi	99
Şekil A.16 : Tel Erozyon Tezgahında Teli Yönlendirici Ekipmanlar	99
Şekil A.17 : Tel Erozyon Tezgahı Kullanım Yazılımı	100
Şekil A.18 : Tel Erozyon Tezgahı Tel Besleme Mekanizması	100
Şekil A.19 : Elektroerozyonla İşlenmiş Kalıplarla Şekillendirilmiş Terminal	101
Şekil A.20 : Elektroerozyonla İşlenmiş Progresif Kalıplar	101
Şekil A.21 : Elektroerozyonla İşlenmiş Prese Bağlı Progresif Kalıplar	102
Şekil A.22 : Elektroerozyonla İşlenmiş Prese Bağlı Progresif Kalıplar	102
Şekil A.23 : Kablo Terminali Üreten 25-50 Tonluk Presler	103
Şekil A.24 : Elektroerozyonla İşlenmiş Plastik Enjeksiyon Kalıpları	103
Şekil A.25 : Kablo Terminali Üreten 25-50 Tonluk Pres	104

Üniversitesi	: İstanbul Teknik Üniversitesi
Enstitüsü	: Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	: Makine Mühendisliği
Programı	: Malzeme ve İmalat
Tez Danışmanı	: Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans – Aralık 2003

ÖZET

ELEKTRO-EROZYONLA KALIPLARIN İŞLENMESİNDE YÖNTEM PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ

Cenk ERTÜRK

Bu çalışmada, sanayiinin farklı ihtiyaçları neticesinde doğan ve günümüze dek giderek gelişen ileri (konvansiyonel olmayan) imalat yöntemlerinin tercih edilme sebepleri anlatılmış, kısaca söz konusu yöntemler hakkında bilgiler (çalışma prensipleri, kullanılan malzemeler, kullanılan ekipmanlar, yöntemin avantaj ve dezavantajları) verilmiş ve bu yöntemlerden elektroerozyon yöntemi detaylı olarak incelenmiştir. Pek çok parametre içeren elektroerozyon yöntemindeki bu parametreler ve uygulamaya nasıl etkidikleri irdelenmeye çalışılmıştır. Ulaşılan bu teorik sonuçların uygulamayla desteklenip desteklenmediğinin kontrolü ise elektrot malzemeleri, güç seviyeleri, ark ve bekleme süreleri değiştirilerek gerçekleştirilen 9 adet deneyle sağlanmaya çalışılmıştır. Deney sonuçlarının teorik varsayımlarla paralellik gösterdiği görülmüştür. Her biri ayrı ayrı gelişime açık olan ileri imalat yöntemlerinin konvansiyonel işleme yöntemlerinden üstün olmadığı ve ileri imalat yöntemlerinin belirli ihtiyaçlar üzerine bulunduğu ve geliştirildiği bu çalışmanın hiçbir noktasında unutulmamalıdır.

Anahtar Kelimeler: Akım, Gerilim, Ark Süresi, Takım Elektrot, Dielektrik Sıvı, Malzeme Kaldırma Oranı, Bağıl Aşınma Oranı, Yüzey Pürüzlülüğü

Bilim Dalı Sayısal Kodu: 622

University	: İstanbul Technical University
Institute	: Institute of Science and Technology
Science Programme	: Mechanical Engineering
Programme	: Material Science and Manufacturing
Supervisor	: Prof. Adnan DIKICIOGLU
Degree Awarded and Date	: M Sc. – December 2003

ABSTRACT

THE EFFECTS OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) PARAMETERS IN MANUFACTURING OF DIES AND MOLDS

Cenk ERTURK

In this study, the non-traditional machining methods which are born and developed because of the demands of the industry, are examined. Firstly, the preference causes of the non-traditional machining methods are explained. Then, general informations (working principles, workpiece materials, equipments, advantages and disadvantages) about the mentioned methods are presented briefly. Finally, as one of the non-traditional machining methods, electrical discharge machining (EDM) is explained in details. The numerous parameters of EDM and their critical effects in industrial applications are examined. The theoretical informations about the method are supported by 9 experiments in which method parameters such as electrode materials, power levels, arcing and waiting durations have been changed. According to the results of the experiments it has obviously been seen that the theoretical and the practical results are in parallel. During this study it never must been forgotten that the non-traditional machining methods are not always superior to traditional machining methods and the non-traditional machining methods are developed because of industrial needs.

Keywords: Amperage, Voltage, Duration of Arc, Tool Electrode, Dielectrical Fluid, Material Removal Rate, Relative Wear Rate, Surface Roughness

Science Code: 622

1. GİRİŞ

1.1. İleri İmalat Yöntemleri ve Önemi

Konvansiyonel imalat yöntemleri, kuvvet kullanımıyla çapak oluşturarak işleme prosesleri olarak nitelendirilir. Konvansiyonel imalat yöntemleri her ne kadar çok tercih edilir ve üretken yöntemler olsalar da, çeşitli sanayi ve deneysel uygulamalardaki karmaşık tasarım özellikleri ve yüksek performanslı malzeme kullanımı talepleri, gelişen teknolojinin kullanımıyla yeni imalat yöntemlerinin geliştirilmesinde bir itici güç sağlamıştır. Bu anlamda, ileri imalat yöntemlerinin yükselen talep standardının karşılanması için zorunlu olarak geliştirilen yöntemler olduğunu söylemek yanlış olmaz. Konvansiyonel imalat yöntemlerinde kullanılan enerjinin yüksekliği, tasarımlarda yer alan her şekil ve her malzemenin işlenmesine olanak olmaması, oluşan ısının iş parçası üzerinde yüzey çatlaklarına, kalıntı gerilmelere sebep olması da imalat endüstrisini yeni imalat yöntemlerinin geliştirilmesine yönlendiren diğer sebeplerdir.

İleri imalat yöntemlerinin giderek artan tercih edilme oranının sebepleri aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek sertlikte (genelde 400HB ve üzeri) veya kırılgan malzemelerin işlenebilmesi,
- Bağlama kuvvetlerine karşı dayanımı olmayan, esnek, narin ve işlem öncesi bağlanması zor şekle sahip iş parçalarının kullanımı,
- İyi mertebede yüzey pürüzlülüğü ve dar tolerans mertebeleri taleplerinin karşılanabilmesi,
- İş parçası yüzeyinde sıcaklık yükselmesinin ve yapıda kalıntı gerilmelerin istenmediği durumlarda işlemlerin gerçekleştirilebilmesi.

Genellikle 2. Dünya Savaşı'nın ardından Amerika'daki uçak ve uzay sanayilerindeki talepler üzerine geliştirilen ileri imalat yöntemlerinin bazıları günümüzde son derece yaygın şekilde kullanılarak bazı sektörler için vazgeçilmez olmuşlardır. Ancak yine bu yöntemlerden bazıları da sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır. İleri imalat yöntemlerinin konvansiyonel imalat yöntemlerinden daha üstün oldukları asla düşünülmemelidir. Yöntemler arası bu farkın artan sanayi taleplerinin karşılanabilirliğinden kaynaklandığı unutulmamalıdır. Bu bağlamda, bu çalışmada yöntemler arası yapılacak karşılaştırmalarda üstünlükten ziyade talebe uygunluk ilkesi vurgulanılmaya çalışılacaktır.

1.2. İleri İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

İleri imalat yöntemleri, kullanılan enerji cinsine göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Kimyasal,
- Mekanik,
- Elektriksel,
- Termal.

Bu çalışmada genelde en çok tercih edilen ileri imalat yöntemleri tanıtılacaktır. Kimyasal yöntemlerden kimyasal işleme (CM:Chemical Machining), mekanik yöntemlerden ultrasonik işleme (UM:Ultrasonic Machining) , su jetiyle işleme (WJM: Water Jet Machining) ve aşındırıcılı su jetiyle işleme (AWJM: Abrasive Water Jet Machining), elektriksel yöntemlerden elektrokimyasal işleme (ECM:Electrochemical Machining), termal yöntemlerden ise elektron demetiyle işleme (EBM:Electron Beam Machining), lazer demetiyle işleme (LBM:Laser Beam Machining), plazma demetiyle işleme (PBM:Plasma Beam Machining) yöntemleri ana hatlarıyla (çalışma prensibi, işlem parametreleri, kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları), elektroerozyonla işleme (PEDM: Plunge Electrical Discharge Machining-Dalma Erozyon ve WEDM: Wire Electrical Discharge Machining-Tel Erozyon) yöntemleri ise daha detaylı olarak incelenecektir. Yöntemlerin hem yukarıdaki sınıflandırmaya uygun şekilde sınıflar arası, hem de sınıf içinde çeşitli kriterlere göre (malzeme, tasarım, yüzey pürüzlülüğü, tolerans, işleme hızı, maliyet) inceleneceklerdir.

İLERİ İMALAT YÖNTEMLERİ

KİMYASAL

KİMYASAL İŞLEME (CM)

MEKANİK

ULTRASONİK İŞLEME (UM)

SIVI (SU) JETİYLE İŞLEME (WJM)

AŞINDIRICILI SU JETİYLE İŞLEME (AWJM)

ELEKTRİKSEL

ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (ECM)

ELEKTROKİMYASAL TAŞLAMA (ECG)

TERMAL

ELEKTRON DEMETİYLE İŞLEME (EBM)

LAZER DEMETİYLE İŞLEME (LBM)

PLAZMA DEMETİYLE İŞLEME (PBM)

ELEKTROEROZYONLA İŞLEME (EDM)

DALMA EROZYONLA İŞLEME (PEDM)

TEL EROZYONLA İŞLEME (WEDM)

ŞEKİL 1.1: İLERİ İMALAT YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

2. İLERİ İMALAT YÖNTEMLERİNİN TANITILMASI

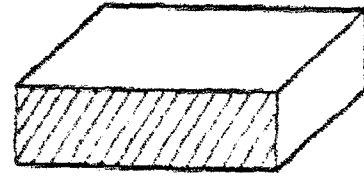
2.1. Kimyasal Yöntemler

2.1.1 Kimyasal İşleme

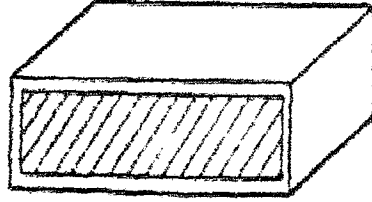
İleri imalat yöntemlerinin en eskilerinden olan kimyasal işleme yönteminde, özel olarak maskelenmiş iş parçası kimyasal daldırıcıya daldırılır ve maskenin şekline göre istenilen bölgelerden malzeme kaldırılması sağlanır. İşlemin aşamaları şu şekildedir:

- Hazırlık ve yüzey temizliği,
- Maskeleme,
- Kimyasal solüsyonlarla dağlama,
- İşleme sonrası maskenin çıkartılması,
- Son işlemler.

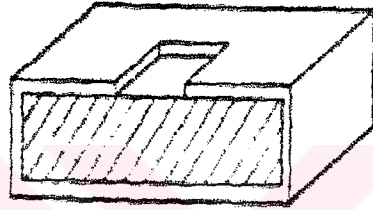
Kimyasal dağlayıcı olarak asitler ve alkali solüsyonları kullanılır. Maskeleme için ise vinil, neopren ve bütül esaslı malzemeler kullanılır. Yaygın olarak elektronik devrelerin ve mikroişlemcilerin imalinde kullanılmakla beraber kimyasal işleme yönteminin ilk kullanımı uçak ve uzay sanayi uygulamalarında olmuştur. Büyük mekik panellerinde ve roket gövdelerinin yapımında sıkça kullanılan kimyasal işleme yöntemi geniş ancak ince kesitli parçaların işlenmesinde uygundur. Kimyasal işlenen iş parçalarında yüzey pürüzlülüğü genelde 1,6-6,35 μm mertebesinde olsa da çok özel uygulamalarda 0,2 μm değerine kadar inilebilmektedir. Malzeme kaldırma oranı yaklaşık 500cm³/dak. olup, işleme hızı 0,013-0,076 mm/dak. seviyesindedir. Tolerans değeri ise +/- 0,0127 mm'dir. [1]



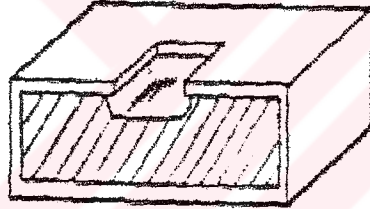
İŞLENECEK İŞ PARÇASI



MASKELENMİŞ İŞ PARÇASI



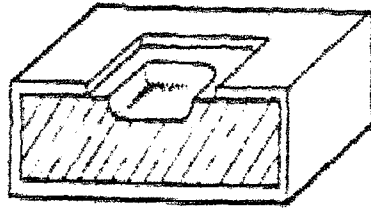
İŞLENECEK KISIMDA KANAL
AÇILMASI



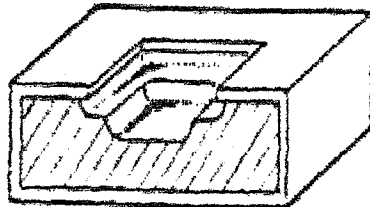
İŞLENMİŞ
PARÇA



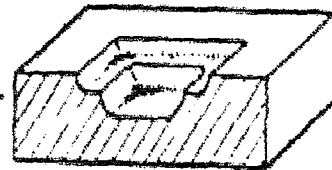
MASKE ÇIKARILINCA İŞLENMİŞ PARÇANIN
SON HALİ



2. ADIMDA İŞLENECEK BÖLÜM
İÇİN MASKENİN SIYRILMASI

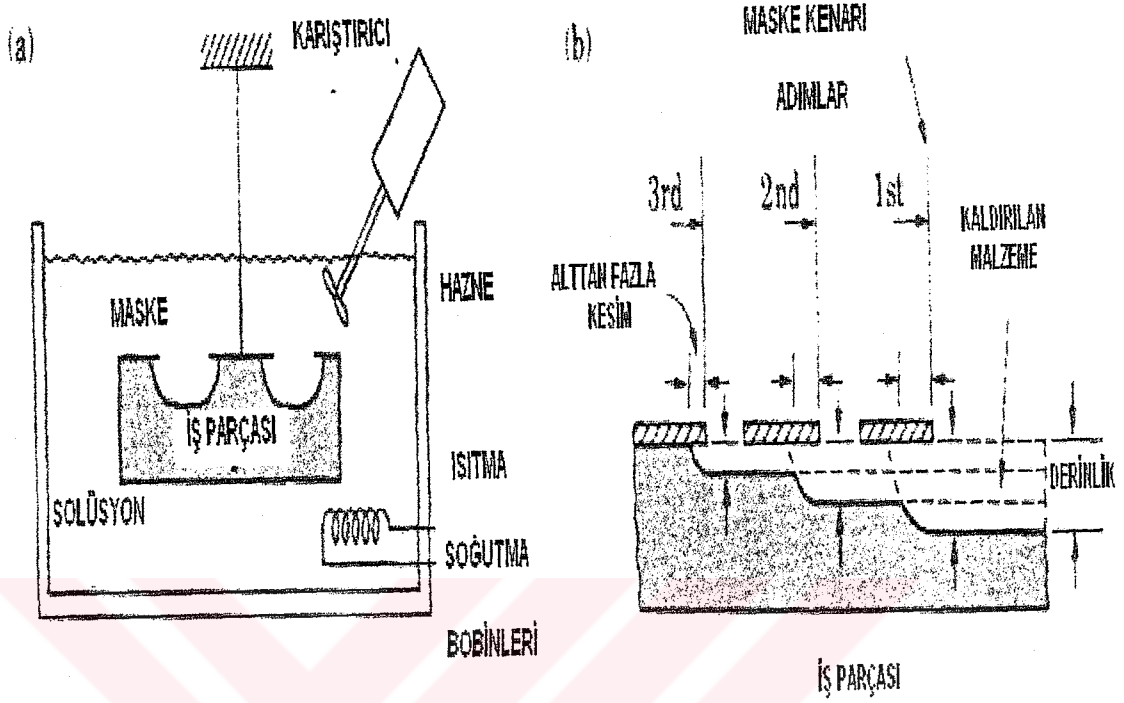


KADEMELİ
KİMYASAL
FREZELEME

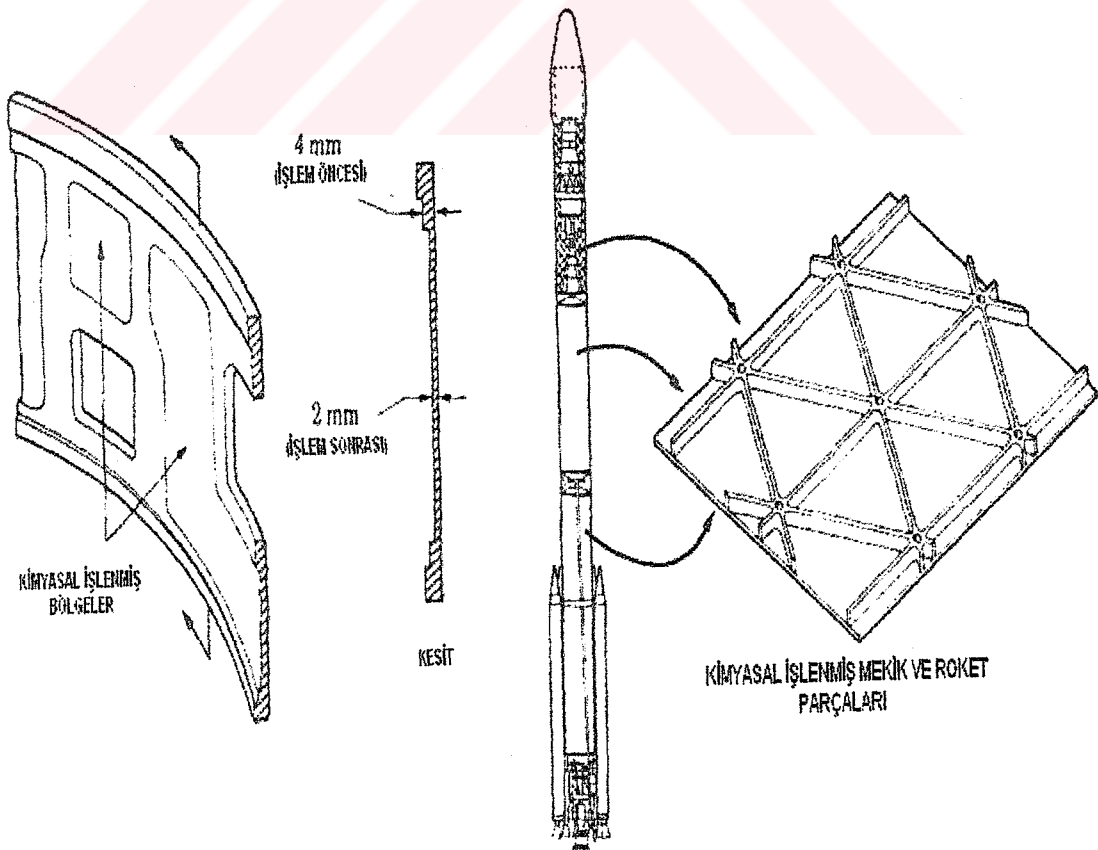


KADEMELİ KİMYASAL İŞLENMİŞ İŞ PARÇASI

ŞEKİL 2.1.1: Kimyasal İşleme Aşamaları



ŞEKİL 2.1.2 : a) Kimyasal İşleme Ekipmanları , b) Kademeli Kimyasal İşleme



ŞEKİL 2.1.3 : Kimyasal İşlenmiş Uzay Sanayi Uygulamaları

Kimyasal işleme yönteminin avantaj ve dezavantajları şunlardır:

AVANTAJLAR:

- Çalışma prensibi olarak uygulaması basit, maliyeti düşüktür,
- Özel eğitilmiş personel gerektirmez,
- İş parçasında gerilme ve soğuk şekil verme etkileri bırakmaz,
- Başta Al, Mg, Ti ve St olmak üzere pek çok metale uygundur,
- İnce kesitli ve çok geniş yüzeyli parçalara da uygulanabilir.

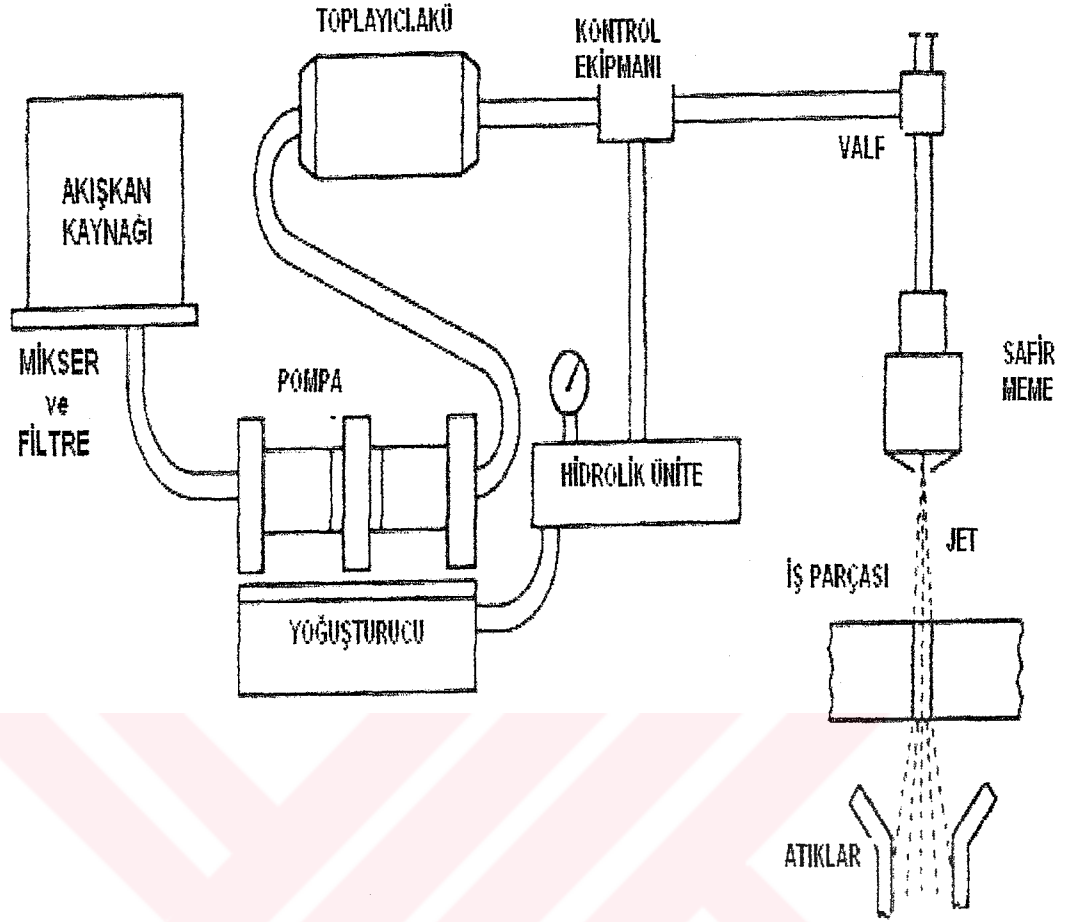
DEZAVANTAJLAR:

- Birim alanda malzeme işleme oranı düşük seviyededir,
- İşleme hızının önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmez.

2.2. Mekanik Yöntemler

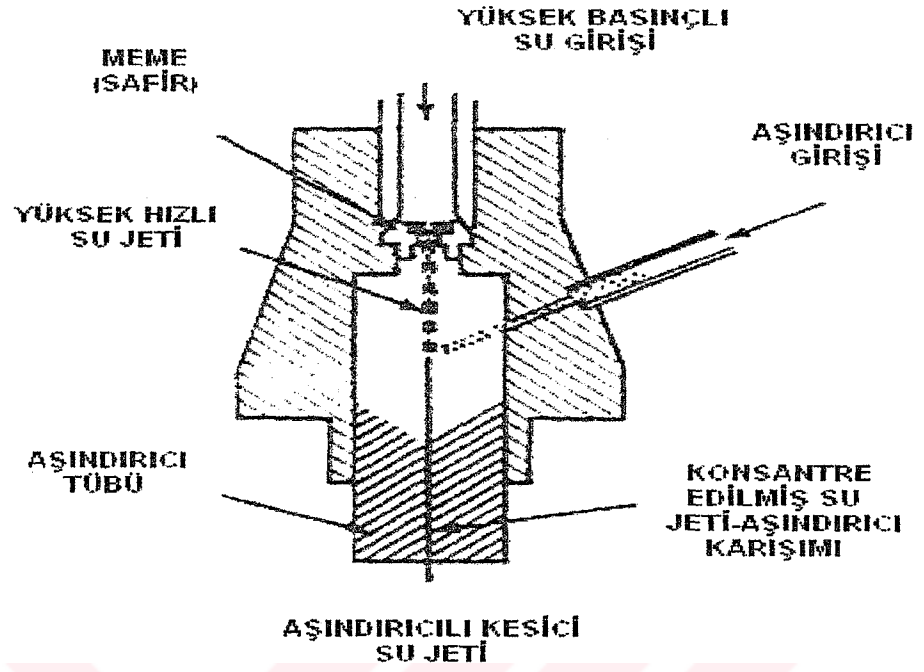
2.2.1 Su Jetiyle İşleme

Bu yöntemde iş parçası üzerinde yüksek hızlı ve yüksek basınçlı su ya da su bazlı akışkan kullanılarak şekillendirme sağlanır. Su jetiyle işleme yönteminde ahşap, kağıt, deri, plastik gibi metal dışı malzemeler ve çok ince kesitli metaller şekillendirilir. Akışkan basıncının 400-1400 MPa olduğu yöntemde, meme çapı 0,05-1 mm, akışkan hızı ise 914m/s mertebesinde [1]. Sert malzemelerin kesiminde su jetinin bir türevi olan aşındırıcılı su jeti yöntemi tercih edilir. Bu yöntemde de memeden çıkan akışkanın içine belirli miktar ve özellikte aşındırıcı madde takviyesiyle malzeme işlenir. Seramik ve cam gibi kırılgan malzemelerin işlenmesinde uygun olmayan aşındırıcılı su jeti yöntemiyle çok kalın kesitli iş parçalarının kesilmesi, işlenen parçanın yüzey kalitesini düşürür. Aşındırıcının türü, tanecik boyutu, akış miktarı ve aşındırıcı malzeme memesinin çapı önemli parametreler olup genelde aşındırıcı olarak garnet, silika ve Al_2O_3 kullanılır.

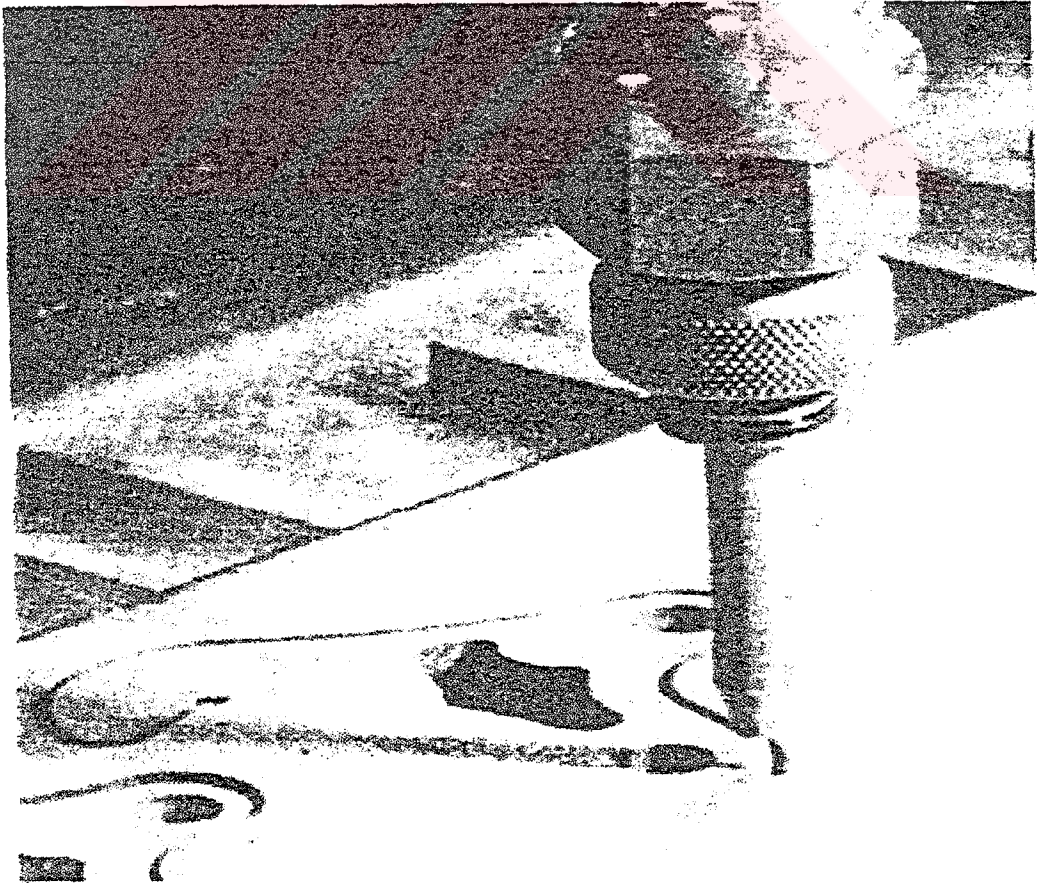


ŞEKİL 2.2.1 : Su Jeti ile İşlemede Kullanılan Ekipmanlar

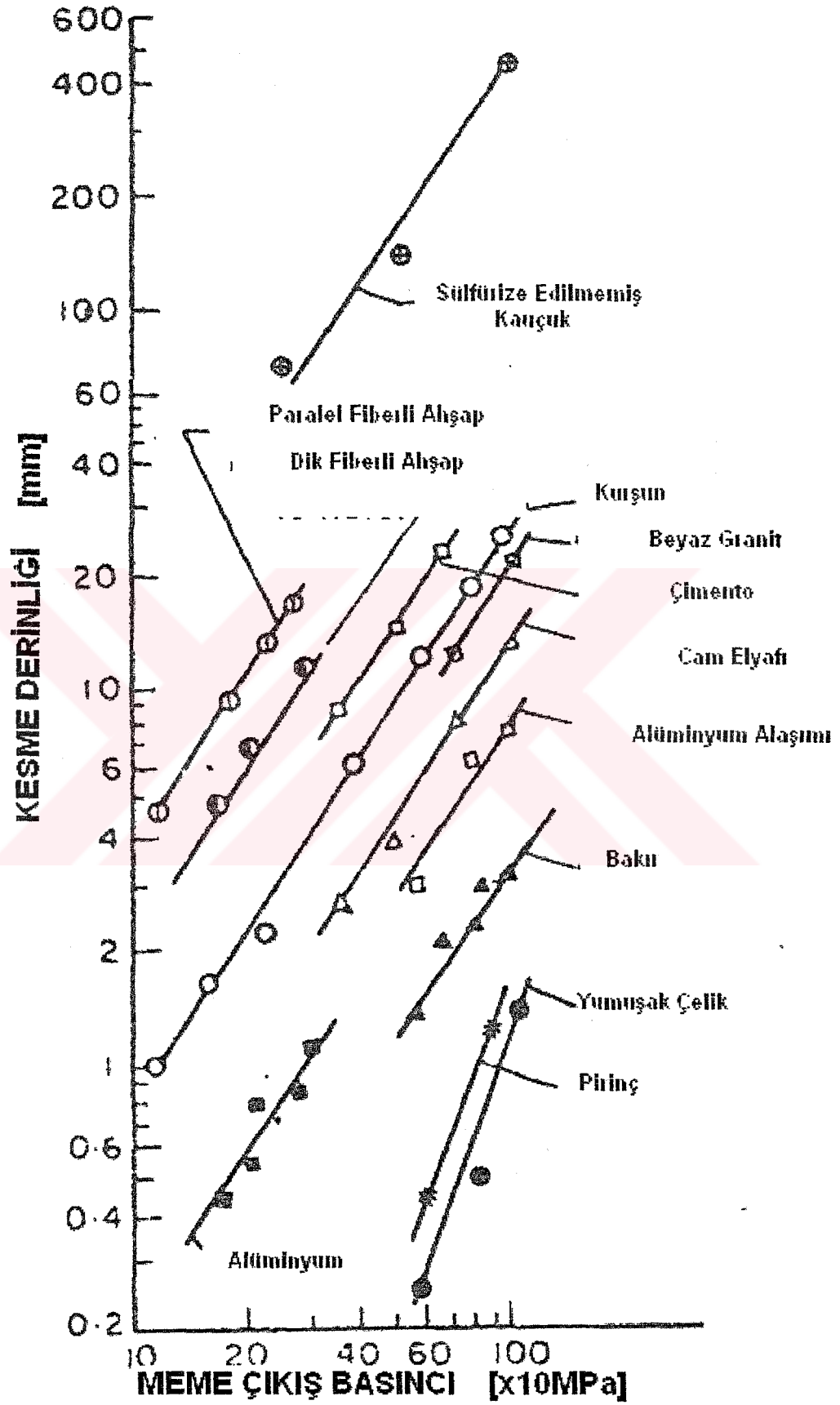
Yüksek basınca maruz kaldığından dolayı bu işlemde meme seçimi önemli bir konudur. Genelde safir malzemenin kullanıldığı meme ekipmanının yöntemin yeni geliştiği dönemlerde 20 dak. olan ömrü günümüzde 100 saate ulaşmıştır. Aşındırıcı su jetiyle işlemede işlem öncesi bir delik açılmasına gerek olmaması, işlemin verimli ve temiz olması ve işlemde ısı hasar yaratılmaması yöntemin avantajlarıdır. Ancak ekipman ve aşındırıcı malzemenin yüksek maliyeti yöntemin dezavantajlarıdır. Gıda sanayiinde ve ince kesitli metal levhaların kesilmesinde sık kullanılan aşındırıcı su jeti yönteminde yüzey pürüzlülüğü $3,8-6,35 \mu\text{m}$ ' dir. Aşındırıcı su jetiyle işleme yönteminin performansına bir örnek verilirse: 1,67mm kalınlıklı gri dökme demir 914 mm/dak. , 22,35 mm kalınlıklı gri dökme demir 101,6 mm/dak. , 355,6mm kalınlıklı beton 38,1 mm/dak., 76,2 mm kalınlıklı takım çeliği ise 38,1 mm/dak hızla kesilebilmiştir [1]. Toleransın genel uygulamalarda 2,5-5 μm olduğu aşındırıcı su jeti yöntemi, düşük güç gereksinimi (220W) ve çok çeşitli malzemelere uygulanabilirliği sayesinde üstün özellikler gösterirken, düşük malzeme kaldırma oranı ($0,8\text{mm}^3/\text{dak.}$) yöntemin dezavantajlarından biridir.



ŞEKİL 2.2.2 : Aşındırıcılı Su Jeti ile İşlemede Kullanılan Ekipmanlar



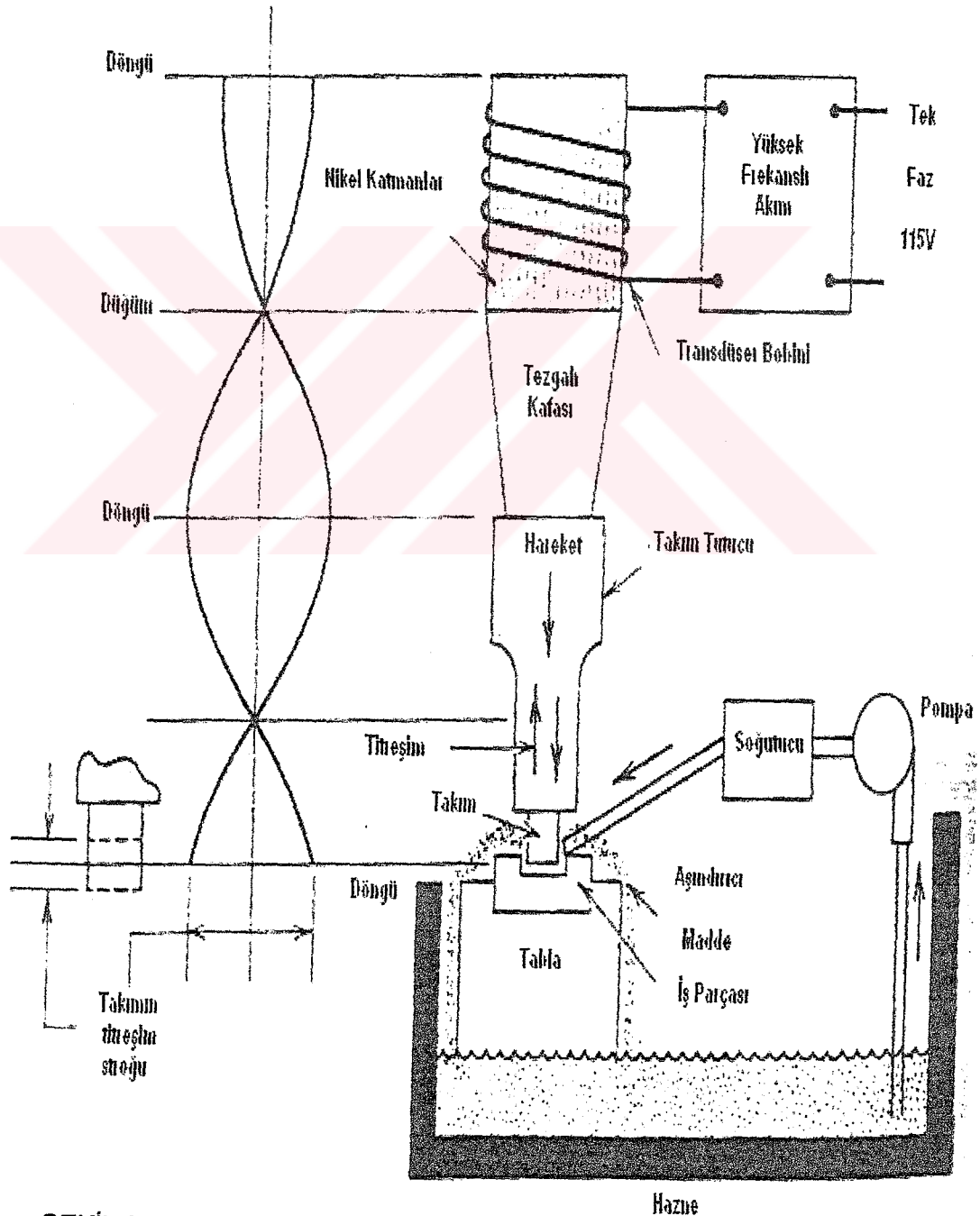
ŞEKİL 2.2.3 : Aşındırıcılı Su Jeti Uygulaması [1]



ŞEKİL 2.2.4 : Aşındırıcılı Su Jeti Yönteminde Kesme Derinliğinin Meme Basıncıyla Değişimi

2.2.2 Ultrasonik İşleme

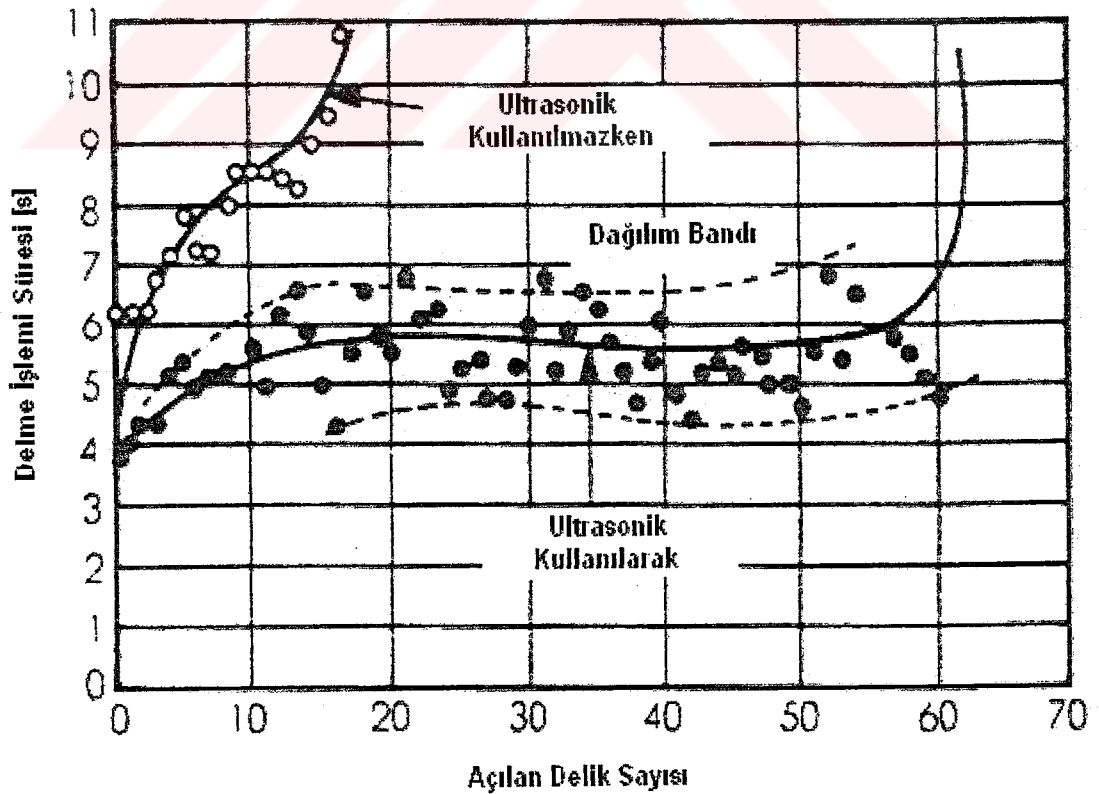
Ultrasonik işleme diğer yöntemlerle işlenemeyen sert ve kırılgan malzemelerin (genelde >40 HRC) kimyasal, ısı ve elektriksel etkiler olmaksızın silikon ve boronkarbit gibi aşındırıcı malzemelerin de katkısıyla takımın yüksek frekansla (20kHz) titreştirilmesiyle şekillendirilmesi esasına dayanır [2]. İş parçasına verilecek şeklin negatifi olarak imal edilmiş takımın şeklinin, takımla iş parçası arasındaki aşındırıcı parçaların ve takımın yüksek frekansla titreştirilmesiyle iş parçası üzerine projeksiyonu gerçekleştirilir.



ŞEKİL 2.2.5 : Ultrasonik İşleme Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları

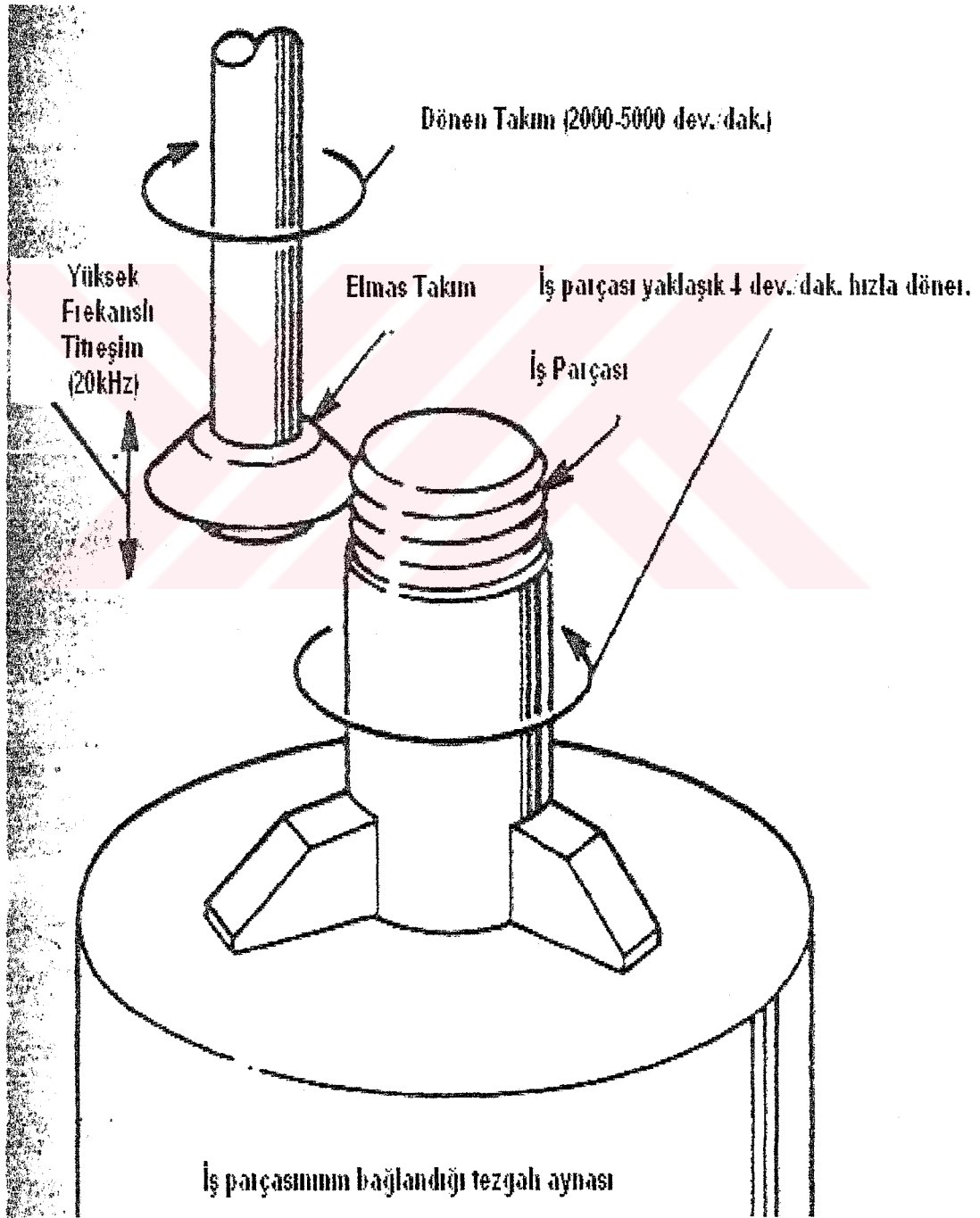
Genelde iş parçası olarak kullanılan malzemeler seramik, cam, kuvars, alüminyum, germanyum ve sertleştirilmiş çeliklerdir. Takım malzemesi olarak iş parçası malzemesine de bağlı şekilde pirinç, karbit, yumuşak çelikler ve takım çelikleri kullanılır. Parça şekillendirmesi dışında ultrasonik teknolojisi algılama teknolojisinde (sensör imalatında) ve kaynak yapımında da kullanılır.

Tolerans değerinin $\pm 12,5-25 \mu\text{m}$ olduğu yöntemde yüzey pürüzlülüğü ise $0,3-0,8 \mu\text{m}$ mertebesindedir[2]. Ultrasonik işleme yöntemi işlenen deliğin derinlik/çap oranının 20'den küçük olduğu değerlerde başarılı sonuçlar verirken bu değerden büyük oranlarda iyi performans göstermez. Malzeme özelliğine de bağlı olarak ortalama malzeme kaldırma oranının $300 \text{ mm}^3/\text{dak.}$ olduğu bu yöntemde göz önünde bulundurulması gerek önemli bir konu da şekillendirme için kullanılan aşındırıcı parçacıkların iş parçasını aşındırdıkları gibi temas halinde oldukları takımı da aşındıracaklardır. Aşındırıcı parçacıkların iş parçasından kaldırdıkları malzemenin hacminin, takım malzemesinden kaldırdıkları hacme oranı yaklaşık 10 mertebesindedir. İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olmadığı bu işleme yönteminde en önemli maliyet kalemlerini aşındırıcı malzemeler, takım ve takımın şekillendirilmesi için yapılan harcamalar oluşturmaktadır.

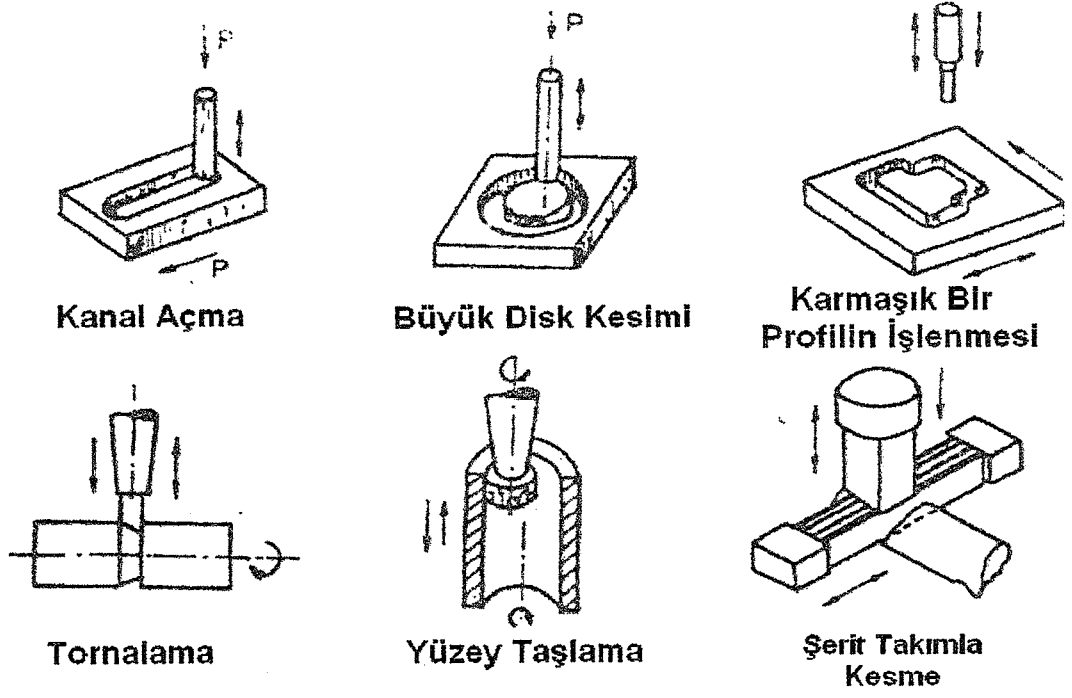


ŞEKİL 2.2.6 : Ultrasonik ile ve Ultrasoniksiz Delinen Deliklerin Delme Süresiyle Değişimi [3]

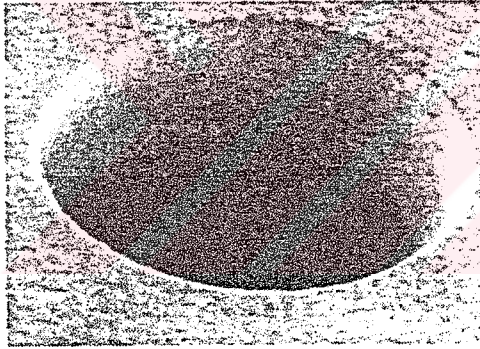
Ultrasonik işleme yönteminin bir türevi de dönel ultrasonik işleme yöntemidir (RUM:Rotary Ultrasound Machining). Bu yöntemde ultrasonik işlemeden farklı olarak takım ve aşındırıcı madde yerine, kendiliğinden aşındırıcı özelliği bulunan takım kullanılır. Takım malzemesinin genelde elmas olduğu bu yöntemde iş parçası da takım da dönmektedir. Takım yine yüksek frekansla (20 kHz) titreştirilirken yaklaşık 5000 dev./dak hızla da döndürülmektedir. İş parçası ise yaklaşık 4 dev./dak. hızla döndürülür. Dönel ultrasonik işleme yöntemiyle delme,kesme ve diş açma işlemleri de gerçekleştirilebilir.



