



**PASLANMAZ ÇELİĞİN ELEKTRO EROZYON İLE
İŞLENMESİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Muhammet Hüseyin TOKMAK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**PASLANMAZ ÇELİĞİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE
ENERJİ TÜKETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammet Hüseyin TOKMAK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

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

**KARABÜK
Ocak 2025**

Muhammet Hüseyin TOKMAK tarafından hazırlanan “PASLANMAZ ÇELİĞİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/01/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU (GÜ)

.....

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Muhammet Hüseyin TOKMAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASLANMAZ ÇELİĞİN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE ENERJİ TÜKETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet Hüseyin TOKMAK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Ocak 2025, 71 sayfa

Plastik kalıp çeliği, pres döküm kalıpları ve enjeksiyon kalıpları, sentetik plastik kalıp kalıpları ve hidroformlama takımlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek sertleşebilirlik, mükemmel parlatma, iyi işlenebilirlik ve aşınma direnci gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Elektro erozyonla işleme (EDM) karmaşık boşluklar ve geometrilerin oluşturulması için plastik kalıplarında yaygın olarak kullanılan bir işleme teknolojisidir. Ancak, EDM verimliliği zorlayıcı olabilir ve kalıp üretim süresini ve maliyetini doğrudan etkileyebilir. Bu bağlamda, imalat süreçlerinde enerji ve kaynak tüketimi sürekli olarak önemli bir endişe kaynağı olup, küresel olarak endüstriyel sektörün enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin yaklaşık 1/3'ünü oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, plastik kalıp çeliği üzerine dalma EDM yönteminde iki farklı işleme stratejisi ile kanal açma işlemi gerçekleştirilmiştir. İşleme parametreleri olarak üç farklı seviyede boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı seçilmiştir. Taguchi L9 deney tasarımına göre kerosene dielektrik sıvı ve bakır elektrot kullanılarak EDM deneyleri yapılmıştır. Elektriksel parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, yüzey topografyası ve enerji tüketimi üzerine etkileri deneysel ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Kaba ve kaba+ince işleme stratejisinde, Ip ve Ton parametrelerindeki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı, Toff parametresi yüksek seçildiğinde, pürüzlülüğün nispeten azaldığı görülmüştür. ANOVA sonuçlarına göre, kaba ve ince işlemede yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre vurum süresi iken, ikincil derecede önemli parametrenin boşalım akımı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, boşalım akımı ve vurum süresindeki artışla birlikte toplam enerji tüketiminin oransal olarak arttığı görülmüştür. Vurum aralığı arttırıldığında, deşarj akımının azalmasına bağlı olarak toplam enerji tüketiminin azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Plastik kalıp çeliği, EDM, Yüzey pürüzlülüğü, Enerji tüketimi, Mikrosertlik

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ENERGY CONSUMPTION IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF STAINLESS STEEL

Mhammet Hüseyin TOKMAK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

January 2025, 71 pages

Plastic mold steel is used in die casting molds and injection molds, synthetic plastic mold molds and hydroforming tools. It also has excellent properties such as high hardenability, excellent polishing, good machinability and wear resistance. Electrical discharge machining (EDM) is a widely used processing technology in plastic molds to produce complex cavities and geometries. However, EDM efficiency can be challenging and directly affect mold manufacturing time and cost. In this context, energy and resource consumption in manufacturing processes is constantly a major concern, and globally, the energy consumption of the industrial sector accounts for approximately 1/3 of total energy consumption.

In this study, channel opening process was carried out on plastic mold steel with two different processing strategies in the plunge EDM method. Discharge current, pulse duration and pulse interval were selected as processing parameters at three different

levels. EDM experiments were carried out using kerosene dielectric liquid and copper electrode according to Taguchi L9 experimental design. The effects of electrical parameters on surface roughness, microhardness, surface topography and energy consumption were analyzed experimentally and statistically. In the rough and rough+fine machining strategy, it was observed that the surface roughness increased with the increase in I_p and T_{on} parameters, and when the T_{off} parameter was selected high, the roughness relatively decreased. According to the ANOVA results, while the most effective parameter on surface roughness in rough and fine machining was the pulse duration, it was determined that the secondary important parameter was the discharge current. In addition, it was observed that the total energy consumption increased proportionally with the increase in discharge current and pulse duration. When the pulse interval was increased, it was determined that the total energy consumption decreased due to the decrease in discharge current.

Key Word : Plastic mold steel, EDM, Surface roughness, Energy consumption, Microhardness

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerin ve analizlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU'na ve Makine Yük. Müh. Ahmet Tolunay IŞIK'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi hiçbir yardımcı esirgemedен yanımda olarak destek olan sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
BÖLÜM 3	10
TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ	10
3.1. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME	11
3.2. EDM SÜRECİNDE İŞLEME MEKANİZMASI.....	15
3.2.1. Vurum Hazırlığı.....	15
3.2.2. Vurum/Darbe	16
3.2.3. Vurum Aralığı Aşaması.....	17
3.3. EDM SÜRECİNDE İŞLEME PARAMETRELERİ	18
3.3.1. Elektriksel Parametreler.....	21
3.3.2. Elektriksel Olmayan Parametreler	24
3.4. EDM ÇEŞİTLERİ	29
3.5. PERFORMANS KRİTERLERİ	31
3.5.1. Malzeme Kaldırma Oranı (MRR).....	31

	<u>Sayfa</u>
3.5.2. Takım Aşınma Hızı (TWR)	31
3.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü	31
3.5.4. Yüzey Bütünlüğü	35
3.5.5. Enerji Tüketimi	37
BÖLÜM 4	39
MATERYAL VE YÖNTEM	39
4.1 MALZEME VE APARATLAR	39
4.1.1. EDM Tezgahı	39
4.1.2. Malzeme	40
4.1.3. Elektrot	40
4.1.4. Dielektrik sıvı	41
4.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	41
4.1.6. Topografik Ölçümler	42
4.1.7. Enerji Tüketimi	42
4.2. DENEY TASARIMI VE ANALİZ	43
BÖLÜM 5	46
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	46
5.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	46
5.1.1. Kaba İşleme	46
5.1.2. Kaba+İnce İşleme	49
5.2. YÜZEY TOPOGRAFYASI	51
5.2.1. Kaba İşleme	51
5.2.2. Kaba+İnce İşleme	53
5.3. MİKROSERTLİK	54
5.4. ENERJİ TÜKETİMİ	56
BÖLÜM 6	59
SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması.....	11
Şekil 3.2. Dalma tipi EDM tezgahı şematik gösterimi.	12
Şekil 3.3. EDM yönteminde kıvılcım mekanizması.	13
Şekil 3.4. Aşırı kesme ve gap bölgeleri; a) Dalma EDM, b) WEDM.....	11
Şekil 3.5. EDM sonrası yüzey katmanları.....	13
Şekil 3.6. Vurum hazırlığı aşaması.	14
Şekil 3.7. Vurum adımları.....	17
Şekil 3.8. Vurum aralığı adımları.....	16
Şekil 3.9. V ve I 'nin hareket eğrileri.	17
Şekil 3.10. EDM'de parametreler ve performans kriterleri.	17
Şekil 3.11. EDM'de elektriksel parametrelerin akım ve gerilim hareket eğrileri içerisinde tanımlanması.	21
Şekil 3.12. EDM dielektrik sınıfları.....	18
Şekil 3.13. Dielektrik uygulama çeşitleri.....	27
Şekil 3.14. EDM'de aşırı kesme.	29
Şekil 3.15. EDM yöntemleri.	29
Şekil 3.16. Dalma EDM yöntemleri.....	30
Şekil 3.17. EDM kesme yöntemleri.	30
Şekil 3.18. EDM taşlama yöntemleri.	30
Şekil 3.19. Ortalama yüzey pürüzlülüğü.....	33
Şekil 3.20. Maksimum ve toplam yüzey pürüzlülük yüksekliği.....	34
Şekil 3.21. Ortalama yüzey pürüzlülük genişliği.....	36
Şekil 3.22. a) Beyaz tabaka çatlakları, b) Yüksek akımda beyaz katmandaki değişim.	36
Şekil 4.1. Cu takım elektrot.	40
Şekil 4.2. Güç analizörü ile enerji tüketimi ölçümü şeması.....	40
Şekil 4.3. Elektro erozyon ile işleme deney düzeneği.	44
Şekil 5.1. Kaba işlemede parametrelere göre R_a değişimi.	43
Şekil 5.2. Kaba işlemede parametrelere göre R_z değişimi	48
Şekil 5.3. İnce işlemede parametrelere göre R_a değişimi	49

Sayfa

Şekil 5.4. İnce işlemede parametrelere göre Rz değişimi.....	49
Şekil 5.5. Kaba işleme 1.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya ...	48
Şekil 5.6. Kaba işleme 2.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya. ..	52
Şekil 5.7. Kaba işleme 3.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya. ..	53
Şekil 5.8. İnce işleme 1.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.....	53
Şekil 5.9. İnce işleme 2.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.....	54
Şekil 5.10. İnce işleme 3.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya...	54
Şekil 5.11. Kaba işleme sonrası mikrosertlik değişimi.....	55
Şekil 5.12. Kaba+ince işleme sonrası mikrosertlik değişimi.....	56
Şekil 5.13. Kaba işlemede parametrelere göre Pc değişimi.....	57
Şekil 5.14. İnce işlemede parametrelere göre Pc değişimi.	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. EDM tezgahlarında kullanılan dielektriklerin bazı özellikleri.	26
Çizelge 4.1. EDM tezgahı teknik özellikleri.....	39
Çizelge 4.2. 1.2738 çeliğinin kimyasal bileşimi (%).....	40
Çizelge 4.3. Cu elektrot teknik özellikleri.	41
Çizelge 4.4. Dielektrik sıvı özellikleri.	41
Çizelge 4.5. Deneyleerde kullanılan parametre ve çalışma koşulları.	45
Çizelge 4.6. L9 deney tasarımı.....	45
Çizelge 5.1. Kaba işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.....	48
Çizelge 5.2. Kaba+ince işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.....	51
Çizelge 5.3. Enerji tüketimi için ANOVA sonuçları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ton	: Vurum süresi
Toff	: Vurum aralığı
Ip	: Tepe akımı
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
Mg	: Magnezyum
Na	: Sodyum
K	: Potasyum
Ω	: Ohm
V	: Voltaj
I	: Akım

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spektrometresi)
EDM	: Elektro Erozyon ile İşleme
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TWR	: Tool Wear Rate (Takım Aşınma Hızı)
MRR	: Material Removal Rate (Malzeme Kaldırma Oranı)



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Paslanmaz çelik, iyi korozyon ve kimyasal reaksiyon direncini, kolayca temizlenebilir, cilalanabilir ve sterilize edilebilir olma özelliğiyle birleştiren üstün özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan kesilmesi zor malzemelerden biridir. Diğer yandan, daha yüksek korozyon direnci, artırılmış mukavemet ve yüksek sıcaklık direnci ihtiyacını karşılamak için yeni paslanmaz çelik bileşimleri geliştirilmektedir. Literatürde belirtildiği gibi [1], günümüzde 150 farklı paslanmaz çelik bileşimi mevcuttur. Bu bileşimler, her biri belirli bir son kullanım amacını karşılamak üzere geliştirilen ve her biri krom, nikel veya molibden gibi ortak alaşım bileşenleri içeren birçok sınıfı içerir [2].