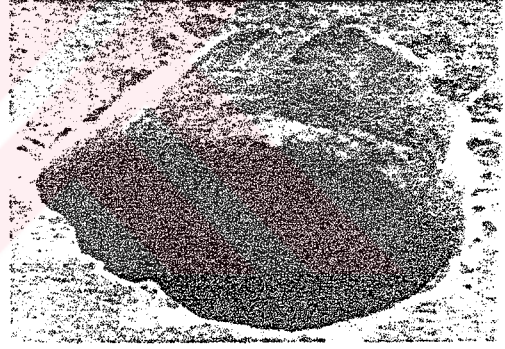
ŞEKİL 2.2.7 : Dönel Ultrasonik İşleme Yöntemi Çalışma Prensibi [4]



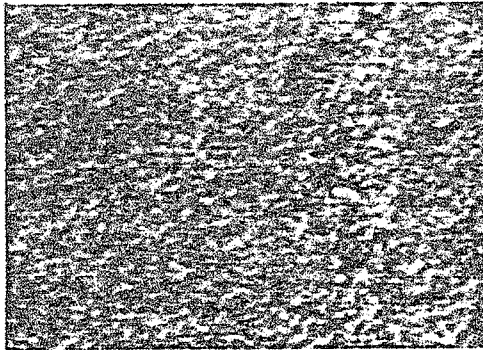
ŞEKİL 2.2.8 : Ultrasonik İşleme Yöntemiyle Yapılan Bazı Uygulamalar[2]



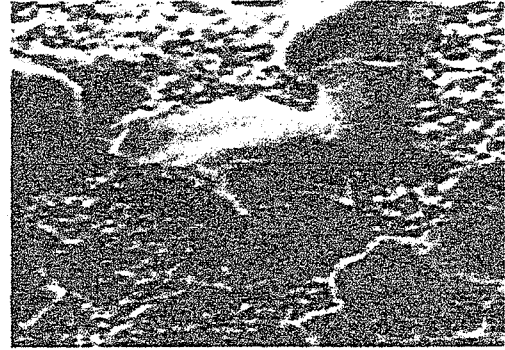
A.



B.



C.



D.

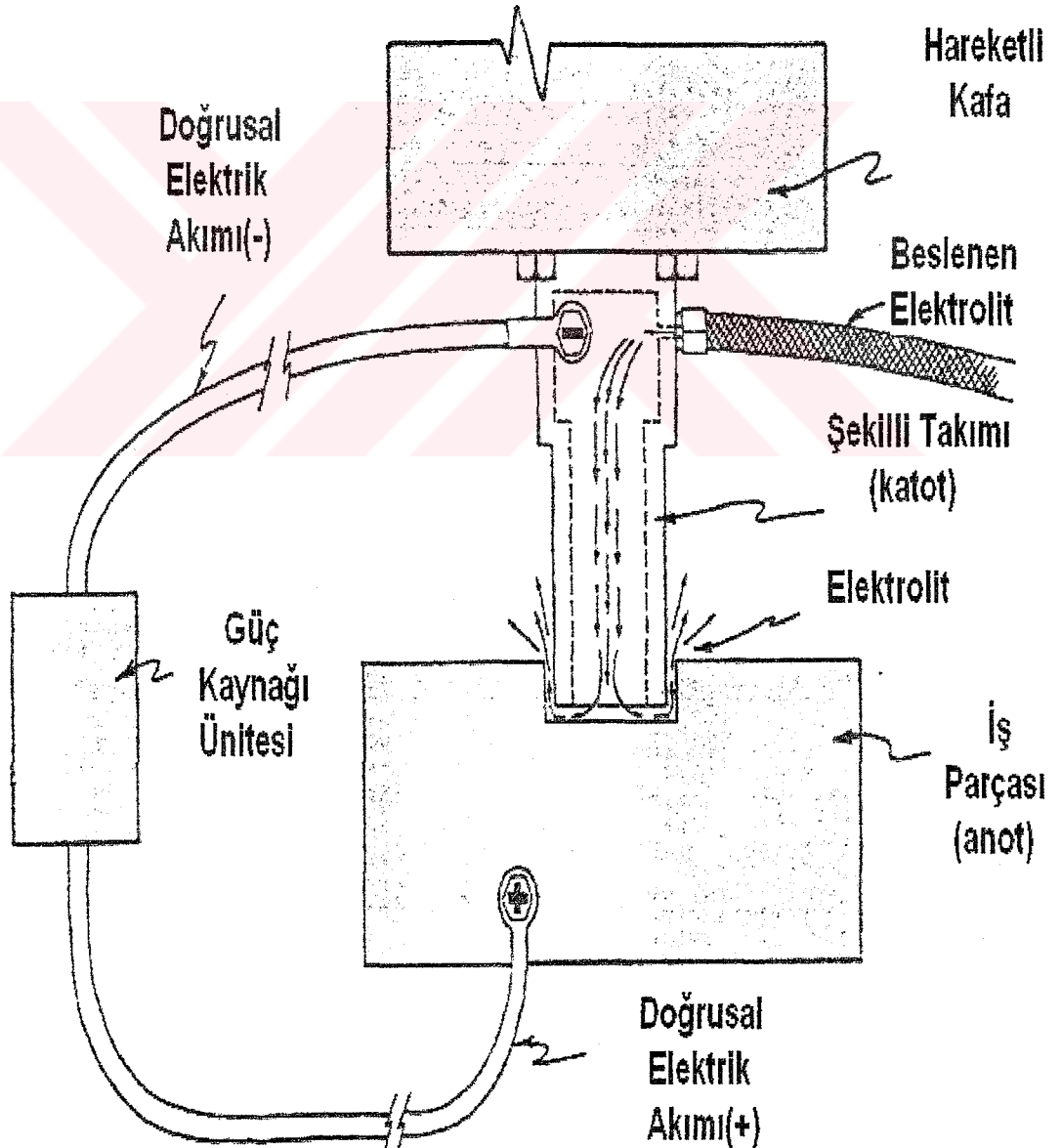
ŞEKİL 2.2.9 : Ultrasonik İşleme-Lazerle İşleme Karşılaştırılması (Alümina iş parçasında 0,64mm çaplı deliklerin SEM ile incelenmesi) A.Ultrasonik (100X)

B.Lazer (100X) C.Ultrasonik (500X) D.Lazer (500X) [1]

2.3. Elektriksel Yöntemler

2.3.1 Elektrokimyasal İşleme

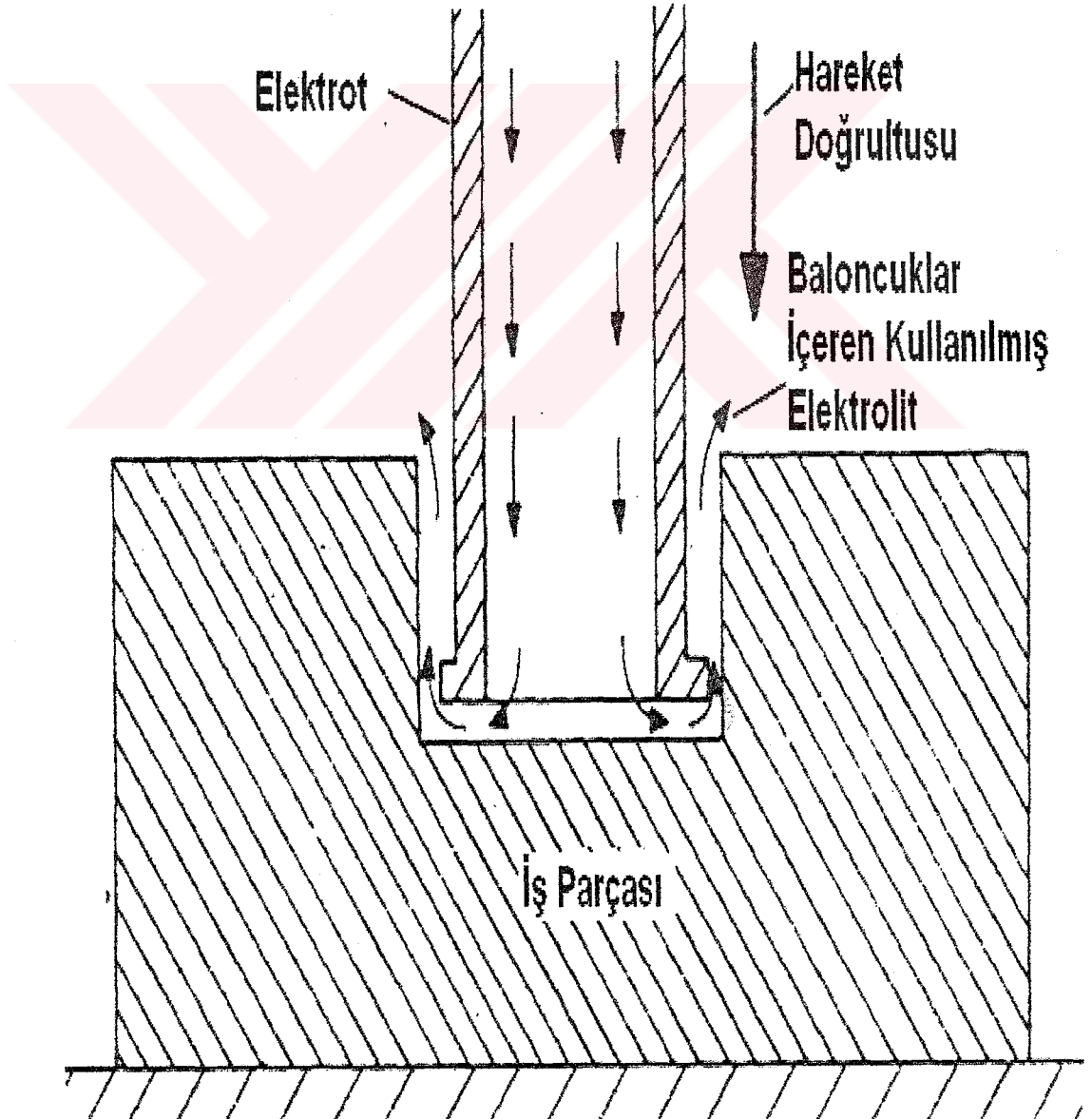
Elektrokimyasal işleme yönteminde, bir doğru akım kaynağına katot olarak bağlı takım, anot olarak bağlı iş parçası ve her ikisiyle temas halinde bulunan elektrolitik sıvı kullanılır. Yöntemde çalışma prensibi şu şekildedir: İşlenecek parçaya verilecek şeklin negatifi olarak şekillendirilmiş takım geometrisinin elektroliz prensipleri uyarınca iş parçasına projeksiyonu gerçekleştirilir. Takım aşınmasının ve ısıl hasarın söz konusu olmadığı bu yöntemde malzeme elektriksel-kimyasal özellikler kullanılarak şekillendirme sağlanır.



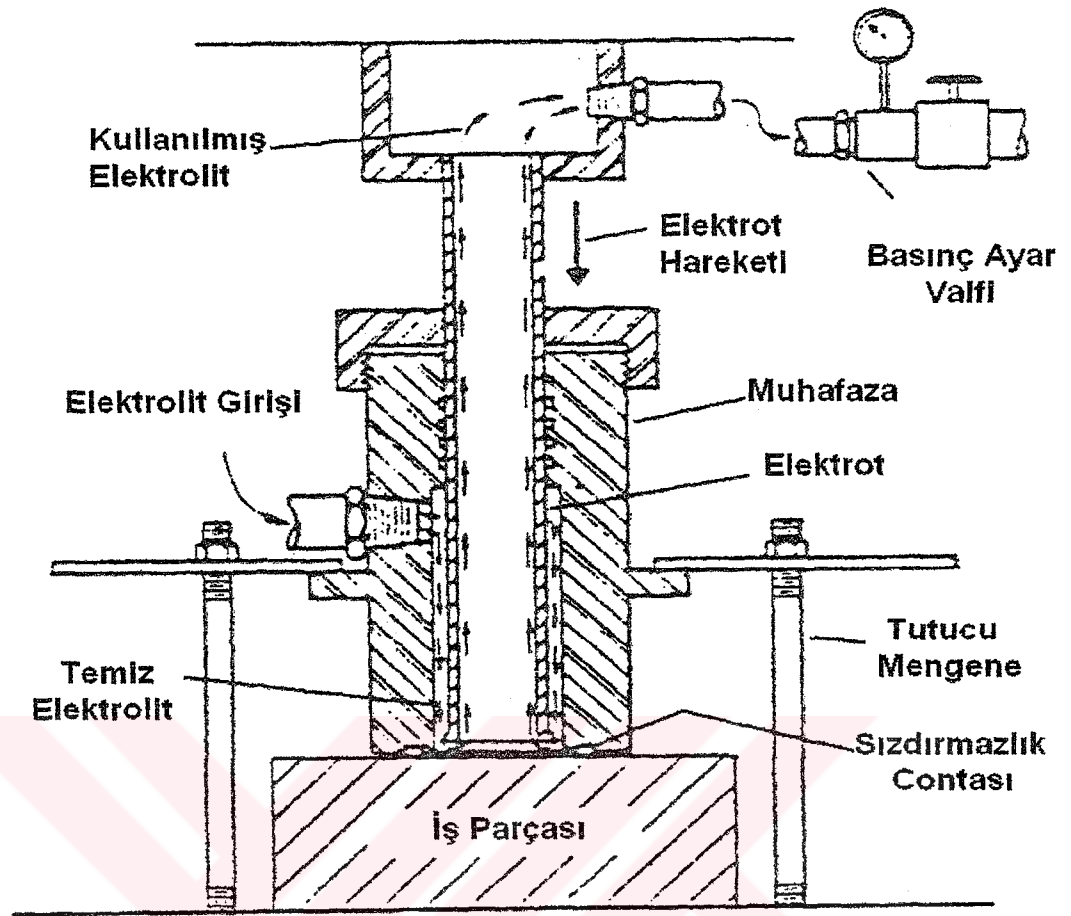
ŞEKİL 2.3.1 :Elektrokimyasal İşlemede Çalışma Prensibi ve Kullanılan Ekipmanlar

Özellikle uçak-uzay endüstrilerinde kullanılan elektrokimyasal işleme yöntemi, daha sonra otomotiv, beyaz eşya, makine, askeri ve tıbbi cihaz sanayilerinde de yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır.

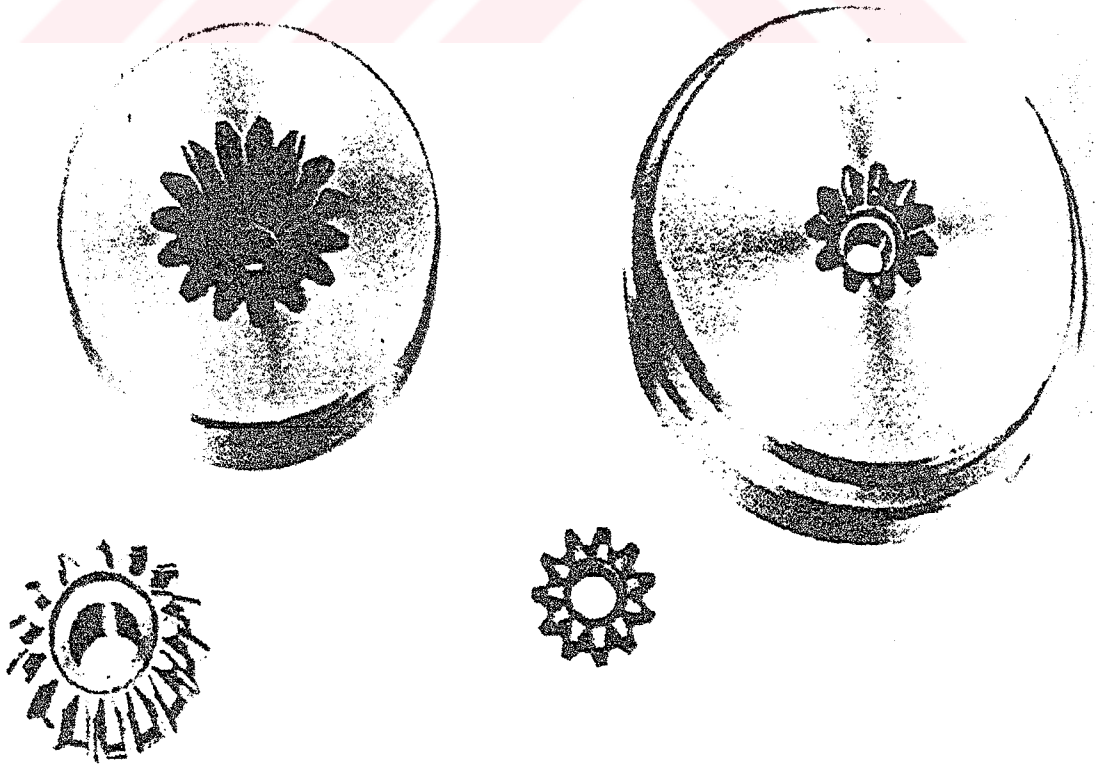
Yöntemde düz ve ters akışlı sistem olarak 2 prensip kullanılır. Düz akışlı sistemde elektrolit elektrotun içinden işleme bölgesine gönderilerek daha sonra tahliye edilir. Ters akışlı sistemde ise dışarıdan işleme bölgesine beslenen elektrolit elektrot içinden emilmektedir. Düz akışlı sistemde, karmaşık profillerde iş parçası-elektrot-elektrolit arasında temas sağlanamaması bir de istenen profilin dışındaki noktalardan da malzeme kaldırılması gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu sorunlar ters akışlı sistemle çözülmüştür.



ŞEKİL 2.3.2 :Elektrokimyasal İşlemede Düz Akışlı Sistem [1]

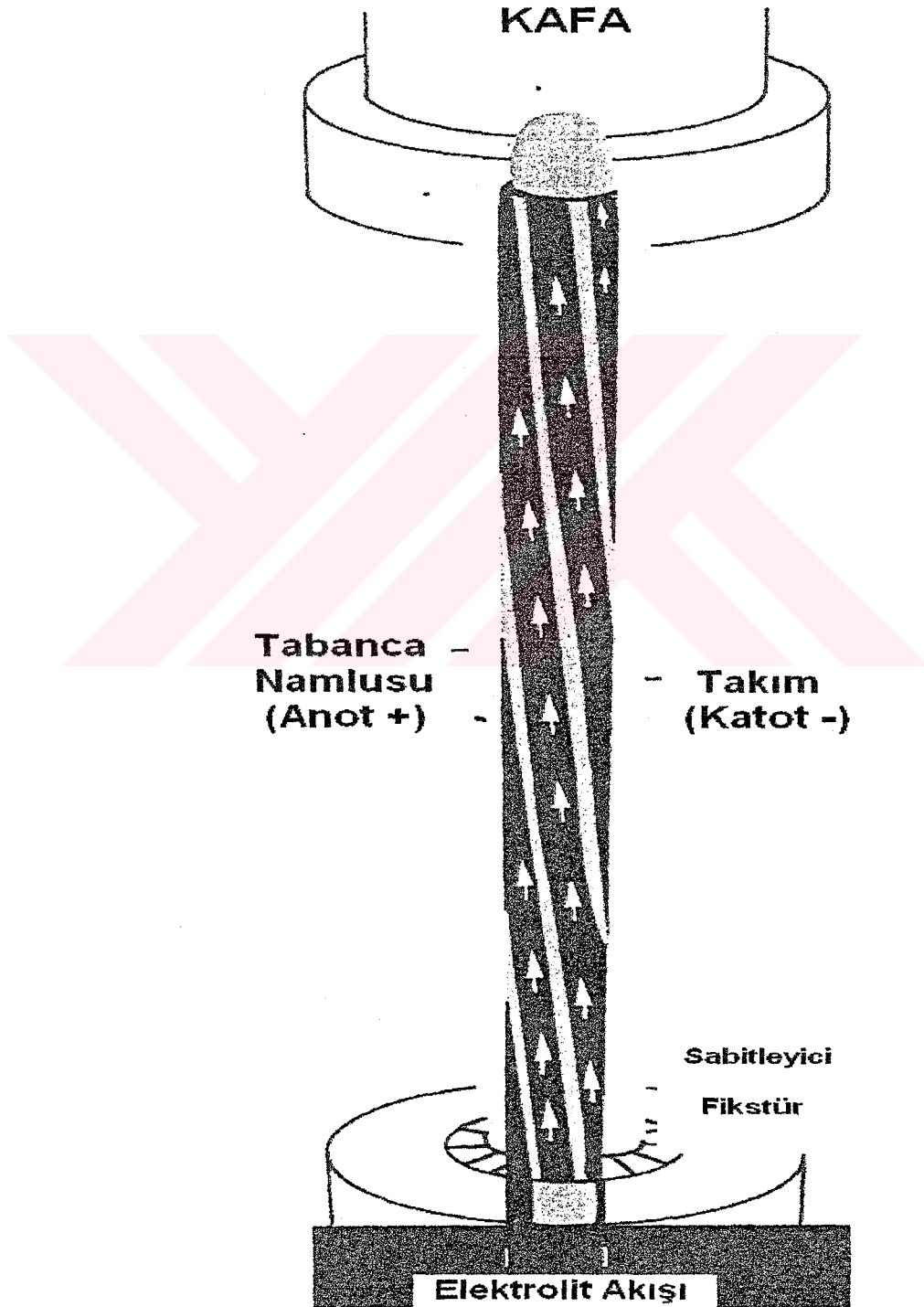


ŞEKİL 2.3.3 :Elektrokimyasal İşlemede Ters Akışlı Sistem



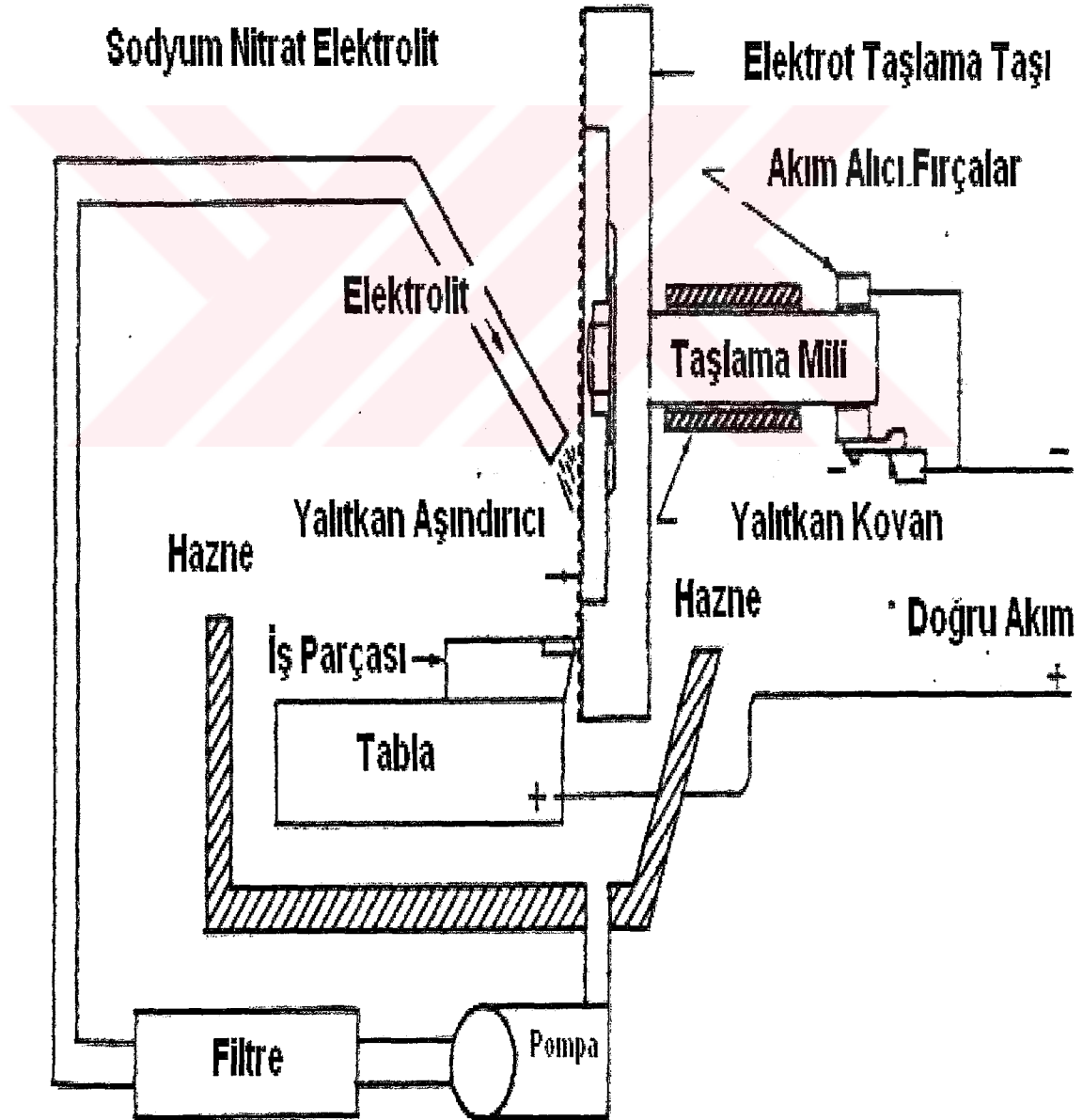
ŞEKİL 2.3.4 :Elektrokimyasal İşleme ile Yapılmış Kalıplar [1]

Yöntemde işleme hızı 510 mm/dak.'ya dek çıkabilir. Yüzey pürüzlülüğünün 0,4-1,6 μm olduğu yöntemde tolerans değeri +/- 40-125 μm mertebesinde [2]. Elektrokimyasal işleme yönteminde 7-20 V'luk doğru akım ve 40.000 A'lık güç kaynağı kullanılmaktadır. Yöntemde elektriksel iletkenliği olmak koşuluyla pek çok malzemenin işlenmesi mümkündür. Ancak yüksek güç gereksinimi (100.000 W) ve yüksek ilk maliyet yöntemin önemli dezavantajlarıdır.

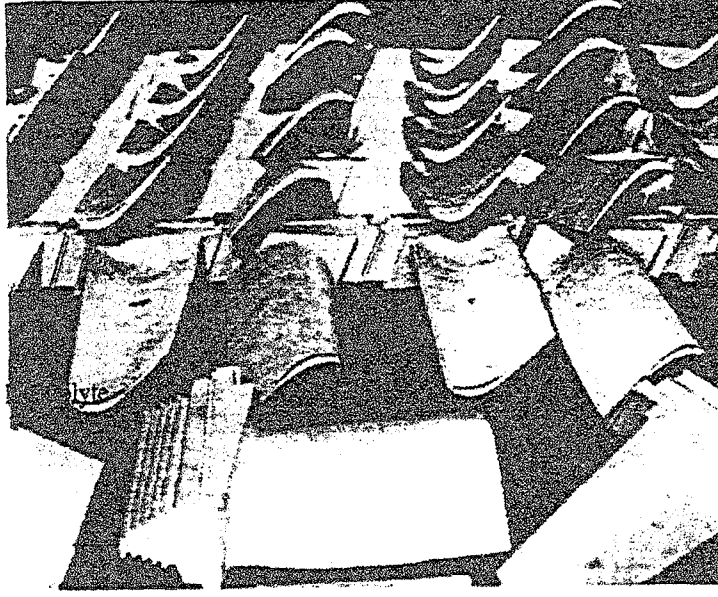


ŞEKİL 2.3.5 :Elektrokimyasal İşleme ile Silah Namlusu İmalı [1]

Elektrokimyasal işlemenin bir türevi de elektrokimyasal taşlamadır (ECG:Electro Chemical Grinding). Konvansiyonel taşlamadan 3 kat daha geniş toleransa ($\pm 0,0076\text{mm}$) sahip olsa da yüzeyde sıcaklık artışı ve gerilme yaratmadığından ve yaklaşık 4 kat daha hızlı olduğundan bu yöntemle yapılan taşlama tercihi artma potansiyeli taşımaktadır. Örneğin mekanik deneylerde kullanılan test numunelerinin yapıda gerilme istenmediğinden bu şekilde taşlanması istenir. Elektrokimyasal işlemede metallerin atom ağırlığı/ o metalin valans değeri kadar gram biriminden malzeme kaldırmak için 96.450C [Axs] kadar enerji gereklidir. Örneğin:Demir için $56\text{g}/2=28\text{g}$ malzeme kaldırılması için 96.450C enerjiye ihtiyaç vardır. [4]

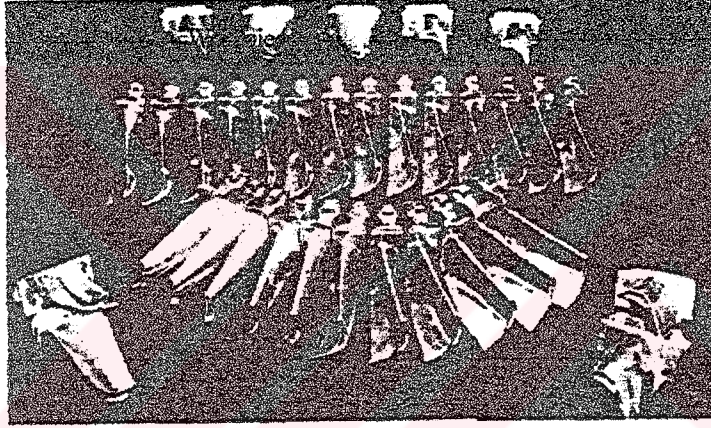


ŞEKİL 2.3.6 :Elektrokimyasal Taşlama Çalışma Prensibi ve Ekipmanları



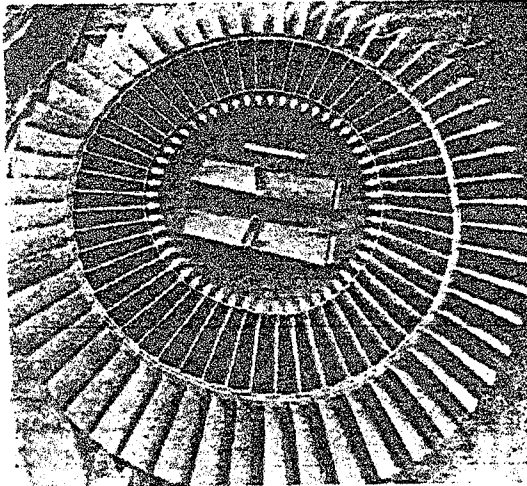
A.

**Elektrokimyasal
işlemeyle
yapılmış
büyük gaz
türbin kanatları**

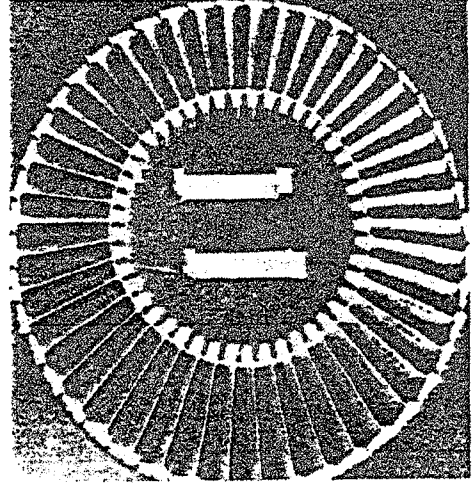


B.

**Elektrokimyasal
işlemeyle
yapılmış
küçük gaz
türbin kanatları**



**Elektrokimyasal işlemeyle
1960'larda imal edilmiş ve halen
kullanımda olan uçaklar için
büyük gaz türbin kanatları.**



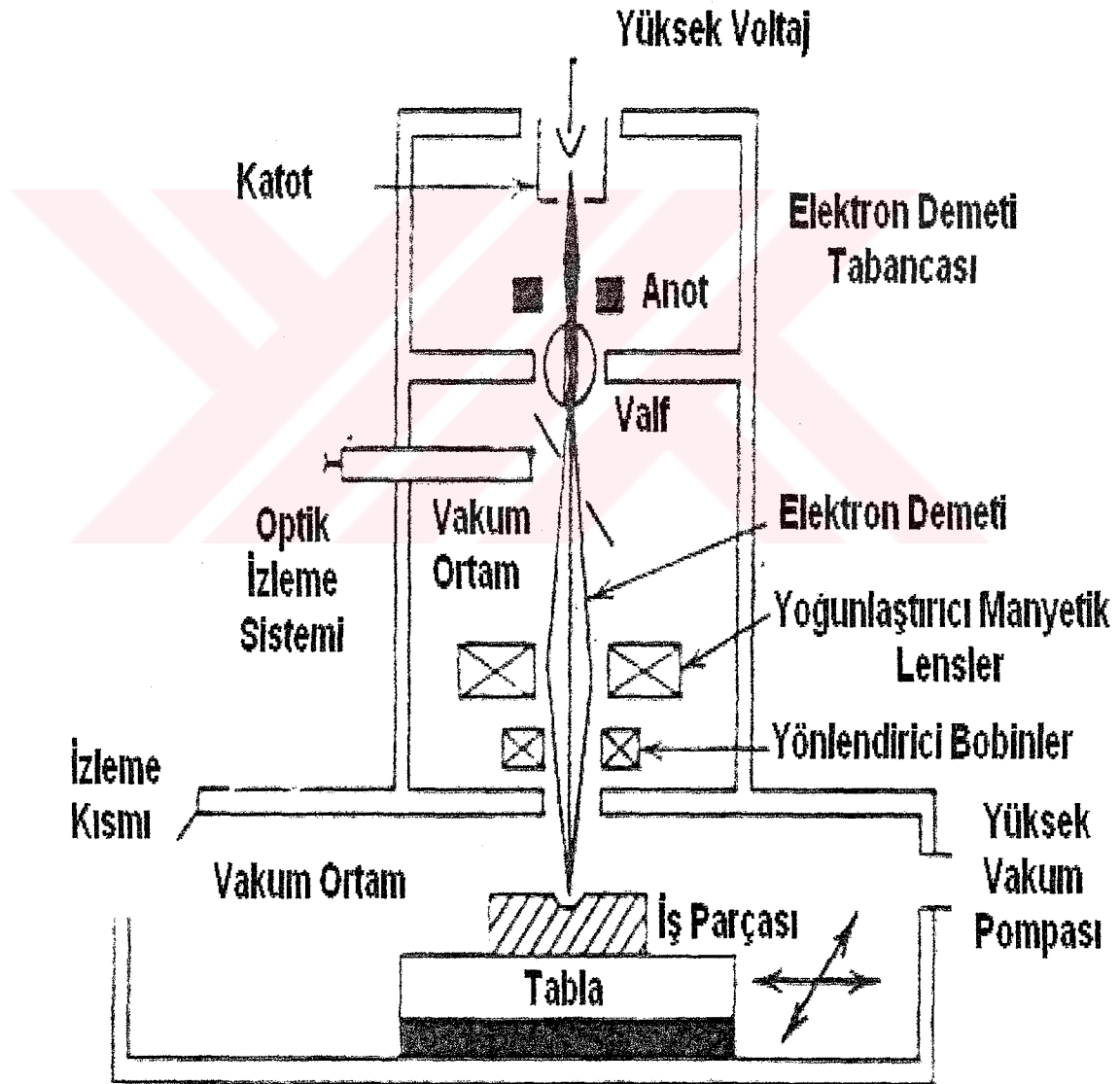
**Elektrokimyasal işleme ile
imal edilmiş uçak gaz
türbini parçaları**

ŞEKİL 2.3.7 :Elektrokimyasal İşleme ile Yapılmış Bazı Uygulamaları [19]

2.4. Termal Yöntemler

2.4.1 Elektron Demetiyle İşleme

Termal esaslı bir yöntem olan elektron demetiyle işlemede çalışma prensibi şu şekildedir. Yüksek enerjili bir elektron demeti kullanılarak iş parçası eritilerek şekillendirilir. İşlem için gereken ısı enerjisi, hızlandırılmış elektronların sahip olduğu kinetik enerjinin ısı enerjiye dönüşümüyle elde edilir. Elektron demetiyle işleme vakum ortamda (10^{-5} mmHg) gerçekleştirilir [5]. Oluşturulan elektron demetinin yoğunlaştırılması için manyetik lensler kullanılır.



ŞEKİL 2.4.1 : Elektron Demetiyle İşlemede Çalışma Prensibi ve Ekipmanları

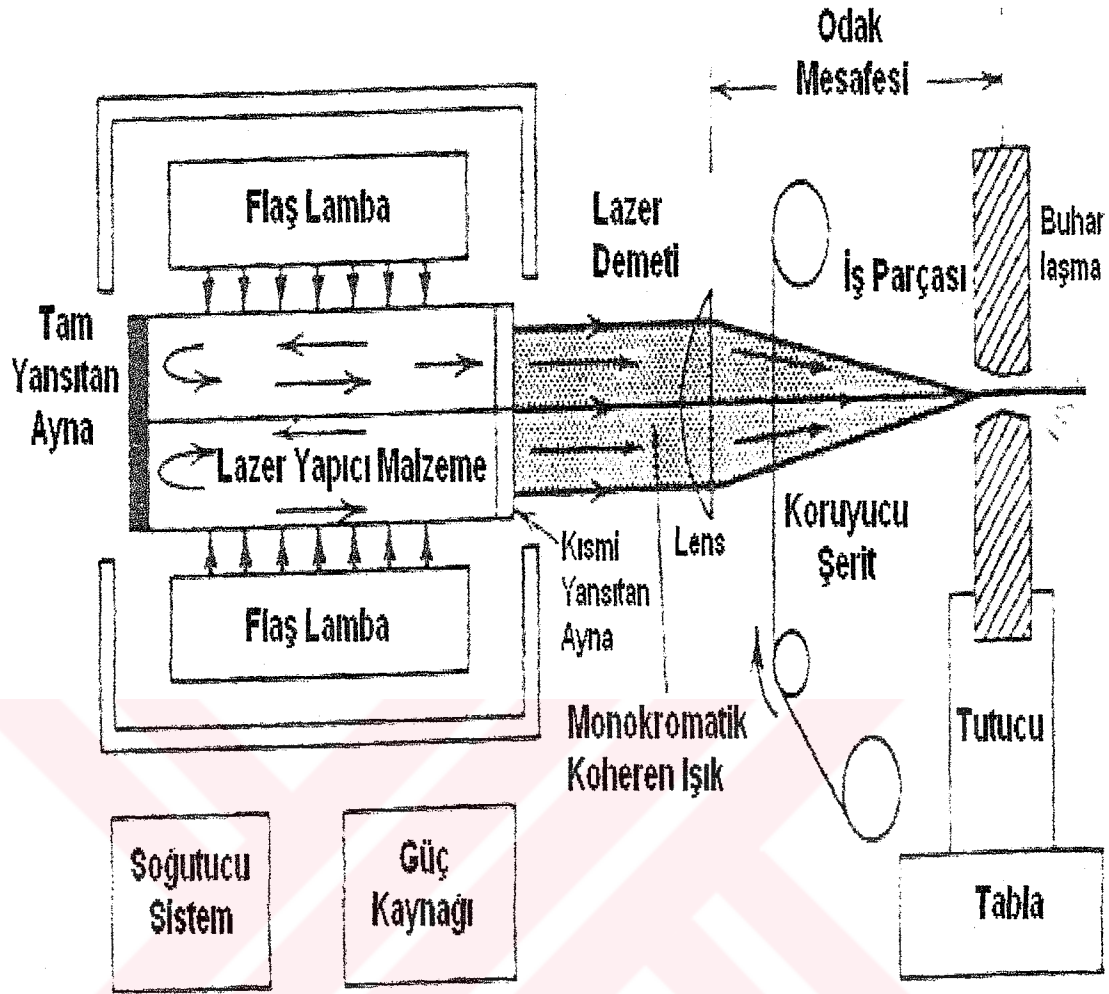
İşlemede kullanılan elektron demetinin kalınlığı 0,0127-0,0254 mm olup, iş parçasında kesilen profilin derinlik/genişlik oranı en çok 100 olabilir.

Elektron demetinin iş parçasıyla etkileşiminden oluşabilecek X-ışınlarına karşı koruyucu kurşun kalkan kullanılmalıdır. Hızlandırılan elektronların hızı, ışık hızının %50-80'i mertebesine ulaştığından yöntemde deneyimli operatör gereksinimi vardır. Elektron demetiyle işleme yönteminde oluşan yüksek güç yoğunluğu ($1,55 \cdot 10^{12}$ W/m²) dikkate değerdir [6].

Yöntemde kullanımı zorunlu olan vakum atmosfer, bu yöntemle işlenecek iş parçası boyutlarını kısıtlayıcı etki yapmaktadır. Vakum kullanımının 2 sebebi vardır. Bunlar, elektron demetinin ortamdaki gaz molekülleriyle etkileşimini, dolayısıyla difüze olmasını ve dağılmasını önlemektir. Diğer sebep ise iş parçasının havayla temas ederek okside olmasına engel olmaktır. Yüksek ekipman maliyeti ve özel bir işlem olması sebebiyle elektron demetiyle işleme yöntemi, seri üretim yerine ince kesitli iş parçalarının işlendiği özel uygulamalar için tercih edilmelidir. Tipik uygulamalar tel çekme kalıpları, dizel motorların enjeksiyon memeleri ve roketlerin yakın enjektörleridir. İşlemde elektronların hızlandırılmasında 50-200 kV'luk yüksek enerji kullanılır. Alüminyum, seramik, cam, bakır alaşımları, berilyum, alaşım çelikleri, titanyum, zirkonyum ve tungsten gibi çok çeşitli malzemenin işlenebildiği bu yöntem kaynak yapımında da kullanılmaktadır. Elektron demetiyle işleme yönteminde malzeme işleme oranı oldukça düşük olup (1,6 mm³/dak.), yüzey pürüzlülüğü 0,8-6 µm, tolerans ise +/- 25-100 µm mertebelerindedir[4].

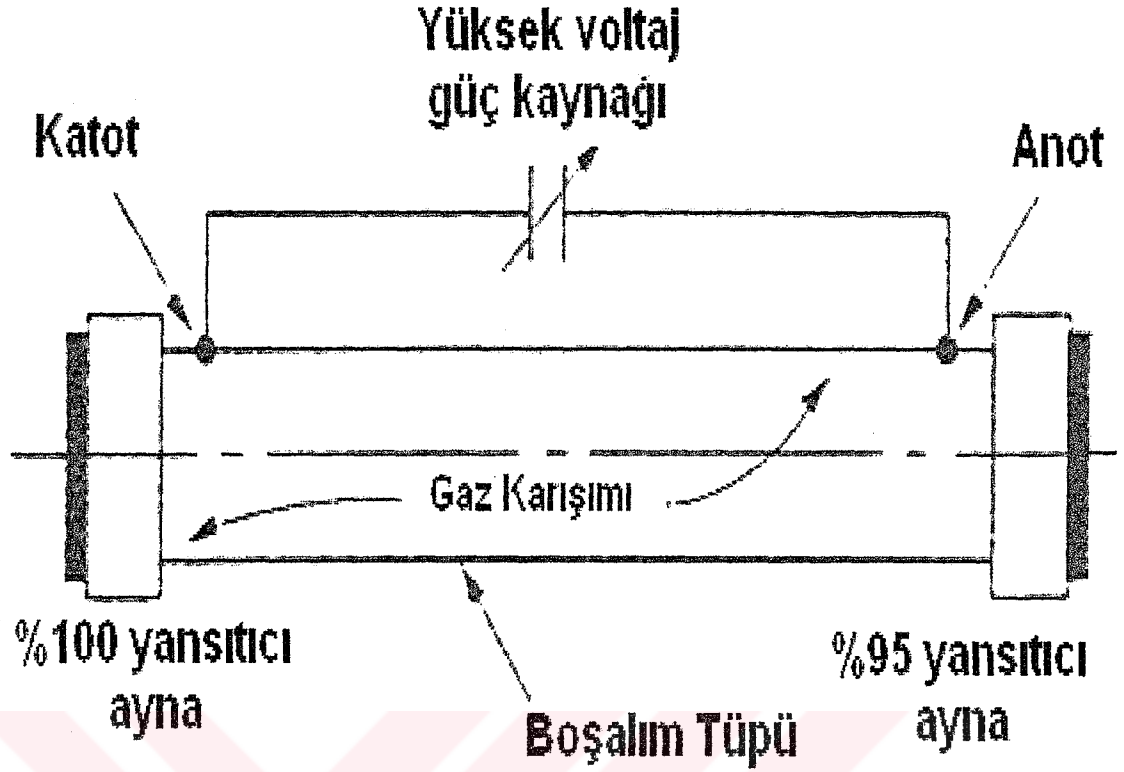
2.4.2 Lazerle İşleme

Lazer demeti kullanılarak işlemede de malzemenin eritilerek işlenmesi söz konusudur. Yöntemde elektrik enerjisi önce ışık sonra da ısı enerjisiye çevrilerek şekillendirme gerçekleştirilir. Özel lambalardan çıkan ışık lazer oluşturucu ortama gönderilir. Bir tarafı tam diğer tarafı ise bir miktar geçirgen aynayla kaplı bu ortamda karşılıklı yansıtılan ışık dalgaları dalga boyları üst üste getirilmek suretiyle yoğunlaştırılırlar. Yarı geçirgen aynadan geçen ışık dalgaları, önce odaklayıcı lense, oradan da iş parçası üzerine gönderilirler. Katı hal, sıvı ve gaz halinde sınıflandırılabilen lazerlerden katı hal ve sıvı faz lazerlerde uyarıcı madde olarak xenon, kripton ve tungsten halojen içeren özel lambalar kullanılır. Gaz fazındaki lazerler ise, düşük basınçlarda bir a.c ya da d.c elektrik devresi kullanılarak oluşturulurlar.



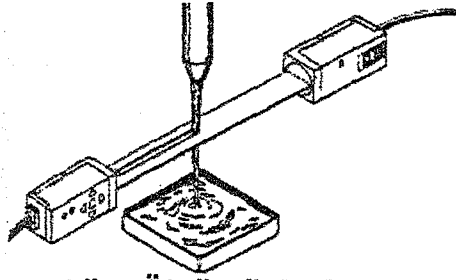
ŞEKİL 2.4.2 : Lazer Demetiyle İşlemede Çalışma Prensipleri ve Ekipmanları

Lazeri hazırlayan ortama (lasing medium), pompalanan elektronların enerjileri düştüğünde ortama fotonların yayınımları gerçekleşir. Fotonların meydana getirdiği ışık dalgaları ise her iki tarafta da bulunan rezonatör aynaları arasında yansıtılarak dalga boylarının üst üste getirilmesi sağlanır. Oluşturulan bu yoğun ışık demetinin dalga boyunu ise lazer oluşturucu madde belirler. Lazer demetiyle işlemede 0,005mm çaplı delikler dahi işlenebilir. İşlenen profildeki derinlik/genişlik oranı ideal olarak 10 mertebesinde olsa da bu değerin 50'ye çıkabilmesi mümkündür. Gaz lazerlerinden CO₂ için uyarıcı lazer ortamı olarak CO₂, N ve H₂ gazları karışımı, sanayide sık kullanılan Nd:YAG lazerde ise neodyum katkılı yttrium alüminyum garnet kullanılır. Lazerlerde kullanılan 1200V ve 1000A'lık yüksek enerjiye dikkat edilmelidir [7].



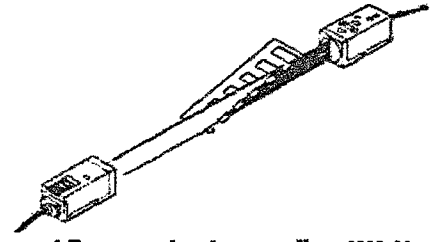
ŞEKİL 2.4.3 : Gaz Lazerlerinde Oluşum Evresi [3]

Lazerin tercih edilme sebeplerinden bazıları, elektron demetiyle işlemedeki gibi bir vakum ortam gerektirmemesi, takımın (lazerin) iş parçasıyla direk temasının olmaması, çok küçük çaplı deliklerde bile kullanılabilirliğidir. Lazerle kesilen kısmın iş parçasından uzaklaştırılmasında gazlar kullanılır. Yansıtma kabiliyeti, ısı iletkenlik ve özgül ısı lazerle işlenecek iş parçasında istenmeyen ve prosesin performansını düşüren malzeme özellikleridir. Bu özellikler yüzünden alüminyum ve bakır alaşımları bu yöntemde verimli olarak işlenemez. Lazer açısından önemli parametreler ise lazerin yoğunluğu ve kısa aralıklı sinyaller halinde gönderilen lazerin aktif olarak kaldığı süredir. Elektronik ve otomotiv sanayilerinde sıkça kullanılan lazer, malzeme işleme dışında kaynak, ısı işlem, markalama ve algılama teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Ticari bir uygulama sunulacak olursa: 10-250W aralığındaki lazerlerin fiyatı 1500 \$/W olup, kullanılan gaz ise 30.000 saat yetmektedir. 800 W'lık bir lazerle 3mm kalınlığındaki pek çok metalin 1-1,25m/dak. hızla kesilmesi mümkündür. Yöntemdeki 0,1mm³/dak. 'lık işleme oranı son derece düşüktür. Yüzey pürüzlülüğü 0,8-6µm olup, tolerans +/- 25-100µm mertebesinde [6].



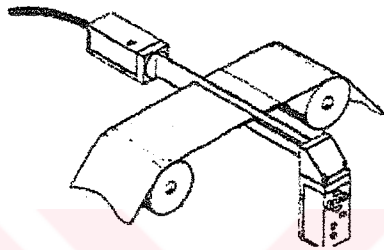
**Süre Ölçümüyle Boya
Miktarı Algılanması**

A.



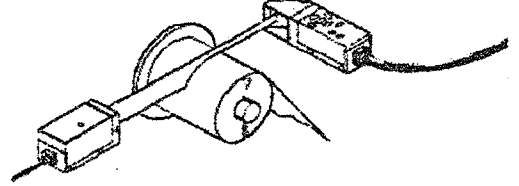
**15mm algılama özellikli
lazerle küçük delikli
parçaların algılanması**

E.



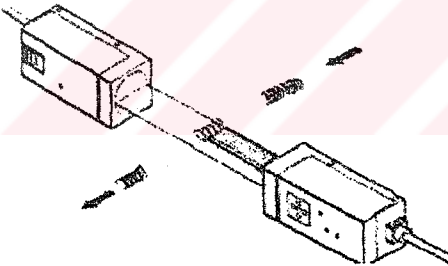
**Lazerle Sigara
Kağıdı Algılanması**

B.



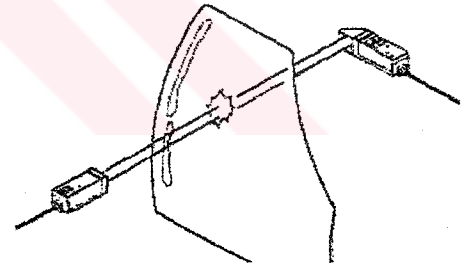
**Makaraadaki malzemenin
lazerle algılanması**

F.



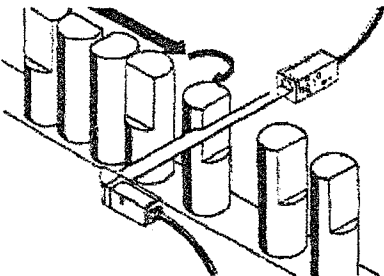
**Lazer kullanımıyla yay
sayımı yapılması**

C.



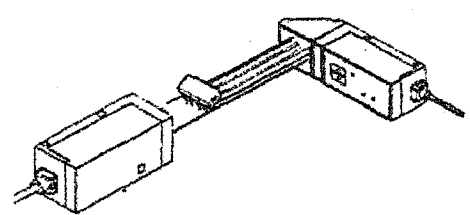
**Otomobillerde cam renginin
lazerle tespiti**

G.



**Parçaların istenen pozisyona
ayarlanmasında lazer kullanımı**

D.