Standart paslanmaz çelikler, AISI tarafından östenitik, ferritik, martensitik ve çökelti sertleştirmeli olarak dört gruba ayrılmıştır. Östenitik türler 200 serisi (üç sınıf) ve 300 serisidir (34 sınıf). Başlıca alaşım elementleri olarak %15-%26 oranında Cr ve yaklaşık %35'e kadar Ni içerirler. Karbon içeriği %0,03 ila %0,25 arasında değişir. Ferritik türler, başlıca alaşım elementi olarak %10,5-%27 oranında Cr içeren 400 serisidir (12 sınıf). Karbon içeriği %0,03 ila %0,20 arasında değişir. Martensitik türler ise 400 serisi (12 sınıf) olup, başlıca alaşım elementi %11,5-%18 oranında kromdur. Karbon içeriği %0,15 ile %1,20 arasında değişir. Bu grubun sadece üç sınıfı nikel içerir: 414 ve 431 (%2,5 max.) ve 422 (%1 max.). Çökelmeyle sertleştirilmiş türler, ana alaşım elementleri olarak %12-%18 arasında Cr ve %3 ile %8,5 arasında Ni içeren PH serisidir (dört sınıf). Karbon içeriği %0,05-%0,09 arasında değişir. PH tipleri tavlanmış durumda östenitik veya martensitik olabilir [3]. Paslanmaz çelik, üstün mukavemeti, yüksek kırılma tokluğu ve olağanüstü korozyon direnci nedeniyle havacılık, otomotiv, gıda işleme ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan demir bazlı kesilmesi zor bir malzemedir. Bu malzemelerin işlenmesi, yüksek güç kapasitelerine sahip rijit bir takım tezgahı ve olağanüstü

özelliklerde kesici takımlar gerektirebilir. Malzemenin yüksek mukavemeti, yüksek işleme gücü ve çevre dostu olmayan spesifik kesme gücü tüketir. Ayrıca, düşük ısı iletkenlik ve deformasyon sertleşmesi davranışı, takımların daha yüksek kesme parametrelerinde çalışmasını engelleyerek işlenmesindeki karmaşıklığı artırır [4].

Elektro erozyonla işleme (EDM), iletken ve kesilmesi zor malzemeleri başarıyla işlemek için kullanılan en gelişmiş üretim yöntemlerinden biridir [5,6]. EDM, modern endüstrilerde hassas işlemeyi, karmaşık şekil işlemeyi ve daha iyi yüzey bütünlüğünü kolaylaştırmak için yaygın olarak kullanılan kesilmesi zor malzemeleri işlemek için tercih edilen işlemdir [7]. EDM, elektriği ileten iki elektrot (iş parçası ve takım) arasında darbeli elektriksel kıvılcımların kontrollü uygulanması ile talaş/döküntü kaldıran geleneksel olmayan işleme tekniğidir. Talaş kaldırma süresince işleme alanında üretilen çok yüksek ısı malzemenin rasgele miktarda erimesi veya buharlaşmasına neden olur. Talaş/döküntüleri uzaklaştırmak amacıyla işleme alanına sürekli olarak bir dielektrik sıvı gönderilir. Mekanik işlemeden farklı olarak, elektrot ve iş parçası arasında deforme edici bir kuvvet gerekmez ve işleme, aralarında gerçek bir temas olmadan gerçekleşir. Dalma EDM, tel EDM, mikro EDM, toz karışımlı EDM ve kuru EDM gibi çok sayıda EDM tekniği vardır ve bunların hepsi aynı talaş kaldırma mekanizması ile çalışır [8,9].

EDM işlemi hem elektriksel hem de elektriksel olmayan parametreler tarafından yönlendirilir. Başlıca elektriksel parametreler tepe akımı (I_p), vurum süresi (Ton), vurum aralığı (Toff), deşarj voltajı, elektrot takım boşluğu, polarite ve vurum dalga biçimidir. Elektriksel olmayan parametreler arasında elektrot takımının dönüşü, dielektrik sıvı, basınç ve uygulama biçimi ve iş parçasının özellikleri bulunur [10]. EDM'de işlenebilirliği etkileyen en önemli parametreler I_p , Ton, Toff, dielektrik basıncı, referans voltajı ve polarite olarak belirtilmektedir. İşlenebilirlik göstergeleri olarak çoğunlukla talaş kaldırma miktarı (MRR), takım aşınma hızı (TWR), yüzey pürüzlülük kriterleri (R_a , R_z vb.) dikkate alınmaktadır. Diğer yandan, EDM ile üretilen bir parçanın maliyeti ham madde maliyeti ve takım üretiminden oluşan elektrot maliyeti tarafından belirlenir. Elektrot maliyetinin toplam EDM operasyon maliyetine katkısı %70'ten fazla olabilir. Elektrot üretimi, EDM sürecinde harcanan büyük bir maliyet ve zamandır ve geleneksel işleme maliyetlerinin %50'sinden

fazlasını oluşturabilir [11,12]. Bu nedenle, elektrot aşınmasının azalması için daha yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler takım malzemesi olarak seçilir. Ayrıca, elektrodun yapısal bütünlüğü elektrot performansını belirleyen önemli bir faktördür [13]. Elektrot malzemesi seçerken diğer önemli bir husus şekillendirme maliyetinin düşük olması için kolay işlenen bir malzeme tercih edilmelidir [14]. Diğer yandan, performans göstergeleri, takım geometrisi, takım üretim yöntemi ve takım ile iş parçasının birbirleriyle etkileşime girme biçiminden etkilenir. Bu süreçte, takım aşınmasından kaçınılmazdır ve yüksek TWR işlenmiş parçaların ölçü tamlığını azaltır. Bu noktada, istenilen doğruluğu sağlamak için TWR'yi hesaplamak ve aşınma telafisi sağlamak gerekir. Takım elektrotları genellikle talaşlı imalat, dövme ve çekme gibi metal şekillendirme teknikleriyle üretilmekle birlikte son zamanlarda toz metalurjisi ve hatta daha karmaşık geometriler için eklemeli üretim de kullanılmaktadır. Ayrıca, takımın işlem performansı, kriyojenik işlem ve elektrotların kaplanmasıyla iyileştirilebilir [15].

Geleneksel olmayan işleme süreçleri, sıkı tolerans, aşırı yüzey kalitesi ve çapaksız olarak sert ve kırılğan malzemeleri, karmaşık geometrileri ve hassas/kırılğan bileşenleri kolayca işleyebilir. EDM, mekanik özelliklerine bakılmaksızın herhangi bir iletken malzemeyi işleyebilen geleneksel olmayan işleme süreçlerinden biridir. Elektrik enerjisinin belirli bir alanda aşırı yüksek sıcaklığa (plazma kanalı) dönüştürülmesine dayanan bu talaş kaldırma işlemi, iş malzemesinin yüzeyine etki ederek erimeye veya buharlaşmaya neden olur [16]. İşleme sırasında sık oluşan kısa arklar yüzey topografyasını bozar, düşük boşalım akımında erime ve buharlaşma azaldığından işlenmiş yüzeyde döküntüler kalabilmektedir [17]. Ayrıca, işlenen yüzeyde yüksek vurum enerjisi yüzünden oluşan ısıl gerilmelerden kaynaklı hetorejen mikro çatlak, düzensiz krater ve beyaz katman gibi yüzey hataları meydana gelebilir [18]. Yüzey bütünlüğünü etkileyen beyaz katman kalınlığı ve elektrot malzemesinin işlenen malzemeye nüfuziyeti deşarj enerjisinin artışıyla artmaktadır. Cu elektrotla işlemede, grafitte göre işlenen malzemeye daha düşük C nüfuziyeti olduğu belirtilir. Diğer yandan, artan tepe akımı ile iş parçası yüzeyinde ısı enerjisinin artması takımın hızlı erimesi/buharlaşmasına sebep olabilir [19]. Ek olarak, dielektrik sıvı içinde kalan döküntülerin malzeme içerisine aktarıldığı belirlenmiştir [20]. Bu bağlamda, işleme sürecinde aşırı kesme (overcut) ve ölçü

tamlığı için krater boyutlarının (derinlik ve genişlik) daha düşük olmasından dolayı C-bazlı dielektrik sıvılar biyodizel içerikli sıvılardan daha çok tercih edilir [21].

Çağdaş üretimde, enerji ve kaynak tüketimi sürekli olarak önemli bir endişe kaynağıdır. İstatistiksel verilere göre, üretim sektörü genel toplumsal enerji tüketimi ve kaynak kullanımında önemli bir orana sahiptir. Küresel olarak, endüstriyel sektörün enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin %37'sine kadarını oluşturmaktadır [22]. Tel erozyonla işlemede (WEDM), talaş kaldırma prensipleri gereği işleme sırasında enerji tüketiminin büyük kısmı elektrik enerjisi tüketimine atfedilir. Elektrik enerjisinin çevresel etkisi, toplam etkinin yaklaşık %60'ını oluşturur [21]. Ek olarak, WEDM sırasında elektrik enerjisi tüketimi genellikle diğer geleneksel işleme yöntemlerinden çok daha yüksektir ve en az 1000 kat daha fazladır [23]. Bu işleme teknolojisi birçok endüstride vazgeçilmez bir rol oynamakla birlikte düşük enerji verimliliği, geleneksel işleme yöntemine kıyasla daha belirgin bir kaynak israfına neden olur [24].

İmalatta enerji tüketimini azaltmak, herhangi bir imalat sürecini sürdürülebilir hale getirmenin temel hedeflerinden birisidir. Herhangi bir süreç için enerji gereksinimleri, süreç parametrelerini optimize ederek bir dereceye kadar azaltılabilir. EDM sürecinde, enerji tüketimi açısından elektriksel ve elektriksel olmayan parametrelerin optimize edilmesi sürdürülebilirlik açısından ümit verici sonuçlar ortaya koyar [25]. Genel olarak, işleme enerjisi tüketimi açısından, darbesiz sistemler toplam enerji tüketiminin en büyük oranını oluştururken, işleme ekonomisi açısından, ana ekonomik giderler esas olarak takım tezgahı amortismanı ve işgücü kaynaklarında yoğunlaşmaktadır [26]. EDM sisteminde, sabit güç sistemi ve değişken güç sistemi olmak üzere iki grup enerji tüketim kategorisi vardır. Burada, işleme hedefine ulaşmak için birden fazla sistemin birlikte çalışması gerekmektedir olup, her sistemin gücü ve çalışma süresi farklıdır. EDM sırasında, aydınlatma, nümerik kontrol, soğutma ve mil sistemlerinin gücü, deşarj durumundan bağımsız olarak sabittir ve işleme parametrelerindeki değişiklikler ile değişmez. Değişken güç sistemi, öncelikle deşarj işleme sürecinde besleme sistemini ve vuruş güç kaynağını ifade eder. Güç kaynağının gücü, deşarj durumuyla ilgili olup, destekleyici besleme kontrol sistemi, besleme milinin besleme hızını işleme durumuna göre ayarlar. Bu

nedenle, değişken güç sisteminin gücü açık devre, normal değarj ve kısa devrede değişmektedir [27]. Bununla birlikte, EDM sürecinde işleme performansını etkileyen çeşitli faktörler karmaşıktır ve bunlar arasında dielektrik sıvısının durumu önemli bir rol oynar. İşleme sırasında değarj durumunu iyileştirmek için bu sıvının parametrelerini etkin bir şekilde kontrol etmek, enerji ve ekonomik verimliliği artırmak için çok önemlidir [26]. Bu bağlamda, EDM sürecinin detaylı bir analizini yapmak ve enerji ve kaynak tüketimi ile işleme ekonomisi için modeller oluşturmak, sürdürülebilir üretim, enerji tasarrufu, emisyon azaltımı ve işleme verimliliğinin iyileştirilmesi için etkili bir yaklaşımdır [28].