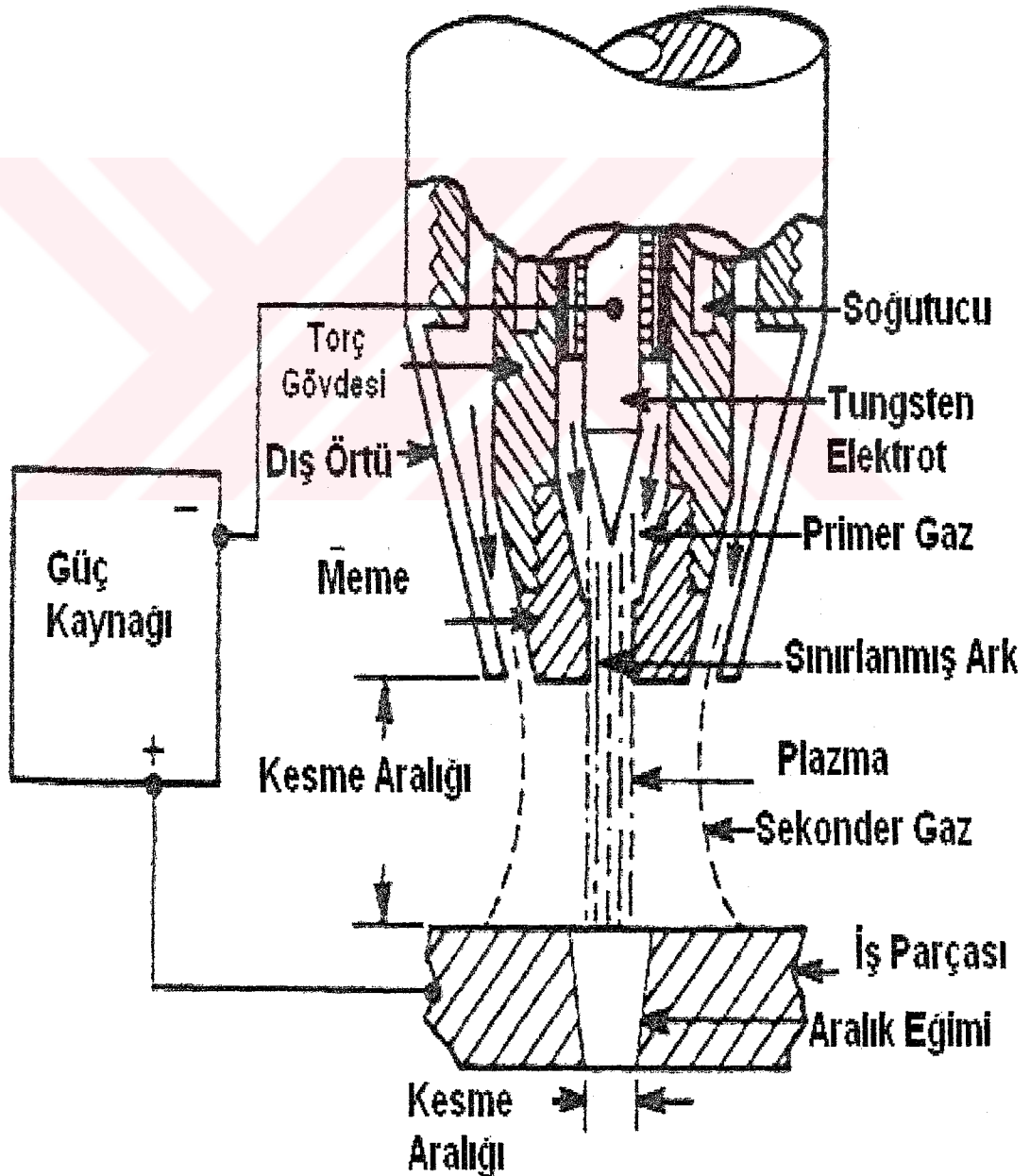
**Elektronik devre parçalarının
lazerle algılanması**

H.

ŞEKİL 2.4.4 : Lazerle Algılama Uygulamaları [1]

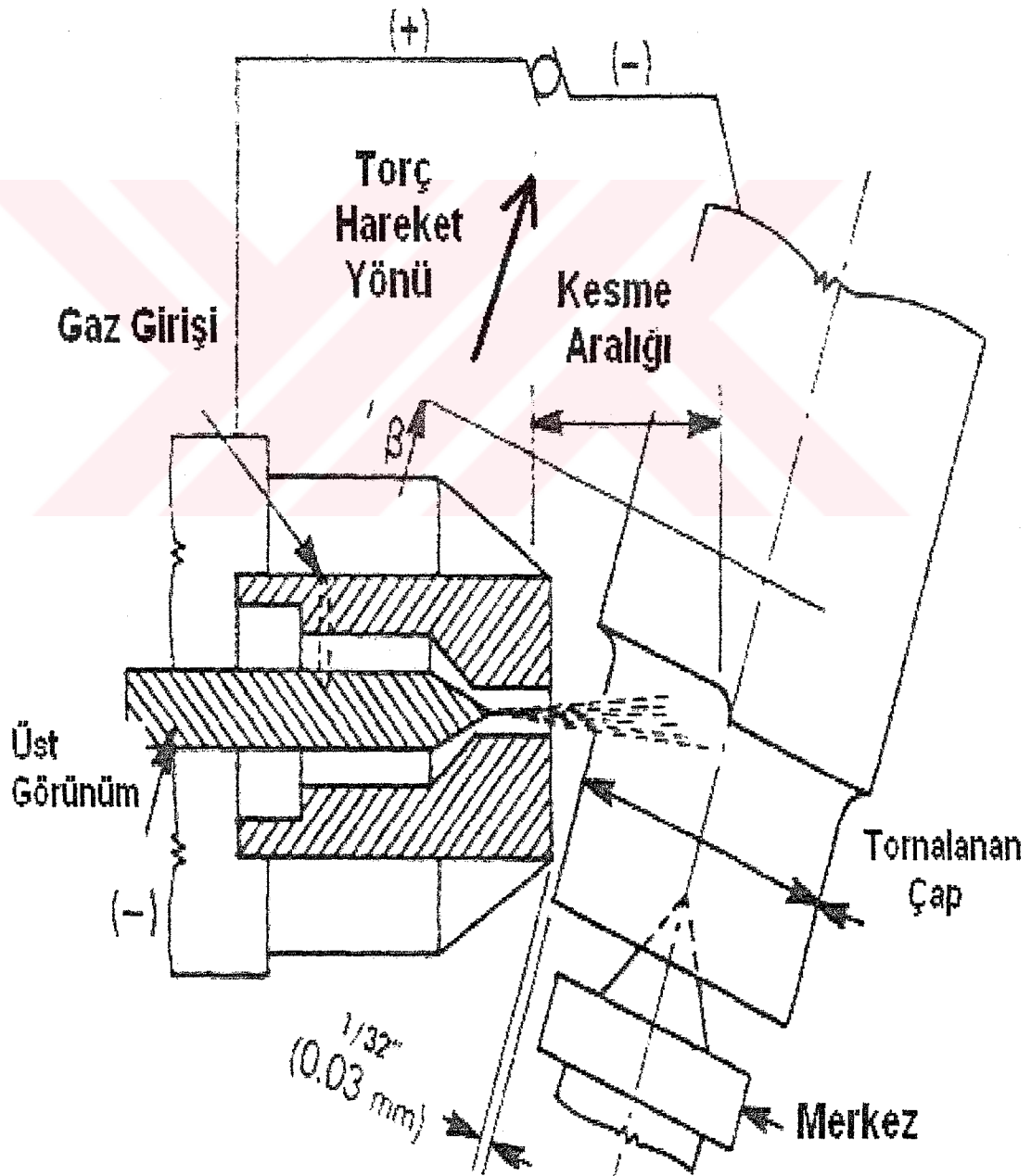
2.4.3 Plazma Arkıyla İşleme

1950'lerden itibaren gelişmeye başlayan plazma arkıyla işleme yöntemi, yüksek sıcaklıklı (11.000-28000 °C) iyonize olmuş gazın iş parçasından malzemeyi eriterek kaldırması esasına dayanır. İşlemede kullanılan gaz hidrojen, nitrojen, argon veya bu gazların karışımından ibarettir. Genelde tungstenin kullanıldığı elektrot "-", iş parçası ise "+" olarak yüklüdür. Yüksek sıcaklığa maruz kalan meme suyla soğutulur. Gaz haznesinde doğru akımla oluşturulan yüksek frekanslı kıvılcımla harekete geçirilen iyonize olmuş gaz, memeden ışık hızına yakın bir hızla çıkar. İş parçasından kesilen kısmın uzaklaştırılmasında ise gaz veya su kullanılır.



ŞEKİL 2.4.5 : Plazmayla İşlemede Çalışma Prensibi ve Kullanılan Ekipmanlar [2]

Plazmayla işleme yönteminin en önemli avantajı yöntemin yüksek işleme hızıdır. İletken olmak kaydıyla tüm malzemelere uygulanabilen plazmayla işleme yöntemiyle şekillendirilen en belirgin iş parçası malzemeleri paslanmaz çelik, alaşım çelikleri, alüminyum, titanyum ve bronzdur. Plazmanın hazırlanması sırasında ortamdaki elektriksel alanın etkisiyle iyonize olan gaz ısınır ve bu ısı iyonların atomları, atomların da molekülleri oluşturmasıyla açığa çıkar. Kaynak işleminde de kullanılan plazma, çoklu kafalar kullanılarak işlemede de kullanılır. Klasik tornalamaya benzeyen uygulamalarda da kullanılan plazma arkının etrafında gönderilen su örtüsü kesme hızını ve meme ömrünü artırır, oluşan duman ve gazların etkisini azaltır.



ŞEKİL 2.4.6 : Plazma Arkıyla Tornalama

Güç seviyesi, kullanılan gaz tipi, gazın akış oranı ve alev açısı işlemin önemli parametreleridir. Plazma arkıyla işlemede malzeme kaldırma oranı oldukça yüksektir (75000 mm³/dak.). Yüzey pürüzlülüğünün 1,5-3 µm olduğu yöntemde tolerans +/- 1-2 mm'dir.

Plazma Arkıyla Alüminyumun Kesilmesinde Genel Koşullar

Kalınlık [mm]	Hız [m/dak.]	Meme Çapı [mm]	Güç [kW]	Gaz Akışı [lt/dak.]
6	7.5	3	60	{ 2270 Ar—1135 H ₂ or 3700 N ₂ —900 H ₂
12	5.0	3	50	{ 1850 Ar—925 H ₂ or 3959 N ₂ —1800 H ₂
25	2.25	4	80	{ 1850 Ar—935 H ₂ or 3950 N ₂ —1800 H ₂
50	0.5	4	80	{ 1850 Ar—935 H ₂ or 3950 N ₂ —1800 H ₂
75	0.375	4.5	90	{ 3700 Ar—2000 H ₂ or 3950 N ₂ —1800 H ₂
100	0.3	4.5	90	{ 3700 Ar—2000 H ₂ or 3950 N ₂ —1800 H ₂

ŞEKİL 2.4.7 : Plazma Arkıyla Al'nin İşlenmesinde Genel Koşullar [8]

Paslanmaz Çeliğin Plazma Arkıyla Kesilmesinde Genel Koşullar

Kalınlık [mm]	Hız [m/dak.]	Meme Çapı [mm]	Güç [kW]	Gaz Akışı [lt/dak.]
6	5.0	3	60	4250 N ₂
12	2.5	3	60	4250 N ₂
25	1.25	4	80	5000 N ₂
50	0.5	4	100	3700 Ar—2000 H ₂
75	0.375	4.5	100	3700 Ar—2000 H ₂
100	0.175	4.5	100	3700 Ar—2000 H ₂

Karbon Çeliğinin Plazma Arkıyla Kesilmesinde Genel Koşullar

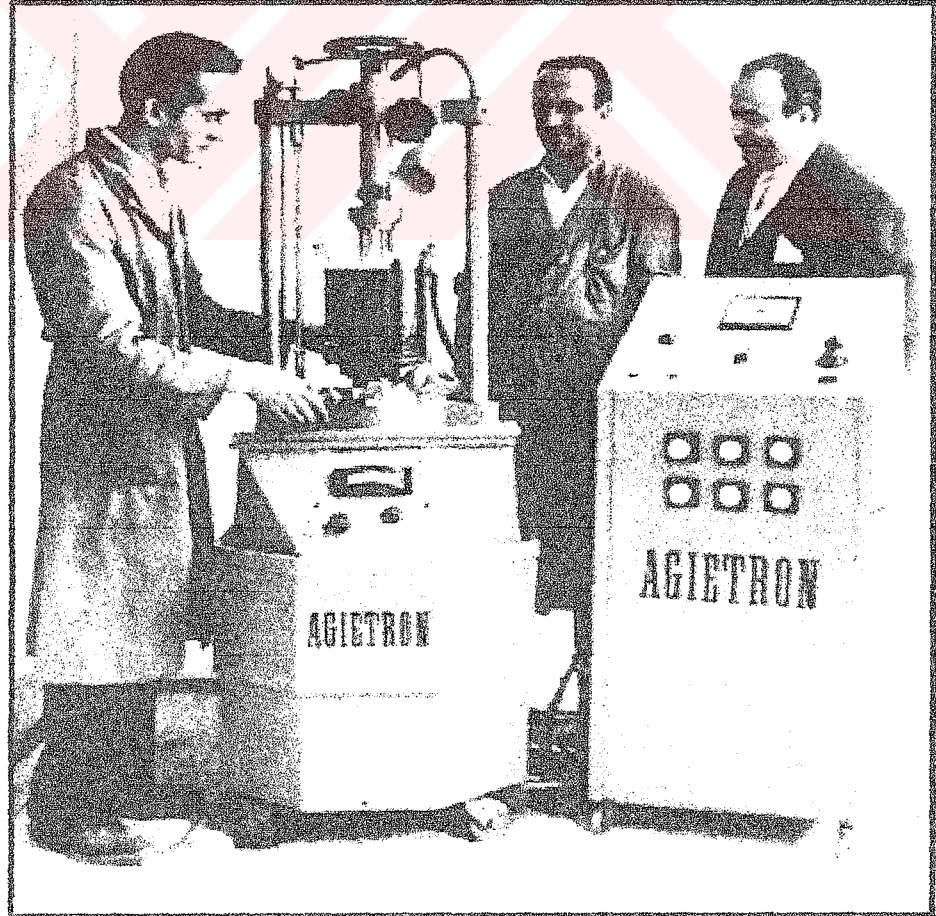
Kalınlık [mm]	Hız [m/dak.]	Meme Çapı [mm]	Güç [kW]	Nitrojen Akışı [lt/dak.]	Oksijen Akışı [lt/dak.]
6	5.0	3	55	4250	2300
12	2.5	3	55	4250	2300
25	1.25	4	85	4250	2300
50	0.625	4.5	110	5700	2850

ŞEKİL 2.4.8 : Plazma Arkıyla Karbon ve Paslanmaz Çeliğin İşlenmesinde Koşullar

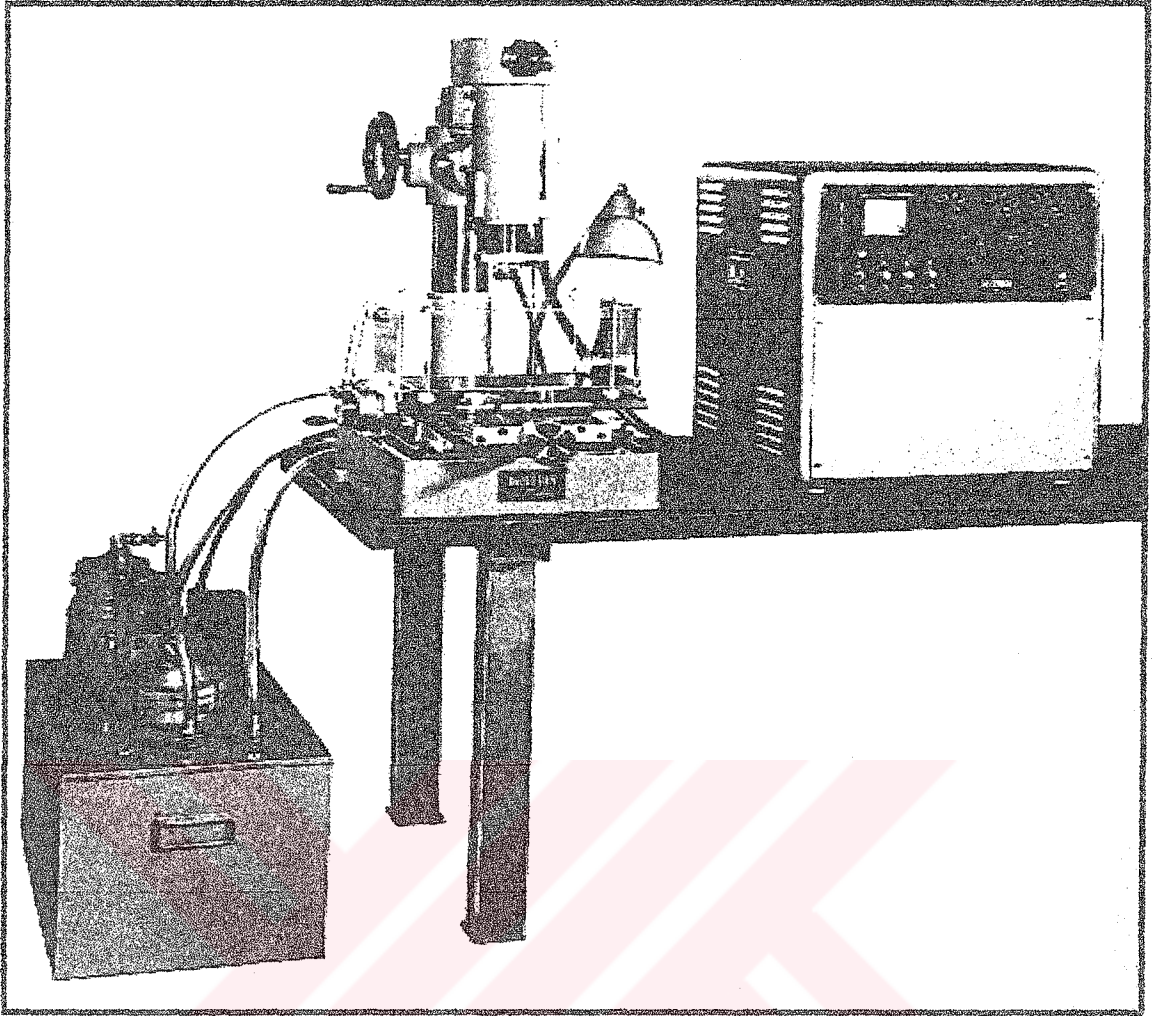
3. ELEKTROEROZYON YÖNTEMİ

3.1. Tarihçe ve Gelişim

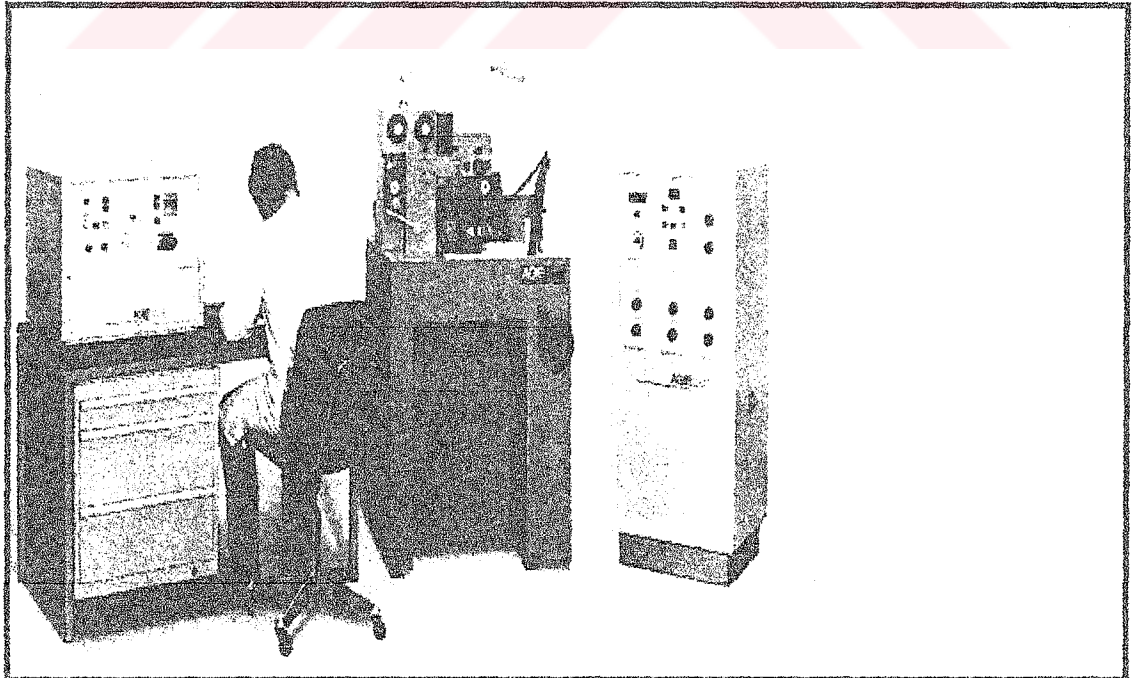
Elektriksel kıvılcımlarla malzeme kaldırılması fenomeninin temelleri 1700'lü yıllara dayanmaktadır. Elektriksel arkın kaynak yapımı amacıyla kullanımı ise Meritens tarafından 1881'de gerçekleştirilmiştir. Bugünkü şekliyle kullanımı ise 1948 yılında rus bilim adamı Lazarenko ve eşi tarafından imal edilen elektroerozyon makinesiyle (EDM: Electrical Discharge Machine) olmuştur [10]. Zaman içinde bazı artış ve azalışlar gösteren yöntemin tercih edilme oranı, 1970'li yılların ardından yıllık %30'luk istikrarlı bir artış sergilemiştir.



ŞEKİL 3.1 : 1954 Yılında İsviçre Agie Firmasının Kuruluşu ve ilk EDM Makinesi [13]



ŞEKİL 3.2 : 1956 Yılına ait İsviçre Agie Firmasının EDM Makinesi [13]



ŞEKİL 3.3 : 1959 Yılında İsviçre Agie Firmasının ilk NC Tel Erozyon (W-EDM) Makinesi

3.2. Elektroerozyon (EDM) nedir? Nasıl Çalışır?

Elektroerozyon veya kıvılcımla işleme, sürekli kontrol edilen ve çok kısa sürelerde bir seri tekrarlı elektriksel boşalmalar sonucu oluşan bir elektriksel kıvılcım ve onun yarattığı anlık yüksek sıcaklıklar sayesinde iş parçası yüzeyinden eriterek ya da buharlaştırarak malzeme kaldırılmasının gerçekleştirildiği bir imalat yöntemidir. Her ne kadar elektroerozyon yöntemi, enerji olarak elektrik enerjisinden yararlı olsa da malzeme kaldırılması işlemi ısı enerjisiyle gerçekleştirildiğinden termal işleme yöntemleri kategorisindedir.

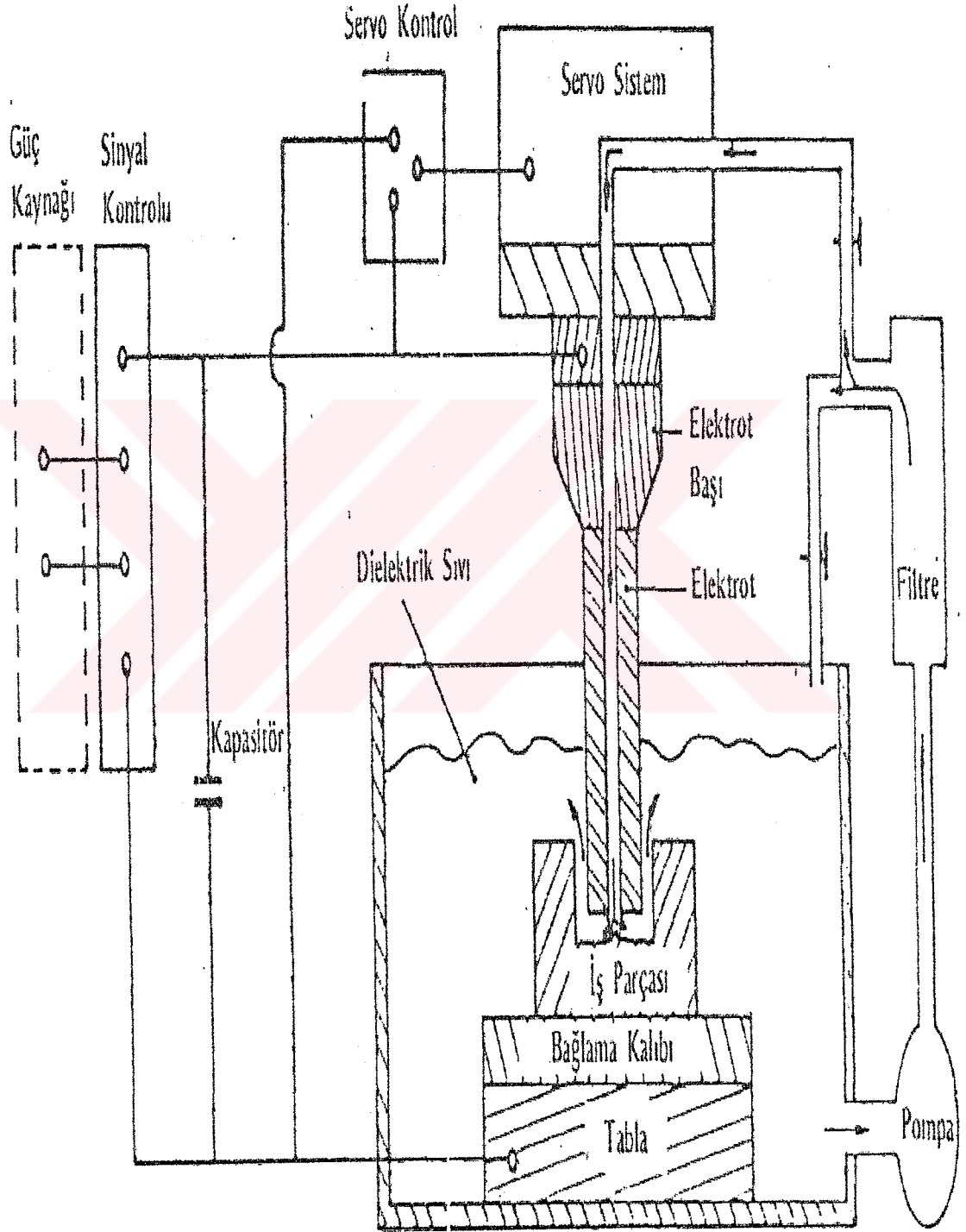
Elektroerozyon yönteminde, kesici takım olarak (genellikle) “-” yüklü elektrot (katot) , iş parçası olarak (genellikle) “+” yüklü elektrot (anot), her ikisinin de içinde bulunduğu sıvıyla (genellikle dielektrik bir hidrokarbon) dolu bir hazne, takıma hareket veren bir kafa ve iş parçasını yönlendiren bir tezgah tablası kullanılan ana ekipmanlardır.

Yöntemin ilk uygulamalarında elektriksel devre üzerinden doldurulan kapasitörün enerjisini devreye yapılan mekanik anahtarlı müdahale ile katot konumundaki takım elektroda göndermesi ve bu süreçte oluşan elektriksel kıvılcımın da iş parçası yüzeyinde oluşturduğu yüksek sıcaklıkla kraterler şeklinde malzeme kaldırması sağlanıyordu. Bu genel prensip hala sürmekle beraber zaman içinde kullanılan elektrik devreleri, takım elektrot özellikleri, kullanılan dielektrik sıvıların özellikleri, yöntemin kontrol mekanizmaları oldukça gelişim göstermiştir.

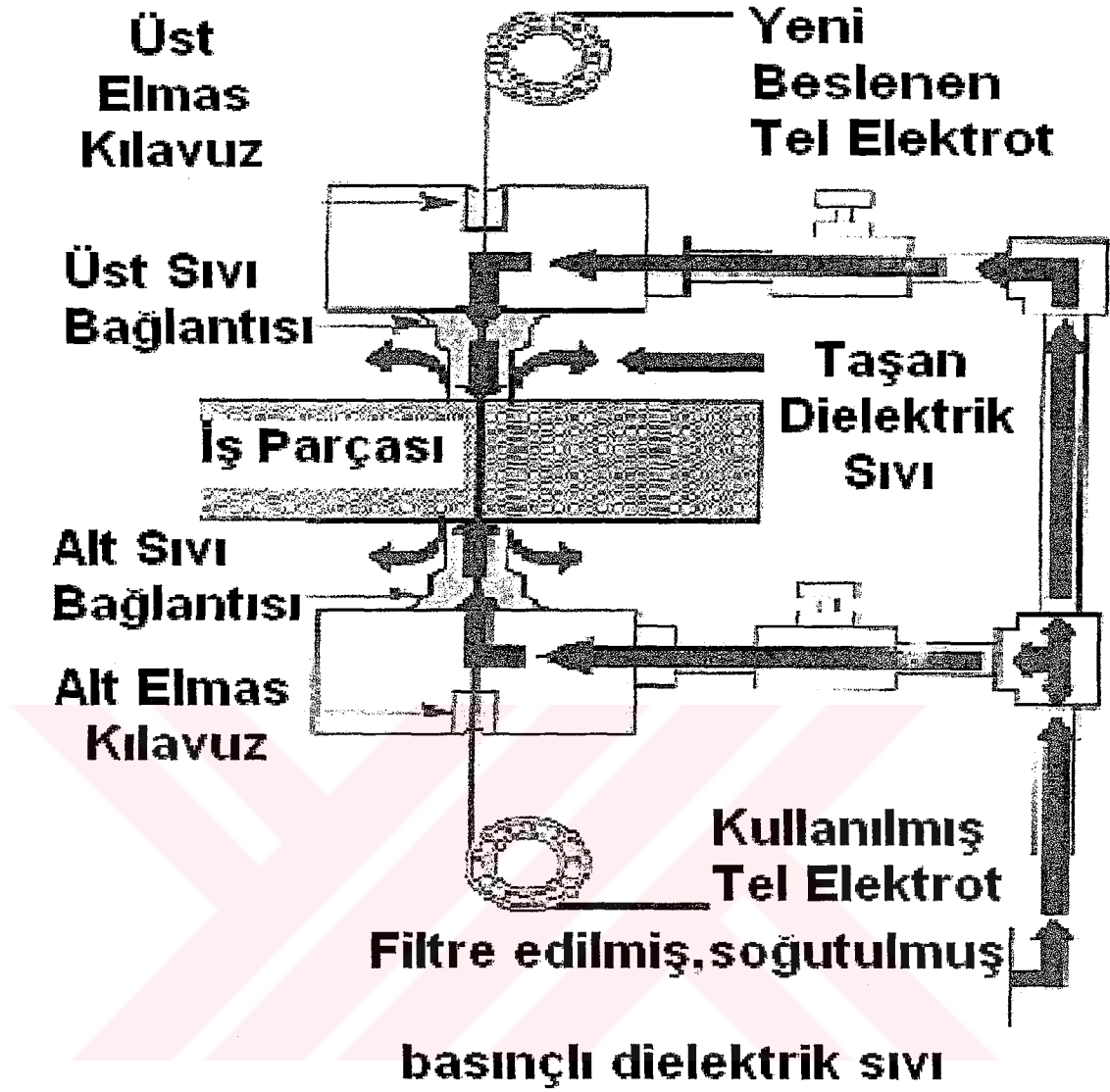
Elektroerozyon yönteminin gelişme evresinde yapılan makineler genelde dalma erozyon şeklindeydi. Dalma erozyon (P-EDM:Plunge Electrical Discharge Machining), iş parçası üzerinde oluşturulmak istenen profilin negatifi şeklinde işlem öncesi şekillendirilen takım konumundaki elektrotun işleme sırasında iş parçası üzerine projeksiyonuyla gerçekleştirilir. Dalma erozyon bu yönüyle bu çalışmada daha önce sözü edilen elektrokimyasal ve ultrasonik işleme yöntemlerine de benzemektedir.

Dalma erozyon yöntemi dışında elektroerozyon yönteminin bir çeşidi de tel erozyondur (W-EDM: Wire Electrical Discharge Machining). Tel erozyonda, dalma erozyondan farklı olarak tel şeklinde ve sürekli olarak beslenen tek kullanımlık elektrot kullanılır. Dalma erozyondaki gibi takım şeklinin iş parçasına projeksiyonu söz konusu değildir.

Elektroerozyon yönteminin bu 2 çeşidi arasındaki bir diğer önemli fark da dalma erozyonun iş parçasındaki kör deliklerin, tel erozyonun ise iş parçasının tüm kesitindeki profillerin kesilmesinde kullanıma uygunluklarıdır.



ŞEKİL 3.4 : Dalma Erozyon Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları

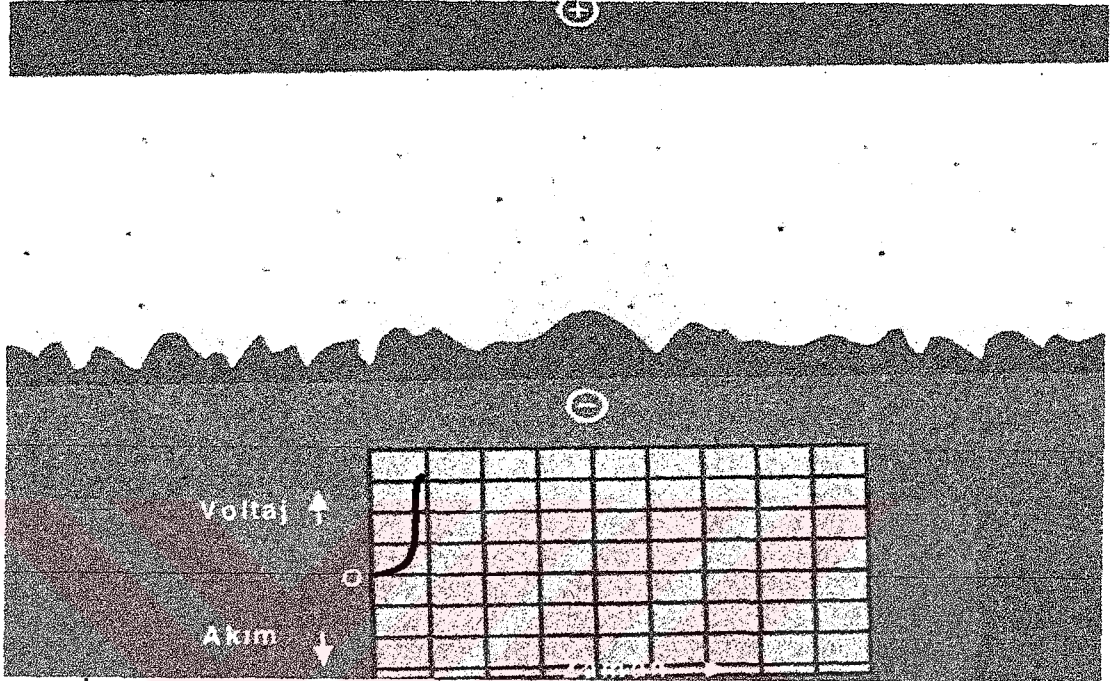


ŞEKİL 3.5 : Tel Erozyon Yöntemi Çalışma Prensibi ve Ekipmanları [11]

3.3. Elektroerozyon Yönteminde Kıvılcım Oluşumu

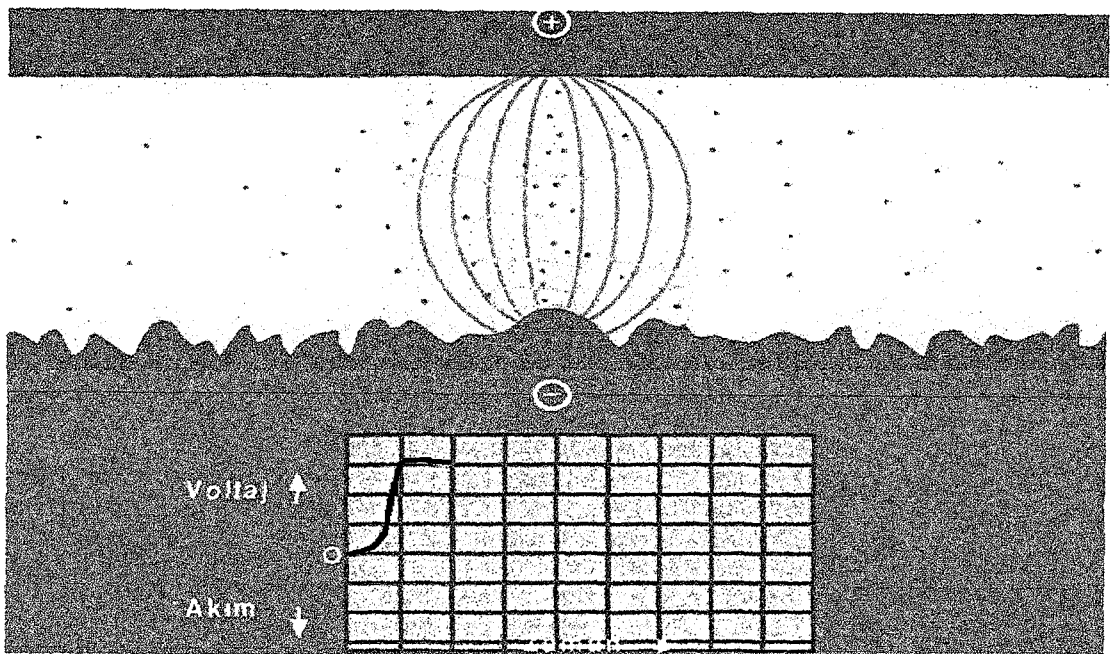
Elektroerozyon yöntemi çalışma prensibi uyarınca bir doğa olayı olan yıldırım oluşumuna benzetilebilir. Yıldırım olayındaki zıt kutup taşıyan bulutları bu yöntemde takım ve iş parçası, ortamda bulunan hava ya da rüzgarı ise yöntemde ortamda ara teması sağlayan dielektrik sıvı sembolize eder. Elektroerozyon yönteminde kıvılcım oluşumu işleminin adımları şu şekilde gerçekleşmektedir. Takım elektrot iş parçasına yaklaştırılır. Elektrot ile iş parçası arası dielektrik sıvıyla doludur.

Dielektrik sıvı iyi bir yalıtkan olmalıdır ki yeterli elektriksel potansiyel oluşmadan, iş parçasıyla takım arasında elektriksel akım akmamalıdır. Takım iş parçasına yaklaştırdıkça elektriksel alan yoğunlaşır. Ancak bu noktada voltaj artmaya başlarken akım hala 0 değerindedir.



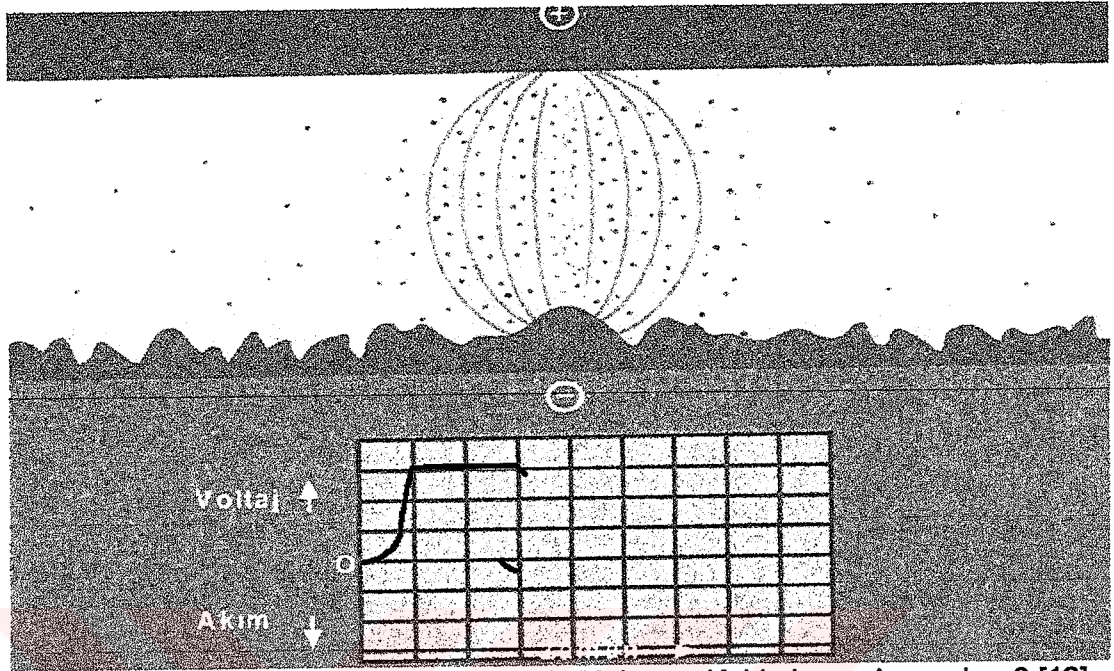
ŞEKİL 3.6 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-1 [12]

İyonize parçaların sayısı artar, dielektrik sıvının yalıtkan özelliği kuvvetli elektriksel alanın ortasındaki dar bir kanala doğru azalmaya başlar. Bu noktada voltaj tepe değerine ulaşmıştır ancak akım hala 0 değerindedir.



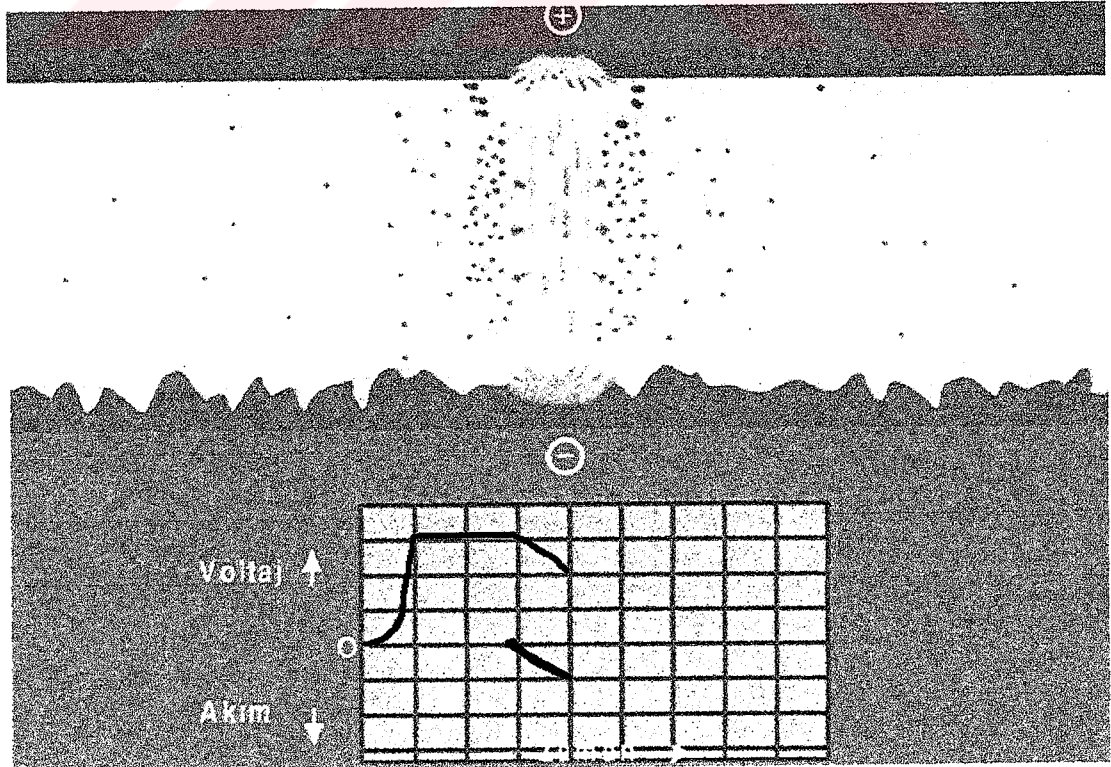
ŞEKİL 3.7 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-2 [12]

Takımla iş parçası arasında sıvının yalıtımı en aza indiğinde bir akım akmaya başlar ve bu noktada voltaj da düşmeye başlar.



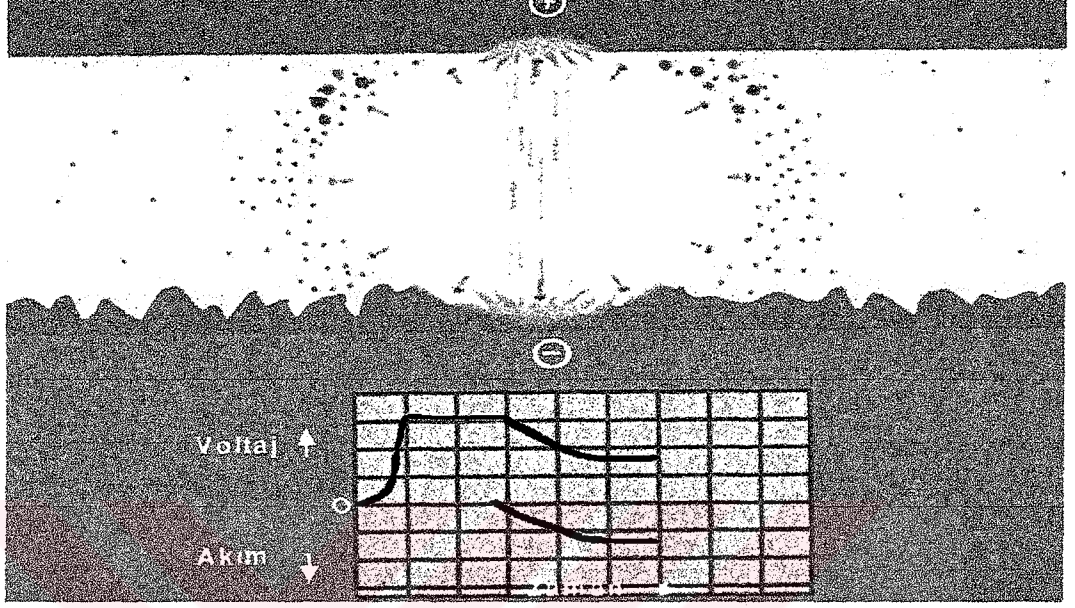
ŞEKİL 3.8 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-3 [12]

Artan akımla beraber bölgedeki ısı da artar. Yüksek ısı, iş parçasının ve takımın bir kısmını buharlaştırır, şekillendirme başlamıştır. Takımla iş parçası arasında bir boşalma kanalı meydana gelir. Bu süreçte voltaj düşüşü devam eder.



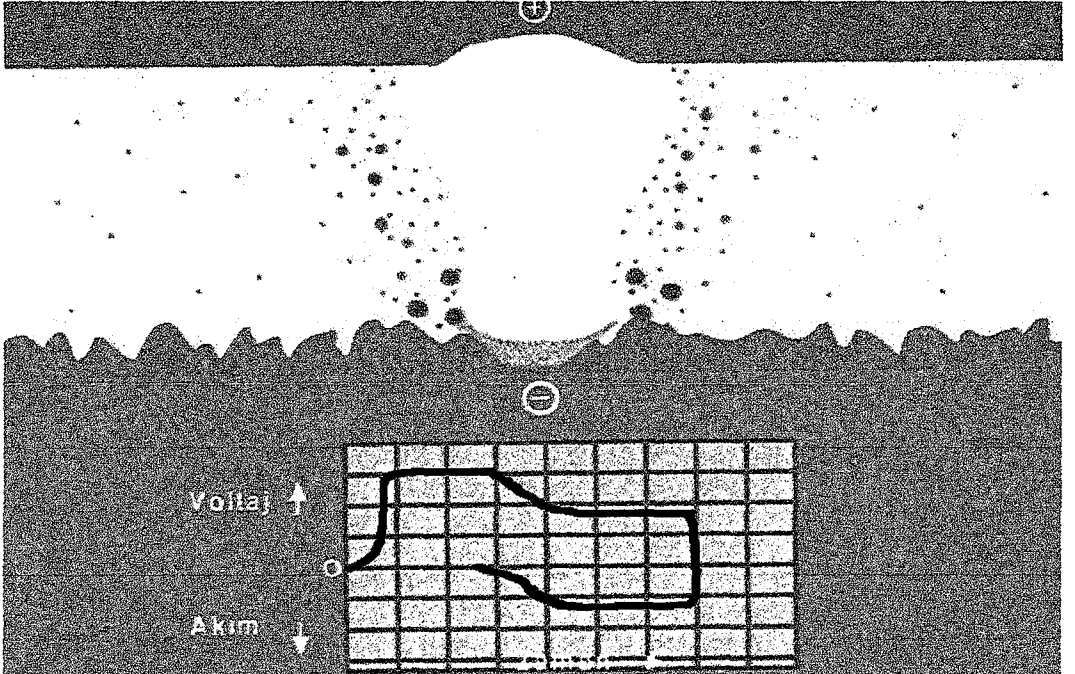
ŞEKİL 3.9 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-4 [12]

Boşalma sırasında akım yükselmeye voltaj ise düşmeye devam eder. Boşalmanın aktif olduğu sürenin ("on time") sonuna doğru akım ve voltaj sabitlenir. Boşalma kanalı, buharlaşmış metal ve dielektrik sıvıdan oluşmuş çok sıcak bir plazma ile buradan geçen güçlü bir akımdan meydana gelir.



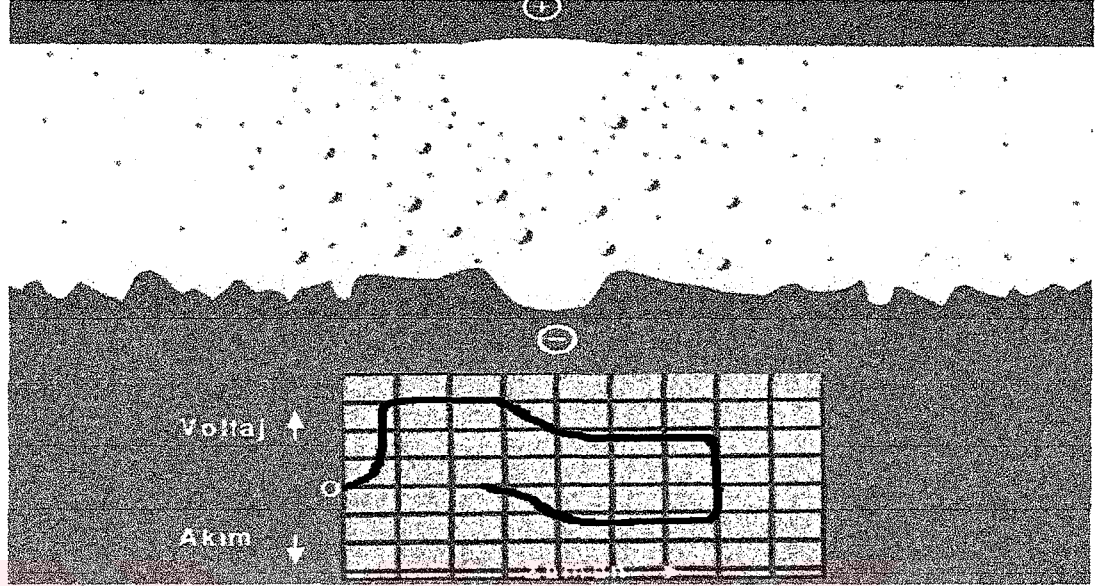
ŞEKİL3.10 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-5 [12]

Bir sonraki aşamada akım boşalmasının devre dışı olduğu zaman ("off time") başlar. Akım ve voltaj sıfıra düşer. Isı hızla azalır. İş parçasından kopartılan erimiş metal parçacıkları ve buhar kabarcıkları çöker.



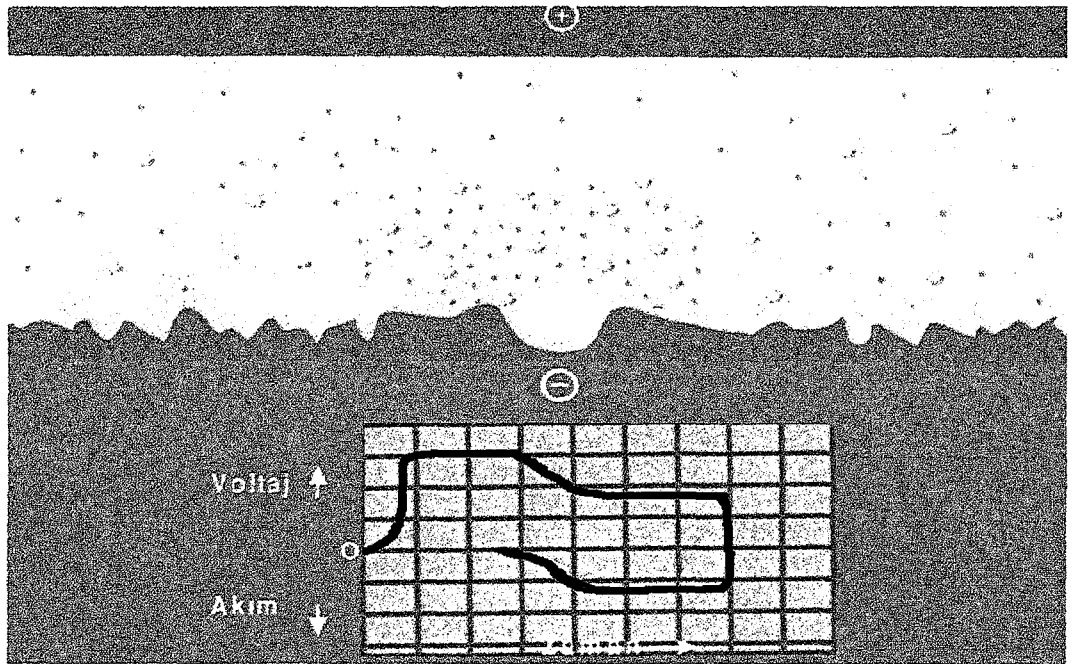
ŞEKİL3.11 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-6 [12]

Temiz dielektrik sıvının yoğunluğu artar ve iş parçasının yüzeyindeki talaşlar yıkanarak buradan uzaklaştırılır. İşlem süreci olarak bu aşamada halen akım devre dışıdır ("off time").



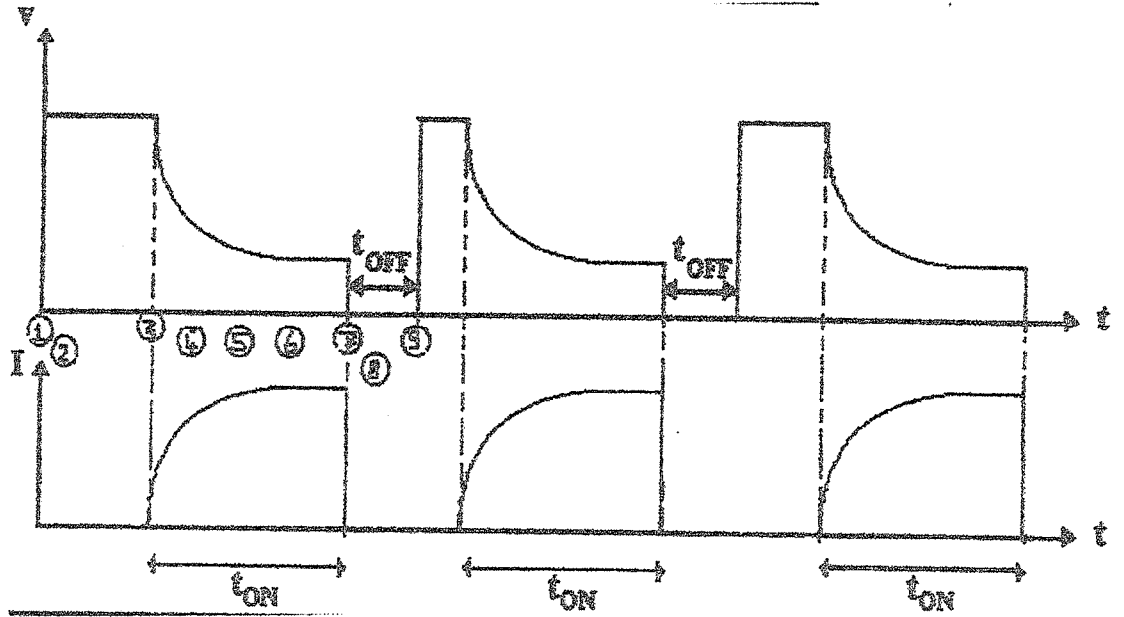
ŞEKİL3.12 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-7[12]

Takımdan ve iş parçasından koparılan malzeme parçacıkları, dielektrik sıvının içerisine dağılırlar. Kalan buhar kabarcıkları ise yüzeye doğru yükselir. Eğer arkın devre dışı kaldığı süre ("off time") yetersiz olursa talaşlar toplanarak yeni bir kıvılcım oluşturabilirler ve bu takıma ve iş parçasına zarar verebilir. Bu aşama çevrimin sonu olup ardından yeni bir çevrim ve ark oluşumu süreci başlar.



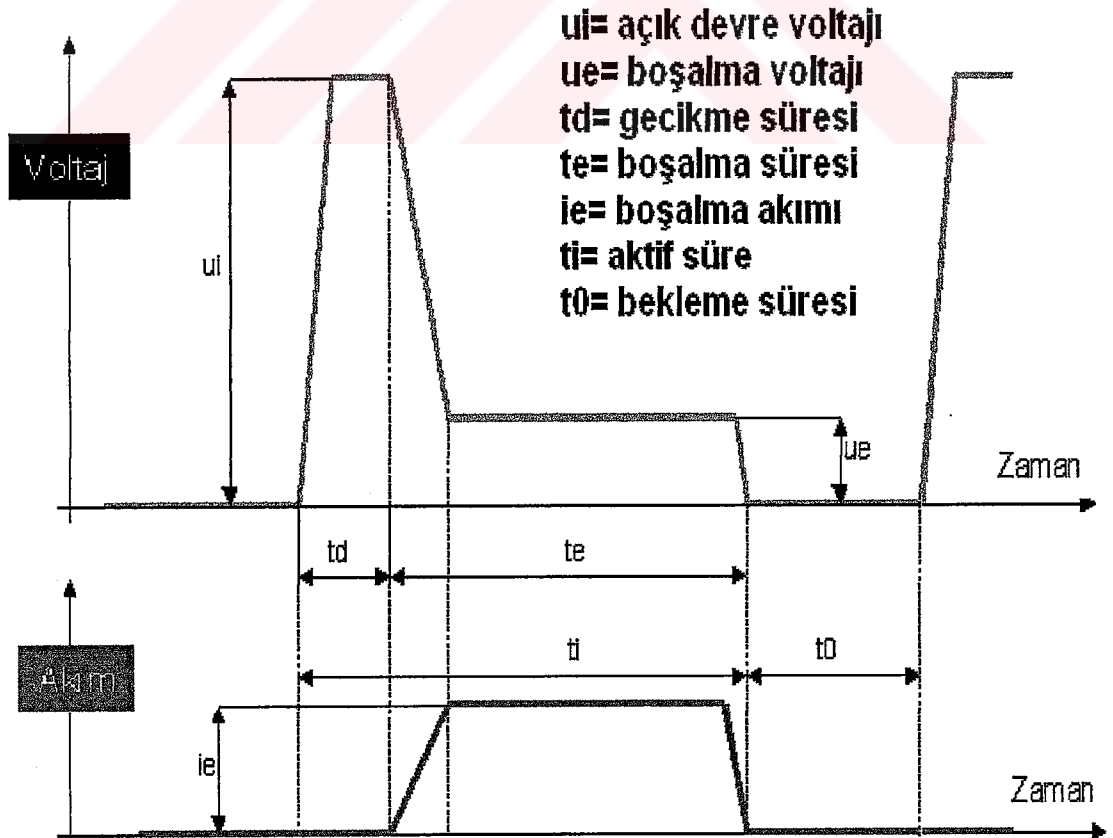
ŞEKİL3.13 : Elektroerozyon Yönteminde Malzeme Kaldırılması Aşamaları-8[12]

Yukarıda sunulan çevrimin aşamaları tek bir şekil üzerinde sunulacak olursa çevrim boyunca akım ve voltajın süreye değişimi daha iyi anlaşılabilir.



ŞEKİL 3.14 : Elektroerozyon Yönteminde Voltaj ve Akımın Zamanla Değişimi

Malzeme kaldırma çevriminde akım ve voltajın davranışları ve evrelere göre bu değerlerin aldığı isimler aşağıdaki grafikte sunulmuştur.



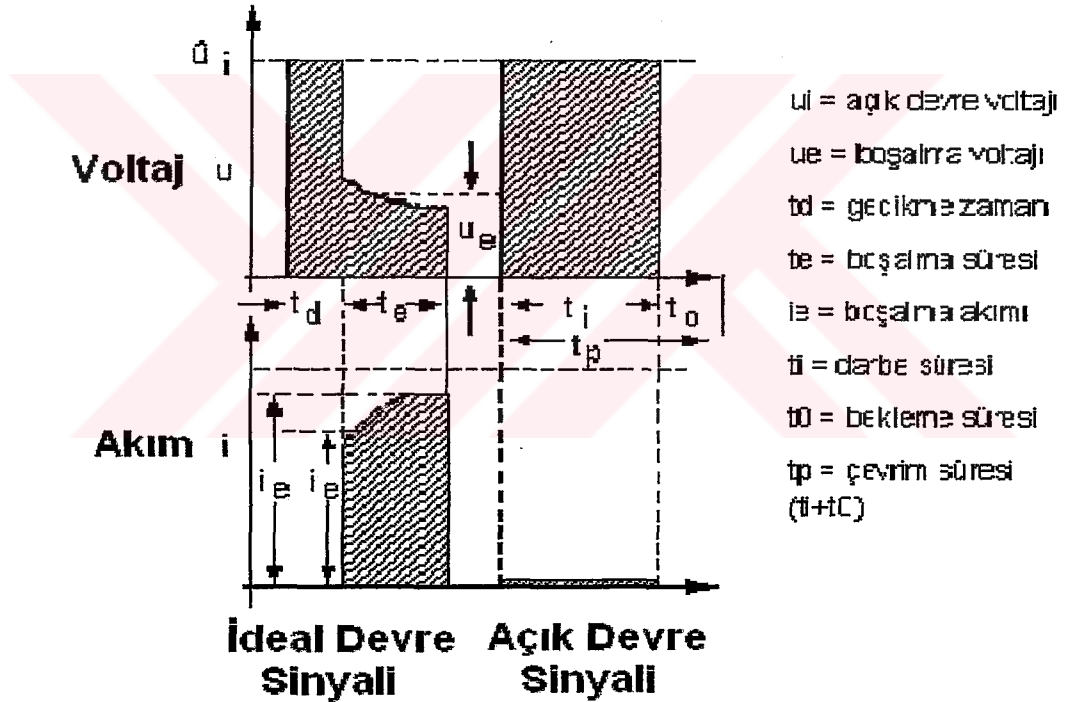
ŞEKİL 3.15 : Malzeme Kaldırılması Çevriminde Akım ve Voltaj Evreleri [13]

3.4. Elektroerozyon Yönteminde Boşalma Hataları

Bu bölümde elektroerozyon yönteminde malzeme kaldırılması sırasında olabilecek hatalar, bunların sebepleri ve etkileri incelenecektir.

3.4.1. Açık Devre Sinyalleri Hatası

Açık devre sinyalleri ateşlemeye ya da elektriksel boşalmaya izin vermezler. İş parçasına, takıma ya da sisteme her hangi bir zarar vermemekle beraber malzeme kaldırma oranının düşük olmasına sebep olurlar. Bu hatanın olası sebepleri ise takımla iş parçası arasında servo kontrol mekanizması tarafından sabit tutulması gereken aralığını nominalden fazla olması veya kullanılan dielektrik sıvının çok temiz olmasıdır.

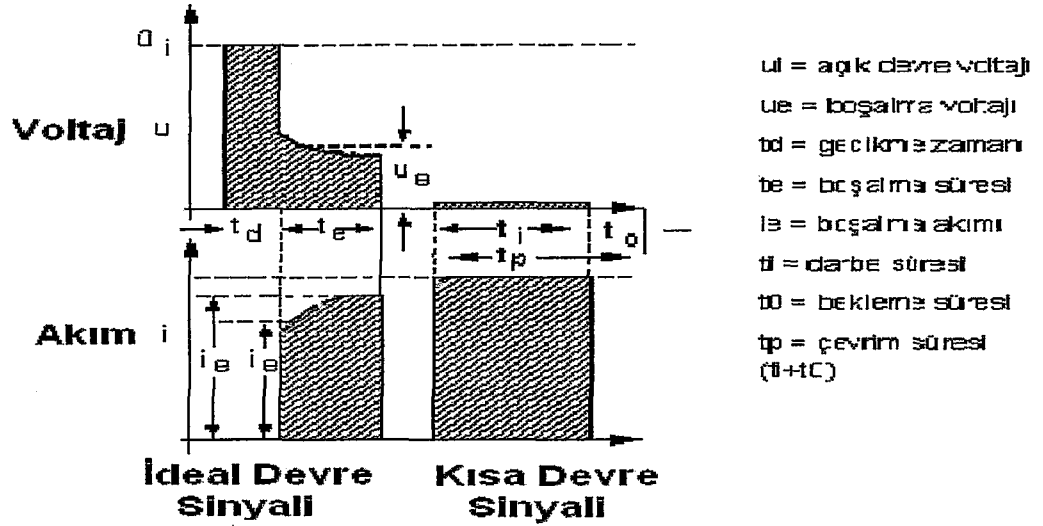


ŞEKİL 3.16 : Açık Devre Sinyalleri Hatası ve İdeal Boşalma [14]

3.4.2. Kısa Devre Hatası

Malzeme kaldırılması sırasında istenmeyen bir diğer durum da kısa devre oluşmasıdır. İş parçası ve takım birbirine değdiğinde kısa devre meydana gelir. Kısa devre aşındırılan iş parçası parçacıklarının takımla iş parçası arasında temas sağlayacak bir köprü oluşturmalarıyla gerçekleşir.

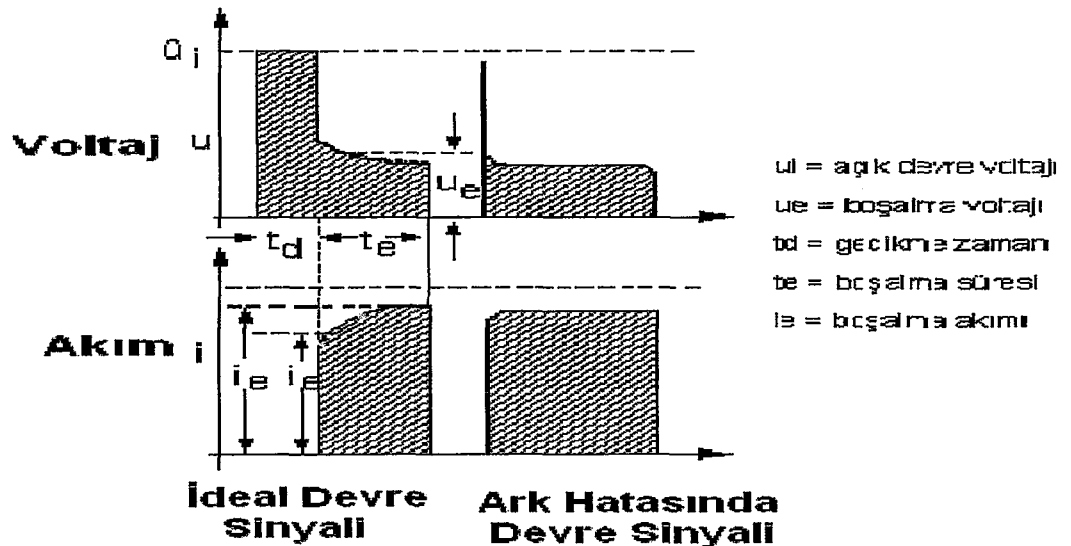
Kısa devre oluşumuyla boşalma akımı artar, boşalma voltajı ise çok küçük değerlere düşer. Bu durum yüzeyde hasar oluşumuna ve malzeme kaldırma oranının düşmesine yol açar.



ŞEKİL 3.17 : Kısa Devre Hatası ve İdeal Boşalma [14]

3.4.3. Ark Hatası

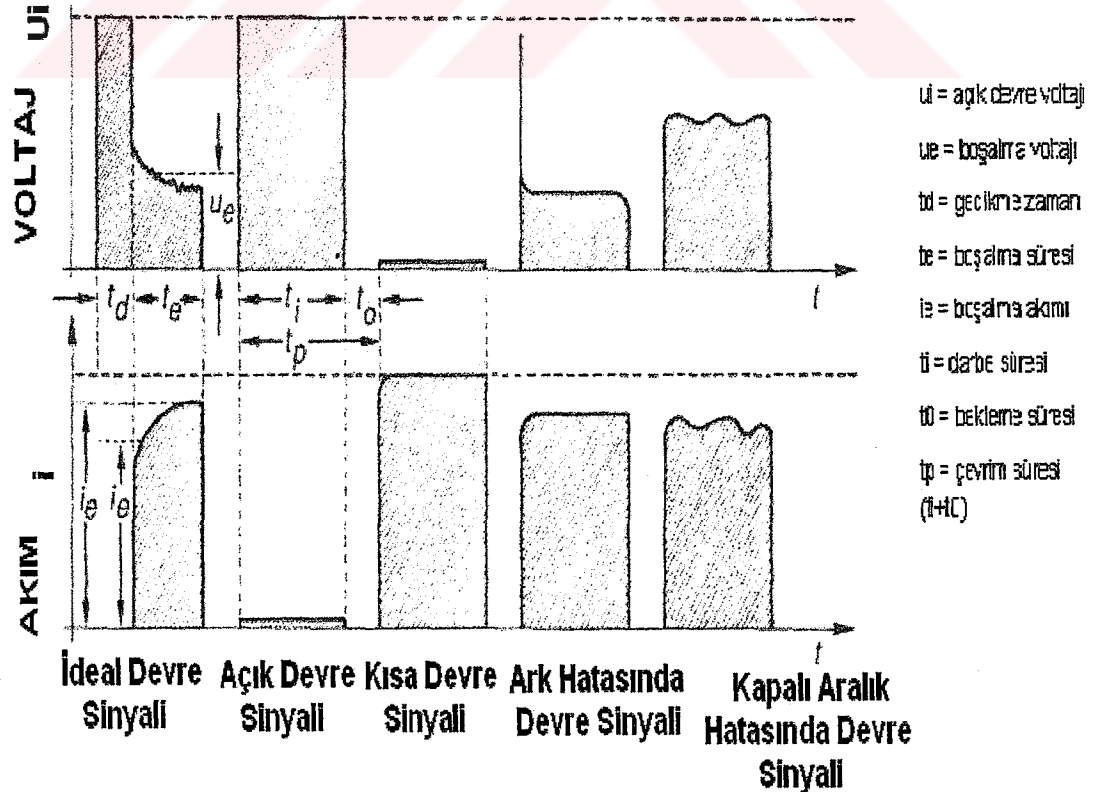
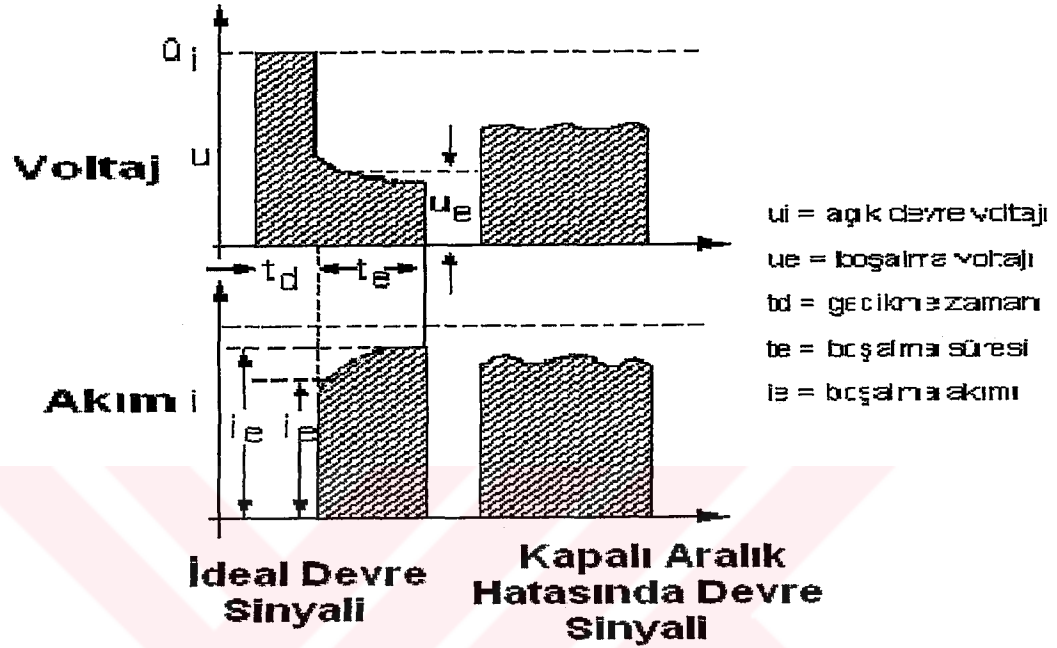
Ark hatası boşalma sonrasında kaldırılan malzemelerin yetersiz dielektrik sıvı sirkülasyonu sebebiyle boşalma bölgesinde kalmaları sonucu meydana gelen bir hatadır. İşleme bölgesinde kalan parçacıklar sebebiyle bu bölgedeki elektriksel alan yoğunluğunda bir artış olur ve boşalım kanalı dielektrik sıvıyla kaplanıp deiyonize olması gerekirken aniden bir ark meydana gelir. Ark oluşumu takıma ve iş parçasına büyük zarar verir.



ŞEKİL 3.18 : Ark Hatası ve İdeal Boşalma [14]

3.4.4. Kapalı Aralık Hatası

Kapalı ark hatasında işleme aralığındaki kirlilik öyle bir seviyeye gelmiştir ki boşalma sırasında malzemenin buharlaştırılması mümkün olmamaktadır. Ayrıca boşalım sırasında oluşan iletken köprü iş parçasına hasar verir.



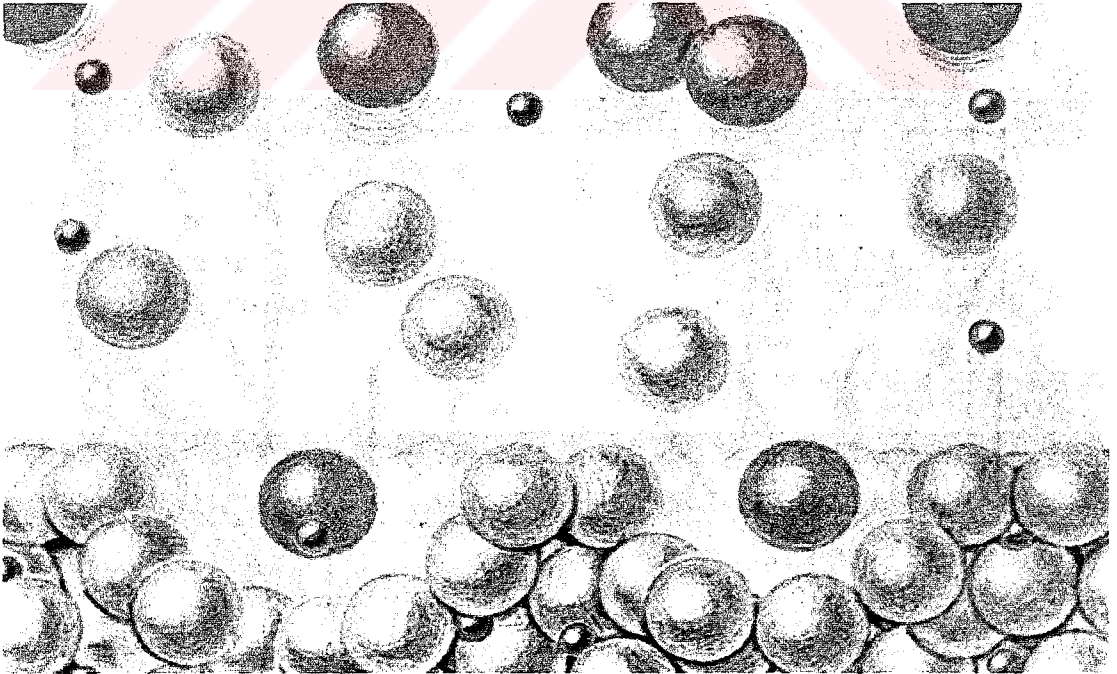
3.5. Malzeme Kaldırılması ve Aşınma Mekanizmaları

Konvansiyonel işleme yöntemlerinde olduğu gibi elektroerozyon yönteminde de malzeme kaldırma oranı, işleme zamanı, takım aşınması miktarı ve yüzey kalitesi önemli işlem parametreleridir. Ancak yönteme özel olarak akım miktarı, elektriksel boşalma sinyal frekansı da malzeme kaldırma oranı açısından son derece önemlidir.

İş parçası yüzeyine çarpan iyonlar, metal parçacıklarının titreşmelerine ve sıcaklıklarının artmasına sebep olurlar. Benzer bir fenomen takım elektrot yüzeyinde de olur ancak kutuplamaya da bağlı olarak bombardımanı gerçekleştiren elektronlardır.

İyonlar, elektronlara oranla daha büyük kütleye sahip olduklarından iyonların iş parçası yüzeyinde yarattıkları ısı etki, elektronların takım elektrot yüzeyinde yarattıkları ısı etkiden daha büyüktür. Bu durum yine kutuplamaya da bağlı olarak elektrotun iş parçasına oranla daha az aşınmasının sebebini açıklamaktadır [13].

Ancak bu noktada önemli bir konu da iyonların ve elektronların çaptıkları yüzeylerde yarattıkları etkiler kadar iyonların ve elektronların bulundukları ortamdaki sayılarıdır. Söz konusu bu sayılar elektriksel boşalma sinyalinde yapılacak ayarlamayla değiştirilebilir.

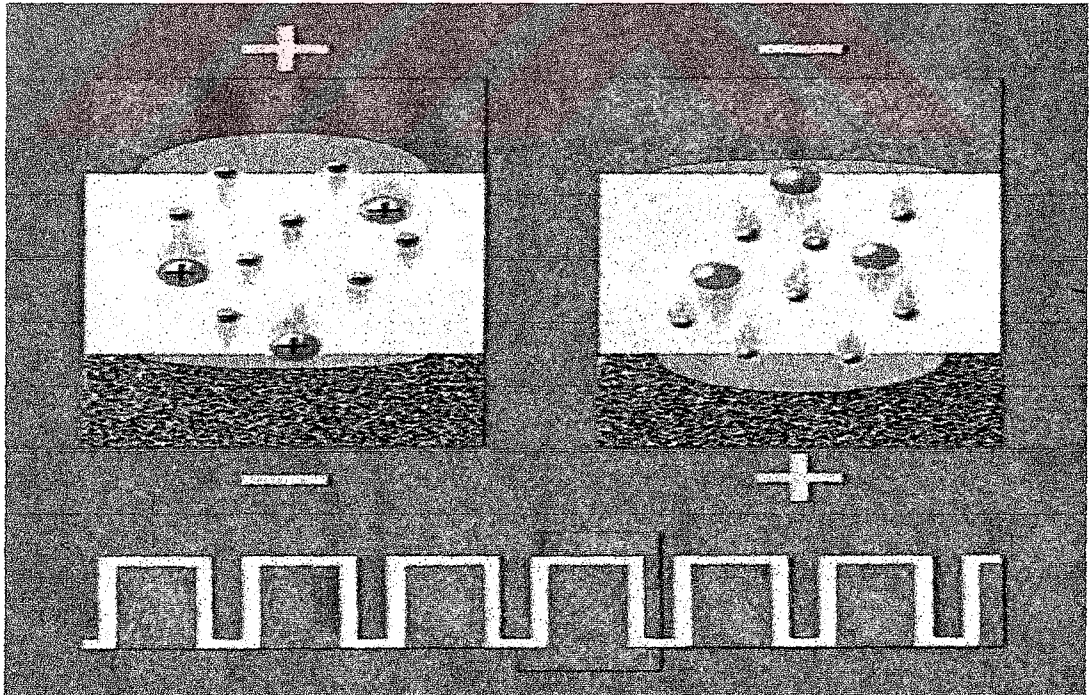


ŞEKİL 3.21 : İyonların ve Elektronların Çarptıkları Yüzeyde Yarattıkları Etki
(Kırmızı Renkli Parçacıklar: İyonlar, Mavi Renkli Parçacıklar: Elektronlar,
Beyaz Renkli Parçacıklar: Çarpılan Yüzeydeki Parçacıklar) [13]

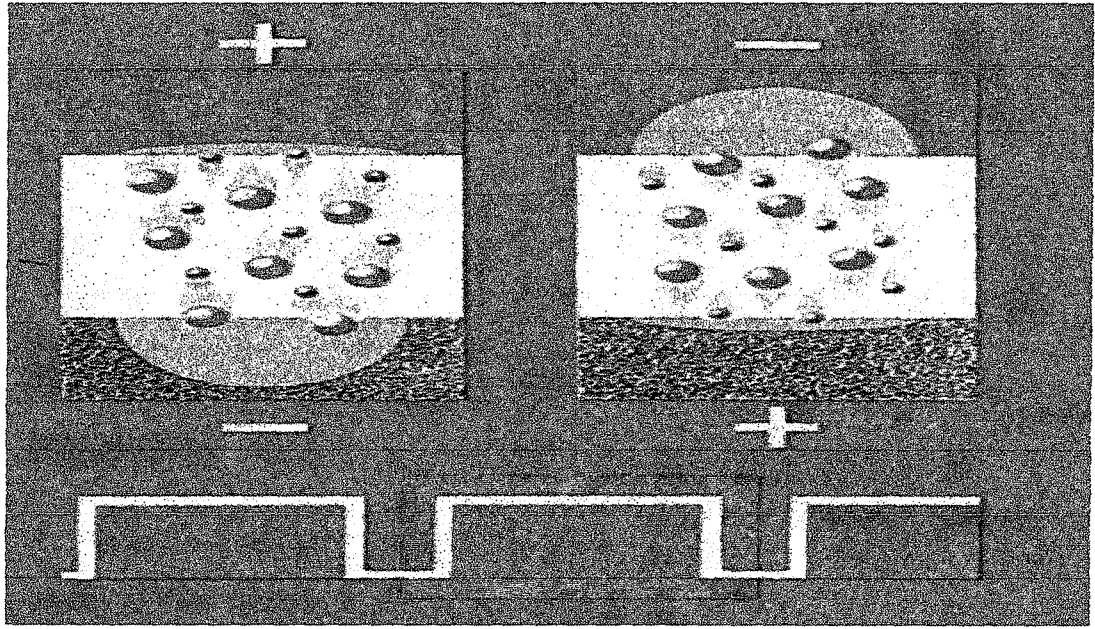
Yüksek frekans yani sık boşalima göre ayarlama yapıldığında dielektrik sıvının iyonlaşması için yeterli süre olmadığından boşalma sırasında ortamdaki iyon sayısı elektron sayısından az olacaktır ve uygun kutuplamayla (bu durum için takım elektrot "-", iş parçası ise "+" kutuplanarak) iş parçasından çok takım yüzeyinden ise az malzeme kaldırılması sağlanacaktır. Başka bir deyişle az aşınmayla çok malzeme kaldırılması sağlanır.

Diğer durumda ise elektriksel boşalım sinyali frekansı azaltılır yani boşalmanın aktif olduğu süre arttırılırsa, boşalma ortamında iyonlaşmaya yeterince süre tanındığından elektronlarla iyonlar aynı sayıda olacak bu durumda iyonların kütle etkisi ön plana çıkacaktır. Yapılacak uygun kutuplamayla (bu durum için takım "+", iş parçası ise "-" kutuplanarak) yine iş parçasından çok, takım yüzeyinden ise az malzeme kaldırılması gerçekleştirilmiş olacaktır.

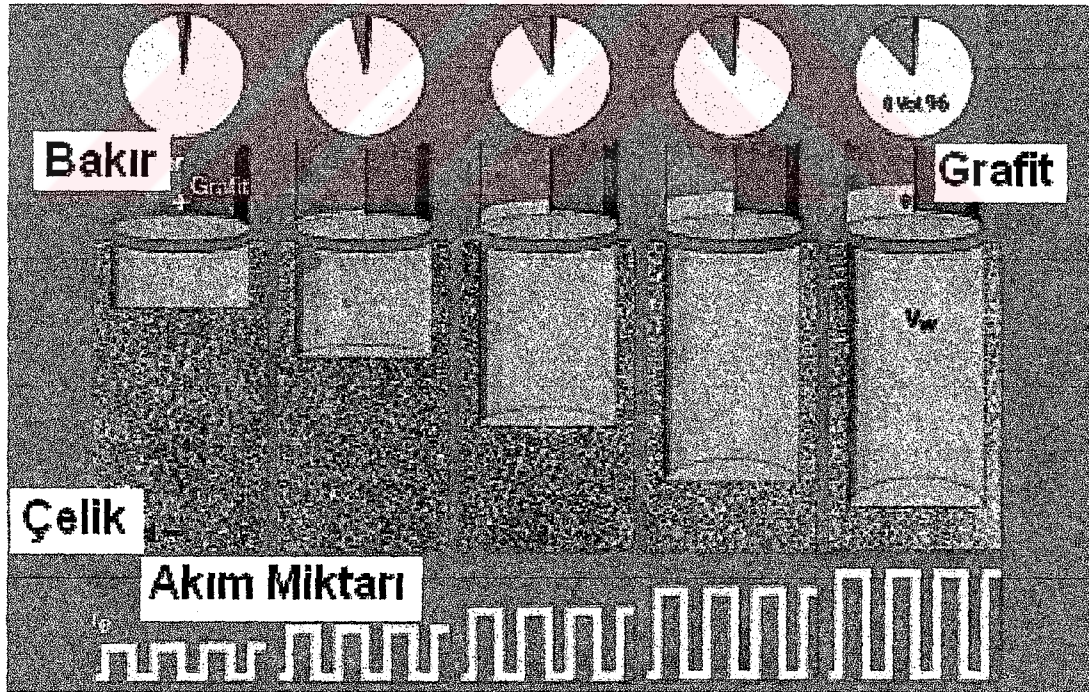
Söz konusu iki durumda da elektriksel boşalma sinyali frekansının ve kutuplamanın aşınma ve kaldırılan malzeme miktarı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Ancak boşalma akımı sabit tutulmuştur. Eğer işlemde söz konusu frekans sabit tutulur ve boşalma akımı arttırılırsa kaldırılan malzeme miktarı artar, ancak kullanılan takım malzemesine de bağlı olarak (Örneğin düşük ergime sıcaklığı sebebiyle bakırda grafitten daha fazla) takım aşınması da artar.



ŞEKİL 3.22 : Yüksek Frekansta ve Sabit Boşalma Akımında Kutuplamaya Göre Elektronların ve İyonların Sayıları ve Çarptıkları Yüzeyde Yarattıkları Etkiler (Büyük Parçacıklar: İyonlar, Küçük Parçacıklar: Elektronlar, Üst Parça: Takım, Alt Parça: İş Parçası) [13]

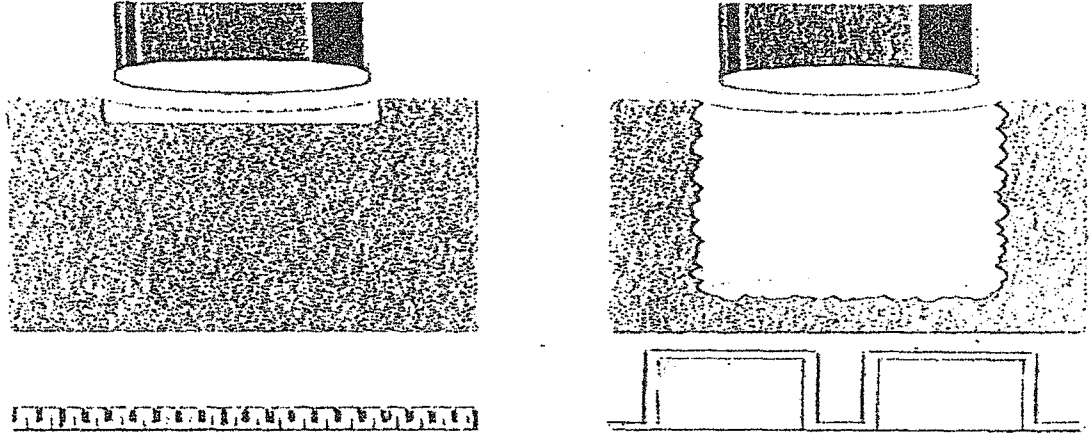


ŞEKİL 3.23 : Düşük Frekansta ve Sabit Boşalma Akımında Kutuplamaya Göre Elektronların ve İyonların Sayıları ve Çarptıkları Yüzeyde Yaratılan Etkiler (Büyük Parçacıklar: İyonlar, Küçük Parçacıklar: Elektronlar, Üst Parça: Takım, Alt Parça: İş Parçası) [13]



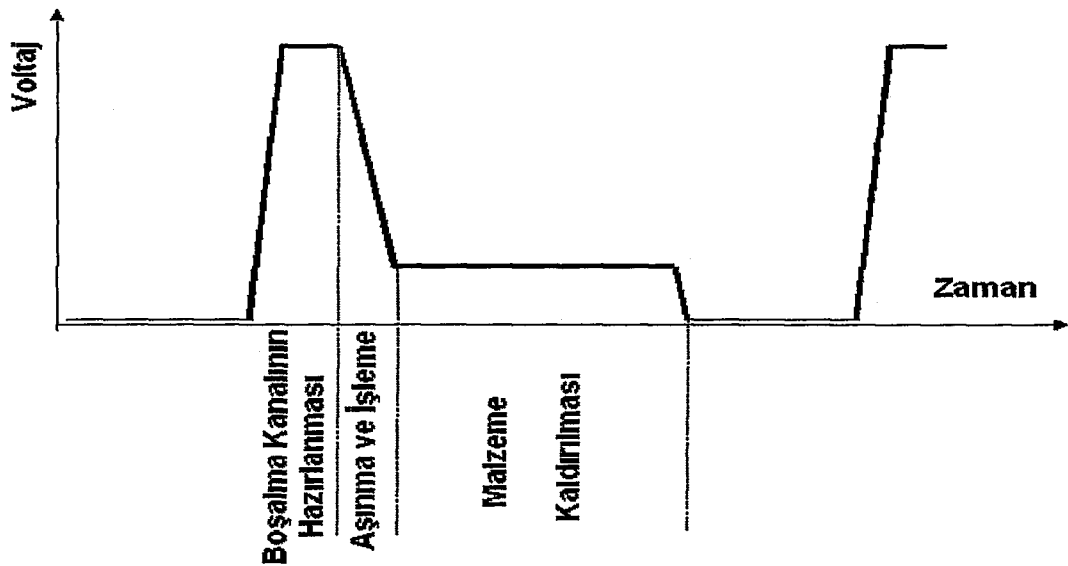
ŞEKİL 3.24 : Sabit Frekansta ve Artan Boşalma Akımında Farklı Takım Malzemelerinin Aşınma Miktarı Değişimi ve Çelik İş Parçasından Kaldırılan Malzeme Miktarı Değişimi (Büyük Parçacıklar: İyonlar, Küçük Parçacıklar: Elektronlar, Üst Parça: Takım, Alt Parça: İş Parçası) [13]

Artan akım malzeme kaldırma oranını artırır. Ancak takım aşınmasını artırırken işlenen yüzey kalitesini de düşürür.



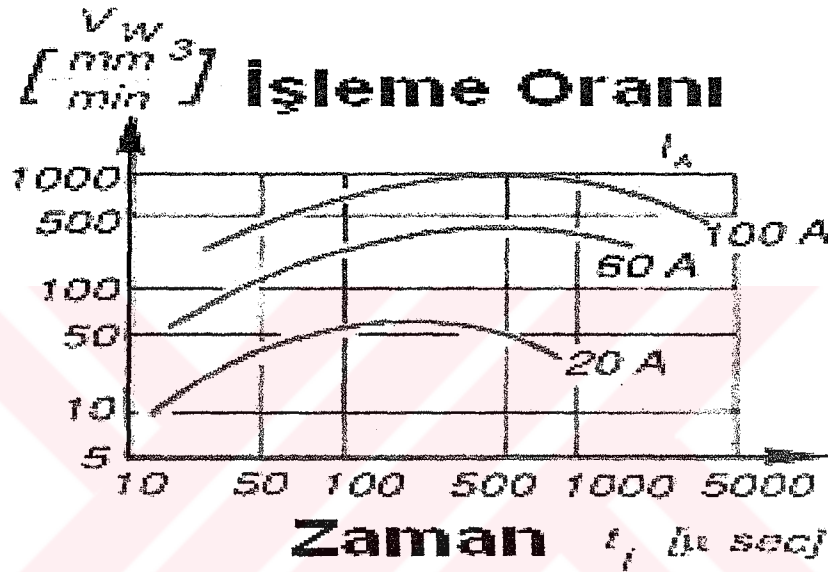
ŞEKİL 3.25 : Düşük ve Alçak Frekansta Malzeme Kaldırma Miktarının ve İşlenen Yüzey Kalitesinin Değişimi

Elektriksel boşalmanın aktif olduğu süre kadar, aktif sinyaller arasında verilen aralık süresi de proses üzerinde önemli rol oynar. Dielektrik sıvının kesilen yüzeyi temizlediği, soğuttuğu, elektrik devresinde ise gerekli enerjinin depolandığı bu sürenin kısa tutulması yüksek malzeme kaldırma oranı ve minimum aşınma için tercih edilir. Ancak şartlara göre değişken olarak belirlenen aralık süresi, limit aralık süresinin altında bir değer seçilirse sistem kararsız hale gelir ve malzeme kaldırma oranı düşerken aşınma miktarı artar.

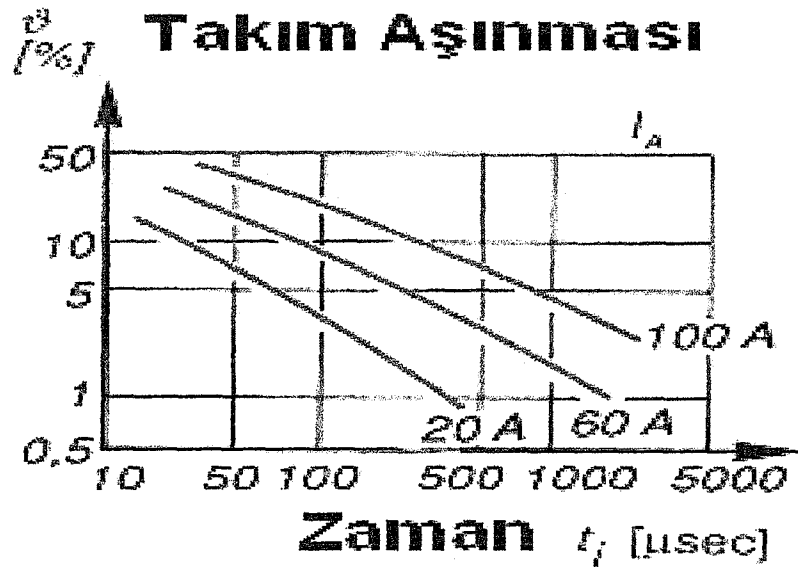


ŞEKİL 3.26 : Çevrim Sırasındaki Evrelerin Voltaj-Zaman Grafiğinde Gösterilmesi

Yukarıdaki şekilde esas malzeme kaldırma evresinden önce oluşan hem aşınma hem de işlemenin olduğu evrede, voltaj düşüşündeki eğimi etkileyen faktörler, kullanılan dielektrik sıvı kalitesi, elektriksel boşalma frekansı ve tezgah karakteristikleridir. Minimum aşınma için mümkün olduğu kadar dik olması istenen eğim için özellikle frekans yüksek seçilmelidir. Ancak genel prosesin tamamında geçerli olduğu gibi bu konuda da optimizasyon önem kazanmaktadır. Şöyle ki, frekans limitlerin dışında seçilecek olursa bu kez de uygun elektriksel boşalma için yeterli enerji depolanması sağlanamayabilir.



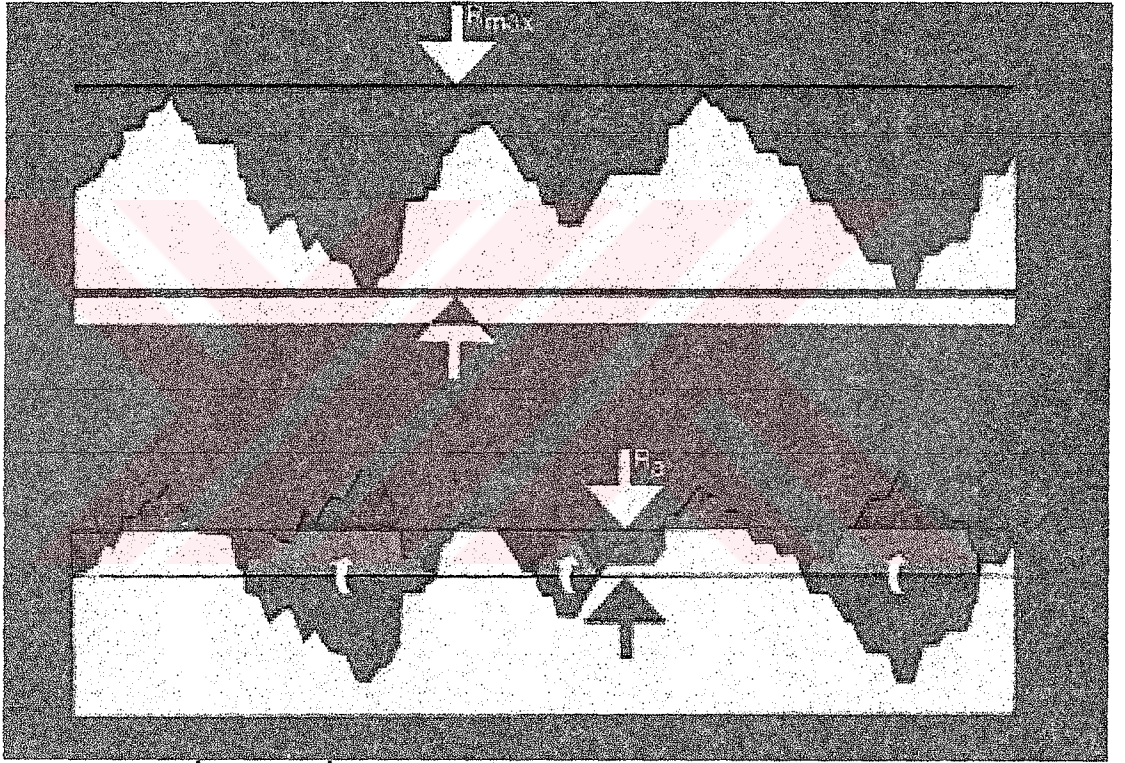
ŞEKİL 3.27 : Farklı Akım Değerleri İçin Malzeme İşleme Oranının Zamanla Değişimi Grafiği [14]



ŞEKİL 3.28 : Farklı Akım Değerleri İçin Takım Aşınmasının Zamanla Değişimi Grafiği [14]

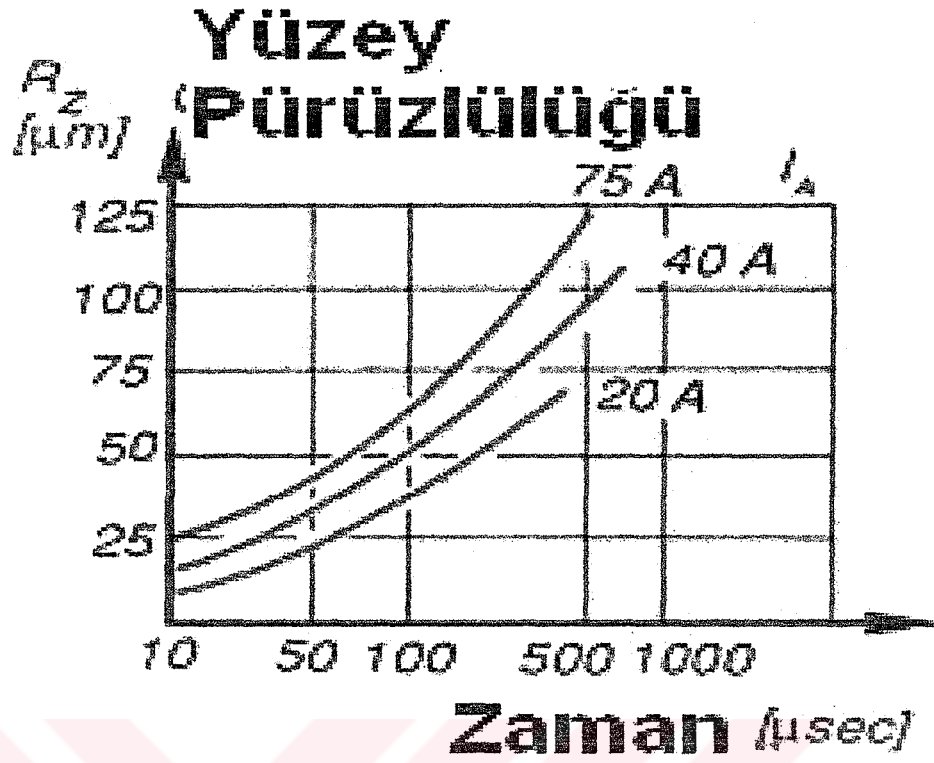
3.6. Elektroerozyonda Yüzey Pürüzlülüğü-İşlem Parametreleri İlişkisi

Her işleme yönteminde olduğu gibi elektroerozyonda da işlenen yüzeylerde mutlaka yüzeyde ondülasyonlar meydana gelir. İşleme başlamadan önce öncelikli olarak işleme süresi, yüzey kalitesi, takım aşınması gibi kriterlerden hangisinin kullanıcı için daha önemli olduğuna karar verilmeli işleme değerleri seçilirken o kriter öncelikli tutulmalıdır. İşlenen yüzeydeki pürüzlülük R_{max} ve R_a şeklinde gösterilir. Bunlardan R_{max} pürüzlü yüzeydeki en üst ve en alt noktalar arasındaki farkı, başka bir deyişle yüzeydeki maksimum pürüzlülük oranını gösterir. R_a ise yüzeydeki pürüzlülük yüksekliklerinin aritmetik ortalamasını göstermektedir.