Bu çalışmada, plastik kalıp çeliği DIN 1.2738 üzerine dalma EDM yönteminde iki farklı işleme stratejisi ile kanal açma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada asıl amaç, istenilen boyutlar ve yüzey bütünlüğüne en kısa sürede ve minimum enerji tüketimiyle ulaşmak için elektriksel parametrelerin (Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı) optimizasyonudur. Ayrıca, elektriksel parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, yüzey topografyası ve enerji tüketimine etkileri kapsamlı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sultan vd., EN 353 çeliğinin EDM'sinde tepe akımı, vurum süresi ve vurum aralığı gibi önemli işleme parametrelerinin MRR, TWR ve SR gibi tepki parametreleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Cevap yüzey yöntemi (RSM) ile yapılan optimizasyon çalışmalarında, optimal MRR, TWR ve SR için en uygun parametrelerin farklı Ip, Ton ve Toff değerlerinde elde edildiği görülmüştür. Bakır elektrot ile deneyler sonucunda, daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için tepe akımı ve darbe süresini düşük seviyelerde uygulanması önerilmiştir [29].

Agarwal vd., AISI D2 çeliğinin EDM'si üzerine araştırmalarını, Ø30 mm elektrot ve farklı düzeylerde boşalım akımı, vurum süresi, görev döngüsü ve referans voltajı parametrelerini kullanarak gerçekleştirdiler. Deneyler sırasında MRR, TWR ve radyal aşırı kesme değişimlerini incelemişlerdir. Jaya algoritması ile performans parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda; en yüksek MRR'yi 10 A, 100 µs, %90, 40V, en düşük TWR'yi 6,7840 A, 300 µs, %90, 40V ve en düşük radyal kesmeyi (0,0013 µm) 4 A, 100 µs, %90, 49,7520 V deney dizisinde elde edildiği belirtilmiştir [30].

Xu vd., Cu elektrot ile Ti6Al4V alaşımının EDM'sinde karbon emisyonu için nicel bir değerlendirme modelini geliştirmişlerdir. Bu modelde TWR, artık takım elektrotlarının ve dielektrik sıvısının zararsız yenilenmesi ve ekipman tarafından tüketilen elektrik enerjisi dikkate alınmıştır. EDM ile delmede, iş parçası ve takım elektrodunun hazırlanması ve atıkların giderilmesinden kaynaklanan karbon emisyonları, küçük malzeme çıkarma hacmi nedeniyle neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir. Elektrik enerjisi tüketiminden kaynaklanan karbon emisyonları, toplam karbon emisyonlarının yaklaşık %50'sini oluşturur. Vurum süresi arttıkça, işleme süresi, enerji tüketimi ve karbon emisyonları büyük ölçüde azalırken yüzey

pürüzlülüğü sürekli artmıştır. Tepe akımı arttıkça, işleme süresi, enerji tüketimi ve karbon emisyonları azalmaya devam ederken, yüzey pürüzlülüğü artmaya devam ettiği vurugulanmıştır [27].

Mascaraque-Ramirez ve Franco, AISI 316 çeliğinin EDM'sinde Ton, Toff ve gerilim sabit iken, değişen akım yoğunluğu ve dalma derinliğinin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülük kriterleri Ra ve Rz'nin dalma derinliği ve akım yoğunluğunun artışıyla arttığı ve aynı zamanda akım yoğunluğundan daha çok etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, akım yoğunluğunun yüzey bütünlüğü kriterleri (malzeme profili eğrisi, pürüzlülük ve krater çapı) ile akım yoğunluğu arasında doğrusal ilişki olduğu bulunmuştur. Sonuçlara göre, akım yoğunluğu ve penetrasyon derinliğinin bir fonksiyonu olan krater çapının EDM sürecinde yüzey kalitesini karakterize etmek için daha iyi bir gösterge olabileceğini belirtmişlerdir [31].

Yang vd., EDM'de enerji tüketimi tahmini için elektrottan elektroda deşarjdan kaynaklanan işleme enerji tüketimi ve takım tezgahının yüksüz enerji tüketiminden oluşan bir model önermişlerdir. Enerji tüketim modeli, deşarj prensibine dayalı olarak işleme parametreleri ile MRR arasındaki ilişkiye bağlı olarak oluşturulmuştur. Modelin onaylanması için 3 mm kalınlığında #45 çeliği üzerinde 0,8 mm çaplı elektrot ile delme işlemleri yapılmıştır. Oluşturulan teorik modelin tahmin doğruluğu %96'dan yüksek bulunmuştur. Ayrıca, elektrikli işlemedeki enerji verimliliği analiz edilmiş ve enerji tüketimi ile işleme parametreleri arasındaki etkileşim ortaya konmuştur. Model, çeşitli işleme parametreleriyle enerji verimliliğini analiz etmek için kullanılabilirdiğinden, enerji verimliliği için işleme parametrelerini optimize etmek için mükemmel bir araç olarak kullanılabilceği vurgulanmıştır [32].

Ahmed, AISI D2 çeliğinin üç farklı takım malzemesi (Cu, CuW ve Gr) ve dairesel geometride farklı takım tasarımları (klasik tasarım_DC ve klasik olmayan tasarımlar_DRA) kullanılarak EDM'sinde işleme süresi (MT), bağıl elektrot aşınması (REW), çapsal aşırı kesim (DOC), delik konik açısı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. DC tasarımına kıyasla, Cu, CuW ve Gr'nin DRA tasarımlarına göre, MT, REW, DOC, delik konikliği ve yüzey

pürüzlülüğünde sırasıyla %47,28, %91,29, %37,35, %9,4 ve %38,68'lik önemli bir iyileştirme sağladığı belirtilmiştir. DRA tasarımlı Cu ve CuW takımlar ile Ra değerinde yaklaşık %30 oranında bir azalma sağlanabilmektedir. EDM performans kriterleri açısından optimum değerlerin 10°'lik rahatlama açısına sahip CuW takım ile elde edildiği vurgulanmıştır [33].

Çakıroğlu ve Günay, L2 takım çeliği üzerinde EDM tornalama yöntemiyle silindirik numuneler üretmişlerdir. Boşalım akımı (3-12 A), vuruş süresi (3-8 μ s) ve vuruş aralığı (5-7 μ s) gibi işleme parametrelerinde MRR, TWR ve Ra performans göstergelerinin değişimlerini incelemişlerdir. Taguchi L₉ deney tasarımı ve gri ilişkisel analiz (GRA) kullanılarak parametrelerin çoklu optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taguchi esaslı GRA optimizasyonu uyguladıklarında, GRG değerinde %25,04'lük bir iyileşme sağlanmıştır. Doğrulama deneyi sonucunda 3A akım, 8 μ s vuruş süresi, 6 μ s vuruş aralığı için 0,0286 mm³/dk MRR, 0,00012 mm³/dk TWR ve 2,056 μ m Ra sonuçları elde edilmiştir [34].

Nieslony vd., 1.2344 çeliğinin bakır elektrot ile EDM'sinde enerji tüketimi ve yüzey bütünlüğü performans kriterleri ile vuruş süresi, akım ve vuruş aralığı parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Tepe akımındaki artış, işleme süresinin kısaltırken, Sa ve Sz parametre değerlerinin büyümesine yol açmıştır. EDM işlemi sırasında oluşan beklenen yüzey pürüzlülüğü, mevcut işleme süresiyle ilişkilendirilebilir. Ancak, en kısa işleme süresi, enerji tüketimi dikkate alındığında her zaman en iyi ekonomik sonuçları üretmez. Bu nedenle, EDM işleminin etkili optimizasyonu, işleme süresi ve enerji tüketimi alanında çözümler arayarak en az iki şekilde gerçekleştirilmelidir. Malzeme çıkarma işleminin maksimum verimliliğinin 120 V ve maksimum darbe akımı için elde edildiği sonucuna varılmıştır [35].

Sharma vd., EDM işleminde vuruş süresi, akım ve elektrot malzemesinin (grafit, bakır ve pirinç) etkilerini incelemiştir. 316 paslanmaz çelik malzeme üzerinde L₉ ortogonal dizisi ile deneyler yapılmış ve ANOVA ile işleme parametrelerinin MRR ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bakır elektrot ile en yüksek MRR'ye ulaşılrken, pirinç elektrot ile en düşük MRR elde edilmiştir. Grafit ve pirinçle karşılaştırıldığında, pirinç elektrot üstün yüzey kalitesi gösterirken, bakır

elektrot en kötü yüzey kalitesi göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü, daha uzun Ton değerinde optimum iken, akım değerindeki artışla doğrusal bir eğilimde artmıştır [36].

Kumar vd., AISI 420 çeliğinin bakır elektrot ile EDM'sinde Taguchi tekniği ve GRA yöntemi entegrasyonu (TGRA) ile MRR ve EWR performans göstergelerinin analizini yapmıştır. İşleme deneylerinde, gap gerilimi, akım ve vurum süresi işleme parametreleri olarak alınmıştır. ANOVA'ya göre, akımın ardından faktör gerilim ve vurum süresi ölçülen işleme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gözlemlerin yorumlanmasından sonra, A, V ve T faktörlerinin optimal açıklama üzerinde sırasıyla %63,71, %13,26 ve %10,88 oranında etkili olduğu analiz edilmiştir. TGRA tekniği kullanılarak gri ilişkisel derecede (GRG) 0,086'lık iyileşme sağlanmıştır [37].

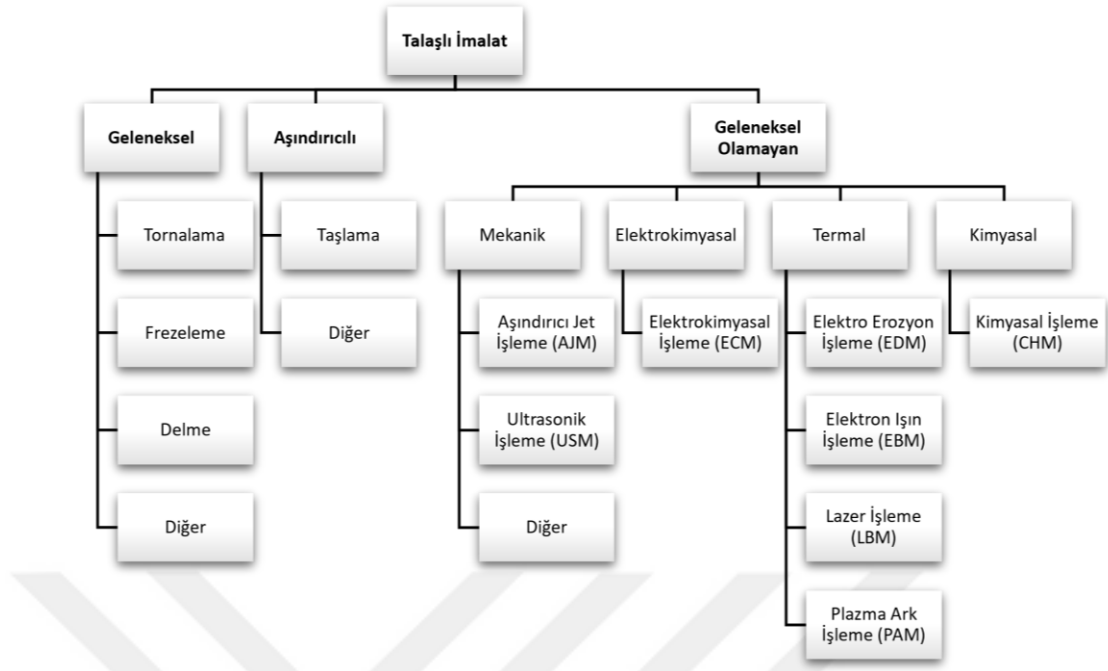
Sahoo vd., tek bir deşarj sırasında deşarj güç yoğunluğu ile krater hacmi arasındaki ilişki kullanılarak EDM işlemi için basit bir teorik model geliştirmişlerdir. Model, deşarj gücünü belirlemek için EDM işlemi sırasında elde edilen gerçek zamanlı voltaj- akım (V-I) dalga formlarını analiz ederek gerçek deşarj koşullarını içerir. Modelin doğrulanması için L18 deney tasarımı kullanılarak Titanyum sınıf-5 alaşımı üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi, deşarj voltajının MRR'yi etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir. SEM ve EDS analizi yoluyla iş parçasının ve takım yüzeyinin yüzey morfolojisi, farklı anomalilerin varlığını göstermekte ve yüzey alaşımlanmasını doğrulamaktadır. Geliştirilen modelin, deneyleri gerçekleştirmeden gerçek deşarj koşullarına dayalı gerçek zamanlı işleme oranını belirlemeye yardımcı olabilecek yeni bir enerji tüketim ölçeri tasarlamak için uygulanabileceği belirtilmiştir [38].

BÖLÜM 3

TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Talaşlı imalat/işleme, iş parçasındaki fazlalıkların çeşitli yöntemler ile çıkarılarak istenen geometriye ulaşıldığı şekillendirme teknikleri bütünüdür. İşleme yöntemleri; geleneksel, aşındırıcı ve geleneksel olmayan işleme olarak gruplandırılabilir (Şekil 3.1).

Geleneksel talaşlı imalatta, malzemedan talaş kaldırmak/kesmek için keskin ve işlenen malzemedan daha sert bir kesici takımın kullanılması gerekir. Bu yöntemler tornalama, frezeleme, delme ve diğer talaşlı işleme teknikleri (planyalama, broşlama vb.) olarak bilinir. İkinci grup, sert ve aşındırıcı seramik parçacıkların etkisi ile malzemedan mekanik olarak partiküller kopartılması esasına dayalı şekillendirme yöntemleridir [39]. Bu yöntemlerde, kesici takım tarafından işleme sırasında mekanik enerjiye ihtiyaç duyulur. Talaş kaldırmada kullanılan bu enerjinin %98-99'u ısıya dönüştürülür ve %2-1'i talaşta elastik enerji olarak depolanır. Yüksek sıcaklık takım ömrünü, iş parçası boyut doğruluğunu ve operatörü etkiler [40]. Bunlar, taşlama ve diğer aşındırıcı işleme yöntemleri (honlama, lepleme vb.) olarak bilinir. Geleneksel olmayan işleme yöntemlerinde ise malzemedan talaş kaldırmak için sert kesme takım ve aşındırıcılar olmadan çeşitli enerji türleri ile işlem gerçekleştirilir. Bu imalat yöntemlerinde mekanik, elektrokimyasal, termal ve kimyasal enerji formları kullanılır [41]. Gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte geleneksel işleme yöntemlerinin kullanımında takım hasarı, tolerans, yüzey kalitesi ve işleme zorlukları gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu noktada, aşındırıcı su jeti işleme (AWJ), kimyasal işleme, elektron ışını ile işleme (EBM), elektro kimyasal işleme (ECM), elektro erozyon işleme (EDM), lazerle işleme, plazma arkıyla işleme ve ultrasonik işleme gibi geleneksel olmayan işleme yöntemleri geliştirilmiştir [41].



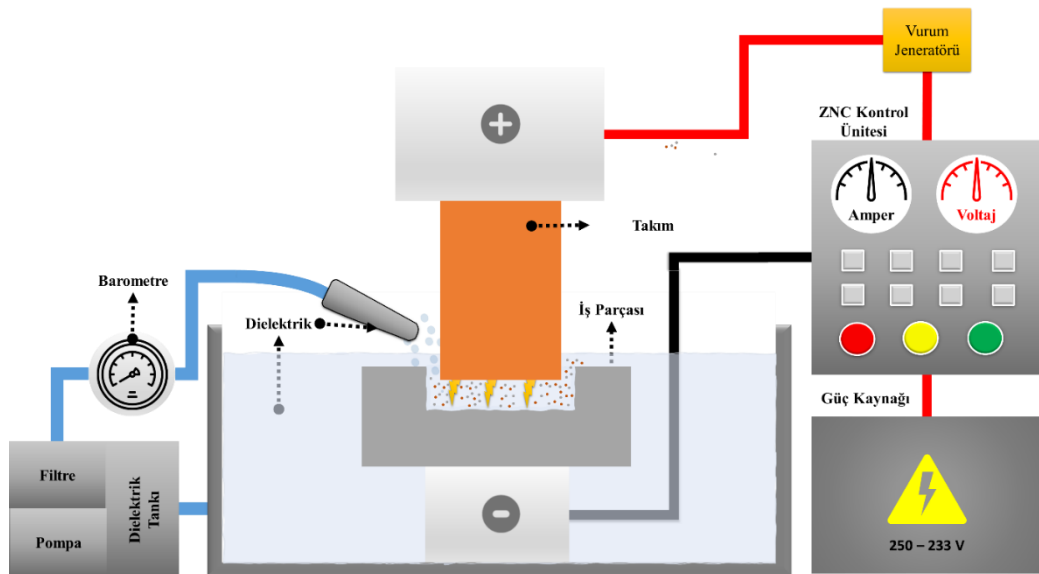
Şekil 3.1. Talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması.

EDM, en yaygın kullanılan geleneksel olmayan işleme süreçlerinden birisidir. Bu yöntem, yüksek frekanslı deşarj akımında oluşturulan kıvılcımların sağladığı ısı enerjisiyle talaşların/döküntülerin oluşturulduğu bir elektro-termal işleme tekniğidir [9]. Bu imalat yönteminin en önemli avantajları, malzeme sertliği ve kırılabilirliğinin önemsiz olması, kompleks şekillerin yüksek hassasiyet ile üretilmesi, temassız işleme, çapak oluşmaması, cilalamaya ihtiyaç duyulmayan yüzey kalitesi, daha az takım ve/veya toplam maliyettir (özel takım, son işlem vb.). Olumsuz yönleri ise yüksek enerji sarfıyatı, iletken malzemelere uygulanabilmesi, düşük işleme hızı, aşırı kesme (overcut), mikroçatlak ve beyaz katman oluşumu, karmaşık talaş oluşum süreci (takımın üretimi, dielektrik sıvı, elektriksel parametrelerin seçimi vb.) ve dielektriklerin olumsuz etkisidir [20].

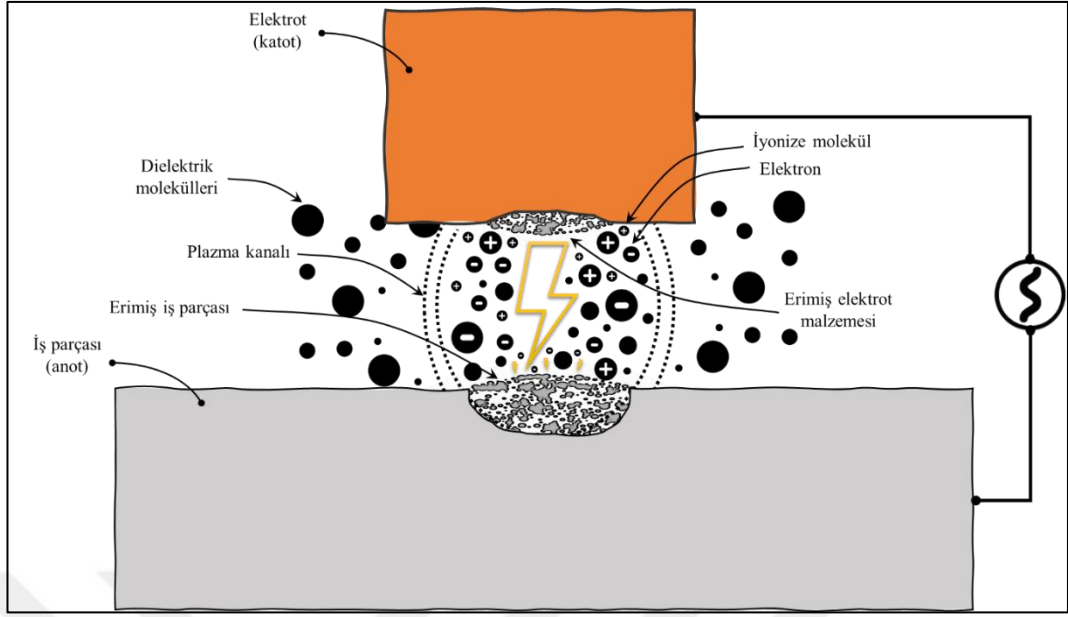
3.1. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME

Elektro erozyonla işleme, imalat sanayinde geniş uygulama alanına sahiptir. EDM tekniği, dalma, kesme ve taşlama gibi birçok farklı işlem için uygulanabilir. Bu yöntemlere ek olarak, kuru, toz karışımı, dönen elektrot ve ultrasonik titreşim gibi hibrit EDM uygulamaları kullanılabilir.

Dalma EDM, takım tezgahı, dielektrik ve güç kaynağı olmak üzere üç üniteden oluşur. Takım tezgahı ünitesi, bir takım tezgahı çerçevesi, bir X-Y koordinat masası, servo kontrollü bir iş kafası, bir çalışma tankı ve bir dielektrik besleme ve dağıtım sistemine sahiptir. Dielektrik ünite de bir pompa, bir filtre elemanı, dielektrik yağ ve ayrıca emme ve boşaltma boruları bulunur (Şekil 3.2). Yaygın olarak kullanılan EDM dielektrikleri gazyağı, trafo yağı, parafin ve mineral yağdır. Güç kaynağı ünitesi, kıvılcım üretmek ve düzenlemek için kullanılan bir darbe üretici devresi içerir. Bir direnç-kapasitans güç kaynağı (R-C tipi) veya transistör kontrollü bir darbe güç kaynağı ile donatılmıştır EDM makinesi, 2000-500.000 kıvılcım/dak frekansında kıvılcım üretirerek çalışır. Kıvılcımın sıcaklığı 10.000–20.000 °C civarındadır. Her kıvılcım sırasında, elektrot ile iş parçası arasında milyonlarca elektron akar [42]. Belirli bir noktada, bu elektronlar dielektrik sıvıyı iyonize ederek bir elektromanyetik akı sütunu oluşturur, bu da plazma kanalı olarak bilinir. Plazma kanalının yüksek enerji yoğunluğu, iş parçasının ısınmasına, erimesine ve buharlaşmasına neden olan yoğun yerel ısı üretir ve bu da iş parçası yüzeyinde krater oluşumuna yol açar (Şekil 3.3). Vurum süresi sonunda, plazma kanalı büzülür ve bir kabarcık oluşur. Kabarcığın kaldırma kuvveti, döküntüleri uzaklaştırır ve dielektrik sıvı döküntülerin temizlemesini sağlar. Sonuç olarak, plazma temizleme verimliliğine bağlı olarak, belirli miktarda erimiş malzeme uzaklaştırılırken kalan erimiş malzeme yeniden katılarak yeniden döküm katmanını (beyaz tabaka) oluşturur [25].