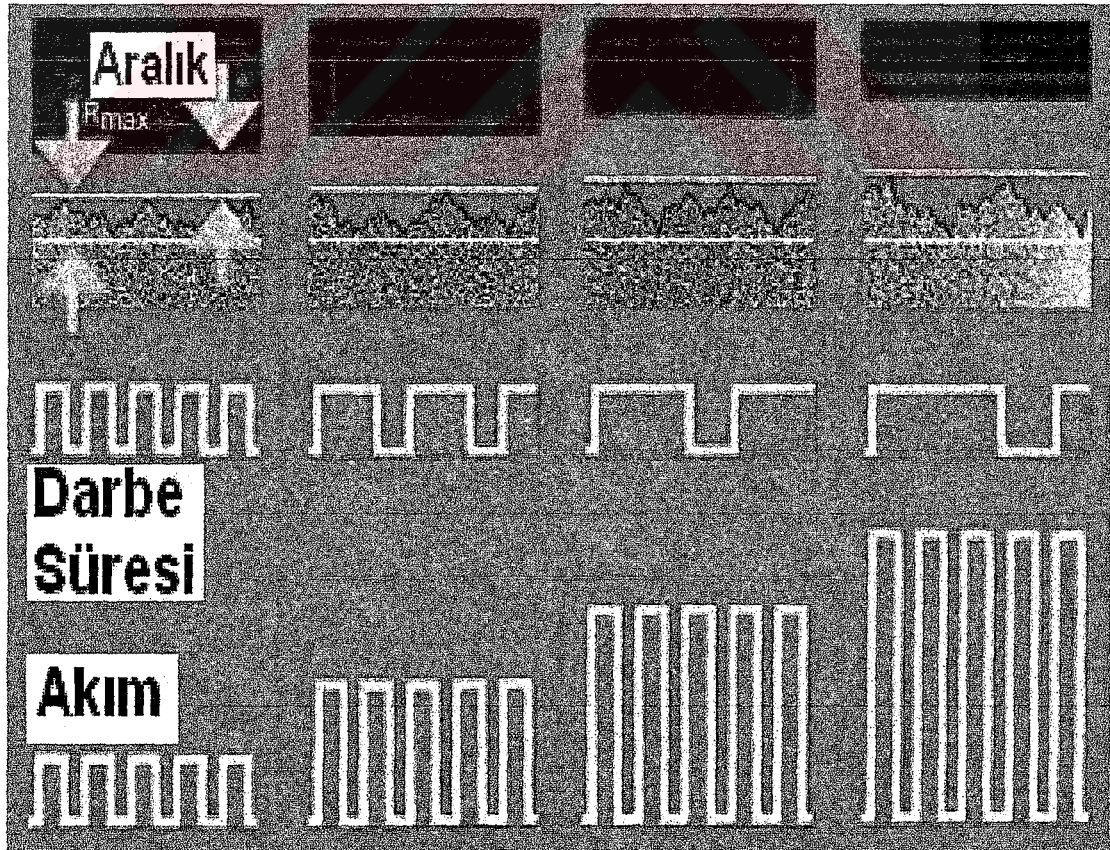


ŞEKİL 3.29 : İşlenen Yüzeydeki Pürüzlülük ve Sembolleri [11]

İşleme sırasında boşalma enerjisini darbe akımı miktarı temsil etmektedir. Darbe akımı miktarı kadar darbe akımının aktif olduğu darbe süresinin uzunluğu da çok önemlidir. Çünkü darbe süresi arttıkça her bir darbe sinyalinin malzeme işlenmesi için taşıdığı enerji miktarı da artmaktadır. Darbe süresi ve darbe akımı değerleri, yüzey pürüzlülüğüyle ters orantılıdır. Bu durumda belirli bir yüzey pürüzlülüğü değerine maksimum malzeme kaldırma oranı, minimum işleme süresi ve minimum takım aşınmasıyla ulaşılması için işleme evrelerinde farklı işlem parametreleri seçilmelidir.



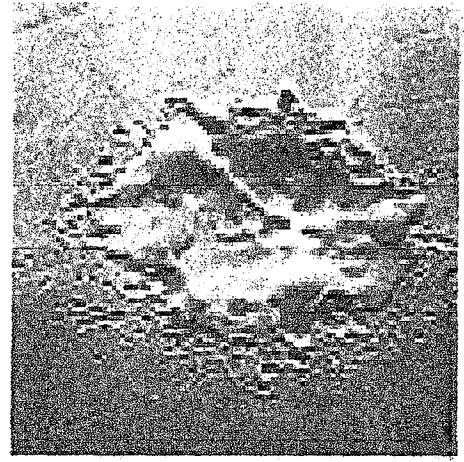
ŞEKİL 3.30 : Farklı Darbe Akımı Değerleri İçin Yüzey Pürüzlülüğünün Zamanla Değişimi [14]



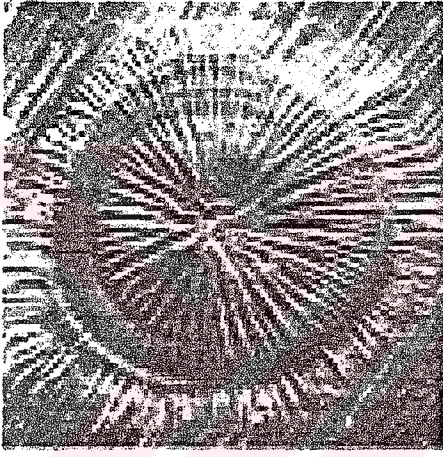
ŞEKİL 3.31 : Farklı Darbe Akımı Değerleri İçin Yüzey Pürüzlülüğünün Zamanla Değişimi [13]



Kurşun (Pb)



Demir (Fe)



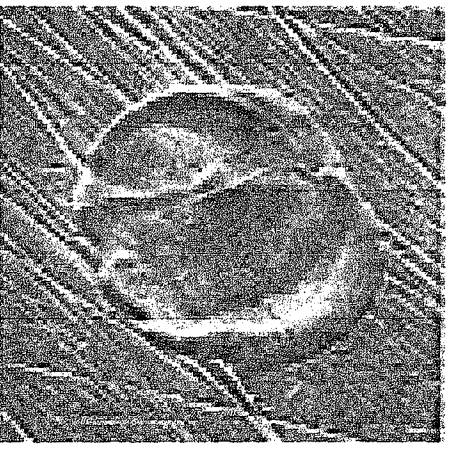
Zirkonyum (Zr)



Titanyum (Ti)



Bakır (Cu)



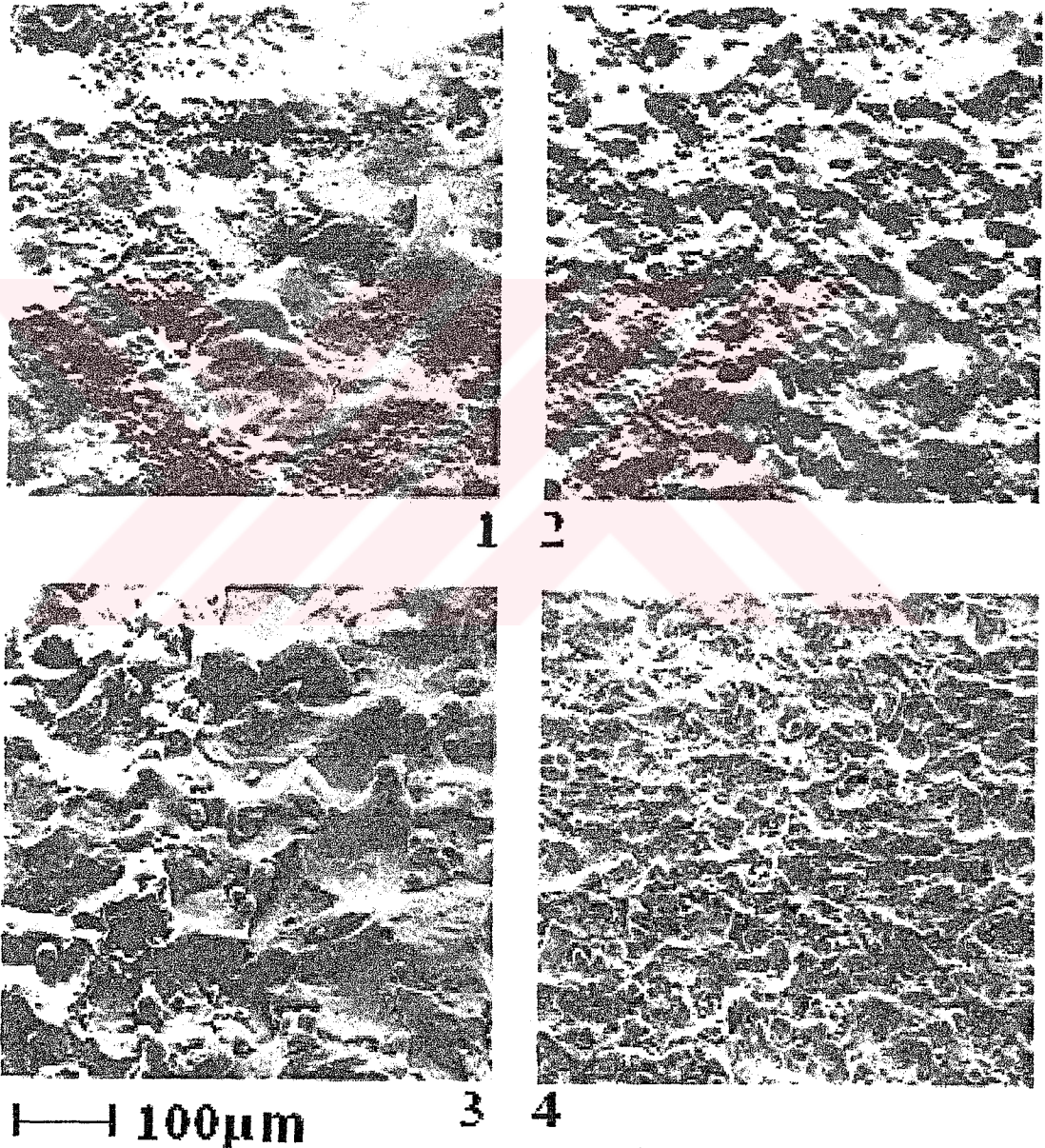
Tungsten (W)

ŞEKİL 3.32 : Farklı Malzemelere Ait Elektroerozyonla İşlenmiş Yüzey Görünümleri

(Deney Koşulları: Darbe Akımı=20A, Darbe Voltajı=100V, Darbe Sinyali=100µs,

Kullanılan Takım Elektrot: Çelik) [13]

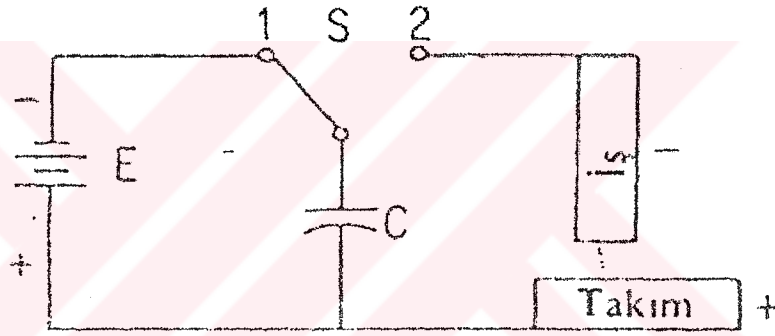
Aşağıdaki şekilde yapılan bir elektroerozyon deneyi ve sonuçları verilmiştir. Bu deneye ait sonuçlar, daha önce sunulan bilgilerle kıyaslanacak olursa: 1. ve 2. deneylerde aynı kutuplamaya rağmen düşük elektroerozyon enerjisiyle yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, 2. ve 3. deneylerde ise aynı erozyon enerjisi ancak farklı kutuplamayla yüzey pürüzlülüğünün takımın "-" kutuplanmasıyla kaldırılan malzeme oranının artması sonucu yükseldiği, 3. ve 4. deneylerde ise yine "-" takım kutuplamasıyla ve düşürülen erozyon enerjisiyle yüzey pürüzlülüğünün azaldığı sonuçlarına varılabilir.



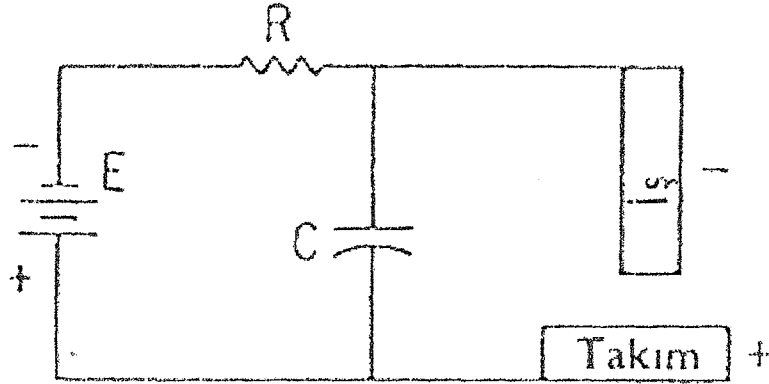
ŞEKİL 3.33 : TiAl6V4 Alaşımının Elektroerozyonla İşlenmiş Yüzey Görünümleri
(Deney Koşulları: 1) Erozyon Enerjisi= 40mJ ; Takım=Cu (+) ; $R_a=4,3\mu m$, 2) Erozyon Enerjisi= 5mJ ; Takım=Cu (+) ; $R_a=2,04\mu m$, 3) Erozyon Enerjisi= 5mJ ; Takım=Cu (-) ; $R_a=7,32\mu m$, 4) Erozyon Enerjisi= 0,75mJ ; Takım=Cu (-) ; $R_a=2,99\mu m$) [13]

3.7. Elektroerozyonda Güç Devreleri

Elektroerozyon yönteminde güç kaynağı devrelerinin gelişimiyle yöntemde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. İlk elektroerozyon tezgahlarındaki güç kaynağı devrelerinde kullanılan mekanik bir anahtarla enerji depolanması ve deşarjı sağlanıyordu. Anahtar ilk konumundayken doğru akım kaynağı tarafından şarj edilen kondansatör, anahtar diğer konuma alınarak takıma ve iş parçasına bağlanıyor, eğer takımla iş parçası aralığı da uygunsa enerji boşalması gerçekleşerek depolanan enerjinin malzeme kaldırılmasında kullanılması sağlanıyordu. Bu devrelerde her darbeye kaldırılan malzeme miktarı kondansatöre bağlı bir parametreydi. Kondansatör sığa değerleri ise $0,01-100\mu F$ arasında değişmekteydi. Söz konusu devrede yaşanan temel sorun, yüksek frekanslarda çalışılmak istendiğinde anahtarda yaşanan mekanik problemlerdi.



a) Temel Devre



b) R-C Devresi

ŞEKİL 3.34 : Elektroerozyon Devreleri-1

Bu durum devreye anahtar yerine bir direnç eklenmesiyle çözülmüştür. Geliştirilmiş devrede kondansatör güç kaynağı tarafından, eklenen direnç üzerinden şarj edilmekteydi.

Kondansatör üzerindeki gerilim yeterli seviyeye geldiğinde, kondansatör aniden takım-iş parçası aralığında boşalır ve sonra yeniden doldurularak çevrim devam ederdi. Ana elektrot malzemesi olarak bakırın kullanıldığı bu devreye “RC” devresi ya da bu çalışmada daha önce de sözü edilen ve yöntemin geliştirilmesinde büyük katkıları olan rus bilim adamı Lazarenko tarafından ilk kez kullanıldığından “Rus Devresi” de denilmektedir.

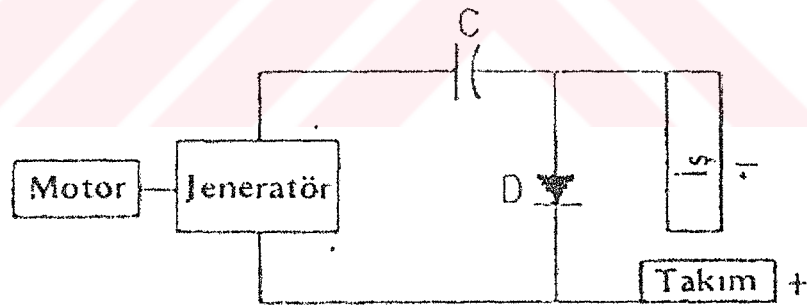
“RC” devresi basit, ucuz ve dayanıklı olması sebebiyle sık tercih edilse de malzeme kaldırma kabiliyeti sınırlıdır. Boşalma akımının 4-5 A'den büyük olduğu değerlerde devre kararsız ve düzensiz bir hal alır. Bu tip devre kullanımında işleme hızı da düşüktür. Bunun sebebi kondansatörün dolması için gerekli zamanın yüksek frekanslarla çalışılmasına engel olmasıdır. Ekonomikliği ve basitliği sebebiyle ilk kullanımından itibaren fazla geliştirilmeyen bu tip devrelerin halen kullanıldığı basit tezgahlar bulunmaktadır.

Malzeme kaldırma hızlarının artırılması için yapılan çalışmalar neticesinde, gerekli gücü karşılayabilmek için devrelerde motor-jeneratör kombinasyonu kullanımına başlanmıştır. Böylece asimetrik çıkış dalgaları oluşturularak, doğru akım güç kaynaklarına eşdeğer ancak daha üstün bir sonuç elde edilmiştir. Genellikle dönel impuls jeneratörleri (RIG: Rotary Impuls Generators) olarak bilinen bu cihazlarla yapılan devrelemede, kondansatör yarım devrede bir diot üzerinden şarj edilir. Bunun ardından jeneratörün toplam gerilimi ve kondansatörde şarj edilen gerilim işleme aralığına boşaltılır. Bu devrede tek yönlü pulsar elde etmek için bir diot ve standart bir yüksek frekans alternatif akım jeneratörü kullanılır. RIG ile çok yüksek hızlarda metal kaldırılır, ancak işlem sırasında kaba bir yüzey elde edilir. İşleme frekansı ayarlama yapılamadığından dolayısıyla işlenen yüzey kalitesi iyileştirilemez.

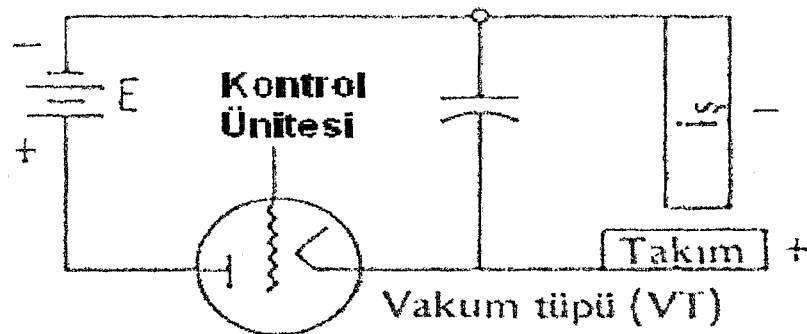
Sözü edilen 3 devre tipinde de boşalma frekansının ve her sinyaldeki enerji miktarının belirlenmesindeki temel faktör anahtar ünitesidir. Bu basit devrelerde, boşalma aralığında olası bir kısa devre durumunda akımı kesebilme kabiliyeti eksikliği proste bir kontrol eksikliği yaratmaktaydı. Kısa devre halinin bozulabilmesi için yapılan takımın iş parçasından mekanik olarak uzaklaştırılmasıydı ve bu durum çok zaman aldığından kısa devre halinde her an yanma ve erime tehlikesi söz konusuydu. Akımın gerektiğinde hızla ve elektronik olarak kesilmesi ihtiyacı sonucu, anahtar ünitesi yerine vakum tüpleri ve transistörler içeren devreler geliştirilmiştir.

Yeni geliştirilen bu devre tipine kontrollü darbe devreleri (CPC: Controlled Pulse Circuits) denmektedir. Akımın devreye alınmasında ve kesilmesinde elektronik anahtar kullanılması, CPC devrelerine yüksek malzeme kaldırma hızı ve iyileştirilmiş takım aşınması gibi özellikler kazandırmıştır. İlk vakum tüpü devrelerinde "RC" devrelerindeki direncin yerini, paralel bağlanmış bir vakum tüpü grubu almıştır. Doğru olarak kontrol edildiğinde bu tüp grubu değişken bir direnç etkisi göstermektedir.

Vakum tüpü grubu elemanlarından olan ızgaralar bir anahtar ünitesi görevi görürler. Bir elektronik kontrol ünitesine bağlı olan bu ızgaralar, kondansatörü doldurmak için tüpleri devreye sokarlar veya aralıktaki kısa devre meydana geldiğinde akımı keserler. Aralıktan akan akım yine kondansatör tarafından sağlanır. Aralıktan akım akarken tüpler devreden çıkarlar. Devrede akım akmaya başladığı anda tüplerden yüksek bir direnç (1000Ω ve üzeri) oluşur. Böylece tüpler çok az akım geçirirler. Aralıktan akım akışı kesildiğinde, kontrol ünitesi ızgara gerilimini ızgara direncini değiştirmek suretiyle düşürür. Vakum tüpleri böylece düşük dirençli, yüksek iletkenliğe sahip elemanlar haline dönüşerek kondansatörü bir sonraki çevrim için doldurmaya başlarlar. Darbeli devreler sınıfına giren bu devrelerin kullanımıyla malzeme kaldırma oranı önemli ölçüde artmıştır.



a) RIG Devresi



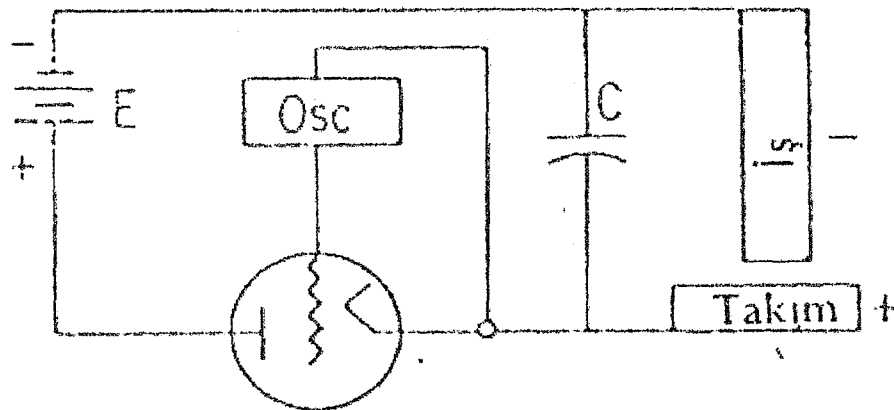
b) Vakum Tüpü Devresi

ŞEKİL 3.35 : Elektroerozyon Devreleri-2

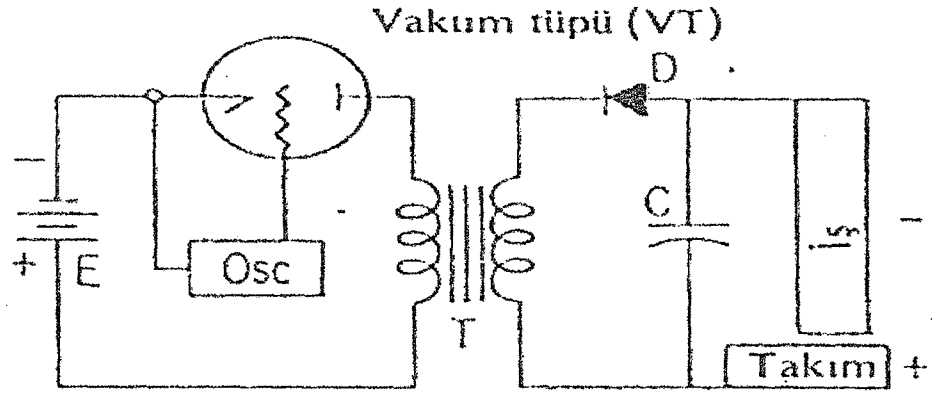
Elektrik devrelerinin gelişiminde bir sonraki aşama olarak, kontrol ünitesi yerine devrelerde bir sabit frekans osilatörü kullanımıyla devrenin çok daha basitleştiği ve çalışma stabilitesinin de yükseldiği görülmüştür. Bu gelişmeye sebep olarak ise, tüp-izgara kontrolünün kısa devre halinde akım kesilmesi dışında gerekli olmadığının ve sadece aralık akımının yeterli yüksek devirli hızlarda anahtar ünitesi tarafından periyodik olarak kesilmesini sağlamanın yeterliliğinin anlaşılmasıdır. Elektroerozyonun kullanılabilirliğinin anlaşılmasıyla malzeme kaldırma oranının iyileştirici çalışmalara başlanmıştır. Malzeme kaldırma hızı, ortalama aralık akımıyla orantılı olduğundan yüksek akımlı güç kaynakları çok sayıda vakum tüpü kullanımını gerekli kılar. Vakum tüpleri yüksek gerilimli düşük akımlı cihazlar olduğundan, ark aralığı ise nispeten daha düşük gerilimlerde yüksek akım geçirdiğinden bu ikisi arasında bir elektriksel karakteristik çatışması bulunmaktadır. Bu uyumsuzluk probleminin çözümü için 2 çözüm bulunmuştur:

1. Transformatörün primer kısmında yüksek gerilim ve düşük akımda çok verimli çalışabilen az sayıda vakum tüpü kullanmak ve düşük gerilim ve yüksek akım sağlanması için ark aralığını transformatörün sekonder kısmına bağlamak,
2. Darbeli tüp devreleri yerine düşük voltajlı, normal aralık çalışma koşullarında yüksek verimlilikle çalışan bir transistör kullanmak.

Vakum tüpü-transformatör devrelerinde, vakum tüplerince seyiren bir doğru akımla beslenen transformatör sekonderde alternatif akım akmasına neden olurken, diot aralığa sabit polarite sağlamak amacıyla kullanılır. Transformatör kullanımı, vakum tüpü sayısını önemli ölçüde azaltsa da yüksek frekanslarda çalışmaya sınırlılık getirdiğinden bu şekilde kullanımı sakıncalıdır.

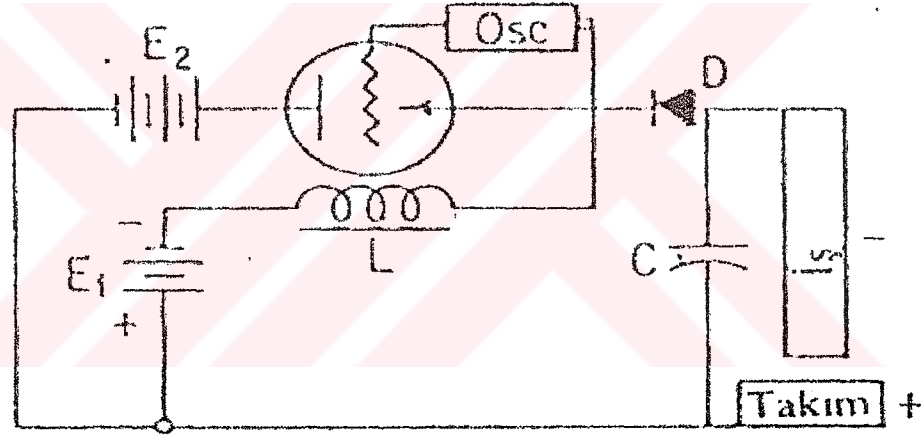


ŞEKİL 3.36 : Elektroerozyon Devrelerinde Osilatörlü Vakum Tüpü Devresi

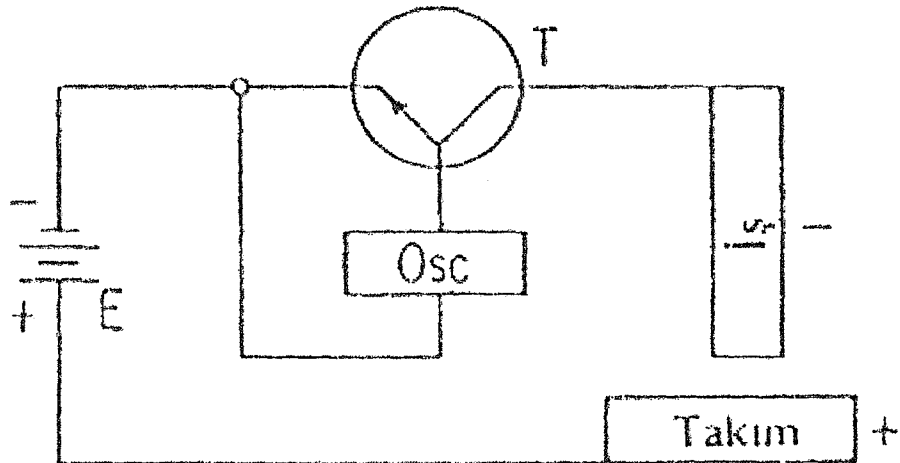


ŞEKİL 3.37 : Elektroerozyon Devrelerinde Vakum Tüpü-Transformatör Devresi

Osilatörlü vakum tüpü devresi uygulamasının bir versiyonu da tüp tipi bir güç kaynağı kullanımıdır. Devrenin tüp darbe kısmı frekansı belirleyen bir anahtar ünitesi görevi görür. Aralıktaki akım akışı ise iki güç kaynağının kombinasyonu tarafından sağlanır.



a) Vakum Tüpü (2 Güç Kaynağı)



b) Transistör Devresi

ŞEKİL 3.38 : Elektroerozyon Devreleri-3

Anahtar ünitesi olarak fazla sayıda vakum tüpü kullanımına bir çözüm olarak geliştirilen bir devre de vakum tüpleri yerine düşük gerilim ve yüksek akımlarda çalışan transistörün kullanıldığı devredir. Bu devrede anahtar, seçilen zorlanmış frekanslarda bir osilatör tarafından kumanda edilmektedir. Ancak bu devre aralık ile paralel bağlı olan bir kondansatör kullanımını gerektirmez .Osilatör aynı zamanda işleme aralığı şartlarıyla da kumanda edilmekte ve kısa devre halinde transistör devreden çıkarılmaktadır.

DEVRE TİPİ	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
TEMEL	BASİTLİK	DÜŞÜK FREKANS
	DÜŞÜK MALİYET	YÜKSEK İŞLEME HIZLARINDA KABA YÜZEY
RC DEVRESİ	BASİTLİK	PÜRÜZSÜZ YÜZEYLER İÇİN DÜŞÜK İŞLEME HIZLARI
	EMNİYET	
	YÜKSEK FREKANS	
	DÜŞÜK MALİYET	
RIG DEVRESİ	YÜKSEK MALZEME KALDIRMAYA UYGUNLUK	KABA İŞLEME YÜZEYLERİ
KONTROLLÜ DARBE DEVRESİ (VAKUM TÜPÜ)	YÜKSEK MALZEME KALDIRMA HIZLARI	ARK ARALIĞI İLE UYGUNSUZ KARAKTERİSTİK
	İYİLEŞTİRİLMİŞ TAKIM AŞINMASI	YARDIMCI GÜÇ KAYNAĞI VE TRANSFORMATÖR İHTİYACI
KONTROLLÜ DARBE-TRANSİSTÖR DEVRESİ	VAKUM TÜPÜ AVANTAJLARI + YÜKSEK VERİMLİLİK	

TABLO 3.1 : Elektroerozyon Devreleri ve Karşılaştırmaları

3.8. Elektroerozyonda Elektrotlar

Elektrotlar, elektroerozyonda elektriksel enerjiyi iş parçasına nakleden elemanlardır. Dalma erozyonda, iş parçasında verilmesi istenen şeklin negatifi olarak işlenen takım elektrotun şekli iş parçası yüzeyine projekte edilir. Tel erozyonda ise sürekli olarak bir makaradan beslenen tel şeklinde elektrotlar kullanılır. Dalma erozyonda takım aşınması bulunurken ve sadece iş parçasındaki kör delikler işlenebilirken, tel erozyonda tek kullanımlık tel şeklinde elektrot bulunur ve bu elektrotlarla iş parçasının tüm kesitinde yer alan profiller işlenebilir. Elektroerozyon yönteminde iş parçalarında olduğu gibi takım elektrotlarda da istenen başlıca özellik elektrik iletkenliğidir. Elektrot malzemelerinde çeşitlilik fazladır. En çok kullanılan elektrot malzemeleri grafit, bakır, bakır tungsten, gümüş tungsten, pirinç, karbit ve çinko alaşımlarıdır.

Grafit Elektrotlar: Sık kullanılan elektrot malzemelerinden biri de grafitir. Tane büyüklüğü bazı düşük yoğunluklu grafitlerde 0,2mm büyüklüğünde olabildiği gibi, yüksek yoğunluklu grafitlere de 0,0127mm'ye dek düşebilir. Kaba taneli düşük yoğunluklu grafitler için düşük olan maliyet, ince taneli yüksek yoğunluklu grafitler için yüksektir.

Kaba taneli grafitler ince işçilik gerektirmeyen büyük hacimli elektroerozyon işlemlerinde, ince taneli yüksek yoğunluklu grafitler ise yüksek sertlik ve dayanımları nedeniyle ince işçilik ve hassasiyet gerektiren işlemlerde kullanılır. Genelde çelik malzeme işlenmesinde kullanılan grafit elektrotlar, metal elektrotlarla karşılaştırıldıklarında birim akımla daha yüksek bir talaş kaldırma hızına sahiptir. Grafit elektrot kullanımının bazı avantajları aşağıda sunulmuştur:

- Termal şoktan etkilenmezler ve mekanik özelliklerini korurlar,
- Konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi kolaydır,
- Düşük yoğunluk ($1,6-1,85 \text{ g/cm}^3$) sebebiyle elektrotlar hafif olur,
- Ekonomiklik ve yüksek erime sıcaklığı (3600°C) önemli avantajlardır.

Sinterlenmiş bir malzeme olan grafit gözenekli bir yapıya sahiptir ve tane büyüklüğü arttıkça grafitin işlediği yüzeyin kalitesi de düşer. Dolayısıyla kaliteli bir işleme yüzeyi talebi olduğunda ince taneli grafitle işlenmesi daha uygundur. Grafit malzemeden elektrot yapımının bazı dezavantajları ise şunlardır:

- Aşındırıcı olduğundan tezgah kızaklarını ve diğer ekipmanları grafit tozlarından korunmalıdır,
- Kırılgan olmaları sebebiyle özellikle köşelerin işlenmesinde dikkat edilmelidir,
- Asitle aşındırılmaları mümkün değildir.

Bakır-Grafit Elektrotlar: Bakır alaşımları ve grafit, elektroerozyon işleminde elektrot olarak kullanılabilen malzemelerdendir. Bakır alaşımları içindeki ince taneli grafit, tungsten karbit malzemenin kaba ve son (bitirme) işleme işlemlerinde çok iyi sonuçlar verir. Bakır grafitler pahalı bir elektrot malzemesi olup, küçük boyutlarda imal edilirler.

Bakır Elektrotlar: Elektrot malzemesi olarak genelde iyi sonuçlar veren bakır, saf bakır ve elektrolitik bakır olarak kullanılır. Kolay işlenebilen bakır malzemede eğer taşlama da isteniyorsa taşın ağırlığına da bağlı olarak bazı sorunlar yaşanabilir. Bakır elektrotlar dövme veya soğuk şekil verme yöntemleriyle de imal edilebilirler. İyi bir yüzey oluşturan bakır elektrotların ince taneli cinsleri yüksek üretim kapasitelerinde düşük maliyetle parça işleyebilirler.

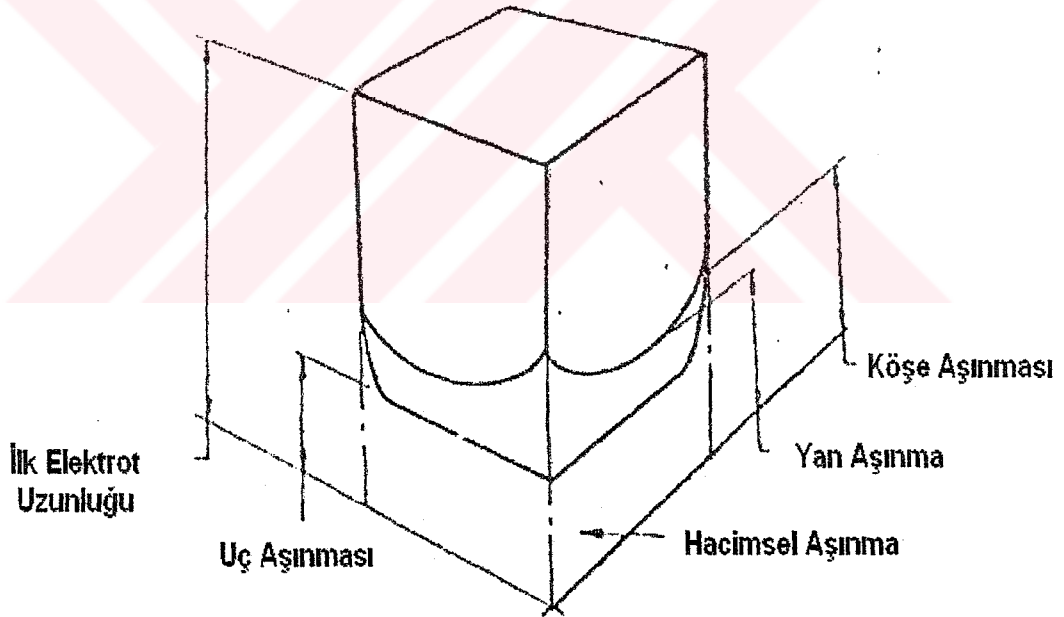
Pirinç Elektrotlar: Sık kullanılan elektrot malzemelerinden olan pirinç, kolay işlenebilen bir malzemedir. Yüksek aşınma hızı nedeniyle özellikle tungsten karbitin işlenmesinde pek tercih edilmez. İş parçası malzemesi çok sert olmadığı sürece iyi bir elektrot görevi yapabilir.

Bakır Tungsten: Bu malzeme genellikle ince detaylı ve yüksek hassasiyetin istendiği elektroerozyon işlemlerinde tercih edilir. İyi bir sertlik ve dayanıma sahip olduğundan ince detayların ve ince kesitlerin işlenmesinde grafit ve diğer elektrotlara oranla takım yüzeyinde daha az çatlama ve kırılma tehlikesi bulunur. Yüksek maliyetli olan bakır tungsten elektrotların işlenmesinde karbit takımların kullanımı uygundur. Yüksek miktarda (%70 kadar) tungsten içeren bakır tungsten elektrotların yoğunluğu ve sertliği yüksektir. İyi bir ısı ve elektrik iletkenlik özellikleri de bu tip elektrotlarda yüksektir.

Gümüş-Tungsten: Pahalı ve işlenmesi zor olan bu tip elektrot malzemelerin işlenmesinde karbit takımlar kullanılır. Pürüzsüz yüzey bitirme işlemlerinde, çok az elektrot aşınması istenen elektroerozyon uygulamalarında ve ince detaylar için kullanılır. İyi seviyede elektriksel iletkenliğe, yüksek yoğunluğa ve 94HB'lik sertliğe sahip olan gümüş tungsten malzeme çok küçük hacimlerde imal edilir.

3.9. Elektrotların İmali

Elektroerozyon işleminde, özellikle de dalma erozyonda toplam maliyetin % 80'ini elektrotlar oluşturmaktadır. Bu nedenle elektrot imali ve iş parçasına da uygun olarak elektrot malzemesi seçimi oldukça önem kazanmaktadır. Elektroerozyon işlemi süresince takım konumundaki elektrotta sürekli olarak bir aşınma gözlenir. Ticari olarak "eskime" olarak da adlandırılan aşınma, zaten yüksek olan elektrot maliyetini daha da arttırarak işlenen parça yüzeyinin kalitesini de olumsuz olarak etkiler. Çünkü elektroerozyon işleminde işlenen parçanın yüzeyinin kalitesi en fazla onu işleyen takım elektrotun yüzey kalitesi kadar olabilir. Genellikle konvansiyonel yöntemlerle (tornalama, frezeleme, taşlama) işlenebilen elektrotlar, döküm, ekstrüzyon ya da çekme yöntemleriyle (büyük boyutlu elektrotlarda, sabit profilli elektrotların imalinde ve dairesel kesitli tüp elektrotların imalinde) ve sıcak-soğuk preseleme (özellikle elektrolitik bakır) yöntemleriyle imal edilebilirler. Ayrıca ölçü küçültmek amacıyla yapılan asitle küçültme yöntemi de mevcuttur.



ŞEKİL 3.39 : Elektroerozyon Yönteminde Elektrot Aşınma Çeşitleri

Elektrotların aşınması, uç, yan, köşe ve hacimsel aşınma olarak sınıflandırılabilir. Bunlardan en büyüğü olan köşe aşınması miktarı kenar aşınmasının yaklaşık iki katı kadardır.

Hassasiyetin önemli olduğu uygulamalarda köşe aşınması, elektrot malzemesi seçimini ve kullanılacak elektrot sayısını dolayısıyla elektrot maliyetini kontrol eder.

Elektroerozyon işleminin verimliliğinde ve işlem maliyetinde elektrot tasarımı önem taşımaktadır. İşleme hızı, istenen yüzey kalitesi ve iş parçası malzemesi elektrot tasarımına etki eden önemli faktörlerdir. Elektrot tasarımında dikkate alınması gereken 2 önemli kriter şunlardır:

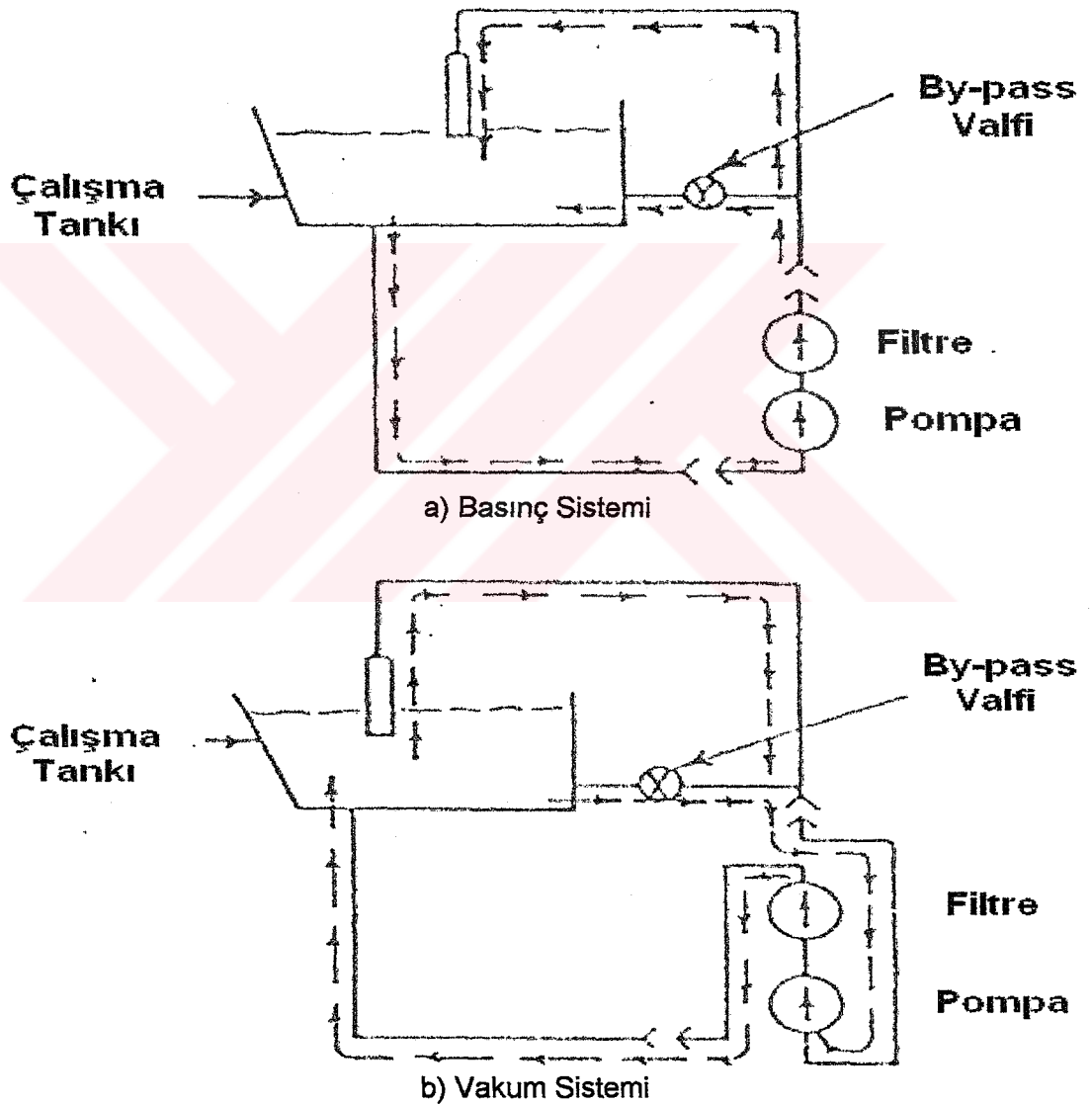
- Kesim Fazlalığı (Overcut): Takımla iş parçası arasında kıvılcım oluşumu için bırakılan açıklıktır (0,005-0,2mm). Bu kriter elektrotun işleyeceği profilden daha küçük olmasını öngörür. Seçilen çalışma şartlarına göre bırakılması gereken pay uygulama tablolarından bulunabilmektedir.
- Eğim: Özellikle derin işleme uygulamalarında kesim fazlalığının yüzeye doğru artmasıdır. Kullanılan dielektrik sıvı özelliklerine göre değişen bu kriterin değeri 0,1 mm'ye dek çıkabilir.

3.10. Elektroerozyonda Dielektrik Sıvılar ve Yıkama

Yıkama, dielektrik sıvının elektrot ve iş parçası arasında doğru şekilde dolaşımıdır. Elektroerozyonla işlemede yıkama çok önemli bir faktördür. Yetersiz yıkama, işleme hızında düşmeye ve işlenen yüzeyde hasar görülmesine sebep olur. İşleme başladığında dielektrik sıvı temizdir. Erozyonla koparılmış parçacıklar ve dielektrik kirlenmesi sonucu oluşmuş karbon atıkları ortamda bulunmaz. Temiz sıvının yalıtma direnci, parçacıklar ve iyonlar içeren sıvınıninkine oranla daha yüksektir. Bu neden ilk birkaç kıvılcım oluşumunda gecikme süresi olağandan fazla olabilmektedir. İlk kıvılcımlar sonucunda oluşan parçacıklar ve iyonlar dielektrik kuvvetini azaltarak yeni kıvılcımların oluşumunu kolaylaştırırlar.

Kıvılcım aralığında bazı noktalarda parçacıkların yoğunluğu çok artarsa, ortamda iletken köprüler oluşabilir. Bu köprülerin sebep olduğu anormal kıvılcımlar, arka dönüşerek elektrota ve iş parçasına zarar verebilirler. Dielektrik sıvının uygun şekilde sirkülasyonu ile erozyon artışı parçaların birikmesi önlenmiş olmaktadır. Elektroerozyon tezgahları, iş parçasının daldırıldığı çalışma tankını dolduran ve ark aralığındaki talaşları uzaklaştıran dielektrik sıvının akmasını sağlayan bir sisteme sahiptirler. Çalışma haznesinin doldurulması işlemi, tezgahın alt gövdesindeki tank içinde bulunan akışkana basınç uygulayarak akışkanın borularla hazneye aktarılması şeklinde gerçekleşir.

Çalışma haznesindeki akışkanın seviyesi, depodaki akışkan basıncının korunmasıyla veya boruya akışı kesen bir valf ilavesiyle sağlanabilir. Çalışma haznesinin boşaltılmasında da akışkanın kendi ağırlığından yararlanılabilir. Çalışma haznesinin doldurulması için diğer bir yöntem de santrifüj pompa kullanımıyla doldurma işlemidir. Akışkan alt gövdede yer alan depodan çalışma haznesine pompalanır. İstenilen sıvı yüksekliği elde edildiğinde pompa durdurulur ve boru hatta üzerindeki valf kapatılarak haznedeki sıvı seviyesinin korunması sağlanır. Hazne boşaltılırken de söz konusu valf açılır ve akışkan kendi ağırlığıyla alt gövdedeki depoya geri döner.



ŞEKİL 3.40 : Elektroerozyonda Çalışma Haznesine Sıvı Pompalama Sistemleri

Basınç sisteminde akışkan çalışma tankından bir pompa yardımıyla emilerek filtre ünitesinden geçirilir. Bu işlem akışkanın kesme bölgesine temiz olarak gönderilmesini sağlar. Akışkan daha sonra takım elektrotta veya bir by-pass valfinden geçerek paralel koldan çalışma tankına akar. By-pass valfinden yapılacak ayarla ark aralığına gönderilen sıvı hacmi kontrol edilebilir.

Vakum sisteminde ise, basınç sisteminde kullanılan elemanların ayrıları kullanılmakla beraber bağlama sistemleri farklıdır. Vakum, pompanın giriş ve filtrenin çıkış bağlantılarının değiştirilmesiyle sağlanır. Bu sistemde, akışkan takım ve by-pass valfinden akarak filtre ve pompadan geçerek çalışma tankına döner. Elektroerozyon işleminin atıkları olan talaşlar oldukça serttir ve dişli pompalarda hasara neden olabilirler.

Dielektrik sıvıların kullanım amacı ve görevleri ark oluşumuna yardımcı olmak, kaldırılan malzemeleri işleme aralığından uzaklaştırmak ve takımla iş parçası yüzeylerini soğutmaktır. Elektroerozyon uygulamalarında en sık kullanılan dielektrik sıvı petrol esaslı hidrokarbon mineral yağlardır.

Bu yağlar yüksek tutuşma sıcaklığına ve düşük viskoziteye sahiptirler. Yağlardaki katkı elemanları, gaz kabarcıklarını önlemek ve kokuyu en aza indirmek amacıyla kullanılırlar. Özel uygulamalar için kullanılan diğer dielektrik sıvılar ise kerosen, silikonlu yağlar, deiyonize su, etilenglikolün sulu solüsyonlarıdır (borik asit, boraks veya kaolin). Titanyum iş parçasının, silikonlu akışkanlar ve bu akışkanların petrollü yağlarla karışımlarıyla işlenmesi çok iyi sonuçlar verir. Ancak bu gibi dielektrik sıvılar oldukça maliyetlidirler.

Dielektrik sıvılarda aranılan özellikler düşük viskozite, yüksek alev alma sıcaklığı, dielektrik kuvveti ve maliyettir. Ayrıca bu sıvılar kullanıcıya zararlı olmamalı, elektrotla ya da iş parçasıyla kimyasal reaksiyona girmemeli ve kullanılan ekipman üzerinde aşındırıcı etkiler göstermemelidirler.