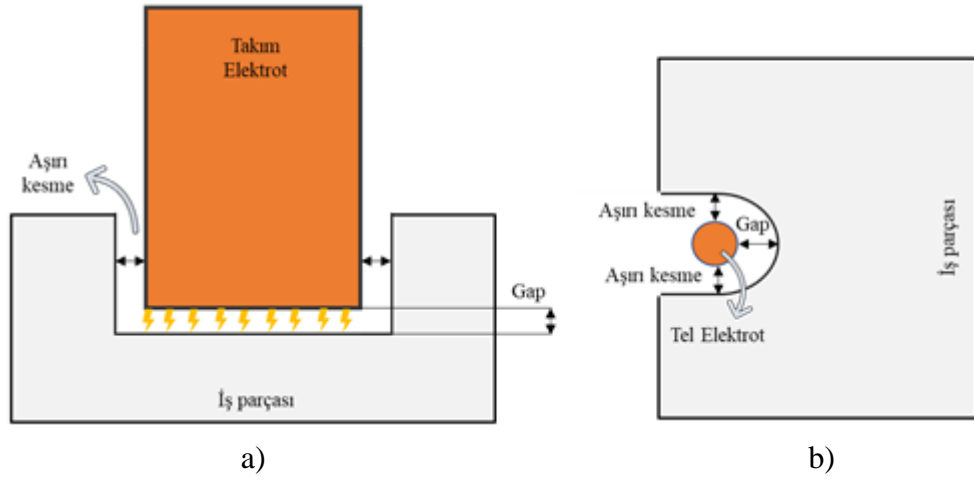


Şekil 3.2. Dalma tipi EDM tezgahı şematik gösterimi.



Şekil 3.3. EDM yönteminde kıvılcım mekanizması [43].

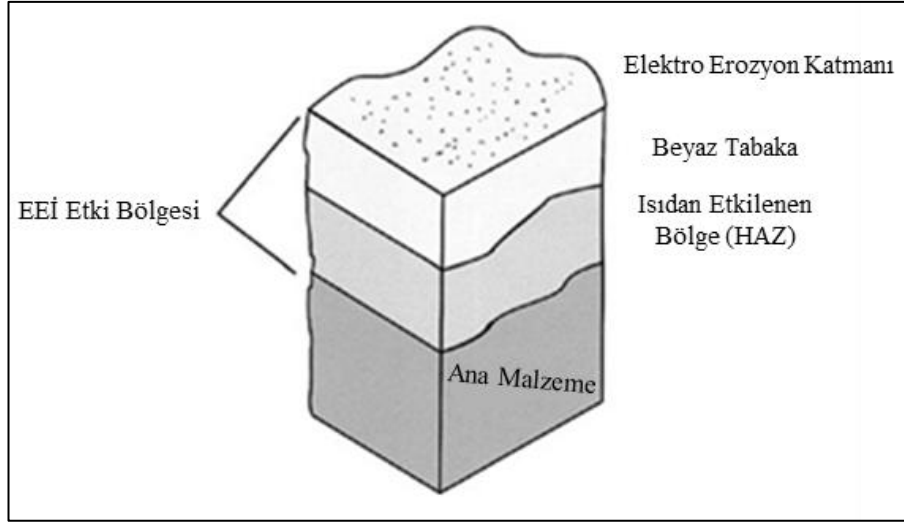
EDM tekniği, otomobillerde uygulanan kontak kesicilerin içindeki WC'in aşınmasından esinlenilerek ve kırık kılavuz veya matkap parçalarını delikten çıkartmak için bir yol bulmak amacıyla geliştirilmiştir. EDM teknolojisi malzemeye temas etmeden bir işleme sunar, ancak işleme sırasında aşırı kesme bölgeleri ve boşluk (gap) oluşur. Bu oluşumlar, işleme sırasında elektrot-işlenen malzeme arasında kıvılcımları oluşturan kısımlardır. Aşırı kesme, elektrot kenarı ile iş parçası yüzeyi arasındaki bölgedir. Gap ise elektrot işleme yüzeyi ile işlenen parça yüzeyi arasındaki boşluktur (Şekil 3.4). Gap, çok kısa olursa işleme anında kısa devre ve/veya düzenli olmayan kıvılcımlar oluşur. Bu durum ölçü tamlığından sapmalara ve dolayısıyla toleranslı işlemeye neden olur. İşleme süresince ilk olarak kıvılcımlara en yakın bölgelerden parçacıklar kopar. Bu işlem, işleme süresi/mesafesi tamamlanıncaya kadar sürekli gerçekleşir. Boşluk değeri artarsa kıvılcımın olduğu alan azalarak daha pürüzlü yüzeylere sebep olur [44].



Şekil 3.4. Aşırı kesme ve gap bölgeleri; a) Dalma EDM, b) WEDM.

EDM, işleme bölgesinde sadece görünen yüzey yapısını etkileyen bir termo-mekanik bir işlem değildir. İşleme sonrasında işlenen yüzey kesiti incelendiğinde üç farklı katmanın varlığı gözlenmiştir (Şekil 3.5). En üstteki kolayca çıkarılabilen katman, iş parçası yüzeyine yapışan elektrot ve iş parçası malzemesinden oluşur. Bir sonraki tabaka olan beyaz katman, karbonlu dielektrik sıvı; yeniden katılaştıran ve uzaklaştırılmayan erimiş elektrot ve/veya malzemedir. Şöyle ki, darbe aralığı boyunca eriyen malzeme dielektrik sıvı sayesinde hızla soğutulur. Bu süreç, beyaz tabakanın sertleşmesi ve/veya kırılma dayanımının yanı sıra mikro çatlakların oluşmasına neden olabilir. Diğer yandan, beyaz katman işlenen malzemenin kullanım süresini azaltır, fakat korozyon ve aşınma dayanımını artırır. Beyaz katman içerisindeki karbonun, C-bazlı dielektrikten ayrılarak iş parçasına nüfuziyeti, safsu-bazlı dielektrikte ise oksijenin iş parçasına nüfuziyeti söz konusudur. Son tabaka ise ısı etkisi altında kalan bölge (HAZ), ergimenin gerçekleşmediği sadece tavlama bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Beyaz katman ve HAZ bölgesinin derinliği iş parçası malzemesinin özgül ısısı ve darbe enerjisine bağlıdır [45,46].

Elektro erozyonla işleme ile elektrik iletkenliği olan malzemeler işlenebilir. EDM’de iletkenlik sınırı $2 \times 10^2 \Omega^{-1}m^{-1}$ olup, bu değer üzerinde kıvılcım oluşturulması mümkün değildir. Bu durumda, seramik ve kompozitlerin EDM ile işlenmesi için deşarj akımının iletilmesini sağlayacak bir iletken matrisin ilave edilmesi gerekir [47].



Şekil 3.5. EDM sonrası yüzey katmanları [45].

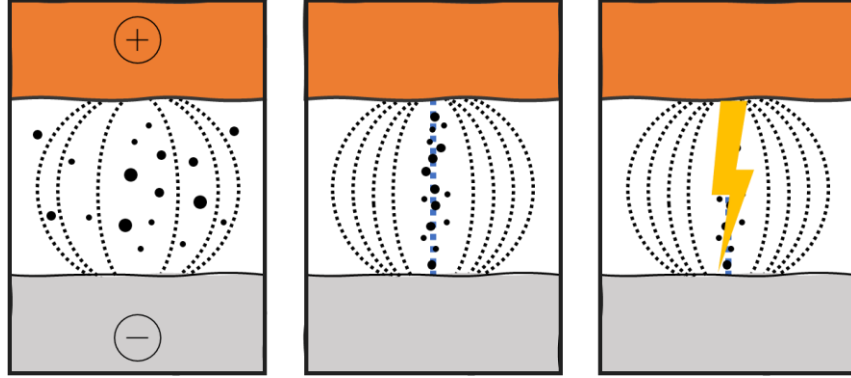
3.2. EDM SÜRECİNDE İŞLEME MEKANİZMASI

EDM işleminde elektrik iletkenliği olmayan dielektrik içinde güç kaynağına bağlı elektrot çifti (takım-işparçası), tezgah servo mekanizması ile birbirlerine yaklaştırılır. Bu sırada, elektriksel potansiyel dielektriğin yalıtkanlığını bozar ve elektrik akımının iletilmesini sağlayacak iyonlar (yükü parçacık) oluşturur. Bu noktada, EDM süreci vurum hazırlığı, vurum/darbe ve vurum aralığı olmak üzere üç aşamada gerçekleşir. Her aşamanın detayları aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Vurum Hazırlığı

Öncelikle, güç kaynağının çalıştırılmasıyla elektrotlar (takım ve işparçası) arasındaki boşlukta elektriksel alan oluşur. Kısa devrenin gerçekleşmemesi veya yeterince potansiyel farkın oluşması amacıyla elektrotlar arasında uygun bir gap bırakılması gerekmekte olup, bu durum servo mekanizması ile otomatik olarak ayarlanabilir. Elektrotlar arası fark en küçük olduğu durumda elektrik alanı en büyük değere ulaşır. Bu noktada oluşan elektro-statik kuvvet ile işlenen malzemedeki bağımsız elektronlar takım yönünde hareket eder. Bu süreçte, elektronlar ile dielektrik moleküller arası iyonlaşmaya neden olan çarpışmalar meydana gelir. Çevrim şeklinde gerçekleşen bu olay “plazma” olarak bilinen elektriksel direnci düşük bir kanal oluşturur. Artan elektronların elektroda, + iyonların iş parçasına doğru hareketi

bir kıvrılcım şeklinde görülmektedir. Bu aşamadaki adımlar şematik olarak verilmiştir (Şekil 3.6).

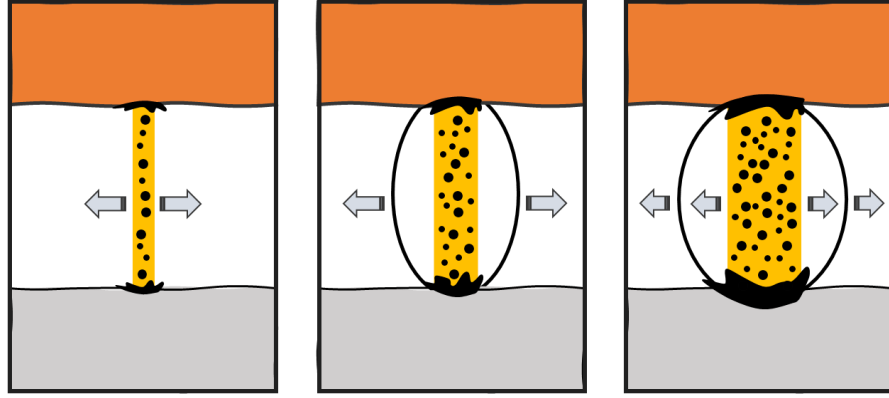


Şekil 3.6. Vurum hazırlığı aşaması [43].

3.2.2. Vurum/Darbe

Plazma kanalı boyunca büyük bir akım geçerken, elektrotun yüzeyinde yüksek bir ısı gözlenir. Bu sırada, yüksek enerjiye sahip elektronlar elektrota ve + yüklü iyonlar işlenen malzemeye çarpar (+ polarite). Meydana gelen yüksek sıcaklıkla malzeme ve elektrotun çok bir bölümü buharlaşır. Bu durum plazma kanalında çok yüksek bir basınca ve deşarj kanalına yol açar. Dielektrik sıvısı plazmaya dönüşür ve iyonların elektromanyetik alan ile çekilmesi sayesinde kanal genişler. Bu kanalın sürekli genişlemesi ısı ve akım yoğunluğunu azaltır. Diğer anlamda, plazma kanal çapının genişlemesi, elektrot-malzeme arasında üretilen ve buharlaşma ile yok olan ısı termal kararılığa ulaştığında son bulur. Genişleyen kanal, dielektrik sıvı ve elektrod çifti malzemesinin buharlaşması nedeniyle yüksek basınç altında kalmaya devam eder. Buharlaşan malzeme, plazma kanalını çevreleyen bir gaz kabarcığına dönüşür. Şekil 3.7'de, yukarıda bahsedilen vurum aşaması şematik olarak gösterilmektedir.

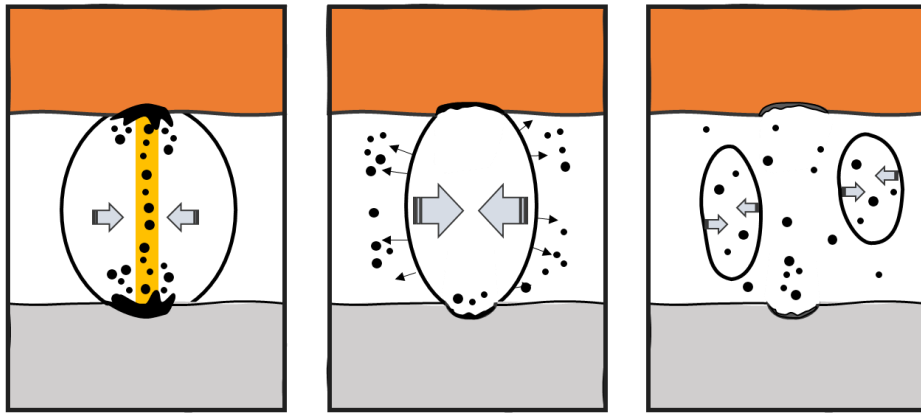
+ iyonlardan daha hafif olan elektronlar daha hızlı tepki gösterdiğinden, çoğunlukla anot malzemesi (iş parçası) erir/buharlaşır. Bundan dolayı, elektrot/takım katot olduğunda daha az aşınma oluşur ve mikro işlemede önemlidir. Fakat plazma kanalındaki genişleme, anot tarafında geniş bir yüzeyde beyaz katmana neden olur.



Şekil 3.7. Vurum adımları [43].

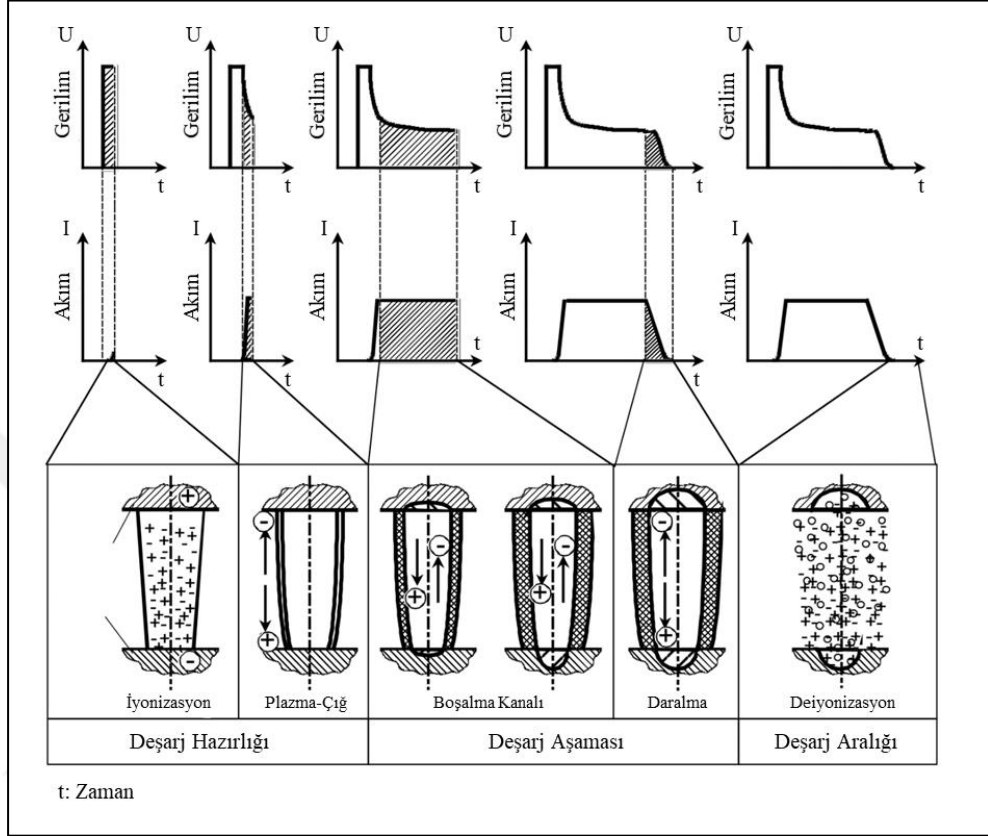
3.2.3. Vurum Aralığı

Bu aşamada, elektrot çiftine giden gücün kapatılması ile vurum sonlanır ve plazma kanalındaki iyonlaşma azalır. Deiyonizasyon sonucunda plazmadaki sıcaklık ve basınç azalır. Deşarj sırasında oluşan yüksek ısı yüzünden elektrot çevresinde eriyen malzeme aynı anda kaynarak sıvı küreciklere dönüşür. Devamında, elektrot buharlaşır ve dielektrik sıvı ile temas ederek hızla katılaşır ve gap boşluğundan parçacık olarak ayrılır. Oluşan katı partiküllerin bir kısmı kanalda kalarak bir sonraki vurum çevrimi için iyonizasyona yardım eder. Vurum aralığının uygun olmaması durumunda döküntülerin yeterince uzaklaştırılamaması kıvılcım mekanizmasını kararsızlaştırır. Vurum aralığının sonunda güç otomatik olarak açılır ve döngü tekrar eder [48]. Bu aşamadaki adımlar Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Vurum aralığı adımları.

EDM’de temel işleme parametreleri, gerilim (V) ve akım (I) için işleme sırasındaki hareket eğrilerinin fazlara göre değişimleri Şekil 3.9’da gösterilmektedir [12].



Şekil 3.9. V ve I 'nin hareket eğrileri

Elektronlar daha hızlı ivmelendiğinde kısa darbeler ($0,5 \mu\text{s}$ 'den az) anottan daha fazla malzeme kaldırırken, + iyonların kütlesi elektronlara göre daha büyük olduğundan daha fazla ısı üreten çarmalar oluşturur ve böylece katotta daha fazla talaş oluşur. Yüksek sıcaklıkla dar plazma kanallı katotta erimiş bölgeler derinleşir. Takımın anot, iş parçası katot seçildiğinde optimum işleme şartı $10-100 \mu\text{s}$ 'dir [43].

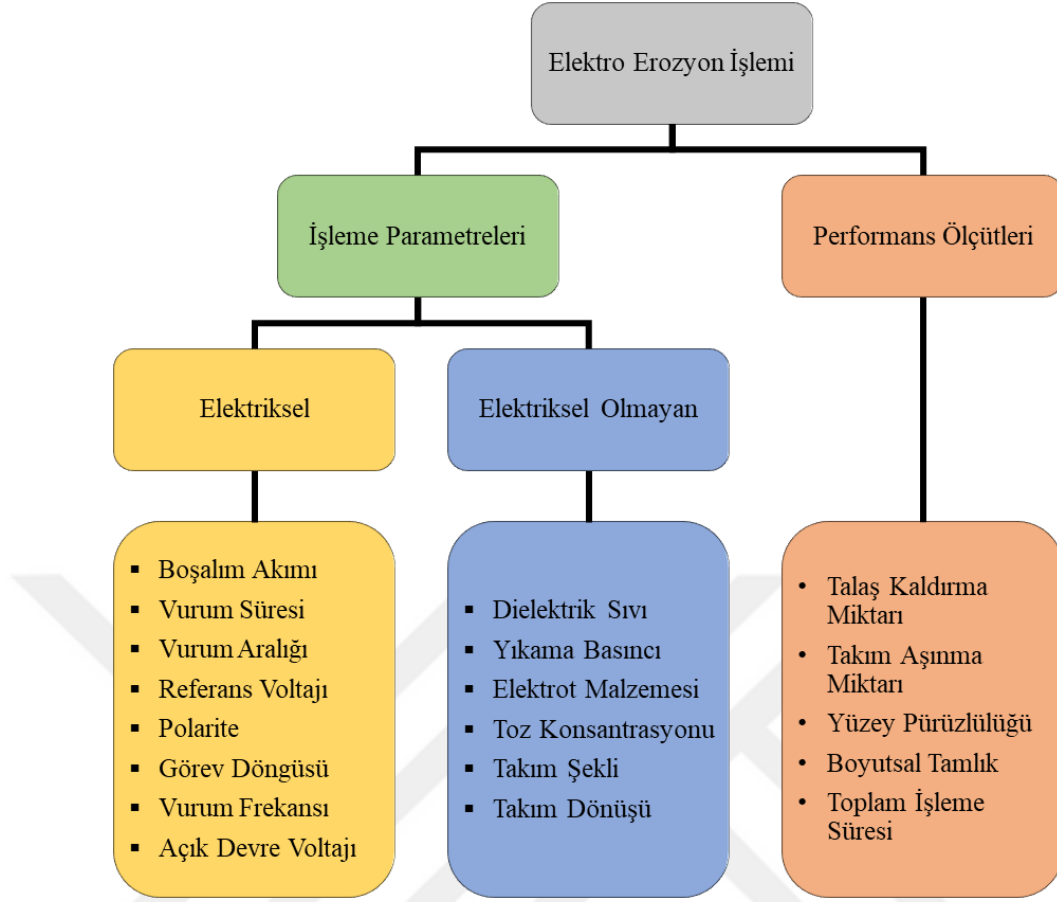
3.3. EDM SÜRECİNDE İŞLEME PARAMETRELERİ

EDM süreci, hem elektriksel hem de elektriksel olmayan parametreler tarafından yönlendirilir. Başlıca elektriksel parametreler deşarj voltajı, tepe akımı, vurum süresi ve aralığı, elektrot takım boşluğu, polarite ve vurum dalga biçimidir. Elektriksel olmayan parametreler arasında elektrot takımının (elektrod ve işparçası) dönüşü,

dielektrik sıvısı türü ve uygulama şekli vb. bulunur [20]. EDM parametrelerinin işleme performansına etkisi genellikle talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma hızı (TWR), yüzey pürüzlülüğü, ölçü tamlığı ve işleme zamanı gibi kriterler ile belirlenmektedir [49]. Şekil 3.10'da EDM'de kullanılan parametreler ve işleme sonrası gözlemlenen performans kriterleri verilmiştir.