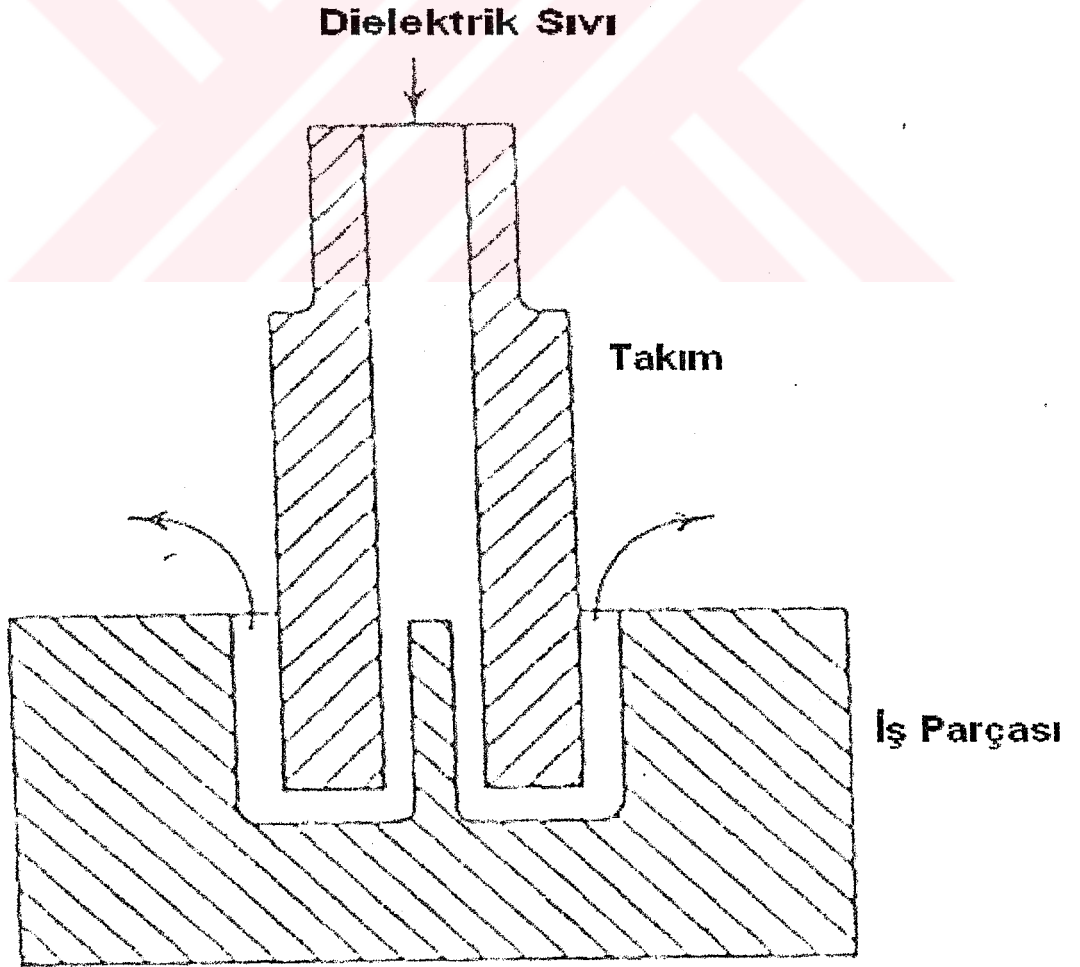
Dielektrik Sıvı	Viskozite Redwood (1s)	Alev Alma noktası	Tavsiye Edilen İşleme Türü
Beyaz alkol	20°C ta 28	38°C	Düşük güç, çok ince yüzey
Ticari parafin	27°C ta 31	49°C	Düşük güç, her durumda
Certrex 56	38°C ta 36	129°C	Çok ince yüzey dışında her durumda
Fusus A	27°C ta 42	124°C	Sadece kaba işlemede

TABLO 3.2 : Elektroerozyonda Kullanılan Bazı Dielektrik Sıvılar ve Özellikleri [12]

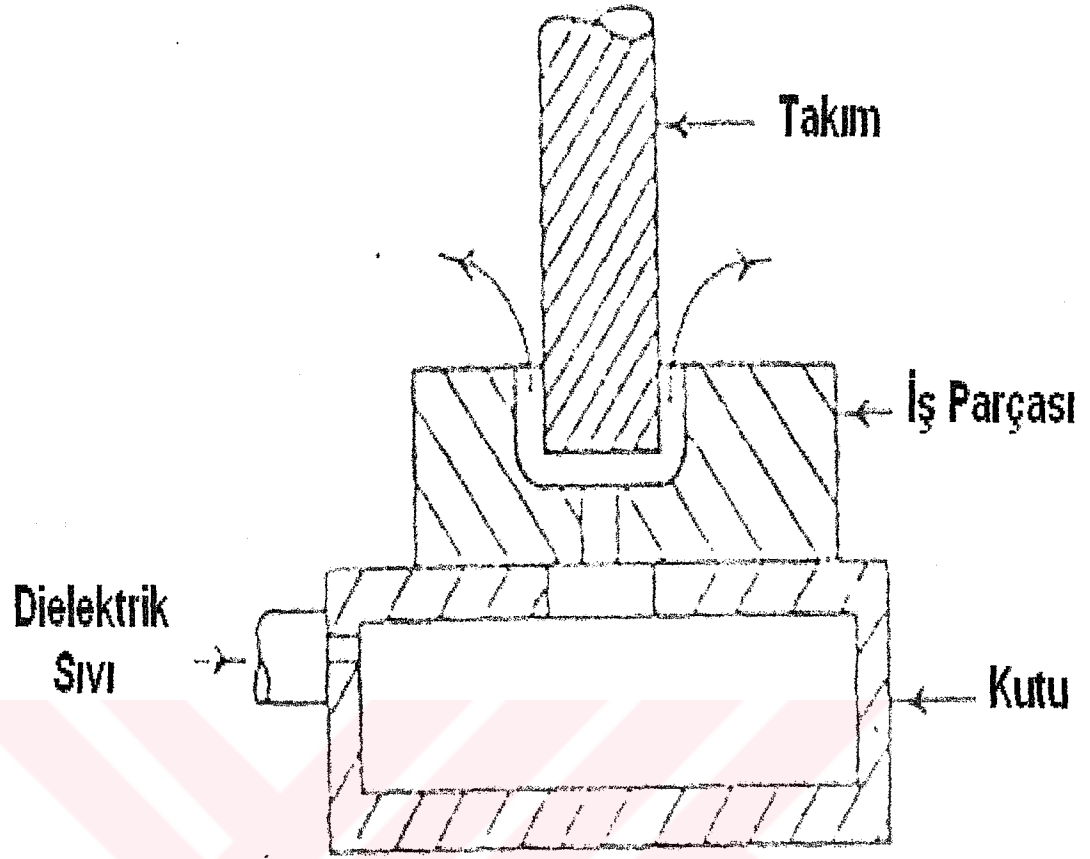
Dielektrik sıvının ark aralığına aktarılması şu şekillerde gerçekleştirilir:

- Normal akış,
- Ters akış,
- Püskürtme,
- Daldırma.

Normal Akışlı Sistem: Bu sistemde akışkan takım içinde bulunan delik ya da deliklerden takımla iş parçası arasına aktarılır. Eğer iş parçası üzerinde bir açıklık veya işleme alanına açılan bir delik varsa, iş parçası soğutucu bir kutu üzerine monte edilir ve bu kutuya gönderilen basınçlı dielektrik sıvı kutuya açılan iş parçası delik ya da kanalı vasıtasıyla kesme bölgesine gönderilir. Bu tür kolaylaştırıcı bir düzenleme, takım uzunluğu veya küçük kesit alanı sebebiyle takıma delik açmanın sorun yarattığı durumlarda tercih edilir.



a) Takım İçine Delik Açılarak

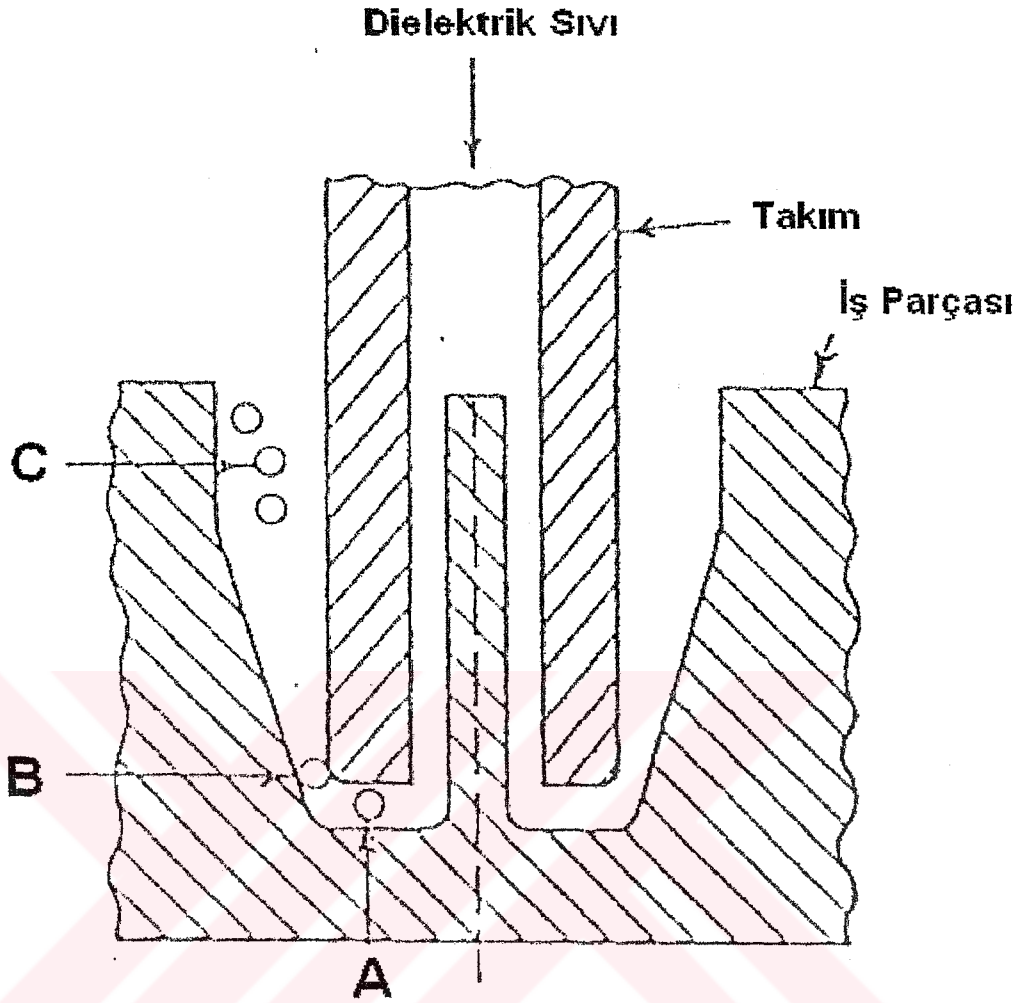


b) Soğutucu Kutu Takviyeli Sistem

ŞEKİL 3.41 : Elektroerozyonda Normal Akışlı Sistem

Bazı durumlarda normal akışlı sistem iş parçasında giderek incelen sivri bir açıklık oluşturması sebebiyle tercih edilmeyebilir. Şekil 3.42'de gösterilen bu durumda, takımın uç kısmından kaldırılan "A" bölgesindeki talaşlar tahliye edilirken "B" bölgesinden geçmek zorundadır.

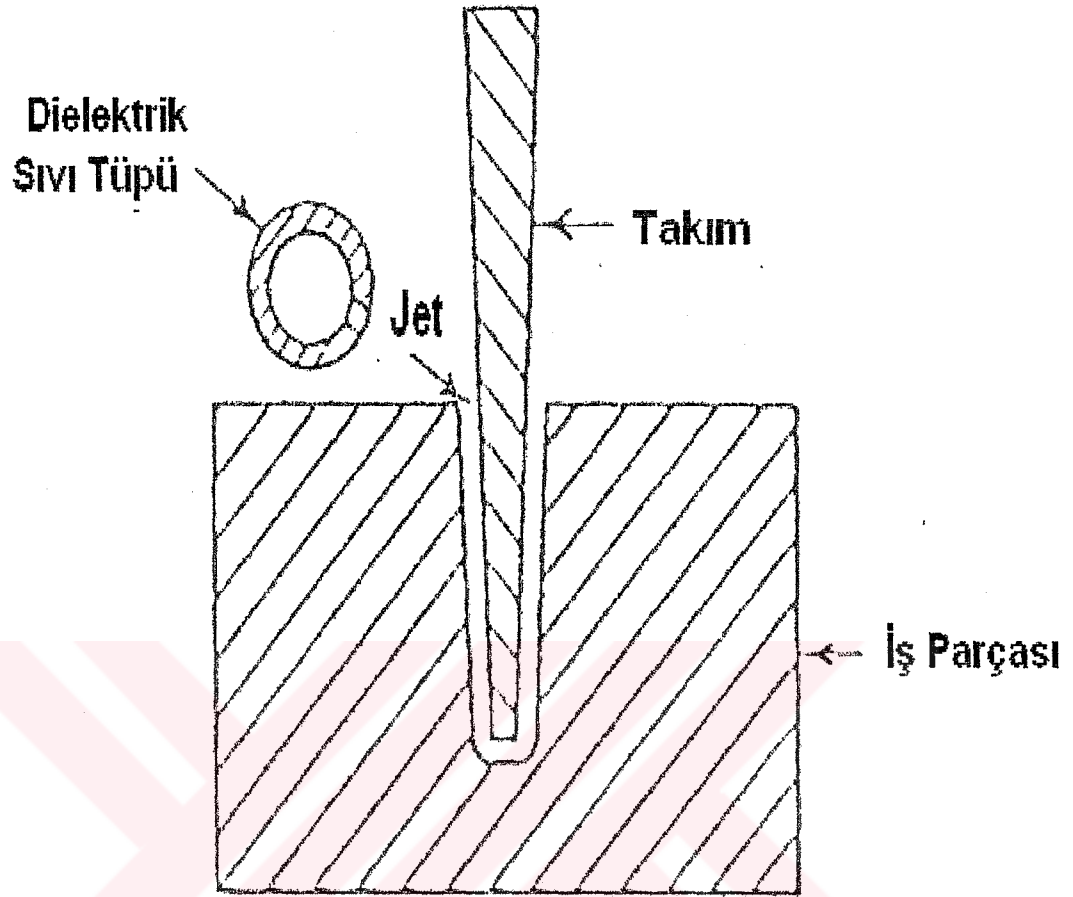
Talaşlar iletken olduğundan ark aralığının elektriksel olarak kısaltıcı etki yaparak kıvılcımı artırırlar. Bu durum kenar kıvılcımlarının oluşması ihtimalini doğurur. Sürekli talaş akışı ve kenar kıvılcımları oluşumuyla takım iş parçasına doğru ilerledikçe "B" aralığı genişleyecektir. Kenar açıklığı "C" deki kadar büyük bir mertebeye ulaştığında birçok talaş ark aralığının elektriksel uzunluğunu kenar kıvılcımlarına izin verecek kadar kısaltıcı etki yapmak isteyecek ancak talaşların bu şekilde aynı hizayla sıralanma olası düşük olduğundan "C" de kenar kıvılcımı oluşmayacak ve sivrilikte değişim olmayacaktır. Ancak "B" de sivrilme sürecektir. Bu olası sorun ters akışlı sistemle çözülmüştür.



ŞEKİL 3.42 : Elektroerozyonda Normal Akışlı Sistemdeki Sorun

Ters Akışlı Sistem: Normal akışlı sistemde olası sivrileşme sorunu ters yönlü bir akış sistemiyle en aza indirgenebilir. Bu yöntemde ark aralığı filtre edilmiş dielektrik sıvı içindedir ve sıvıya basınç yerine vakum uygulanmaktadır. Takımla iş parçası arasına temiz akışkan gönderildiğinden sivrileşme gözlenmemektedir. Emme basıncı 0,8-0,9 bar mertebesinde.

Püskürtmeli Sistem: İş parçası üzerinde işlenecek olan profilin dar ve uzun başka bir deyişle derin olduğu durumlarda, ark aralığına yönlendirilmiş bir jet veya sprej kullanımıyla dielektrik sıvı dağıtımına püskürtmeli sistem denmektedir. Üzerinde küçük delik veya yanklar bulunan dielektrik sıvı tüpü uygun pozisyonda tutularak ark aralığına gönderilir. Normal ve ters akışlı sistemlere göre püskürtmeli sistem uygulamaları daha çok zaman almaktadır.



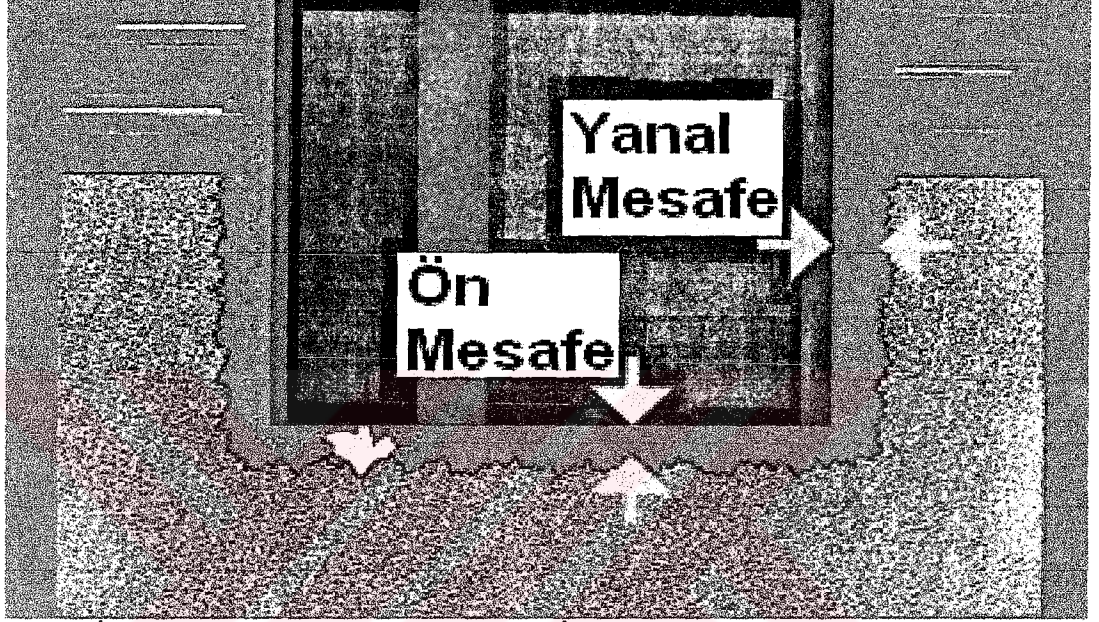
ŞEKİL 3.43 : Elektroerozyonda Püskürtmeli Sistem

Daldırma Sistemi: İnce iş parçalarındaki yüzeysel kesme ve delme şeklindeki elektroerozyon uygulamaları için dielektrik sıvı akışının sağlanması gerekli olmayabilir. Böyle uygulamalar için ark aralığının dielektrik sıvı banyosuna daldırılması yeterlidir. Kesme işlemi sırasında, soğutma ve talaş kaldırma takımı ile iş parçası arasına verilecek izafi bir hareketle gerçekleştirilebilir.

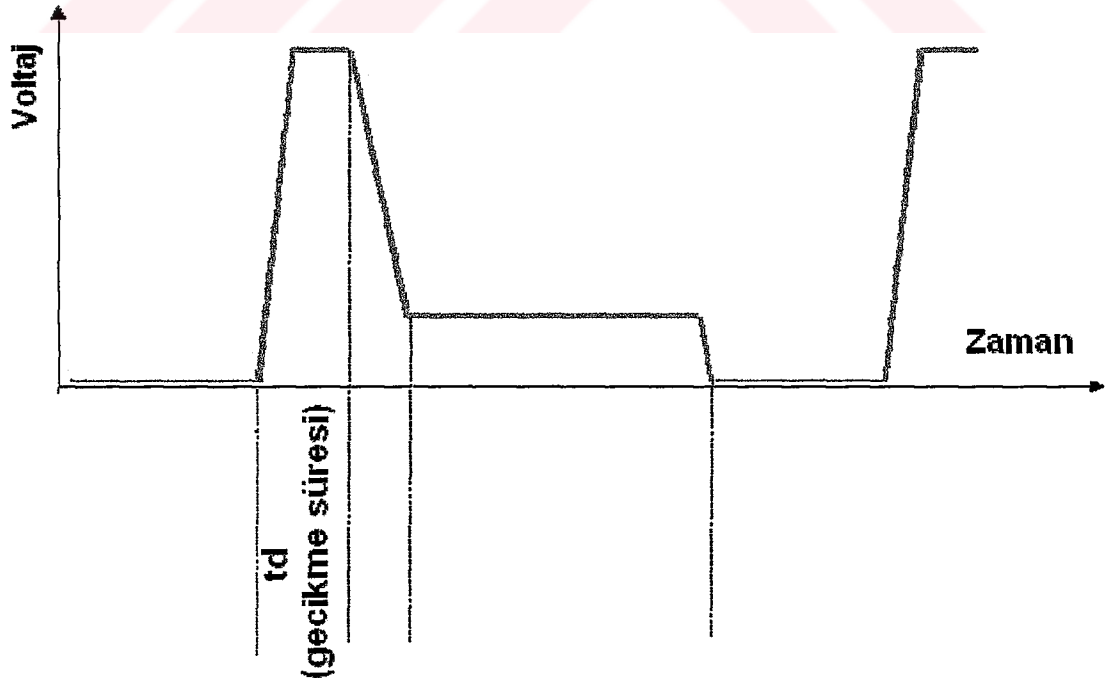
3.11. Elektroerozyonda Kontrol Sistemi

Elektroerozyon yönteminde erozyon tipinden (dalma ve tel erozyon) bağımsız olarak takım elektrot iş parçasına değmemektedir. Ancak kıvılcım oluşumunda da anlatıldığı gibi takım elektrot ile iş parçası arasındaki bu aralığı sabit tutulması işlemin sürekliliği ve hatasız şekilde uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır. Tel erozyonda sadece yanıl, dalma erozyonda ise hem ön cepheden hem de yanıl olarak bulunan söz konusu boşluğun sabit tutulması ve ayarlanması kıvılcım oluşumu bölümünde bahsedilen gecikme süresi (t_d) ile sağlanmaktadır.

Yanal boşluklar boşalma sinyali, akım değeri ve önceden ayarlı bazı parametrelere bağlıdır. Ön (cephe) boşluğunun algılanması ise, boşluğun değişiminin gecikme süresi (t_d) üzerindeki etkisiyle sağlanır. Dolayısıyla gecikme süresi (t_d) üzerinde sağlanacak hakimiyet ön kısımdaki boşluğun kontrolüne imkan verir. İşlem sırasında gecikme süresini algılayan sistem bu değeri kayıtlı ideal değerle kıyaslayarak, takım elektrotu kontrol eden servo mekanizmaya hareket emri verir ve uygun değere ulaşıncaya da durdurur. Bu şekilde boşluğun sabit tutulması gerçekleştirilir.



ŞEKİL 3.44 : Elektroerozyonda Takım-İş Parçası Boşluğunun Kontrolü [13]



ŞEKİL 3.45 : Takım-İş Parçası Boşluğunun Kontrolünde Kullanılan Gecikme Süresinin Gösterilmesi

3.12. Elektroerozyon Özellikleri ve Uygulama Alanları

Çalışmanın baş kısımlarında sözü edilen tüm konvansiyonel olmayan imalat yöntemlerinde olduğu gibi elektroerozyon yöntemi de bazı özel ihtiyaçlar neticesinde geliştirilmiştir. Elektroerozyon yönteminin tercih edilmesini kolaylaştıran sebeplerden bazıları aşağıda sunulmuştur:

Malzeme açısından:

- Yüksek sertlik,
- Yüksek çekme dayanımı,
- Zayıf işlenebilirlik.

İş parçası açısından:

- Karışık ve düzensiz şekiller,
- Kırılabılır ve tespiti zor parçalar,
- Derinlik/genişlik oranı yüksek delikler,
- Çok sayıda delik ve profil içeren iş parçaları.

İmalat açısından:

- Çapaksız imalat,
- Eş çalışan pres veya kalıp parçaları,
- Çok sayıda işlemin aynı anda yapılabilirliği.

Proses ekonomisi açısından:

- Konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi imkansız veya çok yüksek maliyetli parçalarda maliyet avantajı.

Elektroerozyon yönteminin diğer işleme yöntemlerine olan üstünlükleri şunlardır:

1. Elektriksel iletkenliğe sahip tüm malzemeler, fiziksel özelliklerinden bağımsız olarak işlenebilirler,
2. Takımla iş parçası arasında bir temas yoktur. Bu nedenle iş parçası üzerine kesme kuvveti gelmez. Bu durum kesme kuvvetine dayanımı olmayan ince ve kırılgan parçaların bile elektroerozyonla işlenmesine olanak verir. Ayrıca iş parçasının bağlanması problemi de yoktur,
3. Çok karışık şekiller, kör delikler (dalma erozyonla işlenir) ve tüm kesitte yer alan profiller içeren iş parçaları işlenebilir,
4. Isıl işlem görmüş veya sertleştirilmiş parçalara uygulanabilir. Diğer işleme yöntemlerinde ise ısıtılma işlemi ve sertleştirme son işlem olarak yapılır. Bu durum ölçü toleranslarını aşan büzülme ve uzamalara sebep olmakta, iş parçası üzerinde çatlaklar ve gerilmeler yaratmaktadır. Tüm bu olası sorunlar elektroerozyonla işlemede görülmemektedir,
5. Proje mühendisi dizayn sırasında 2 konuda esneklik kazanır:
 - a) Çok çeşitli malzemeleri ve alaşımları kullanabilme opsiyonu elde edilir ve kurumda çalışan metalürji mühendislerine yeni alaşımlar geliştirme imkanı verilir,
 - b) Diğer işleme tezgahlarıyla işlenemeyen veya birkaç adımda işlenebilen iş parçaları, elektroerozyonla tek adımda işlenebilir.
6. Elektroerozyonla işlenen yüzeyler yöne bağlı olmayan özellik göstermektedir. Kraterlerle kaplanmış iş parçası yüzeyi %20 daha kolay parlatılabilir. Ayrıca yağ tutma özelliği sayesinde yüzeylerde daha uzun ömür sağlanır,
7. Tamamen otomasyona dayalı bir yöntemdir ve özel eğitilmiş personel kullanımı gerektirmez. Çok hızlı bir işlem olmadığından tek operatörle birkaç tezgah idare edilebilir. Böylece işçilik masrafı da düşmüş olur.

Elektroerozyonun bu üstünlüklerinin yanı sıra yöntemin zayıf kaldığı bazı yönleri de şunlardır:

1. Sadece elektriği ileten malzemeler işlenebilir,
2. Elektrotun aşınması maliyeti arttırmaktadır (dalma erozyon için),
3. İşlenen parçaların yüzey kalitesi işlem parametrelerinin yanı sıra elektrot yüzeyi kalitesine de bağlıdır ve işlenen yüzeyin özellikleri elektrotun yüzey özelliklerinden daha iyi olamaz,
4. Diğer yöntemlere oranla yavaş bir işlemdir,
5. Genel olarak diğer yöntemlerden pahalıdır.

3.13. Erozyon Parametreleri ve Etkileri

Elektroerozyon yönteminde etkili olan parametreler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Güç seviyesi ,
- Ark süresi ,
- Ark aralığı ,
- Servo ,
- Hassasiyet ,
- Ark koruma ,
- Yıkama .

3.13.1. Güç Seviyesi

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 pürüzlülüğü seviyesi artmaktadır.

Ortalama Çalışma Akımı: Ortalama çalışma akımı, çalışma (kıvılcım boşalması) sırasında meydana gelen akım değerlerinin ortalama değeri şeklinde açıklanır. Çalışma akımı değeri elektroerozyon tezgahındaki ampermetre kontrollerinden takip edilebilir.

- Aralık mesafesi büyüdükçe iyonizasyon için gerekli süre artacağından, ortalama çalışma akımı azalır,
- Ark süresi arttıkça ortalama çalışma akımı artar,
- Güç seviyesi arttıkça ortalama çalışma akımı artar.

Aşınma: Güç seviyesi, elektrot ve iş parçası malzemeleri ve çalışma polaritesiyle beraber aşınma üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Kaba işleme sırasında güç seviyesi yükseldikçe talaş kaldırma hızı artar ve hacimsel aşınma oranı azalır. İnce işleme de denilen bitirme işlemlerinde ise güç seviyesi azaldıkça talaş kaldırma hızı azalır ve hacimsel aşınma oranı yükselir.

Akım Yoğunluğu: Takım elektrotun çalışma yüzeyinde birim alana düşen ortalama çalışma akımı değerine akım yoğunluğu denir. Akım yoğunluğu $[A/cm^2]$ birimiyle ifade edilir. Yüksek akım yoğunluğu elektrotun fazla ısınarak aşınmasına sebep olur. Bu nedenle güç seviyesi seçiminde elektrotun çalışma yüzeyi dikkate alınmalıdır. Elektroerozyon uygulaması tek işlemle bitirilecekse yüzey kalitesi ve aşınmayı istenen limitlerde tutarken en yüksek talaş kaldırma hızını sağlayacak güç seviyesi seçilmelidir. İşlem birden fazla adımda tamamlanacaksa, kaba işlemede yüksek yarı işleme ve bitirme aşamalarında ise düşük güç seviyeleri seçilmelidir.

3.13.2 Ark Süresi (T_{on})

Ark süresi kıvılcım boşalmasının başlamasıyla kıvılcımın sona ermesi arasında geçen süreye denmektedir. Ark süresi, talaş kaldırma hızı, elektrot aşınması ve yüzey kalitesini etkiler. Ark süresi kademeler halinde ayarlanır.

Talaş Kaldırma: Güç seviyesi ve ark aralığı sabitken, ark süresi arttırıldığında belirli bir değere kadar talaş kaldırma hızının arttığı görülür. Söz konusu limit değerinin üzerindeki artışlarda ise talaş kaldırma hızı düşmeye başlar. Ark süresi optimum değerinin üzerinde arttırılırsa, boşalma enerjisi talaş koparmaz. İş parçası yüzeyinin ve dielektrik sıvının gereksiz yere ısınmasına sebebiyet verilmiş olur.

Elektrot Aşınması: Ark süresi arttıkça, optimum değer geçilse bile hacimsel elektrot aşınması azalır.

Yüzey Kalitesi: Ark süresi arttıkça, boşalma akımının etkisi daha uzun süre devam ettiğinden maksimum talaş kaldırma hızına ulaşıldıktan sonra bile yüzey pürüzlülüğü değeri artar.

3.13.3 Ark Aralığı (T_{off} Bekleme Süresi)

İki kıvılcım boşalması arasındaki minimum süredir. Ark aralığı (bekleme süresi) ark süresinde olduğu gibi kademeler halinde ayarlanır ve [μs] cinsinden verilir. Ark aralığı değerinin alacağı en küçük değer, işleme hatalarına sebep olmayacak şekilde seçilen ark süresi kademesinden en çok 2 kademe küçük olarak seçilebilir. Bekleme süresi hiçbir zaman 0 yapılmamalıdır. Eğer yapılırsa, elektrot ile iş parçası arasındaki elektrik alan sürekli olacağından, ark kanalı da sürekli var olacak ve koparılan talaşlar ortamdan koparılamayacaktır. Bu durumda hep aynı nokta erozyona uğratılacağı için iş parçasından istenmeyen hasarlar görülecektir. Bu duruma anormal ark durumu denir ve tezgah ark koruma devresi tarafından anormal arkta kurtarılır. Kısa devre durumu da buna benzer bir karakter taşır ancak kısa devrede elektrotların birbirine değmesiyle maksimum akım geçer ama talaş kaldırılması gerçekleşmez.

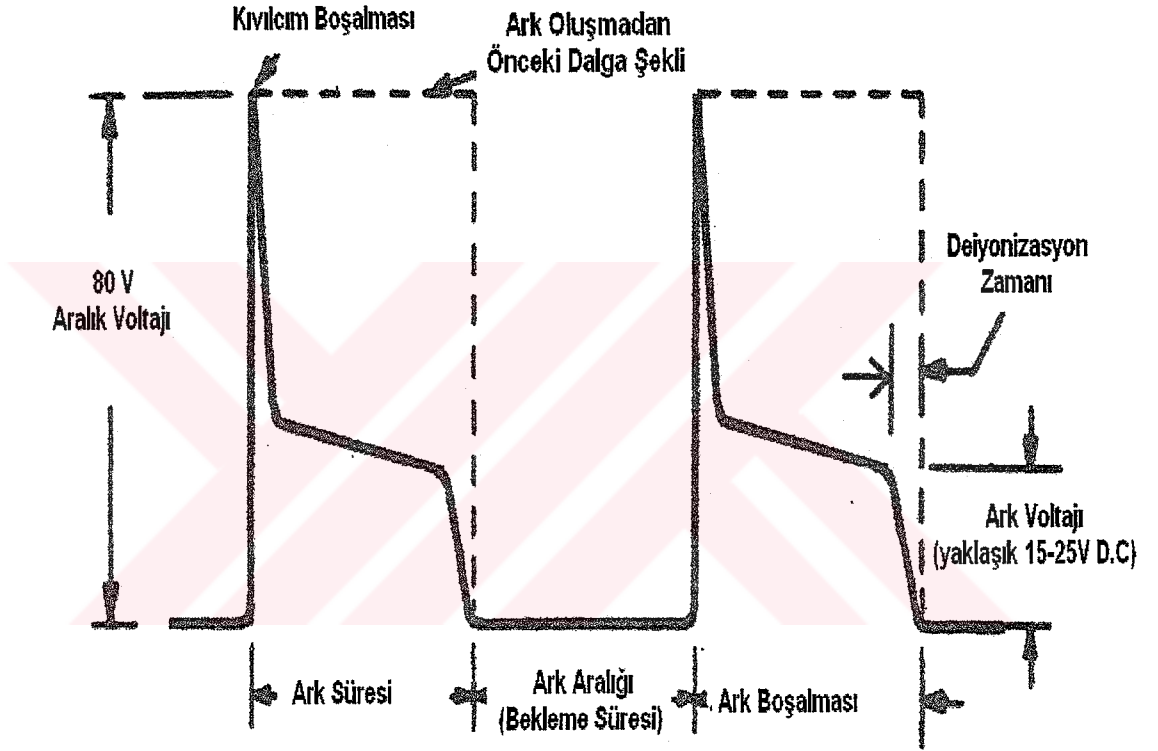
Temizlik şartlarının zor olduğu uygulamalarda (derin profillerin kesilmesinde) ark aralığı (bekleme süresi) daha yüksek tutulmalıdır. Temizlik şartları geçici olarak sağlanamadığında ise ark aralığı kısa süreli artırılarak kirlilik sorunu çözülebilir.

3.13.4 Servo

Elektroerozyon işleminin devam edebilmesi için aralık mesafesinin ayarlanan bir değerde tutulması gerekir. İşte bu görevi aralık voltajının otomatik ayarlanmasıyla servo mekanizma gerçekleştirir. Aralığın gerçek değeri sürekli ölçülerek önceden ayarlı aralık değerleriyle karşılaştırılır. Bu karşılaştırmanın sonucuna göre servo mekanizması, gerçek değeri önceden ayarlanan değere yaklaştıracak şekilde takım elektrotu tutan kafayı hareket ettirir. Aralık mesafesi servo potansiyometresiyle ayarlanır. Aralık mesafesi büyüdükçe, servo potansiyometresi maksimum değere ayarlandıkça aralık voltajı büyür. Aralık mesafesi küçüldükçe, servo potansiyometresi minimum değere doğru ayarlandıkça aralık voltajı küçülür.

Aralık mesafesi küçüldükçe iyonizasyon zamanı azaldığından hem kaba işlemede hem de bitirme işleminde talaş kaldırma hızı yükselir. Bu nedenle servo voltajı mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Bununla beraber servo voltajı çok küçük ayarlanırsa, devre hataları meydana gelmeye başlar ve çalışma verimi düşer.

Belirlenen güç seviyesi, ark süresi, ark aralığı değerlerinin ardından verimli çalışma ortamı için servo ayarı derin ve dar çukurların işlenmesinde yüksek, kaba işlemede ve bitirme işlemlerinde ise düşük şekilde ayarlanmalıdır. İşlemden zararlı ark veya kısa devre meydana gelirse düzenli çalışmaya ulaşılan dek servo yükseltilebilir.



3.13.5 Hassasiyet

Servo mekanizmasının cevap zamanını azaltıp artırma hızının ayarlanmasına hassasiyet denir. Hassasiyet potansiyometresiyle ayarlanır. Hassasiyetin çok yüksek ayarlanması titreşimli çalışmaya sebep olarak çalışma verimini düşürebilir. Hassasiyetin çok düşük ayarlanması durumunda ise elektrotun doğru noktaya konumlandırılması çok uzun zaman alacaktır. Bunun sonucu olarak zararlı ark ve kısa devrenin daha sık meydana gelmesi ve iyonizasyon zamanındaki artış sebebiyle verimlilik düşecektir. Düzenli çalışma elde edilecek şekilde ayarlanmalıdır.

3.13.6 Ark Koruma

Çalışma sırasında elektroerozyon atıklarının yeterince temizlenememesi, zararlı ark ve kısa devreye sebep olur. Zararlı ark ve kısa devre elektrotla iş parçası üzerinde hasar yaratır. Erozyon tezgahları, zararlı ark veya kısa devrenin giderilememesi durumunda işlemi durduran bir ark koruma sistemine sahiptirler. Kademelere bölünmüş olan ark koruma değeri güç seviyesi arttıkça daha büyük olarak seçilmelidir. Düzenli çalışmaya ulaşılan dek ark koruma devre dışı bırakılabilir.

3.13.7 Yıkama

Yıkama bölümünde anlatıldığı üzere elektroerozyon işleminde dielektrik sıvı miktarı dolayısıyla seviyesi oldukça önemlidir. Çünkü uygun yıkama yapılmazsa, elektroerozyon işleminin verimi düşer. İş parçası ve takım gereğinden fazla ısınarak hasar görür. Sirkülasyon sistemi üzerinde yapılacak ayarlamalarla sıvı seviyesi ve basınç ayarlanabilir.



4. ELEKTROEROZYON UYGULAMASI

Bu çalışma kapsamında detaylı olarak incelenen elektroerozyon yönteminin bir uygulaması ve bu uygulamanın detayları (deney koşulları, ekipmanı, deney sonuçları ve yorumları) bu bölümde sunulacaktır.

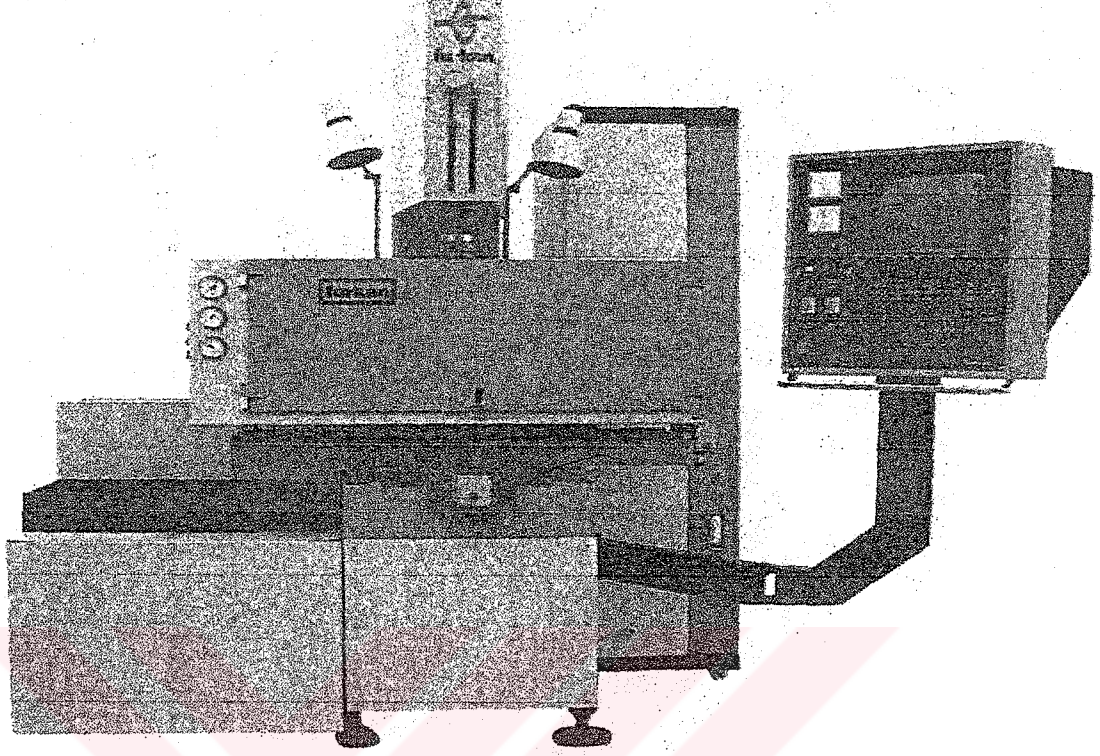
Söz konusu uygulama, Hatko A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. Kablo terminalleri, terminal kılıfları ve konnektörleri imal eden söz konusu firma kendi imal ettiği kalıpları kullanarak hidrolik preslerde (20-50 ton arası baskı güçlerinde) bant halindeki değişik malzemelerden (çelik, bakır ve pirinç) kablo terminalleri üretmektedir. Zincir halinde veya tek tek parça halinde üretilen terminaller müşteri isteğine göre firmanın kaplama tesislerinde kalay, nikel veya gümüşle kaplanmaktadır. Terminal kılıfları ise plastik enjeksiyon kalıplarıyla plastik enjeksiyon makinelerinde naylon, p.v.c. ve polietilen malzemelerden üretilmektedir. Hatko A.Ş. 10 mühendisi ve toplam 100 kişilik çalışan kadrosuna sahip olup, ülkemizde otomotiv ve beyaz eşya yan sanayi firmalarına hizmet vermektedir. Yurt içinde kendi sektöründe en üst sırada yer alan firmanın Orta Doğu ve Avrupa'da pek çok ülkeye ihracatı bulunmaktadır.

Arçelik, Vestel, Mercedes-Benz Türk, Otokar gibi sektöründe lider firmalara çalışan Hatko A.Ş.'nin yıllık cirosu yaklaşık 12.000.000 € mertebesinde.

Yapılan deneyde ticari olarak "1.2080" şeklinde adlandırılan X210 Cr12 kodlu AISI/SAE kodu D3 olan soğuk iş takım çeliğinden iş parçası kullanılmıştır. Söz konusu iş parçası malzemesinin bileşiminde, %2,1 C ve %12 Cr bulunmaktadır. Ledeburitik yapılı, yüksek karbonlu, kromlu bir takım çeliği olan "1.2080" in aşınma dayanımı yüksektir.

Su verme işlemi sonrası sertliği 64 HRC'dir. İşlemden kullanılan takım elektrotlar (iş parçasına üzerine projekte edilecek şekle sahip) 20 mm çap ve 12 mm derinliğe sahip olup, elektrolitik bakır ve grafit malzemeden tel erozyonla işlenerek hazırlanmışlardır.

İşlemede Furkan Makine marka ve "CNC 100A" modele sahip dalma erozyon makinesi kullanılmıştır. Söz konusu makinenin özellikleri aşağıda sunulmuştur:



a) Deney Tezgahı

TEKNİK ÖZELLİKLER

JENERATÖR :

Güç 220 V, 50 Hz, 3f	10,5 KVA
Max. Sürekli Çalışma Akımı	100 A
Güç Seviyesi Kademeleri,	Programdan kontrollü 15 kademe
Max. Aşınmasız Talaş Kaldırma ;	Cu + / Çelik - 500 mm ³ / dak
	Gr + / Çelik - 550 mm ³ / dak
Max. Talaş Kaldırma (%20 Aşınma) ;	Gr - / Çelik + 1000 mm ³ / dak
Min. Elektrot Aşınması	%0,5
En İnce Yüzey	1,5 µm (Ra)
CNC Arabirimi	Heidenhain TNC406

MAKİNA GÖVDESİ :

İş Tablası Ölçüleri (XxY)	600x400 mm
Tabla Hareket Ölçüleri (XxY)	500x350 mm
Tabla Kızakları :	Öngerilimli-rulmanlı yatak
Tabla Hareket Mekanizması:	Öngerilimli-rulmalı vida, servo motorlu, otomatik
İş Haznesi (XxYxZ)	1240x700x530 mm
Max.İş Parçası Ölçüleri(XxYxZ)	1050x700x510 mm

Z Eksen :

Otomatik Kafa Mekanizması:	Yüksek hassasiyetli, özel tasarım servo
Hareket Kursu	200 mm
Kaba Hareket	250 mm
Kaba Hareket Kızağı	Tümüyle taşlanmış kırılmaç yataklı

b) Deney Tezgahı Teknik Özellikleri

ŞEKİL 3.47 : Deneyde Kullanılan Dalma Erozyon Tezgahı Özellikleri

Yapılan deneyde bakır ve grafit takım elektrotlar kullanılarak daha önce sözü edilen boyutlarda soğuk takım çeliği iş parçası üzerinde farklı akım ve güç seviyelerinde yapılan işlemle bu değişik değerlerin, meydana gelen malzeme kaldırma oranları ($\text{mm}^3/\text{dak.}$), elektrotun bağlı aşınma oranı (%) ve yüzey pürüzlülüğü (μm) gibi önemli işlem parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

<u>GÜÇ SEVİYESİ KADEMELERİ</u>	
	1/16 1/8 1/4 1/2 1 2 3 4
Tepe Akım (A)	2,25 4,5 9 18 36 72 108 144
Ortalama Akım (A)	1,5 3 6 12 25 50 75 100

Tablo 3.3 : Deney Tezgahındaki Güç Seviyesi ve Akım Kademeleri

ARK SÜRESİ KADEME	SÜRE (MİKROSANİYE)
1	4
2	6
3	12
4	25
5	50
6	100
7	200
8	400
9	800
10	1600

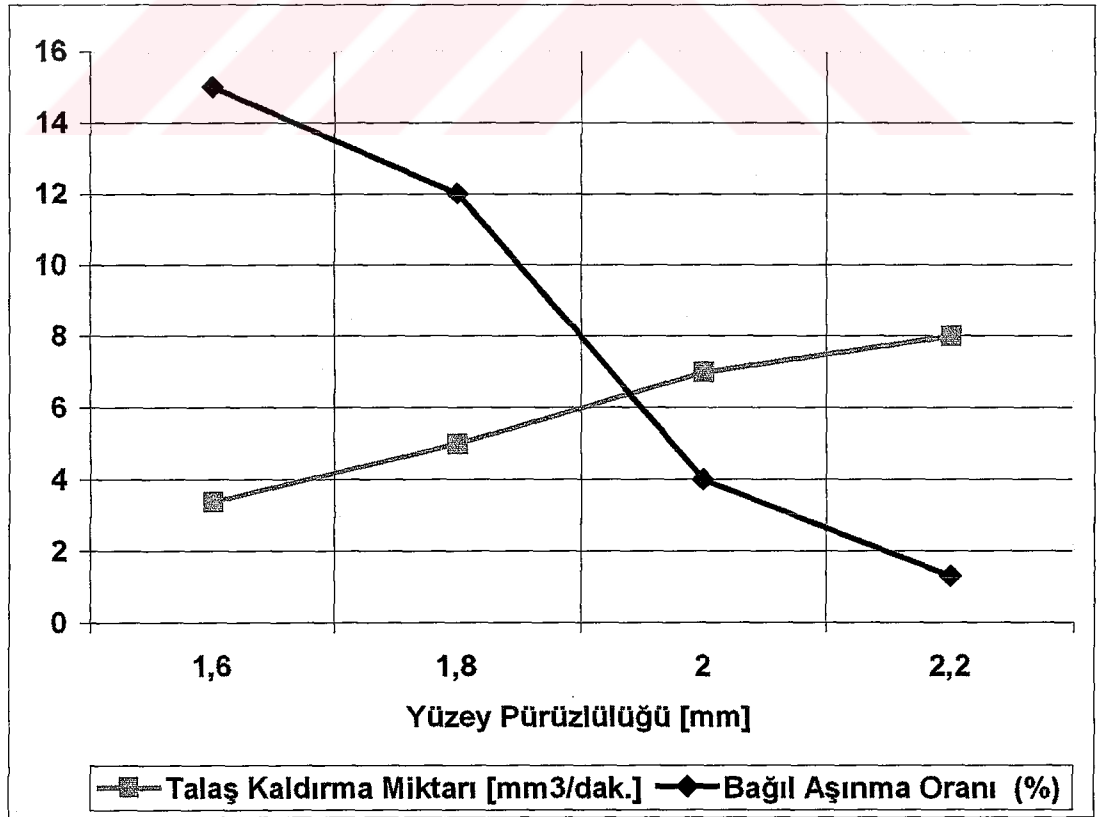
Tablo 3.4 : Deney Tezgahındaki Ark ve Bekleme Süresi Kademeleri

3.14.1 Deney I.

Bu deneyde elektrolitik bakır (+) elektrot ve 1.2080 çeliğinden iş parçası (-) kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, sıvı basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1/8 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	1,6	3,4	15
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	1,8	5	12
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2	7	4
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	2,2	8	1,3

Tablo 3.5 : 1. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



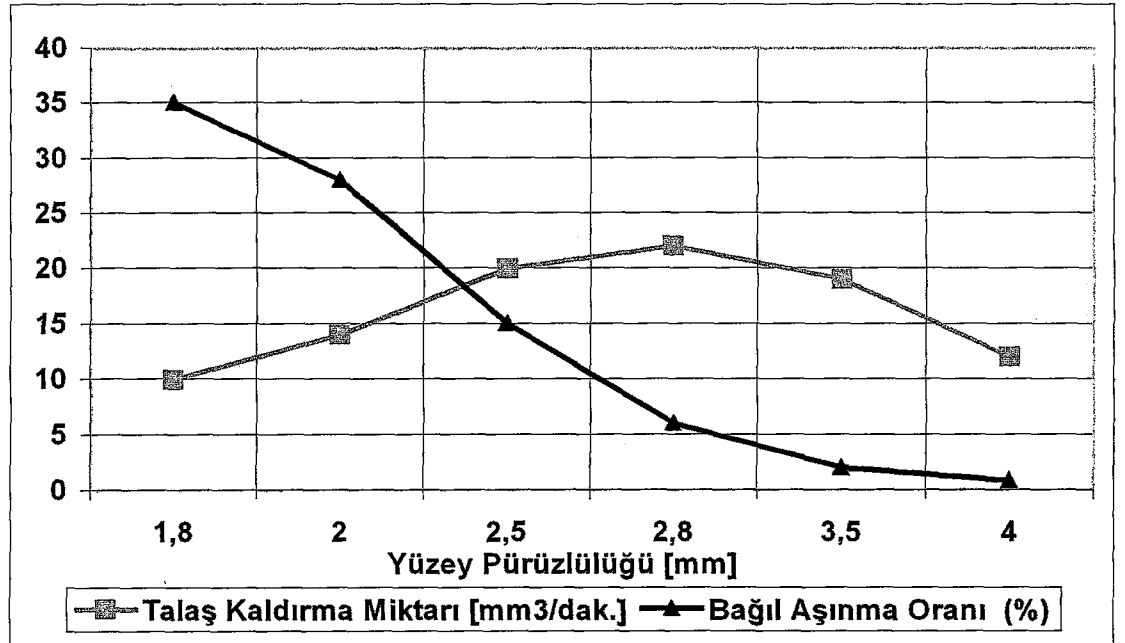
ŞEKİL 3.48 : 1.Deney Sonuçları Grafiği

3.14.2 Deney 2

Bu deneyde elektrolitik bakır (+) elektrot ve 1.2080 çeliğinden iş parçası (-) kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, sıvı basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1/4 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	1,8	10	35
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2	14	28
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2,5	20	15
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	2,8	22	6
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	3,5	19	2
6 ($100\mu\text{s}$)	3 ($12\mu\text{s}$)	4	12	0,8

Tablo 3.6 : 2. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



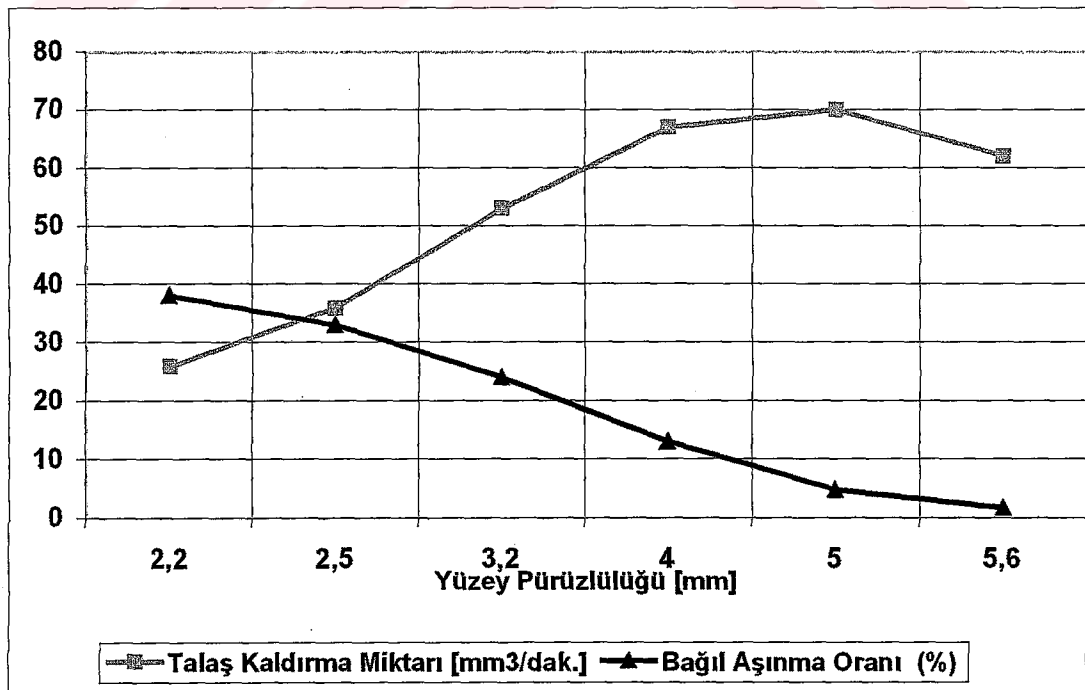
ŞEKİL 3.49 : 2.Deney Sonuçları Grafiği

3.14.3 Deney 3

Bu deneyde elektrolitik bakır (+) elektrot ve 1.2080 çeliğinden iş parçası (-) kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, sıvı basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1/2 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R _a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 (4 μs)	1 (4 μs)	2,2	26	38
2 (6 μs)	1 (4 μs)	2,5	36	33
3 (12 μs)	1 (4 μs)	3,2	53	24
4 (25 μs)	2 (6 μs)	4	67	13
5 (50 μs)	2 (6 μs)	5	70	4,8
6 (100 μs)	3 (12 μs)	5,6	62	1,7

Tablo 3.7 : 3. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



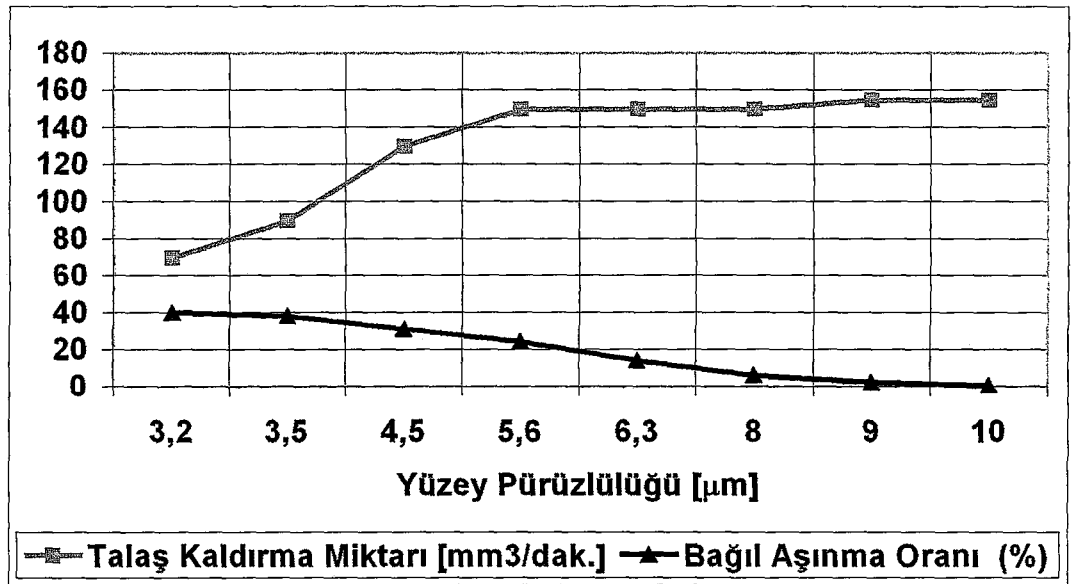
ŞEKİL 3.50 : 3.Deney Sonuçları Grafiği

3.14.4 Deney 4

Bu deneyde elektrolitik bakır (+) elektrot ve 1.2080 çeliğinden iş parçası (-) kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, sıvı basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	3,2	70	40
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	3,5	90	38
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	4,5	130	31
4 ($25\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	5,6	150	24
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	6,3	150	14
6 ($100\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	8	150	6
7 ($200\mu\text{s}$)	3 ($12\mu\text{s}$)	9	155	2,2
8 ($400\mu\text{s}$)	4 ($25\mu\text{s}$)	10	155	0,4

Tablo 3.8 : 4. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



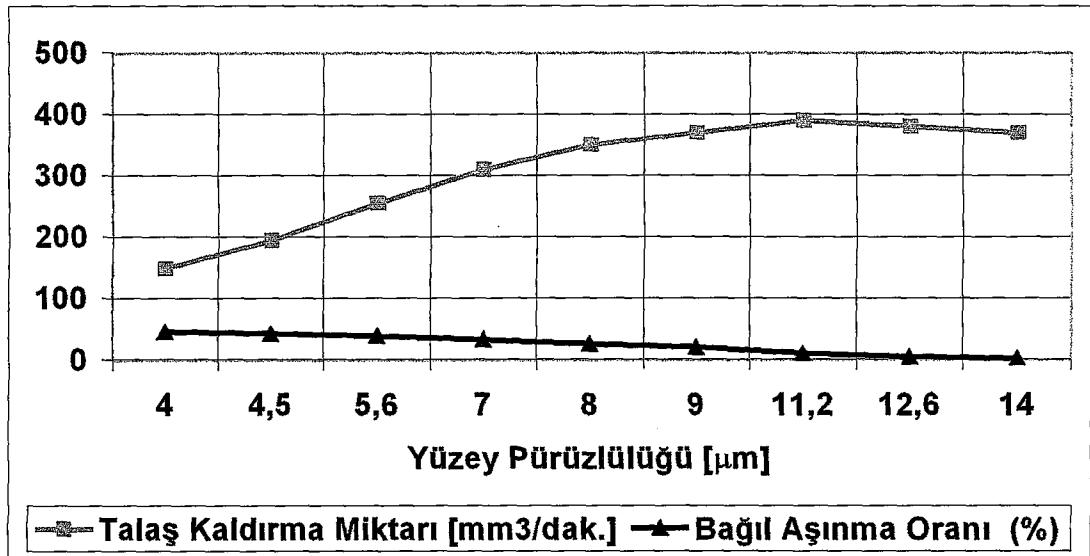
ŞEKİL 3.51 : 4. Deney Sonuçları Grafiği

3.14.5 Deney 5

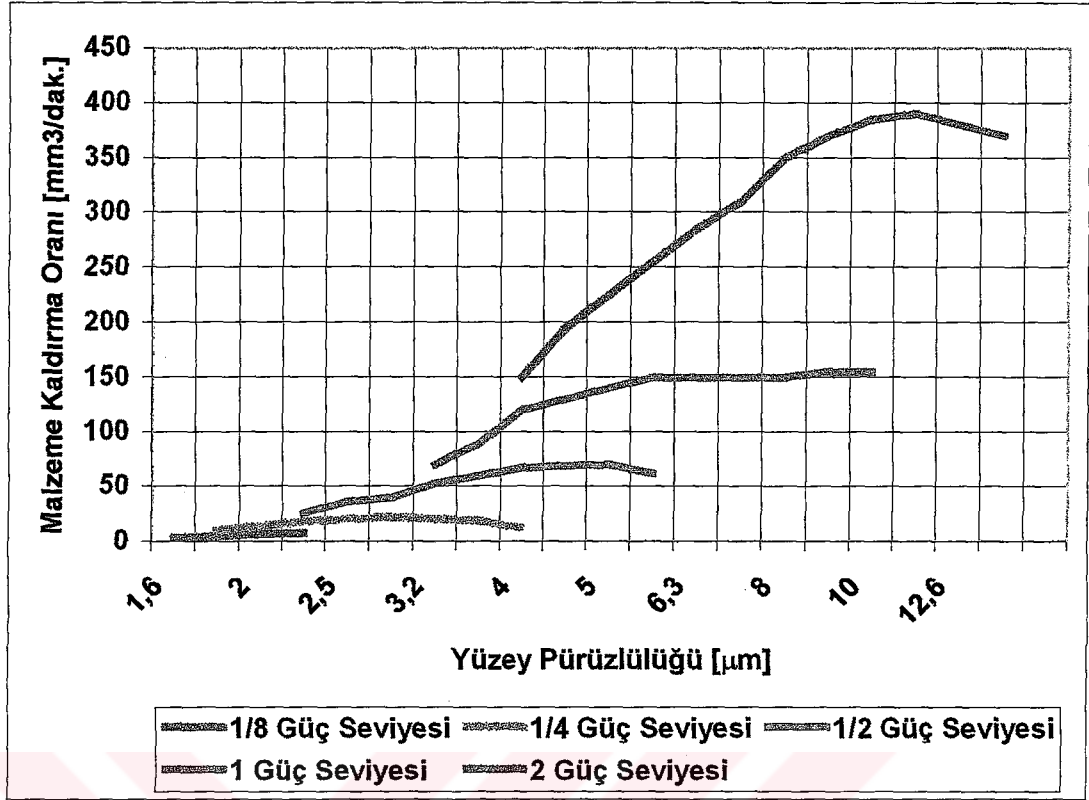
Bu deneyde elektrolitik bakır (+) elektrot 1.2080 çeliği iş parçası (-) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 2 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	4	150	45
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	4,5	195	42
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	5,6	255	38
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	7	310	32
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	8	350	25
6 ($100\mu\text{s}$)	3 ($12\mu\text{s}$)	9	370	20
7 ($200\mu\text{s}$)	4 ($25\mu\text{s}$)	11,2	390	10
8 ($400\mu\text{s}$)	5 ($50\mu\text{s}$)	12,6	380	4,5
9 ($800\mu\text{s}$)	6 ($100\mu\text{s}$)	14	370	1,4

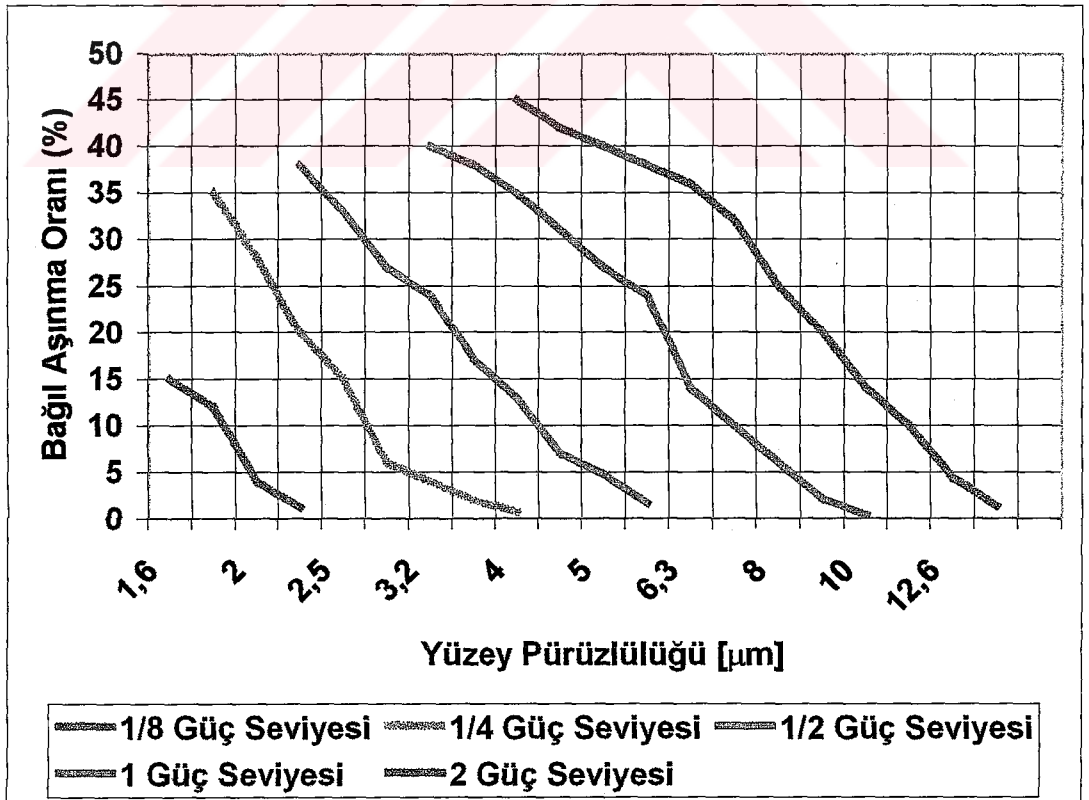
Tablo 3.9 : 5. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



ŞEKİL 3.52 : 5. Deney Sonuçları Grafiği



ŞEKİL 3.53 : Bakır Elektrot (+) ve Çelik İş Parçasında (-) Yüzey Pürüzlülüğü ve Malzeme Kaldırma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi Grafiği



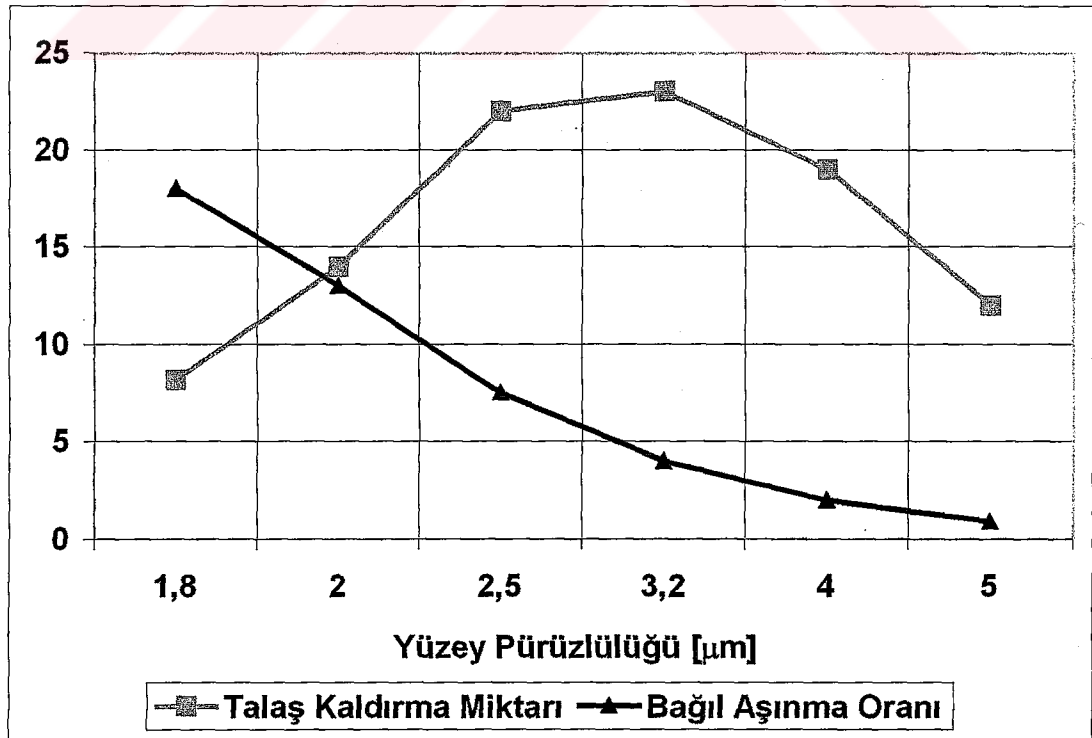
ŞEKİL 3.54 : Bakır Elektrot (+) ve Çelik İş Parçasında (-) Yüzey Pürüzlülüğü ve Bağıl Aşınma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi Grafiği

3.14.6 Deney 6

Bu deneyde "ellor 9" tip grafit (+) elektrot, 1.2080 çeliği iş parçası (-) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1/4 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	1,8	8,2	18
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2	14	13
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2,5	22	7,5
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	3,2	23	4
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	4	19	2
6 ($100\mu\text{s}$)	3 ($12\mu\text{s}$)	5	12	0,9

Tablo 3.10 : 6. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



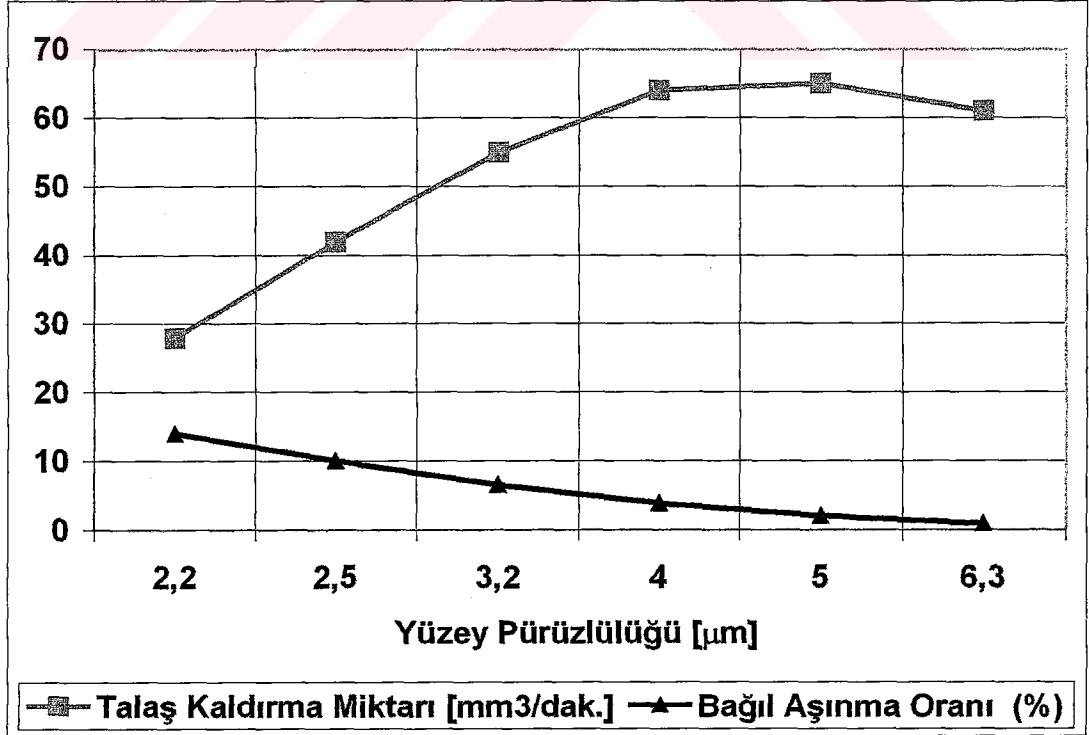
ŞEKİL 3.55 : 6. Deney Sonuçları Grafiği

3.14.7 Deney 7

Bu deneyde "ellor 9" tip grafit (+) elektrot, 1.2080 çeliği iş parçası (-) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1/2 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2,2	28	14
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2,5	42	10
3 ($12\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	3,2	55	6,5
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	4	64	3,8
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	5	65	2
6 ($100\mu\text{s}$)	3 ($12\mu\text{s}$)	6,3	61	0,9

Tablo 3.11 : 7. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



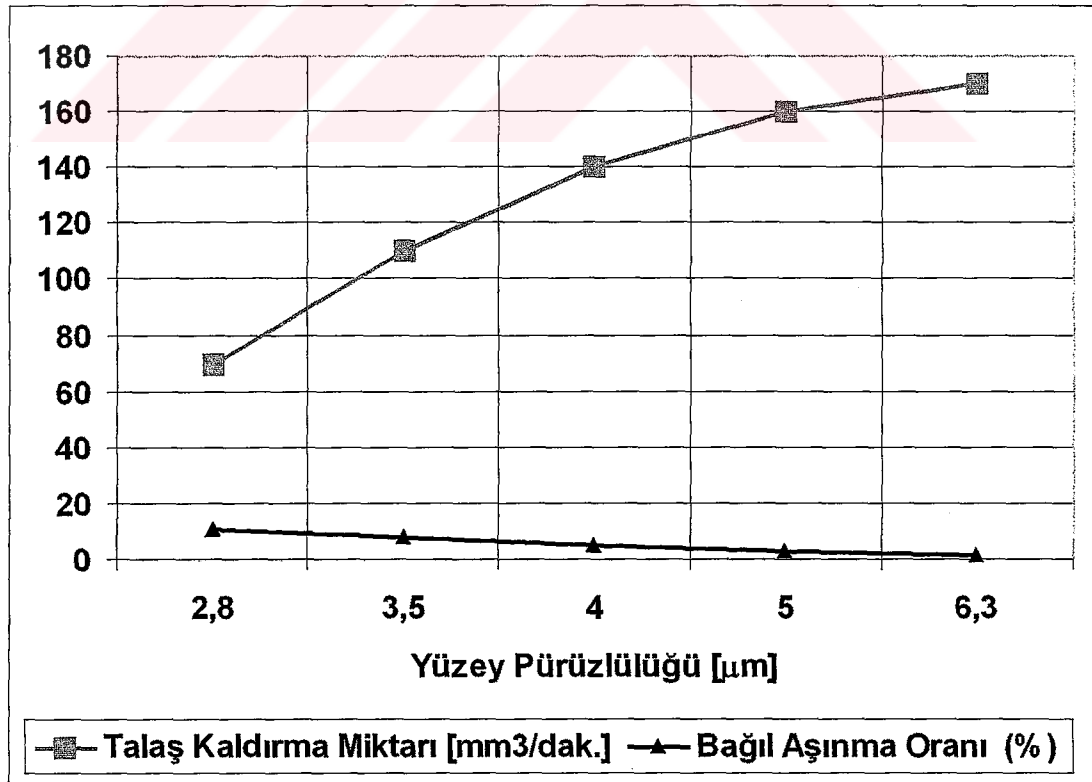
ŞEKİL 3.56 : 7.Deney Sonuçları Grafiği

3.14.8 Deney 8

Bu deneyde "ellor 9" tip grafit (+) elektrot, 1.2080 çeliği iş parçası (-) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, basıncı 400g/cm^2 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 1 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R_a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [$\text{mm}^3/\text{dak.}$]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 ($4\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	2,8	70	11
2 ($6\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	3,5	110	8
3 ($12\mu\text{s}$)	1 ($4\mu\text{s}$)	4	140	5
4 ($25\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	5	160	3
5 ($50\mu\text{s}$)	2 ($6\mu\text{s}$)	6,3	170	1,5

Tablo 3.12 : 8. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



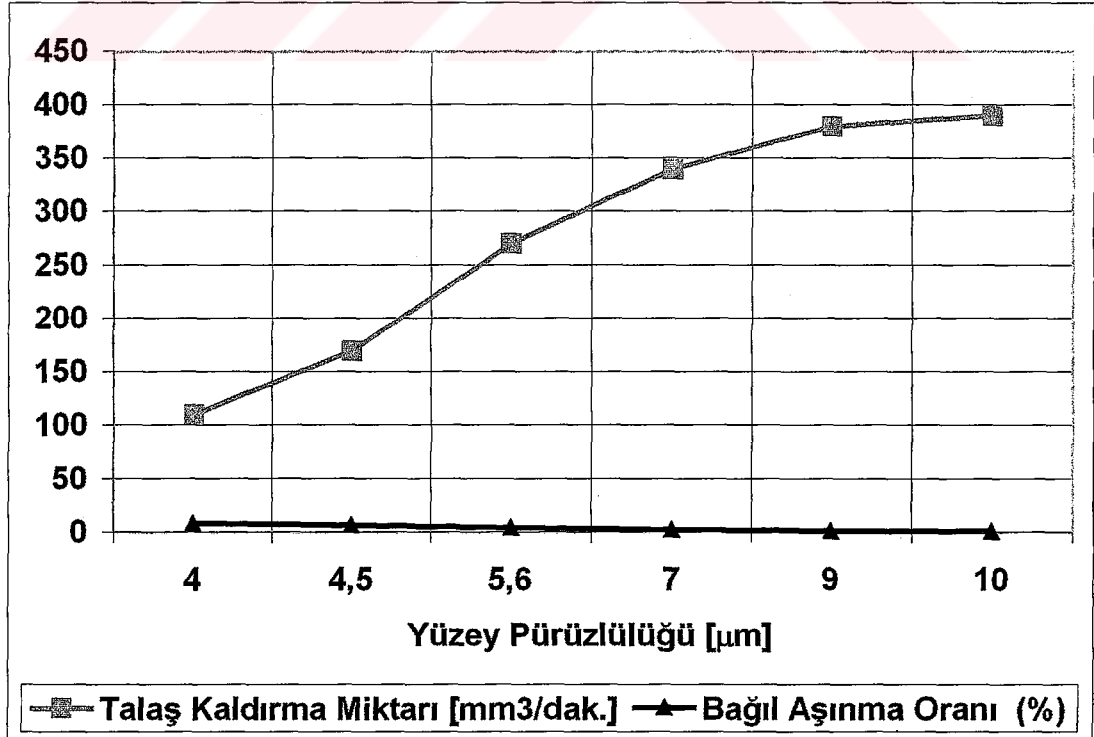
ŞEKİL 3.57 : 8.Deney Sonuçları Grafiği

3.14.9 Deney 9

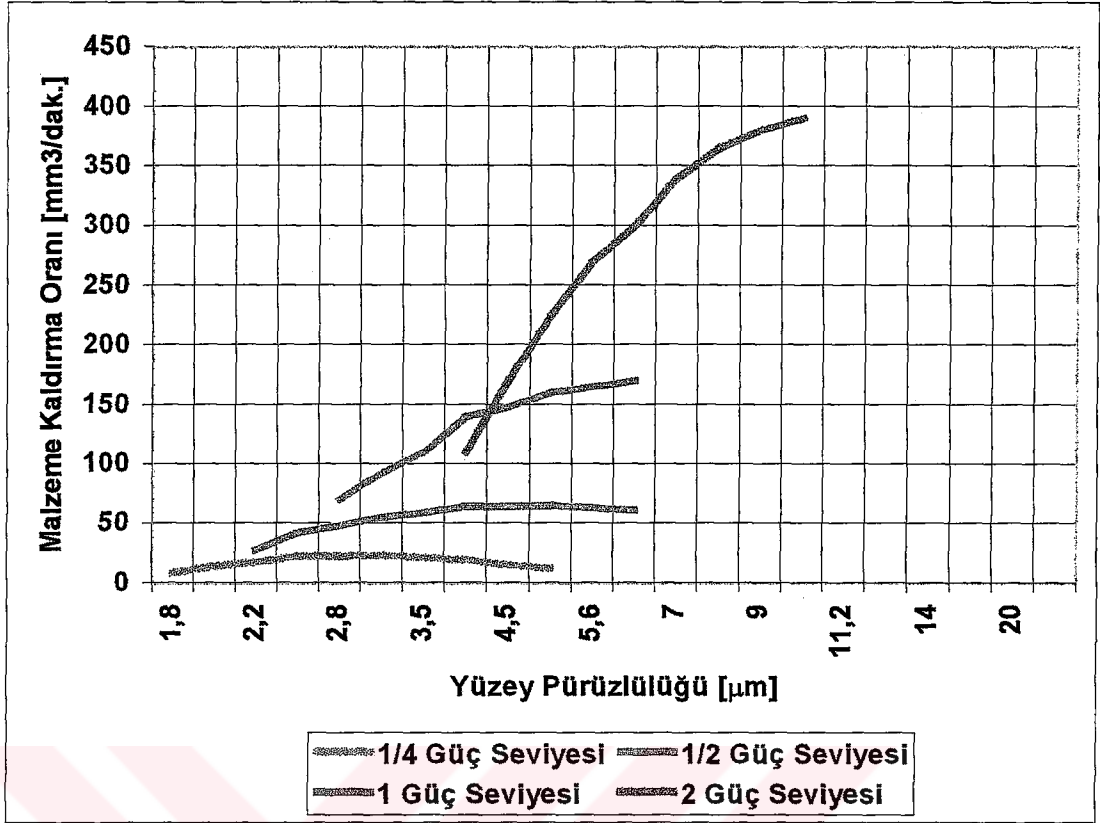
Bu deneyde "ellor 9" tip grafit (+) elektrot, 1.2080 çeliği iş parçası (-) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı Mentor 28 (Esso standart) olup, basıncı 400g/cm² 'dir. Deney sonucu elde edilen değerler tabloda sunulmuştur. Güç seviyesi 2 olup gerilim 80 V'tur.

Ark Süresi	Ark Aralığı (Bekleme Süresi)	R _a (yan yüzey) [μm]	Talaş Kaldırma Miktarı [mm ³ /dak.]	Bağıl Aşınma Oranı (%)
1 (4μs)	1 (4μs)	4	110	8
2 (6μs)	1 (4μs)	4,5	170	6,2
3 (12μs)	2 (6μs)	5,6	270	3,8
4 (25μs)	2 (6μs)	7	340	2
5 (50μs)	3 (12μs)	9	380	1
6 (100μs)	4 (25μs)	10	390	0,5

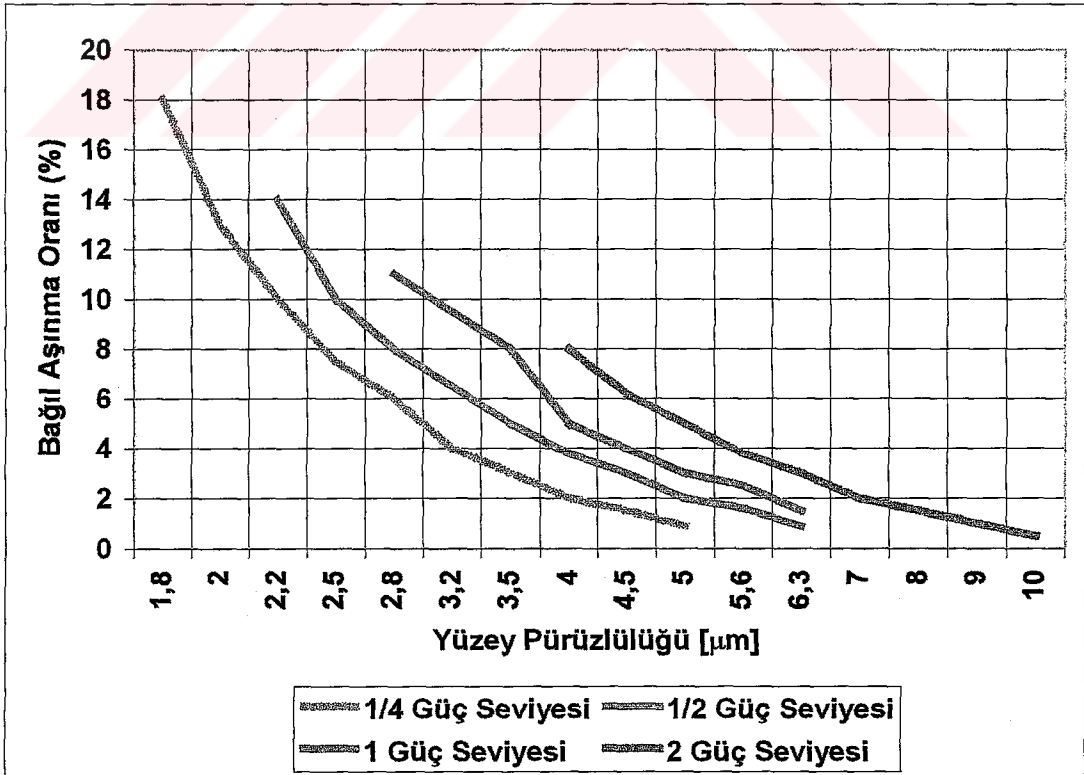
Tablo 3.13 : 9. Deney Parametreleri ve Elde Edilen Sonuçlar



ŞEKİL 3.58 : 9. Deney Sonuçları Grafiği



ŞEKİL 3.59 : Grafit Elektrot (+) ve Çelik İş Parçasında (-) Yüzey Pürüzlülüğü ve Malzeme Kaldırma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi Grafiği



ŞEKİL 3.60 : Grafit Elektrot (+) ve Çelik İş Parçasında (-) Yüzey Pürüzlülüğü ve Bağıl Aşınma Oranının Güç Seviyeleriyle Değişimi Grafiği

5. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR

Farklı güç seviyeleri, farklı ark ve bekleme süreleri ve farklı elektrot malzemeleriyle gerçekleştirilen 9 adet deney işlemi sonucunda deney çıktısı olarak ön görülen malzeme kaldırma oranı, elektrot için bağıl (hacimsel) aşınma oranı ve oluşan yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, çalışmanın teorik kısmında anlatılan ön görülerle paralel olduğu ortaya çıkmıştır.

Söz konusu sonuçlar ve paralel oldukları teorik öngörüler aşağıda sunulmuştur:

- Diğer tüm deneysel koşullar (ark süresi, bekleme süresi, kutuplama, iş parçası ve takım malzemeleri, dielektrik sıvı cinsi) aynı kaldığında artan güç seviyesi, dolayısıyla artan ark akımı miktarıyla iş parçasından kaldırılan malzeme kaldırma oranının yükseldiği gözlenmiştir,
- Aynı deney koşulları için yine artan ark akımı miktarıyla takımda meydana gelen bağıl (hacimsel) aşınma oranının yükseldiği gözlenmiştir,
- Aynı deney koşulları için yine artan ark akımı miktarıyla takımda meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değerinin yükseldiği gözlenmiştir,
- Aynı güç seviyesi değeri için ise artan ark süresiyle iş parçasından kaldırılan malzeme oranı artar. Ancak bu değer belirli bir seviyeden sonra düşüşe geçer. Buna sebep olarak ise artan ark süresiyle dielektrik sıvı içindeki parçacıklara iyonlaşmak için daha çok süre sağlandığından ortamda elektronlara oranla daha çok iyon bulunmaktadır. Kütlesel olarak daha yüksek olan iyonlar elektronlara oranla çarptıkları yüzeyde daha büyük bir etki ve sıcaklık yükselmesine yol açarak yüksek malzeme kaldırma oranına ulaşılmasını sağlarlar. Ancak ark süresi gereğinden fazla uzun tutulduğunda doyuma ulaşan sistemdeki iyon sayısı elektron sayısından az olacağından iyonların söz konusu kütlesel etkisi ikincil hale gelecektir. Bu şekilde malzeme kaldırma oranı yapacağı maksimum değerinden düşüşe geçer,

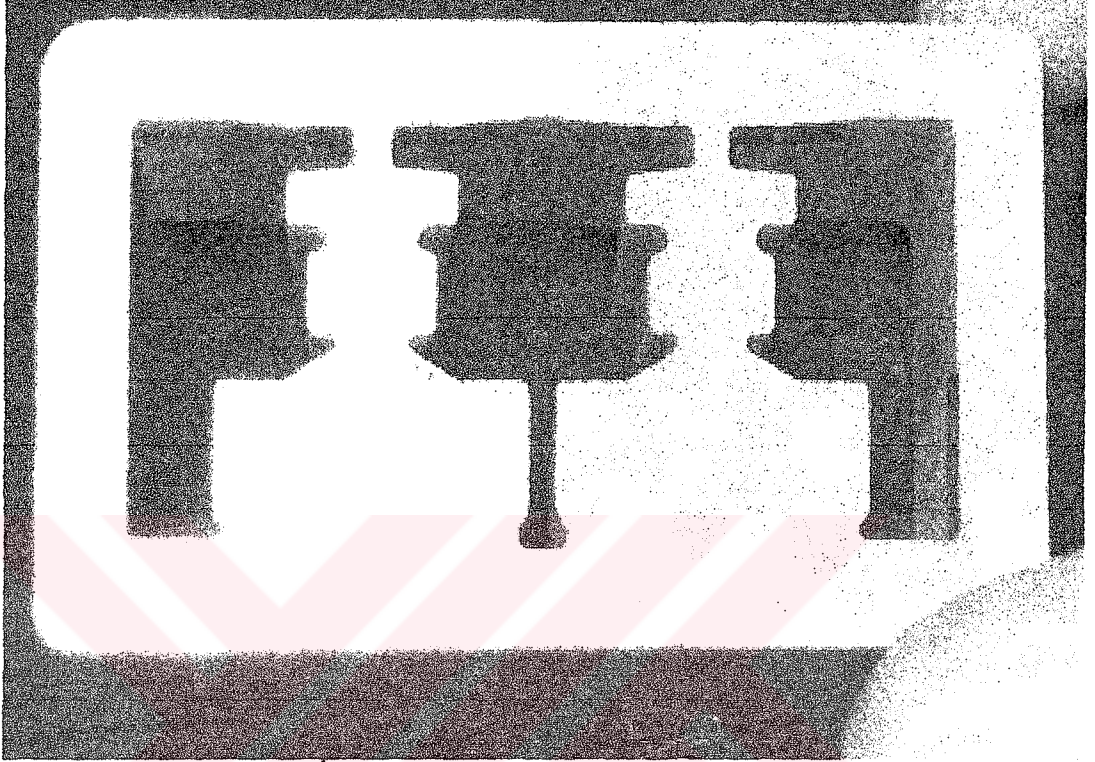
- Grafit ve bakır elektrotun deneysel performansları karşılaştırılacak olursa, aynı deneysel koşullarında her iki elektrot da birbirine eşit ya da oldukça yakın yüzey pürüzlülüğü değerleri vermiştir,
- Yine her 2 elektrot için de aynı deneysel koşullarda malzeme kaldırma oranları birbirine çok yakın çıkmıştır,
- Ancak aynı deneysel koşullarda bağlı aşınma oranı grafitte bakır elektroda oranla daha az oluşmuştur (2 Güç seviyesinde yaklaşık 5 kat daha az). Bunun sebebi olarak da grafitin bakıra oranla yüksek olan ergime sıcaklığı (bakır için 1083°C iken grafit için 3600°C) gösterilebilir. Çünkü artan güç seviyesi yani akım değerleriyle iş parçası-takım aralığında oluşan yüksek sıcaklıklar ergime sıcaklığı daha yüksek olan malzemede daha düşük aşınma meydana gelmesine sebep olmaktadır.



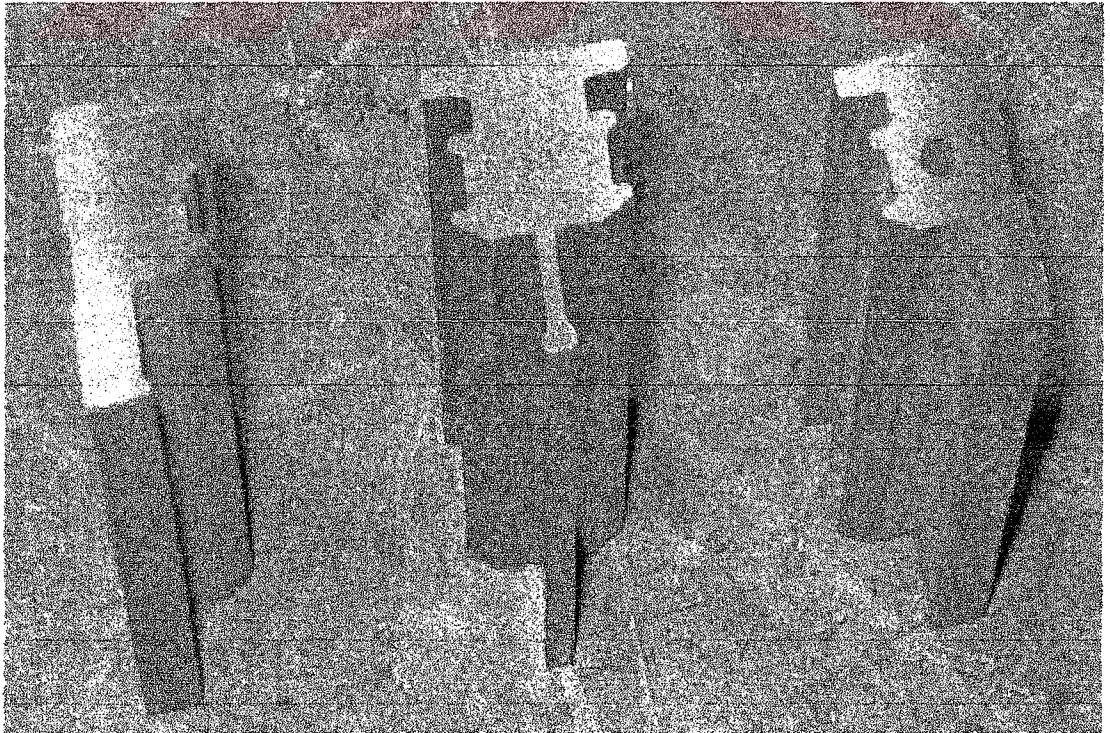
KAYNAKLAR

- [1] Brown, James, 1998. Advanced Machining Technology Handbook, New York, Mc Graw-Hill
- [2] Pandey P.C., Shaw H. S., 1980. Modern Machining Processes , New Delhi, Mc Graw-Hill
- [3] Goetsch David L., 1991. Modern Manufacturing Processes, New York, Delmar Publishers
- [4] De Garmo Paul, Black J.T. ve Kohser Ronald, 1999. Materials and Processes in Manufacturing, New York, John Wiley & Sons
- [5] Boothroyd Geoffrey, Knight Winston A., 1989. Fundamentals of Machining and Machine Tools, New York, Marcel Dekker
- [6] El Wakil :Sherif D., 1989. Processes and Design for Manufacturing, New Jersey, Prentice Hall
- [7] Niebel Benjamin W., Draper Alan B., Whysk Richard A., 1989. Modern Manufacturing Process Engineering, New York, Mc Graw-Hill
- [8] Ostwald Philip F. Ve Munoz Jairo., 1996. Manufacturing Processes and Systems, New York, John Wiley & Sons
- [9] Black Paul H., 1961. Thory of Metal Cutting, New York, Mc Graw-Hill
- [10] Kalpakjian Serope, 1995. Manufacturing Engineering and Technology, Mass., Addison-Wesley
- [11] Sommer C., Sommer Steve, 1994. Wire EDM Manual, Texas., Technical Advance Publications
- [12] Schumacher B., Weckerle D., 1988. Funkenerosion, Berlin, VEB Verlag Technik
- [13] www.agie.com, www.furkan.com
- [14] www.sodick.com, www.mitsubishi-world.com

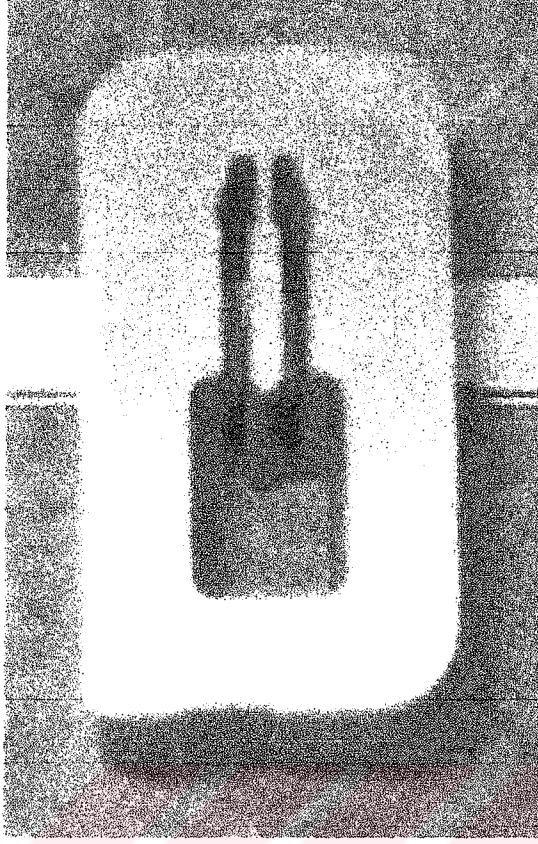
Ek A.



ŞEKİL A.1 : Elektroerozyon Uygulaması-1



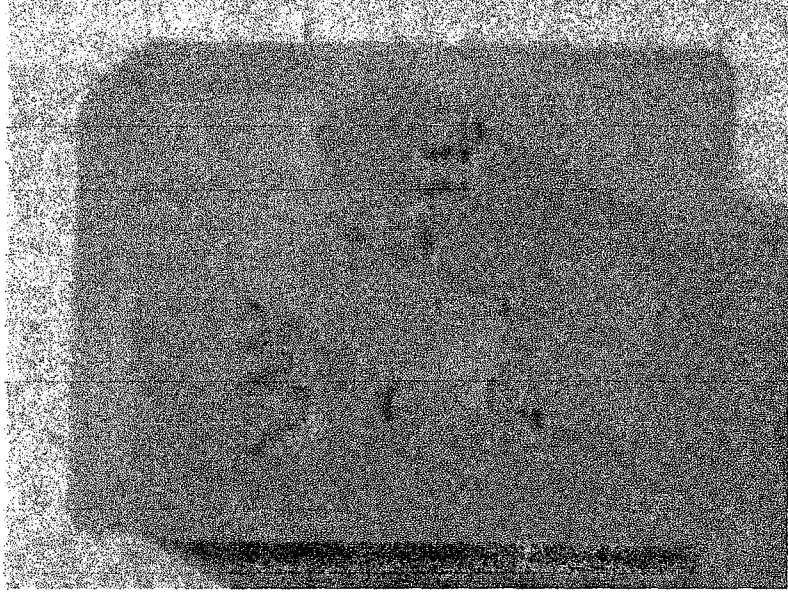
ŞEKİL A.2 : Tel Erozyonla Kesilmiş Kalıp Kesme Lokmaları



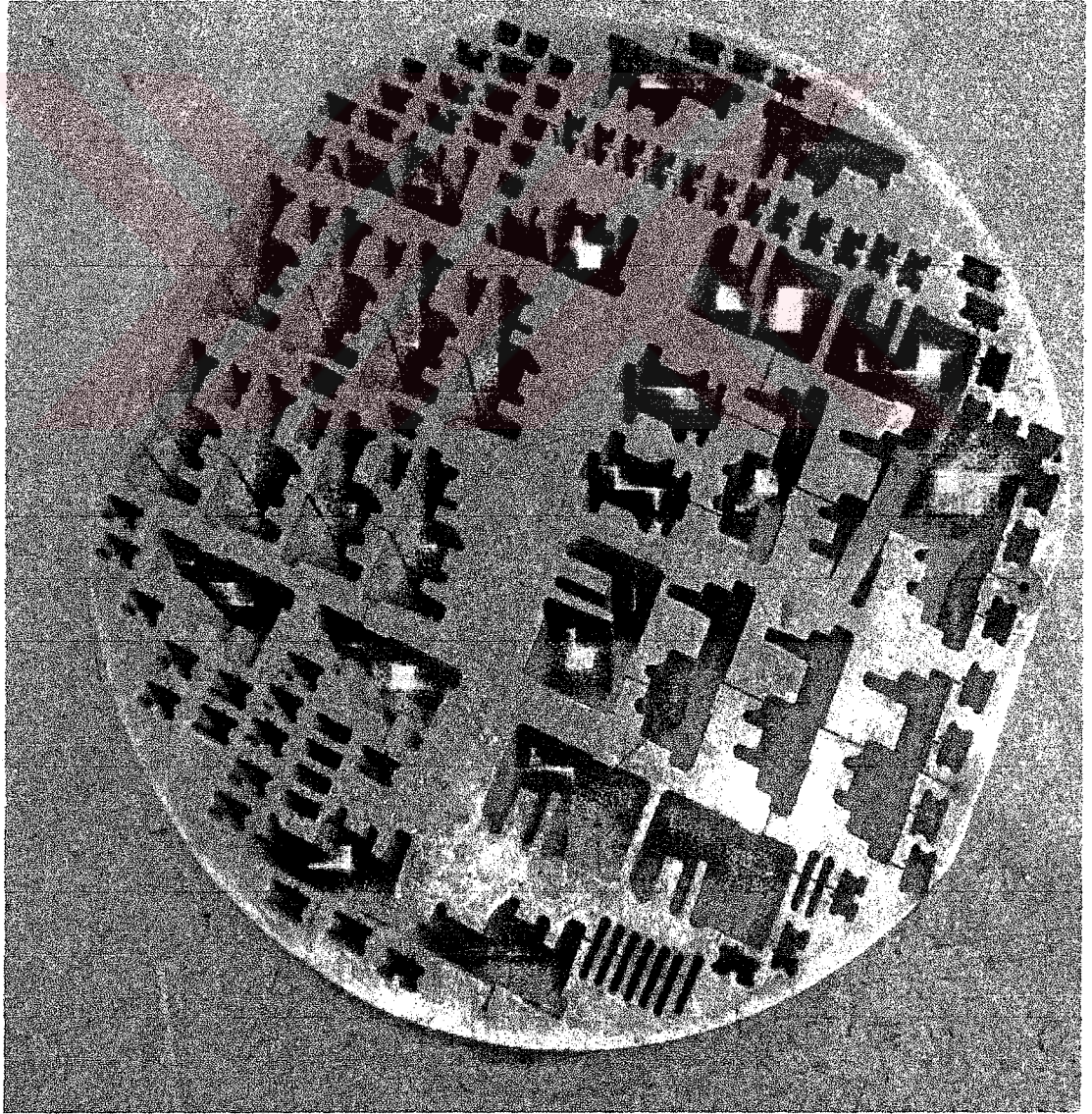
ŞEKİL A.3 : Elektroerozyon Uygulaması-2



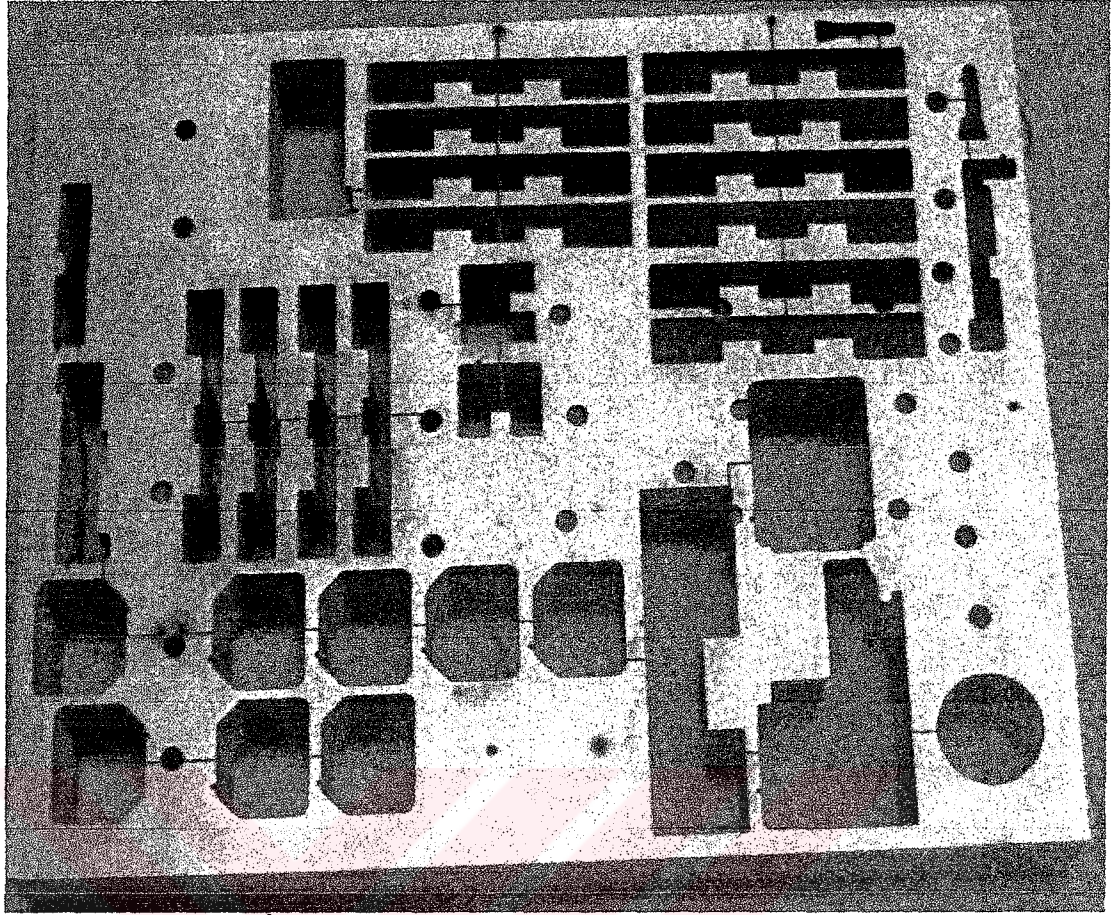
ŞEKİL A.4 : Elektroerozyon Uygulaması-3



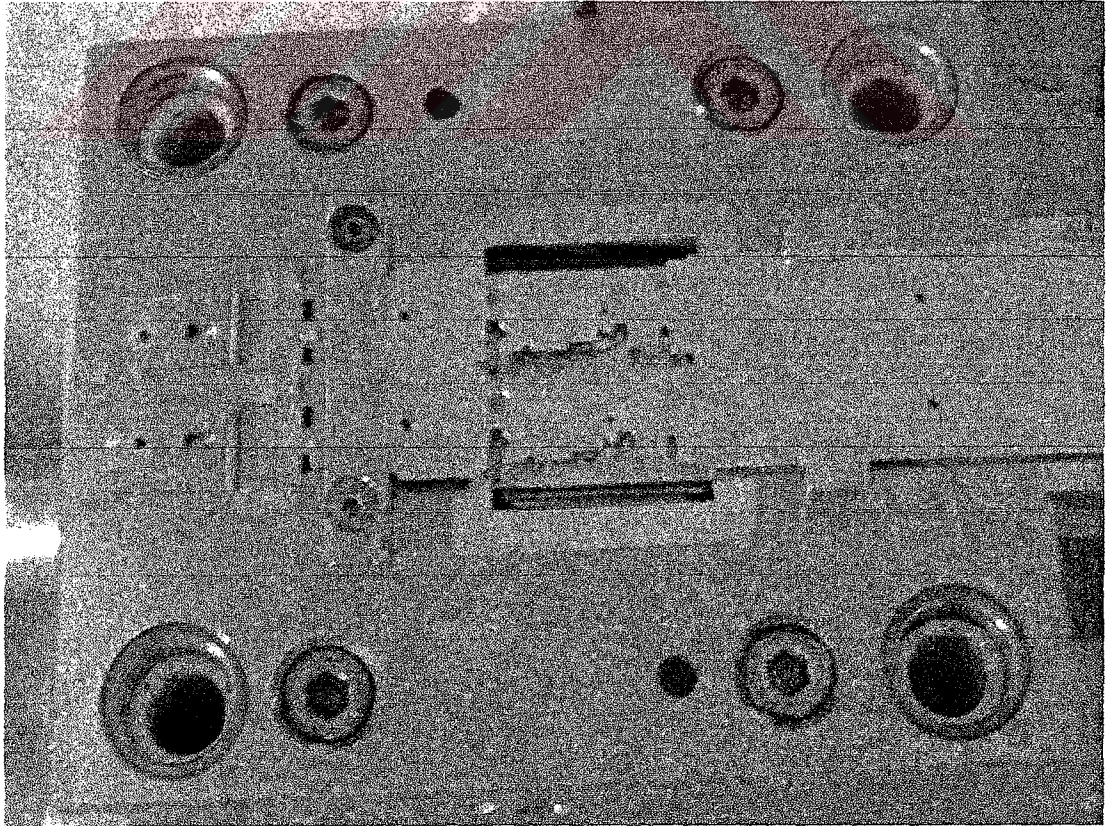
ŞEKİL A.5 : Elektroerozyon Uygulaması-4



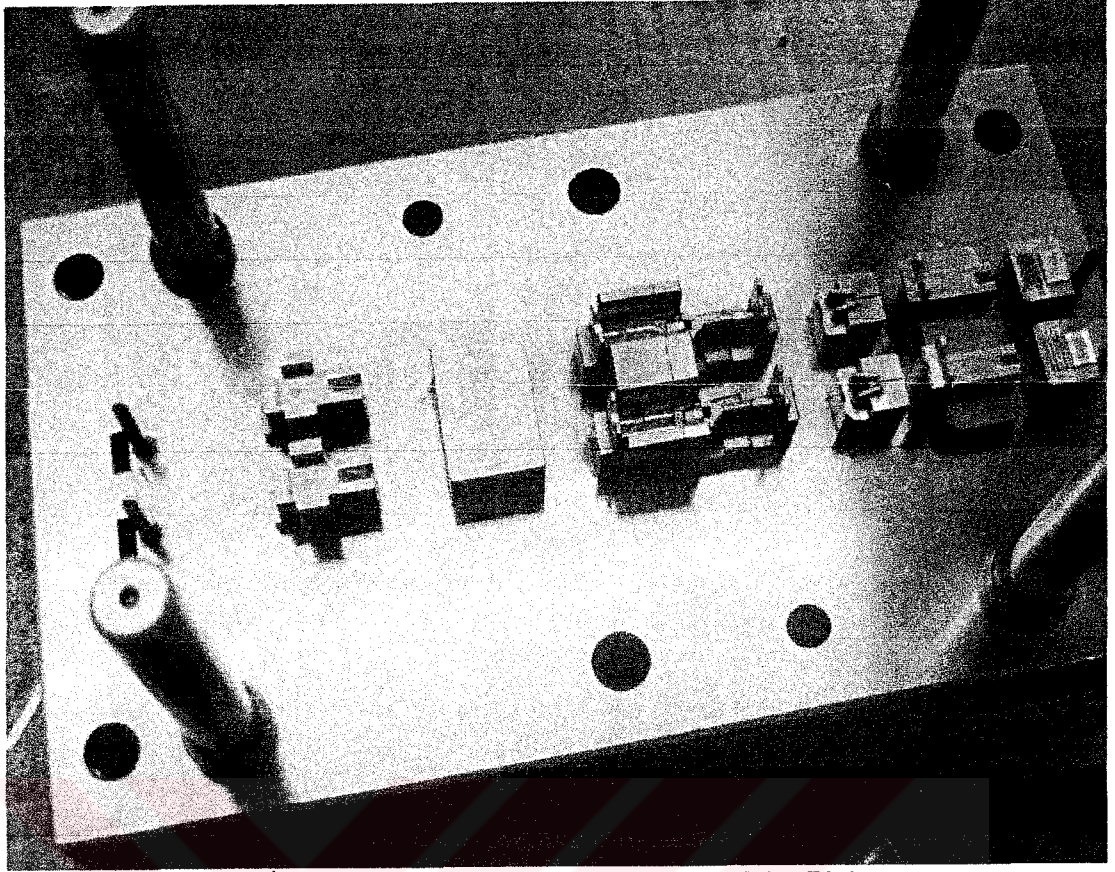
ŞEKİL A.6 : Elektroerozyonla Kesilmiş Çelik Bloğu-1