Deşarj veya işleme voltajı, işleme sırasında kıvılcım aralığındaki ortalama voltajdır. Elektrik potansiyeli, deşarj nedeniyle açık aralık voltajından sonra keskin bir şekilde azalır ve tepe akımı yükselir. Talaş kaldırma işlemi çalışma voltajında başlayacaktır. Ayrıca, deşarj voltajı, kıvılcım aralığının ve aşırı kesimin boyutunu doğrudan etkiler [50–52]. Düşük voltaj, normalde yüksek elektriksel iletkenliğe sahip elektrot/takım ve iş parçası malzemeleriyle kullanılır. Buna karşılık, düşük iletkenliğe sahip malzemeler çok daha yüksek bir voltaj gerektirir [53]. Erozyonla işlemede harcanan maksimum güçle tanımlanan tepe akımı, EDM işlemini büyük ölçüde etkileyen bir parametredir. Tepe akımı, vuruş süresi boyunca ulaşılan maksimum seviye ile temsil edilir. Bu parametre, MRR, TWR ve işleme doğruluğunu doğrudan etkiler [54,55].

Vuruş süresi, deşarj akımının uygulandığı süredir. Yüksek sıcaklıktaki bir plazma kanalı, deşarj sırasında hem elektrodu hem de iş parçasını ısıtır. Vuruş süresi sırasında üretilen enerji miktarı, MRR üzerinde doğrudan etkiye sahiptir [56,57]. Daha uzun vuruş süreleri uygulayarak deşarj enerjisini artırmak MRR'yi artırır. Deşarj çevrimi boyunca döküntü oluşur, bir yalıtım tabakası oluşturur ve ark oluşumuna yol açar. Bu tabaka vuruş aralığı sırasında yıkanabilir. Vuruş aralığı, deşarjın uygulanmadığı zaman olup, bu sürenin doğru seçilmesi istikrarlı bir işleme sağlar [58]. Daha kısa bir süre işleme hızını artırabilir ancak vuruş aralığı, boşluktan döküntülerin temizlenmesine yetecek kadar uzun olmalıdır.



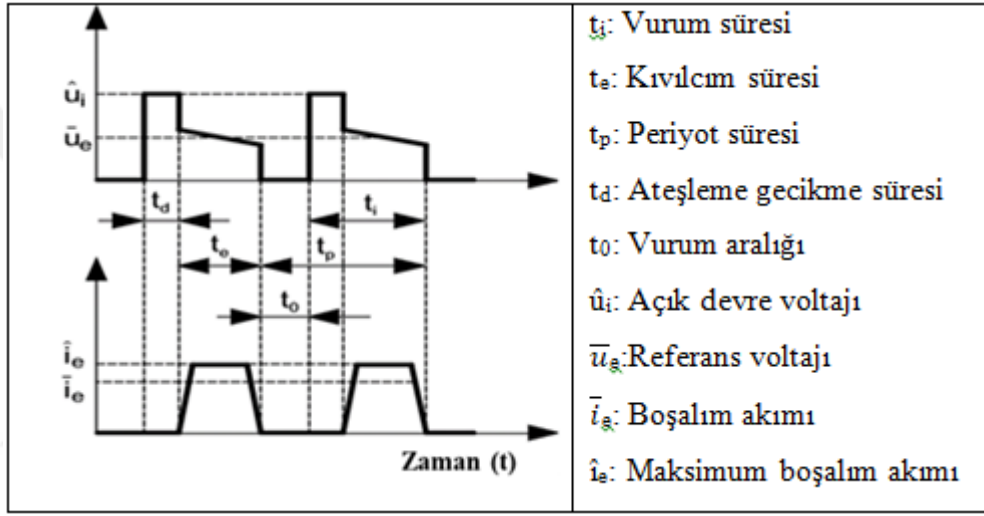
Şekil 3.10. EDM’de parametreler ve performans kriterleri.

Diğer yandan, vurum aralığı çok uzun olursa işlenmiş malzemenin aşırı soğumasına neden olabileceği ve bunun MRR üzerinde etkisi olduğu hesaba katılmalıdır[72]. Ayrıca, vurum dalga formu genellikle dikdörtgen şeklinde oluşur, ancak elektrot aşınmasını azaltmak için trapezoid gibi diğer darbe şekilleri kullanılabilir [59]. EDM süreç parametrelerinin performans üzerindeki etkisi, deşarj mekanizmasının stokastik yapısı nedeniyle çok zor açıklanmaktadır. Bu nedenle, EDM ile ilgili birçok çalışma, işlem parametrelerinin performans ölçümleri üzerindeki etkisini araştırmış ve en iyi performansı elde eden optimum işlem parametreleri kavramını ortaya koymuştur [60–62]. EDM’de performans kriterlerini etkileyen başka bir konu ise takım polaritesi olup, takım polaritesi pozitif veya negatif olabilir. Dalma EDM’de, jeneratörler işleme gereksinimlerine göre pozitif veya negatif takım polaritesine geçme esnekliği sunar. EDM işlemlerinde genellikle pozitif elektrot takım polaritesi elektrot aşınması daha düşük olacağı için tercih edilir. Yüksek MRR önemliyse

negatif elektrot takım polaritesi daha iyi bir seçimdir. Ancak, bu durumda yüksek elektrot takım aşınması oluşur [10].

3.3.1. Elektriksel Parametreler

Elektriksel parametreler, EDM’de V ve I’nın kıvılcım boşalımı ve işleme sırasındaki hareket eğrileri değişimleri ile gösterilebilir (Şekil 3.11). EDM için gerekli elektriksel parametreler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.11. EDM’de elektriksel parametrelerin akım ve gerilim hareket eğrileri [64].

Kıvılcım süresi: Boşalım sırasında geçen akım zamanıdır.

Ateşleme gecikme süresi: Gerilim başlangıcından boşalım oluşumuna kadar geçen zamandır. Bu süreç, boşaltma kanalının oluşumu ve dielektriğin iyonlaşması için gereklidir.

Vurum süresi: Gerilim açılmasından itibaren oluşan darbe sürecidir. Aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$t_i = t_e + t_d \quad (3.1)$$

Sabit darbeli izofrekans jeneratörlerinde, çalışma aralığındaki farklı ateşleme koşullarında farklı vurum süreleri oluşabilir.

Vurum aralığı: Gerilimin kapanması ile açılması arasında kıvılcımın oluşmadığı süredir. Bu süreçte, önceki kıvılcımların boşaltma kanalı deiyonize olur ve elektrot çifti arasında meydana gelen ateşleme farklı bir yerde başlar.

Periyot süresi: Art arda iki gerilim darbesinin açılması için geçen zaman aralığıdır. Vurum süresi ve vurum aralığının toplanmasıyla bulunur:

$$t_p = t_i + t_0 \quad (3.2)$$

Görev döngüsü: Vurum süresi ile periyot süresi arasındaki orandır.

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} \quad (3.3)$$

Vurum frekansı: Birim zamanda açılan darbe gerilimlerinin sayısıdır:

$$f_p = \frac{1}{t_p} \quad (3.4)$$

İşleme bölgesindeki koşulların sürekli değişimi yüzünden, EDM'deki V ve I eğrileri belirsiz bir dizide gerçekleşir. Aşağıdaki değişkenler buna göre tanımlanır:

Kıvılcım frekansı (f_e): İşleme bölgesinde birim zamandaki boşalımların sayısıdır.

Frekans oranı (λ): Kıvılcım frekansının vurum frekansına oranıdır. Bu değişken, erozyon sürecinin kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir.

$$\lambda = \frac{f_e}{f_p} \quad (3.5)$$

Açık devre voltajı: Akım geçişi olmadığında maksimum değerde boşalım kanalında oluşur. Jeneratörde birkaç seviye olarak ayarlanır ve kıvılcımın oluşacağı boşluğu belirler.

Referans voltajı: Deşarj başlangıcı ve akım akışı sırasında boşalım kanalında oluşur. Zamana bağlı bir değişken olduğundan, ortalama voltaj değeri \bar{u}_e kullanılır. \bar{u}_e , malzeme çeşidine bağlı olarak birçok uygulamada 15-30 V düzeyindedir.

Çalışma voltajı (U): Talaş kaldırma esnasında boşalım kanalındaki voltajın aritmetik ortalamasıdır.

Boşalım akımı: \bar{i}_e işleme sırasında oluşan akım darbelerinin ortalama değeridir. Jeneratörün çıkış gücüyle sınırlıdır ve kademeli olarak ayarlanabilir.

Çalışma akımı (I): Talaş kaldırma esnasında boşalım kanalındaki akımın aritmetik ortalamasıdır. Çalışma V ve I değeri, elektro erozyon sürecini kontrol etmek için kullanılan parametrelerdir.

Polarite: Elektrotlarda biriken yükün gösterimi olup, anot (+) ve katot (-) yükü gösterir.

Vurum enerjisi (We): Darbe esnasında boşalım kanalında dönüştürülen enerjidir. Aşağıda verilen denklem ile ifade edilebilir. Vurum miktarı ve işlenen yüzeyin oluşumu, vurum enerjisine bağlıdır.

$$W_e = \int_{t_p} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx \bar{u} \cdot \bar{i}_e \cdot t_e \quad (3.6)$$

Servo kontrol: Vurum, işleme ve ilgili boşluk şartlarına göre elektrotun izleme görevini yürütür. Servo kontrol kısa devre, yanlış kıvılcım veya boşta vurumu çoğunlukla engeller. Bu, çalışma aralığı ile orantılı bir parametre olan ateşleme gecikme süresiyle sağlanır. Her vurumdan sonra iletkenlik, çalışma boşluğu,

dielektrik kirliliği, sıcaklık gibi değişen şartlardan dolayı değişir ve bu yüzden EDM tezgahlarında uygun bir servo kontrol olmalıdır [64].