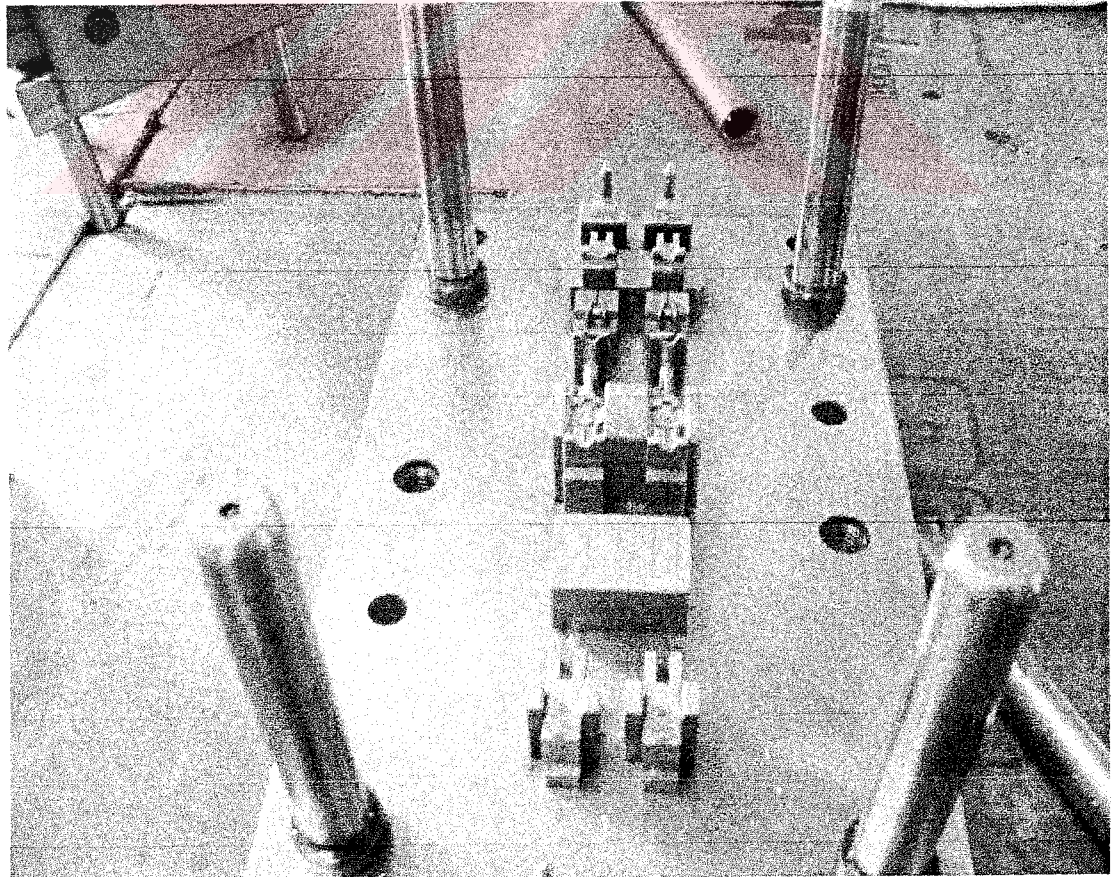
ŞEKİL A.7 : Elektroerozyonla Kesilmiş Çelik Bloğu-2



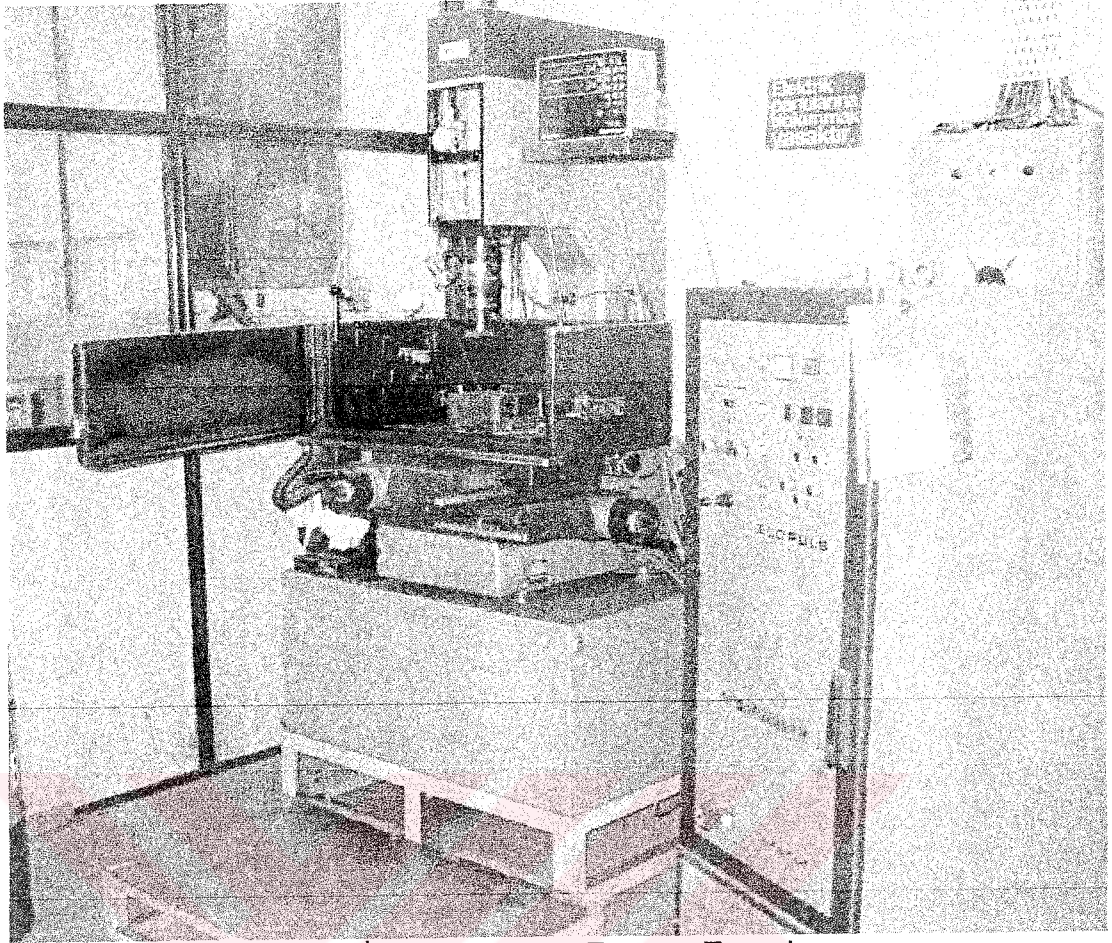
ŞEKİL A.8 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası ve Pirinç Bant İş Parçası



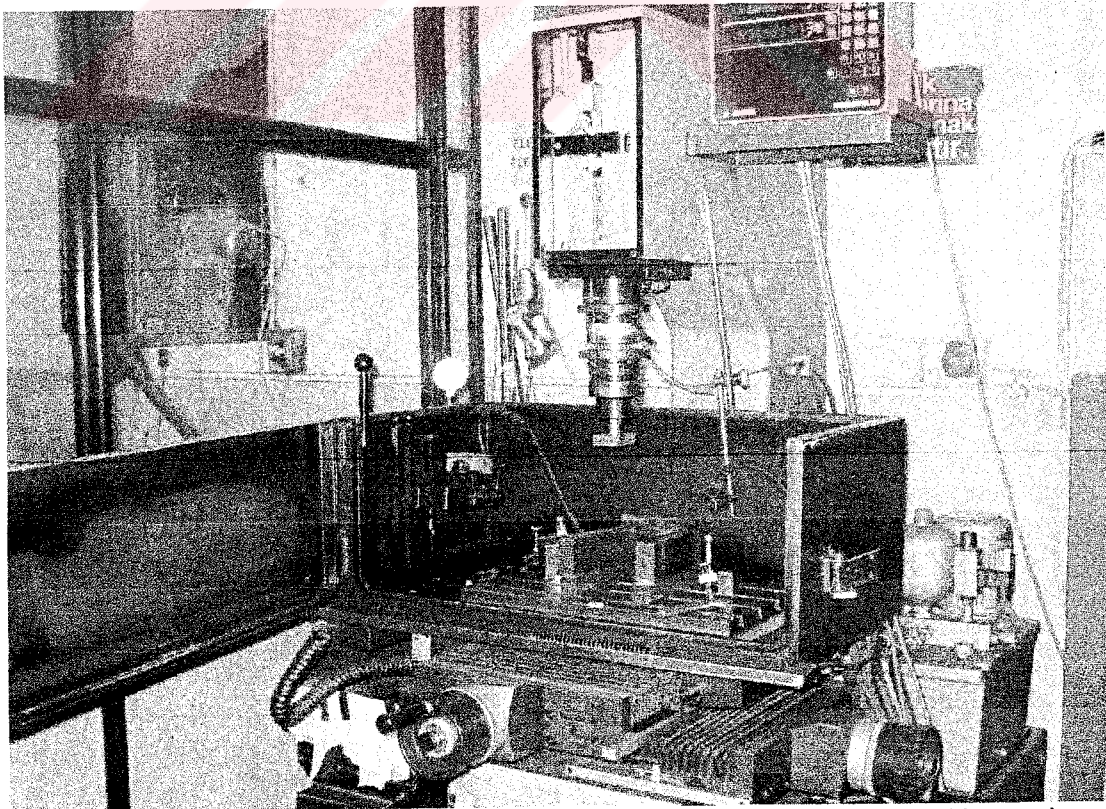
ŞEKİL A.9 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası



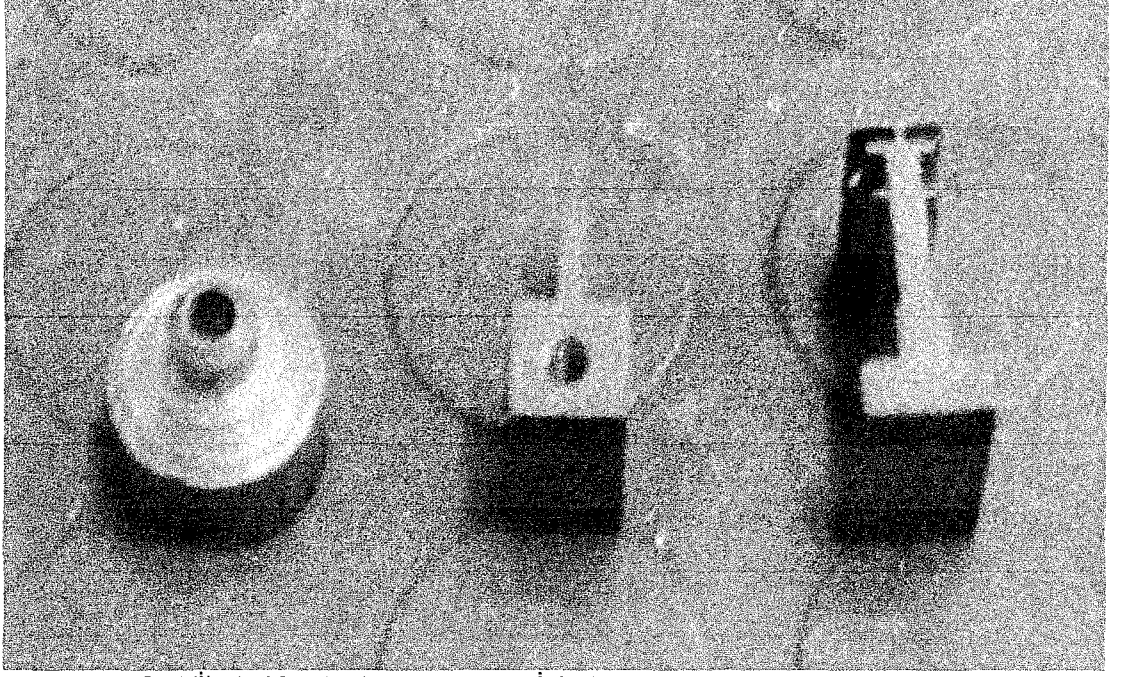
ŞEKİL A.10 : Elektroerozyonla Kesilmiş Kalıp Plakası



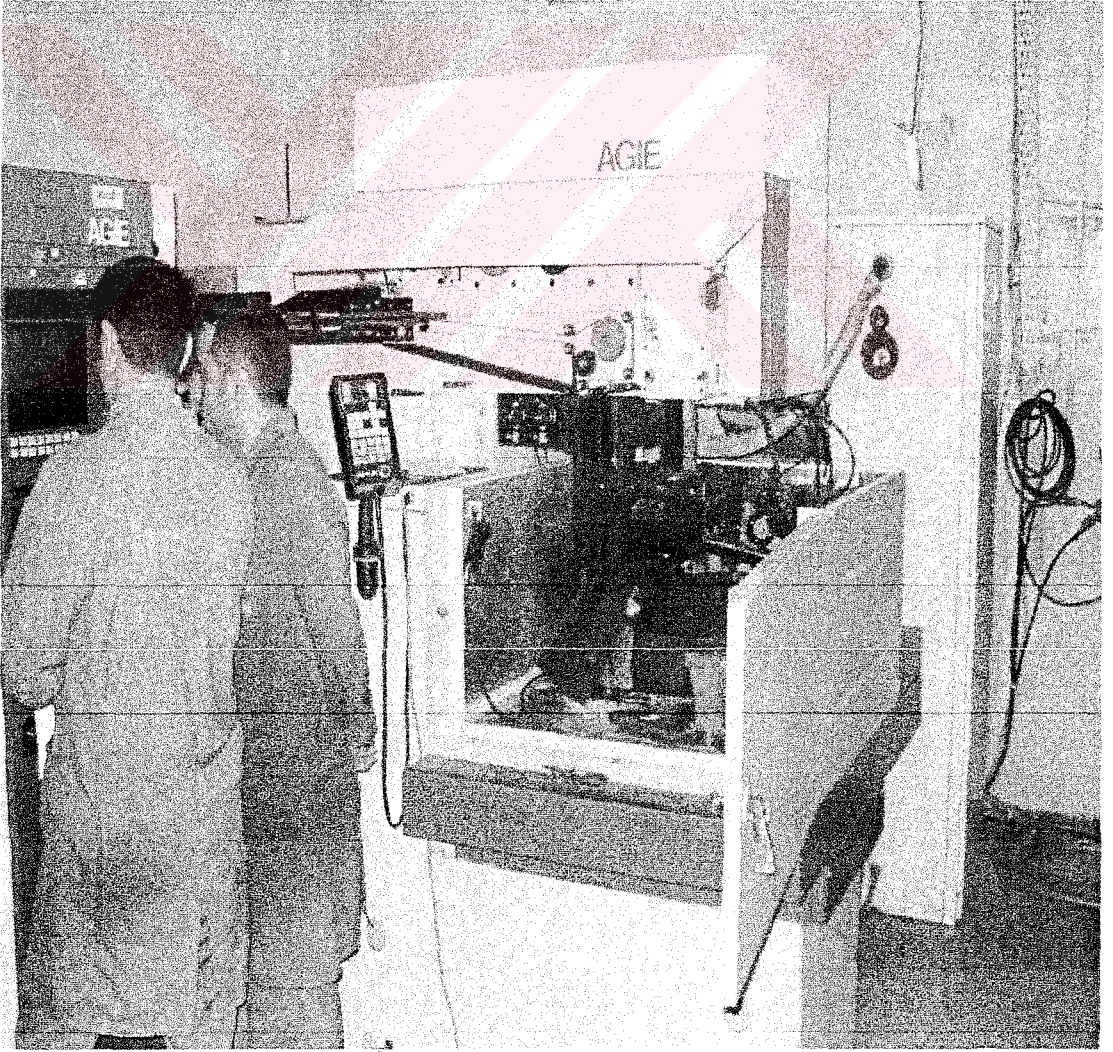
ŞEKİL A.11 : Dalma Erozyon Tezgahı



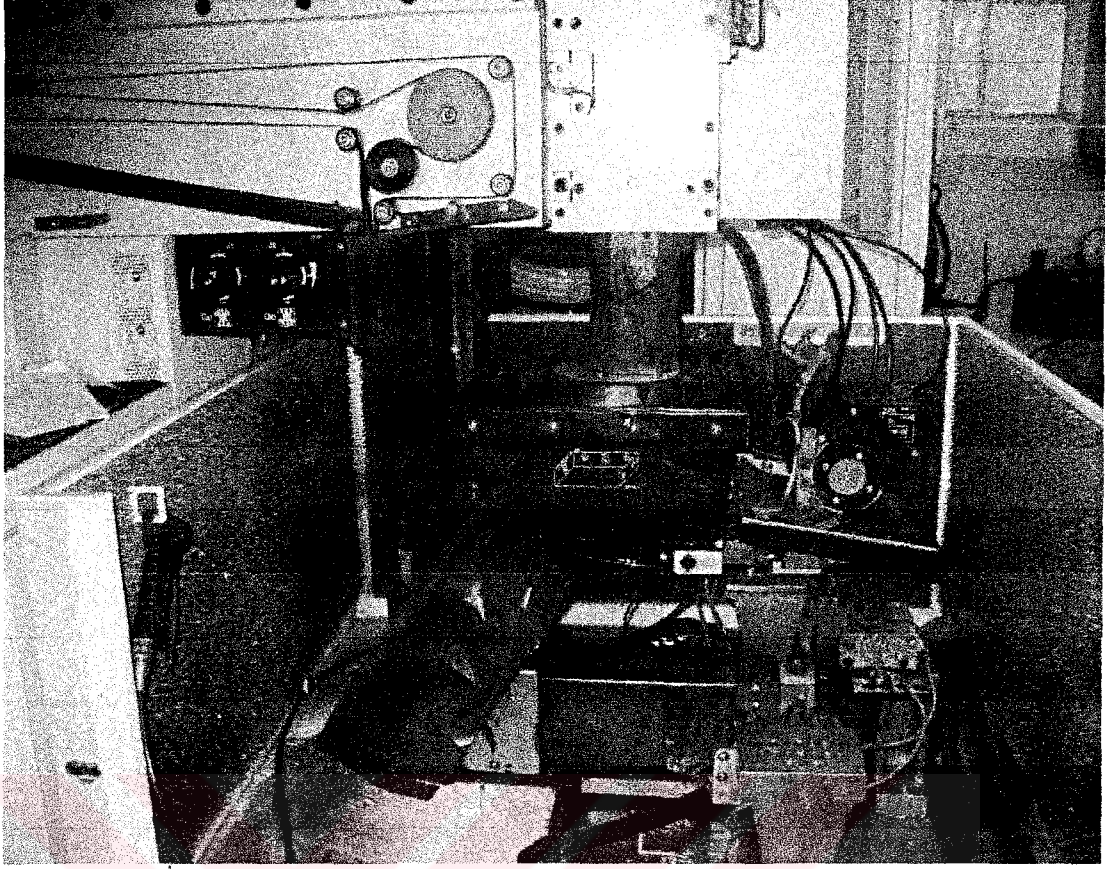
ŞEKİL A.12 : Dalma Erozyon Tezgahı Elektrot Kafası ve Dielektrik Haznesi



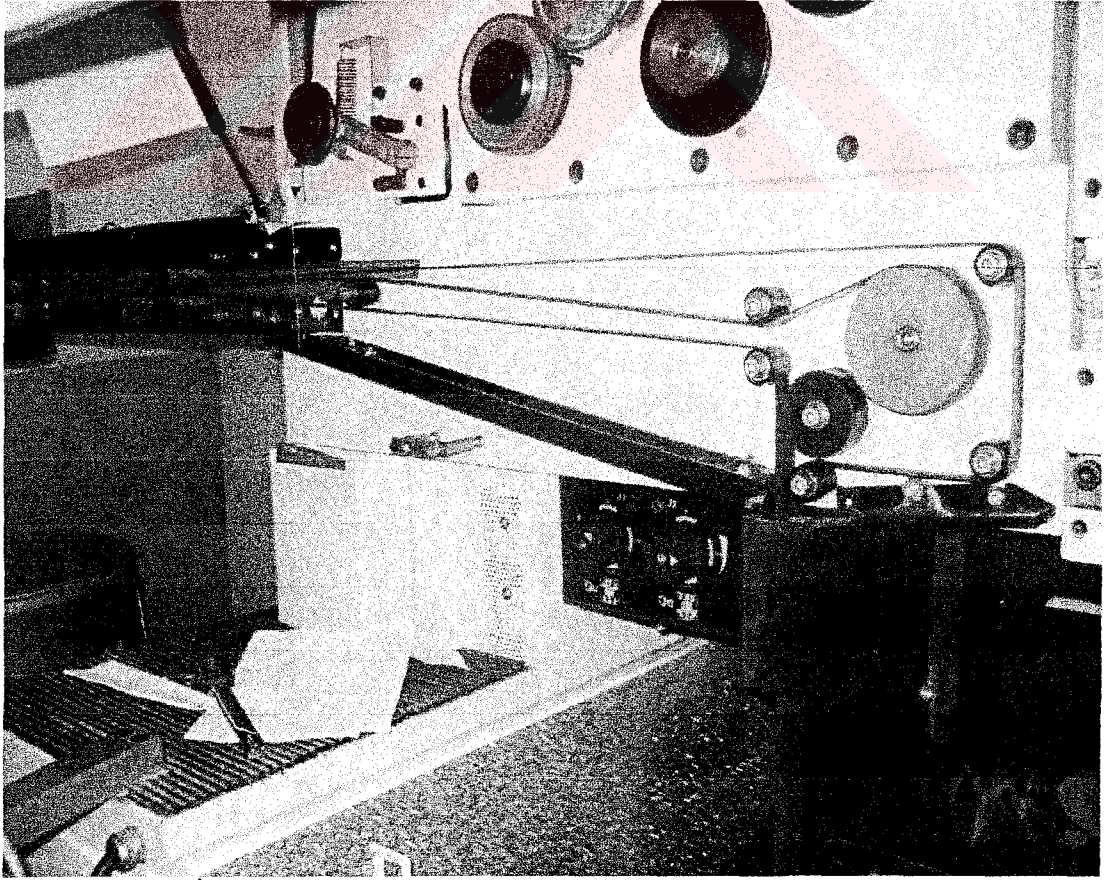
ŞEKİL A.13 : Dalma Erozyon İçin Hazırlanmış Bakır Elektrotlar



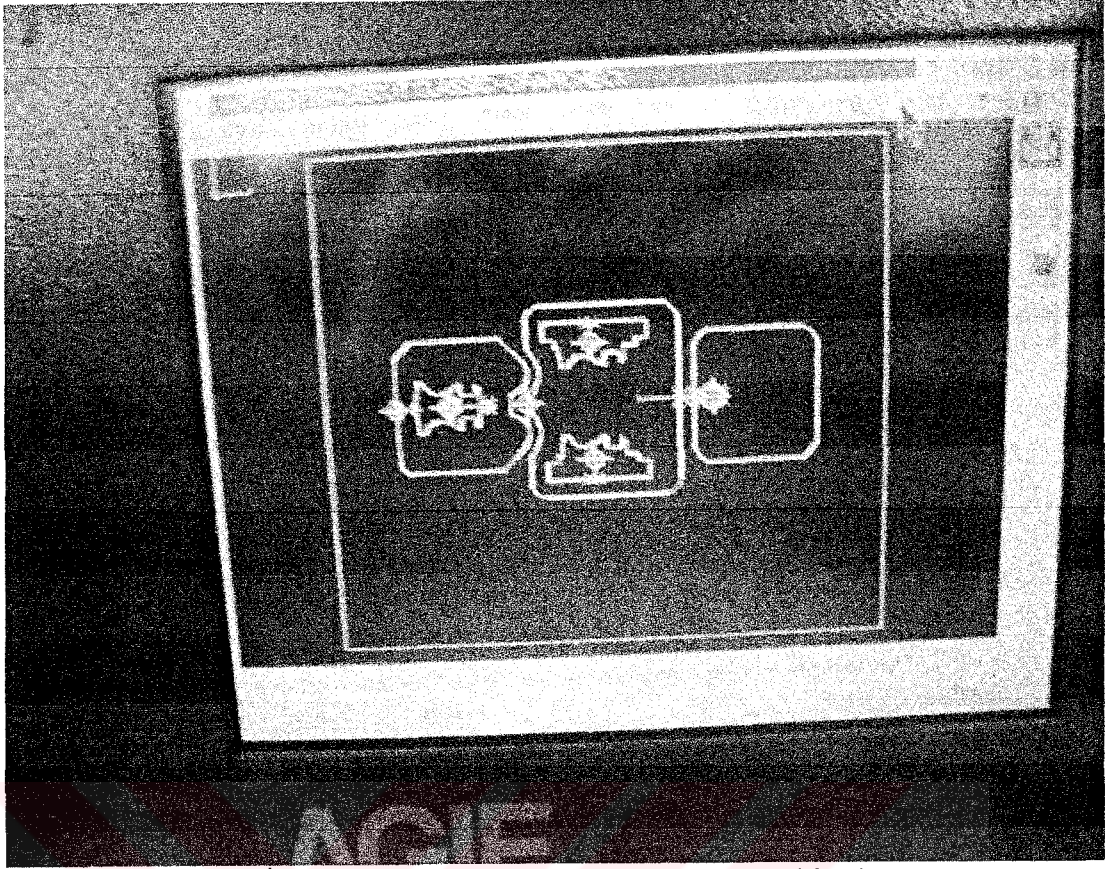
ŞEKİL A.14 : Tel Erozyon Tezgahı



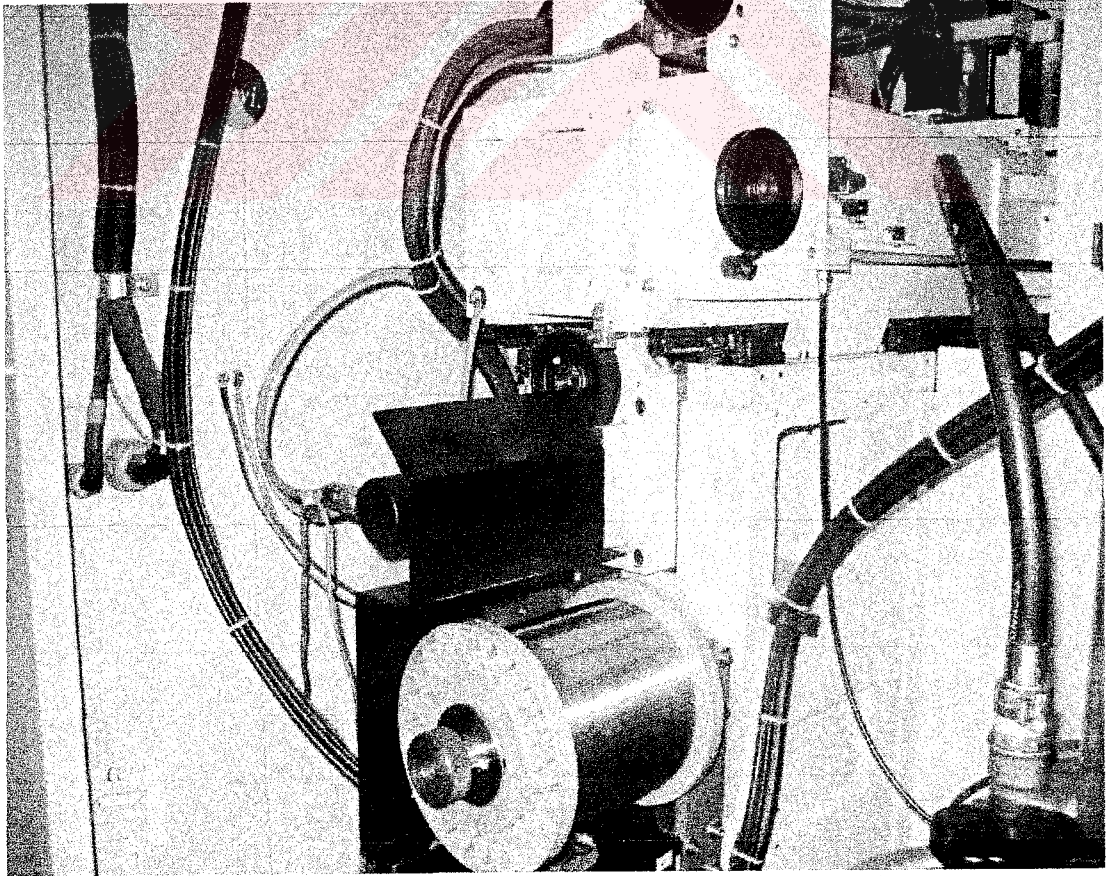
ŞEKİL A.15 : Tel Erozyon Tezgahı Tel Kafası ve Dielektrik Haznesi



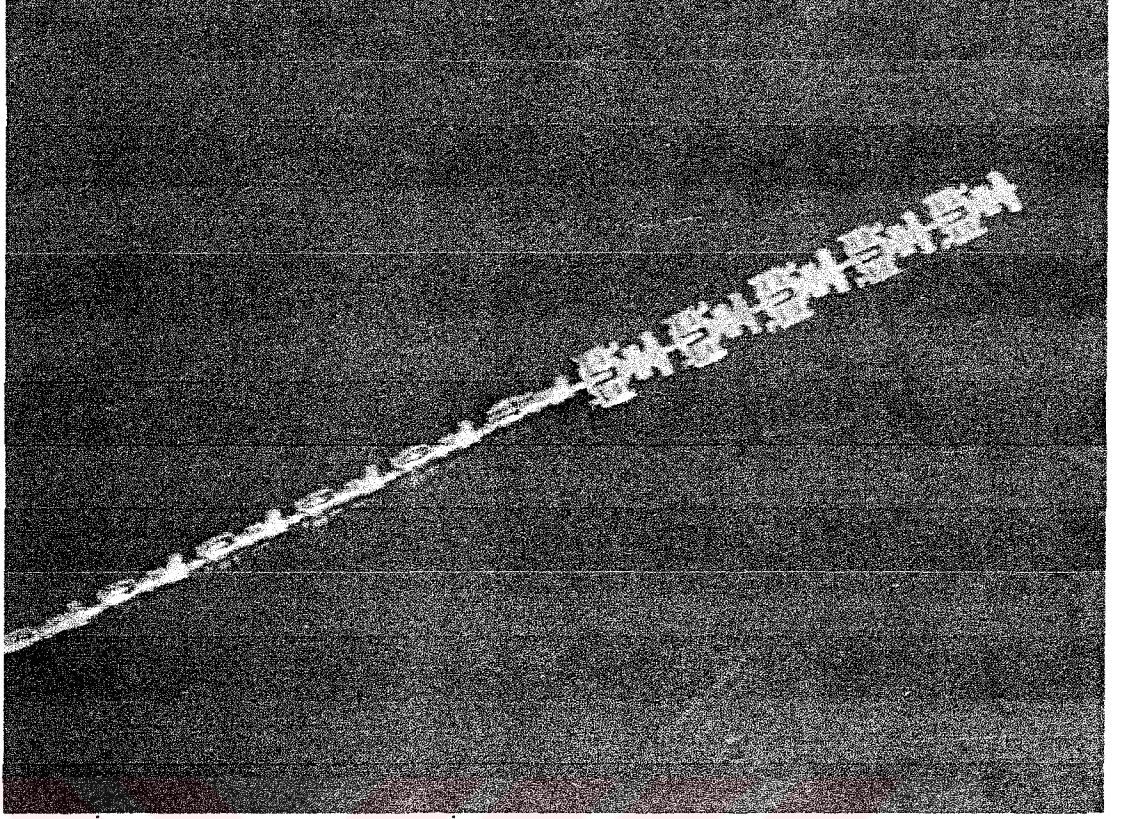
ŞEKİL A.16 : Tel Erozyon Tezgahı Tel Yönlendirici Ekipmanlar



ŞEKİL A.17 : Tel Erozyon Tezgahı Kullanım Yazılımı



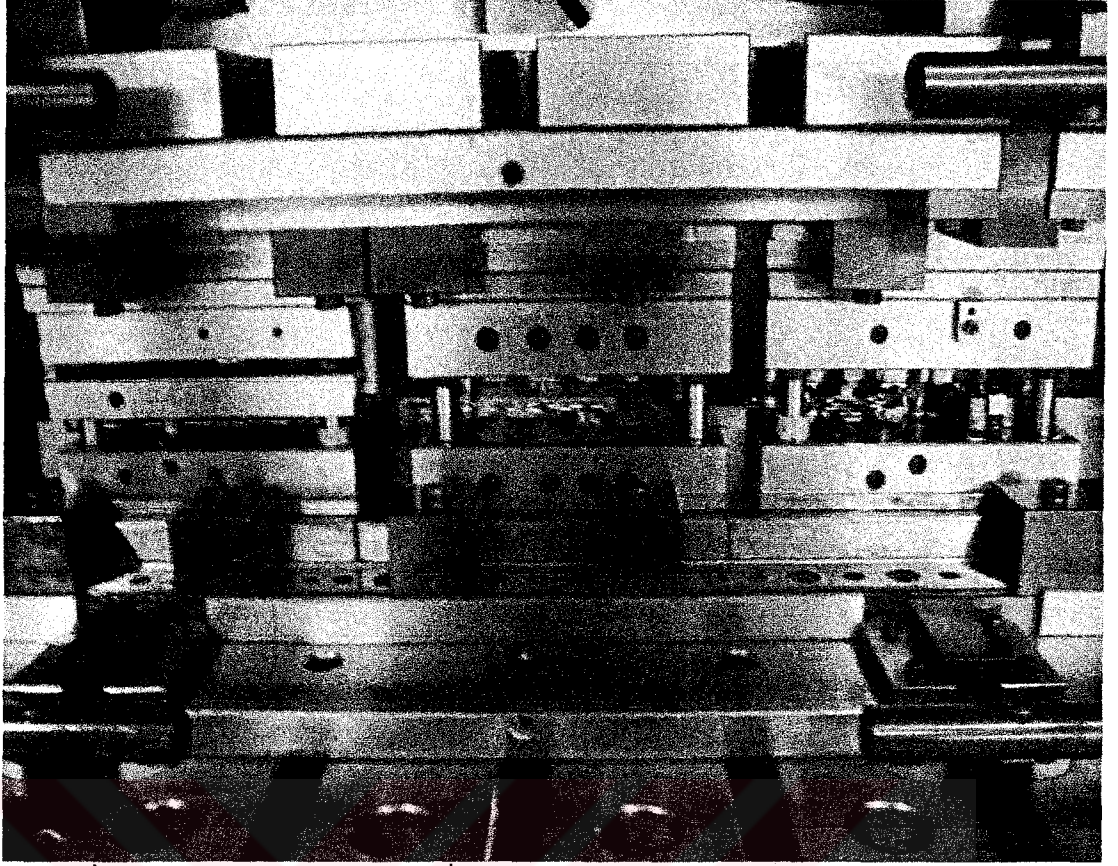
ŞEKİL A.18 : Tel Erozyon Tezgahı Tel Besleme Mekanizması



ŞEKİL A.19 : Elektroerozyonla İşlenmiş Kalıplar Kullanılarak Hidrolik Preslerde Şekillendirilmiş Bakır Kablo Terminali İmalat Aşamaları



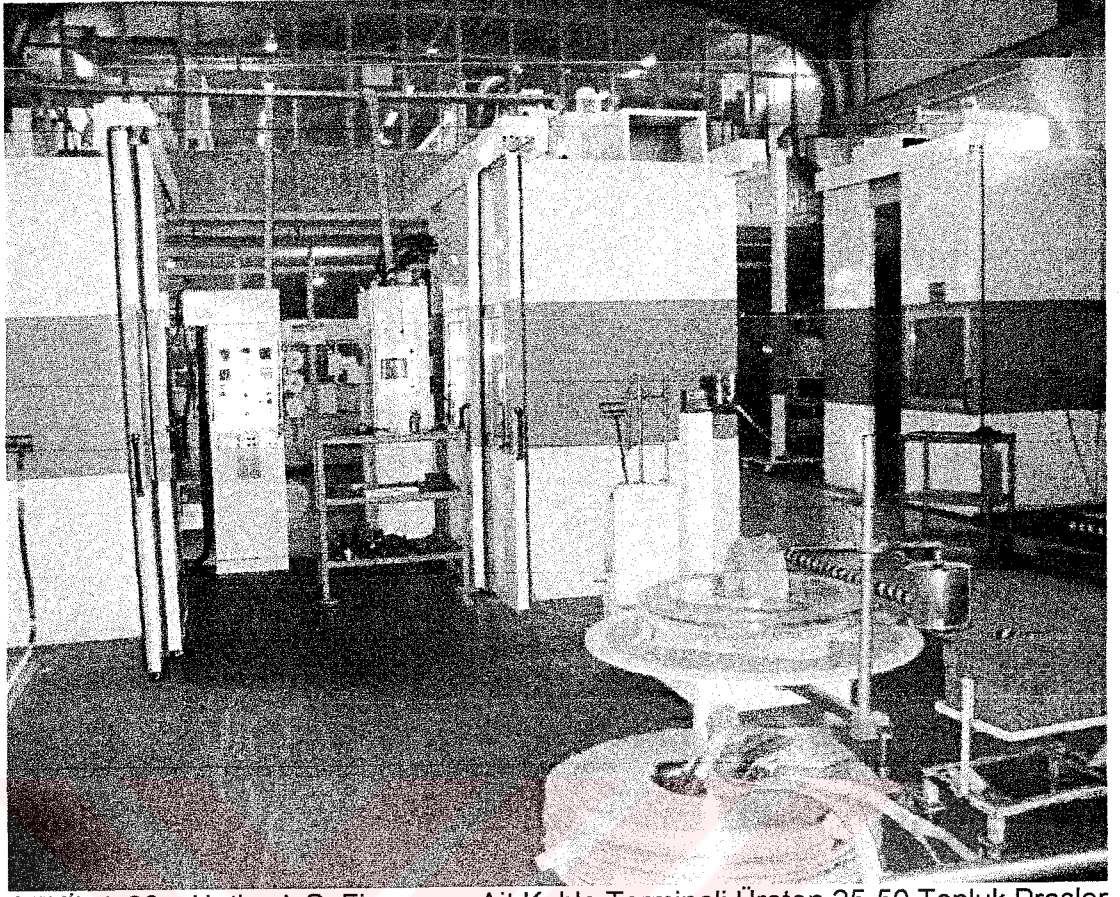
ŞEKİL A.20 : Elektroerozyonla İşlenmiş Progresif Kalıplar



ŞEKİL A.21 : Elektroerozyonla İşlenmiş ve Kalıba Bağlanmış Progresif Kalıplar



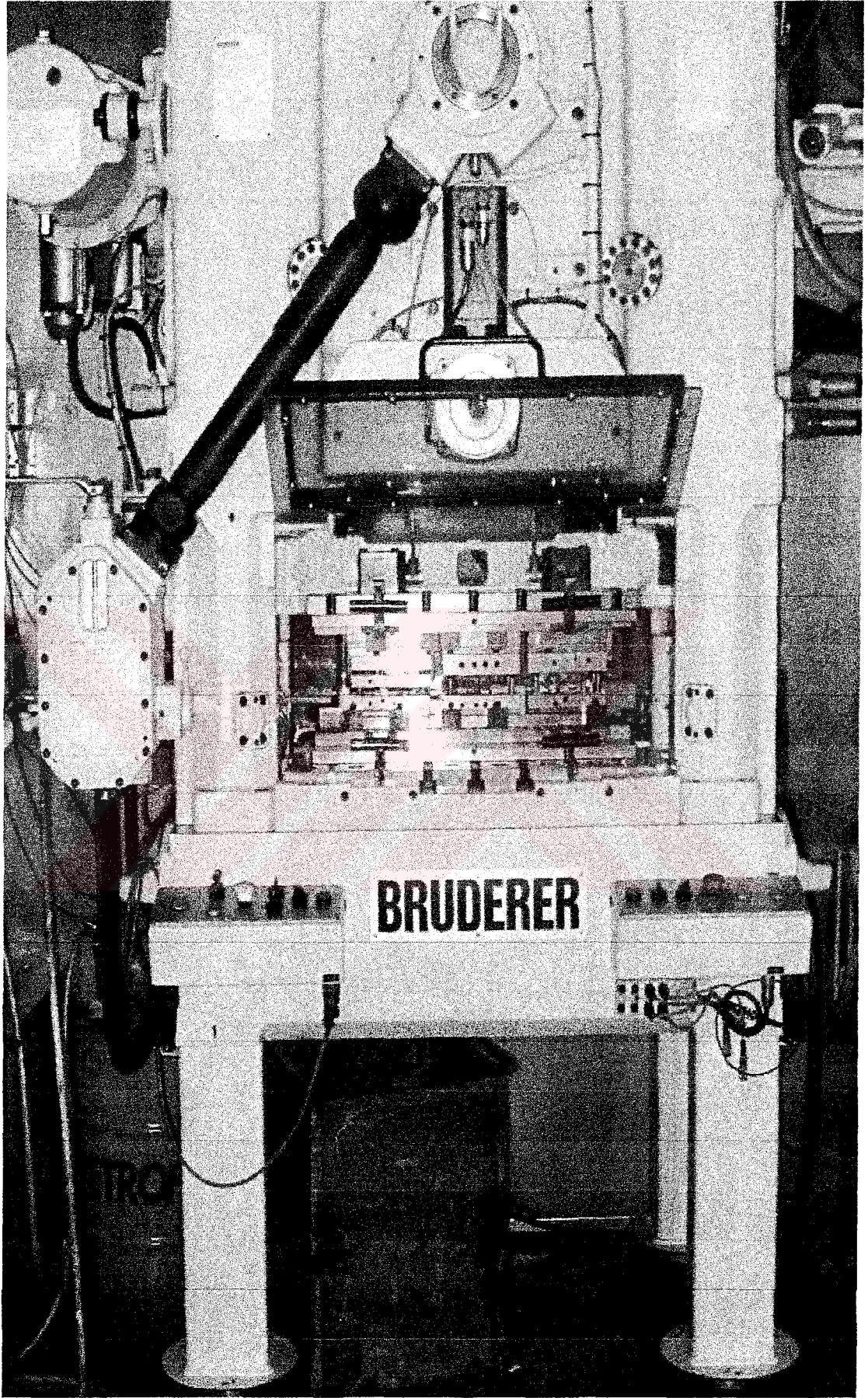
ŞEKİL A.22 : Elektroerozyonla İşlenmiş ve Kalıba Bağlanmış Progresif Kalıplar



ŞEKİL A.23 : Hatko A.Ş. Firmasına Ait Kablo Terminali Üreten 25-50 Tonluk Presler



ŞEKİL A.24 : Elektroerozyonla İşlenmiş Plastik Enjeksiyon Kalıpları



ŞEKİL A.25 : Hatko A.Ş. Firmasına Ait Kablo Terminali Üreten 25 Tonluk Pres

Ek B.

<u>Elektrot Malzemesi</u> <u>/İşlenebilirlik</u>	<u>Ticari Şekli</u>	<u>Maliyet</u>	<u>Uygun İş Parçası</u>	<u>Uygun Olmayan İş Parçası</u>	<u>Tavsiye Edilen Uygulamalar</u>	<u>Tavsiye Edilmeyen Uygulamalar</u>
Grafit / A	Kütük, çubuk	Düşük	Çelik	Karbitler	Takım endüstrisi	Çok iyi yüzey kalitesi
Bakır /B	Çubuk, tel levha, kütük	Düşük	Hepsi	Yok	Delikler	Hassas ve derin uygulamalar
Tungsten/D	Tel, çubuk	Orta	Hepsi	Yok	Küçük kanallar, delikler	Karışık profiller
Tungstenkarbit/D	Özel İmalat	Yüksek	Hepsi	Yok	Küçük kanallar, delikler	Karışık profiller
Bakır- Tungsten/C	Küçük çubuk, levha	Orta	Hepsi	Yok	Karbit malzemelerde kanallar	Büyük profiller
Pirinç/B	Çubuk, kütük, tel levha	Düşük	Hepsi	Yok	Delikler	Hassas uygulamalar
Çinko ve Alaşımları/B	Döküm ve levha	Düşük	Çelik	Sert Malzemeler	Dövme kalıpları	Delikler
Alüminyum/B	Her Şekilde	Düşük	Çelik	Tungsten Karbit	Dövme kalıpları	-----
Çelik/A	Her Şekilde	Düşük	Çelik	Karbitler	Basma kalıpları	-----
Gümüş- Tungsten/C	Sinterlenmiş	Yüksek	Hepsi	Yok	Küçük kanallar, delikler	Büyük profiller
Nikel ve Alaşımları/C	Özel İmalat	Yüksek	Hepsi	Yok	Çok karışık profiller	-----

A:Çok İyi, B:İyi, C:Orta, D:Kötü

TABLO B.1 : Elektroerozyonda Kullanılan Elektrotlar ve Özellikleri

BAZI DIELEKTRİK SIVILAR

MARKASI	AKIŞKANLIK (20°C de) PARLAMA SICAKLIĞI		
	CST	E °	°C
BP Dielektrik 250	6	1.48	120
Castrol HONILÖ 409	6.4	1.52	135
Chevron EDM Fluid 71	5.7	1.46	116
Esso MENTOR 20 / Somentor 43	7.4	1.6	124
Esso LECTOR 40	6.8	1.55	132
Esso UNIVOLT 64	20	2.9	156
Fuchs RATAK FE	5.6	1.46	115
Gulf Mineral Seal Oil	5.8	1.48	132
Mobil OIL VELOCITE 4	9	1.75	118
Mobil OIL VELOCITE 6	19.1	2.8	158
Socal Fina LYRAN D 50	12	2.05	132
White Spirit - Kerosene	2		78
Viscol EDM 01	1.6		80
Viscol EDM 02	3.8		130
Petrofer Dielektrik 200	3.0		80
Petrofer Dic. 400	7.0		100
Hengsterfers Cristalbite	2.2		220°F
EDMfluid 108 MP-S	3.0		108

TABLO B.2 : Elektroerozyonda Kullanılan Dielektrik Sıvılar ve Özellikleri

Özgeçmiş

Cenk Ertürk 1978 yılında İstanbul'da doğmuştur. Çapa Gazi İlkokulu, Cağaloğlu Anadolu Lisesi kurumlarında eğitim aldıktan sonra 1996 yılında İ.T.Ü. Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazanmıştır. İlk yıl İngilizce hazırlık sınıfının ardından, 4 yıllık lisans eğitimini 2001 yılında konstrüksiyon ve imalat kolundan mezun olarak tamamlamıştır. Aynı yıl aynı bölümde Malzeme ve İmalat Programı'nda başladığı yüksek lisans eğitimini tamamlayarak tez aşamasına gelmiştir. İyi derecede İngilizce ve Almanca bilen yazar 1,5 yıl Hatko A.Ş. firmasında teknik dış ilişkiler sorumluluğu ve Ür-Ge mühendisliği görevlerinde bulunmuştur.