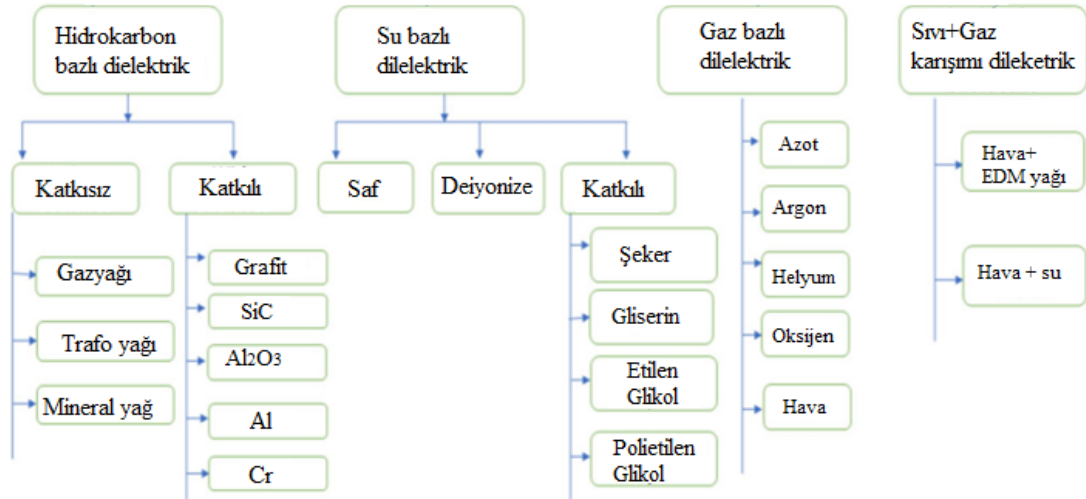
3.3.2. Elektriksel Olmayan Parametreler

3.3.2.1. Dielektrik Sıvı

EDM tekniklerinin çalışma ortamlarında dielektrik sıvı kullanılır. Çünkü işlemede oluşan parçacıkların uzaklaştırılması ve elektrot çifti arasında yalıtkanlığa ihtiyaç vardır. Dielektrik sıvının temel görevleri şunlardır:

1. Döküntü/Parçacıkların ortamdan uzaklaştırılması
2. Aşınan ve ısınan işleme bölgelerinin soğutulması
3. Gap boşluğunda iyonlaşma sağlanması
4. Takım ve iş parçasının yalıtılması
5. Enerji yoğunluğunu güçlendirmek amacıyla plazma kanalının incilmesi

EDM uygulamalarında kullanılan dielektrik sıvılar aşağıda özetlenmiştir [63,64]:



Şekil 3.12. EDM dielektrik sınıfları [65].

Hidrokarbon Bazlı Dielektrik: EDM işlemi için kullanılan geleneksel ve orijinal bir dielektrik türü hidrokarbonlara ve biyodizele dayanır. Bu yağların yeniden kullanımını ve parçalanmaması büyük sorundur. Bu yağlar işlem sırasında bir dizi

tehlikeli duman, aerosol ve zehirli gaz yayar. Ancak günümüzde, biyomedikal uygulama için oluşturulan organik tür dielektrikler, biyoaktif hidroksil apatit süspansiyon tipi ve biyodizel yağları, kullanılmaktadır.

Su Bazlı Dielektrik Sıvı: Hem normal hem de deiyonize su bazlı dielektrikler EDM işleme için kullanılır. Bunlar kolayca temin edilebilir ve çevre dostudur. Ancak, bu sıvıların yarattığı etkiler tatmin edici ve elverişsizdir. Günümüzde mükemmel sonuçlar elde etmek için su+glikol, su+makine yağı, su+gliserin ve diğer su bazlı emülsiyonlar dielektrik olarak kullanılmaktadır.

Gaz Bazlı Dielektrik Sıvı: Hava ve oksijen, EDM'de kullanılan tipik dielektriklerdir. Bunlar, diğer dielektriklerden daha az tehlikelidir ve ayrıca daha az kirliliğe neden olurlar. Ancak bu dielektrikler, düzgün bir şekilde yerleştirildiğinde diğer dielektriklere benzer performans gösterir. Gaz dielektrikler, gliserin gibi katkı maddelerinin kullanımıyla iyileştirilebilir.

Toz Karışımli Dielektrik Sıvı: Malzeme işleme için sıklıkla kullanılan modern bir yöntem toz karışımli dielektrik sıvıdır. Yüzey pürüzlülüğü, çatlaklar ve delikler azaltılır ve yüzey topografisi iyileştirilir. Bu dielektrik, sıvı kerosen ve grafit, SiC, Al₂O₃, Al ve Cr gibi toz iletken elementlerden oluşur. Bu dielektrikler, düşük dirençle elektriksel iletkenliği iyileştirirken daha fazla talaş kaldırılmasına olanak tanır.

EDM'de dielektrik olarak düşük maliyet açısından mineral yağlar veya sentetik sıvılar olan hidrokarbon bileşikler ve suyun kullanımı yaygındır. Saf su çoğunlukla genellikle WEDM ve mikro-EDM'de tercih edilir[65]. Bazı yağ esaslı dielektrik sıvılarda yangın oluşma riski vardır. Ayrıca, bunlar işleme süresince çalışan ve çevrenin sağlığını olumsuz yönde etkileyen koku ve gaz salınımı yaparlar. EDM'de parlama noktası 85 °C'den az olan dielektrik sıvının kullanımı önerilmemektedir. Çizelge 3.1'de EDM tekniklerinde kullanılan sıvıların özellikleri verilmiştir [43].

Dielektrik sıvılar Şekil 3.13'de gösterilen 6 farklı biçimde uygulanabilir [66]:

1. Dielektrik sıvının erozyon bölgesinden çekilerek uygulanması; emmeli yıkama (Şekil 3.13a ve 3.13c).
2. Dielektrik sıvının takım/iş parçası içinden verilerek uygulanması; basınçlı yıkama (Şekil 3.13b ve 3.13d).
3. Dar kanal ile delik işlemede uygulanan sürekli akışın işleme alanına yönlendirilmesi; jet/kenar yıkama (Şekil 3.13e).
4. Derin olmayan işlemlerde akışsız dielektrik uygulama; daldırma (Şekil 3.13f).

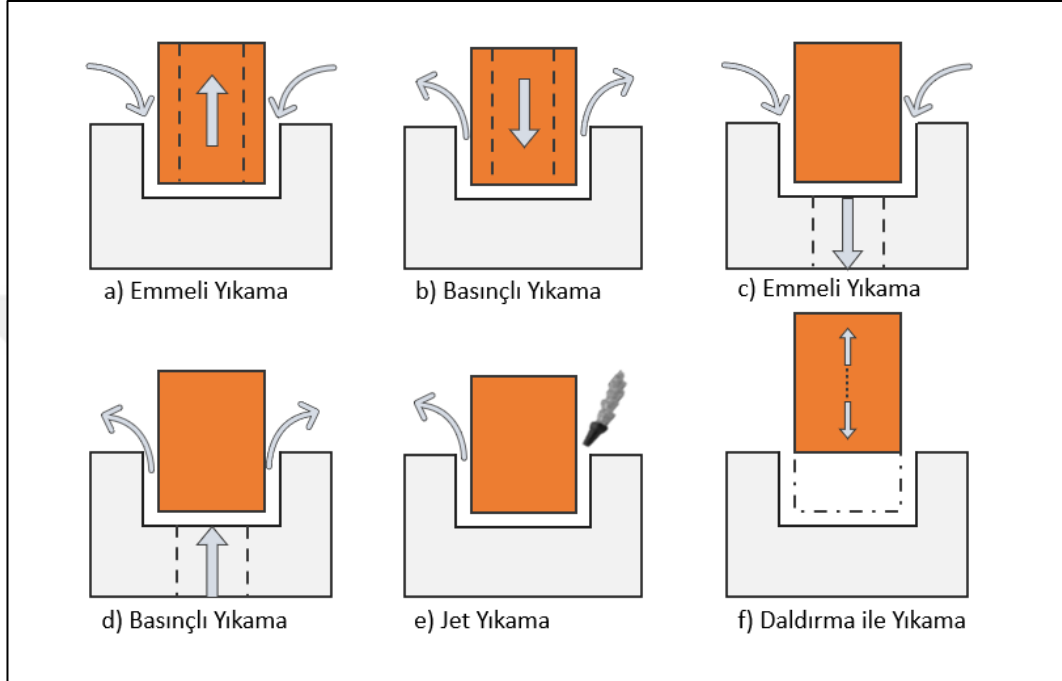
Çizelge 3.1. EDM tezgahlarında kullanılan dielektriklerin bazı özellikleri.

Özellik	Gazyacı	Mazot	Standart sıvılar
Parlama noktası	40°C	52°C	103°C-125°C
Rahatsız edici koku	Yüksek	Yüksek	Yok
Dielektrik özellik	Düşük, Geçici	Düşük, Geçici	Çok iyi
Oksitlenme	Yüksek	Yüksek	Yok
Korozyon	Var	Var	Yok
Asit oluşumu	Var	Var	Yok
Yangın riski	Var	Var	Düşük
Filtre edilebilme	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok İyi

EDM sırasında oluşan döküntünün giderilebilmesi MRR, TWR ve yüzey pürüzlülüğü açısından önemlidir. Bu süreç, dielektrik uygulaması ve basıncı ile değişir. Dielektrik uygulaması; akışsız, kesikli ve sürekli uygulama şeklinde gruplandırılır. Kanal ve derin delikleri işlerken, sürekli yıkama tekniği diğerlerine göre talaşların/döküntülerin uzaklaştırılmasında daha etkindir. Ayrıca, verimli bir yıkama için takım işlemenin başladığı seviyeden daha yukarıya (geriye) çekilmelidir. Bu noktada, dielektrik akışı hızlandırılırsa işleme süresini azaltmak amacıyla geri çekme mesafesi azaltılır [67].

Diğer yandan, EDM sırasında meydana gelen gaz kabarcıkları vurum neticesinde oluşan döküntülerin birikme zeminini hazırlar. Döküntüler ve gaz kabarcıkları yıkama basıncıyla uzaklaştırılır ve işleme bölgesinin deiyonizasyonu sağlanır. Bu kabarcıklar işleme düzenliliği için önemlidir. Dielektrik basıncının artmasıyla kabarcıkların boyutu azalır. Çok küçük gaz kabarcıklarının hacmine bağlı olarak

kaldırma kuvveti de az olacağı için işleme bölgesinden uzaklaşmaları zorlaşır. İri gaz kabarcıkları, gap mesafesini doldurarak işleme düzensizliğine yol açabilir. Düşük dielektrik basıncı takımların kaynama noktasını azaltarak talaş kaldırma miktarının artmasını sağlar [68].



Şekil 3.13. Dielektrik uygulama çeşitleri.

3.3.2.2. Takım Elektrotları ve Aşınma

Yüksek elektriksel iletkenlik ve termal iletkenliğin yanısıra yüksek erime ve kaynama noktalarına sahip malzemeler, EDM elektrotları olarak kullanılmak için uygundur. Pirinç, Cu, grafit, Cu-grafit, tellür bakır, tungsten, Cu-tungsten, tungsten karbür, Ag, Ag-tungsten ve alüminyum elektrot malzemeleri olarak yaygın kullanıma sahiptir [13]. Bir elektrot malzemesi seçerken, EDM işlemini etkileyen elektriksel ve elektriksel olmayan tüm parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, aşağıdaki prensipler elektrot seçiminde dikkate alınmalıdır [12].

1. Malzemenin yapısal bütünlüğü (yani, malzemenin yüzeyindeki yüz binlerce kırılcıma ne kadar iyi tepki verdiği), elektrot malzemesinin performansını belirlemede önemli bir faktördür.

2. Malzemenin mekanik özellikleri (yani, çekme mukavemeti, tane boyutu ve sertlik) hem elektrodun üretimini hem de EDM işlemindeki performansı etkiler.
3. Malzemenin üretilebilirliği (yani, bir elektrot malzemesinin kullanılabilirliği, ondan elektrot üretmenin zorluğuna göre bir dereceye kadar belirlenir) işlenebilirlik, kararlılık ve çapak oluşumu ve giderimi gibi faktörler elektrot maliyetini ve iş parçası boyut doğruluğunu etkileyecektir.

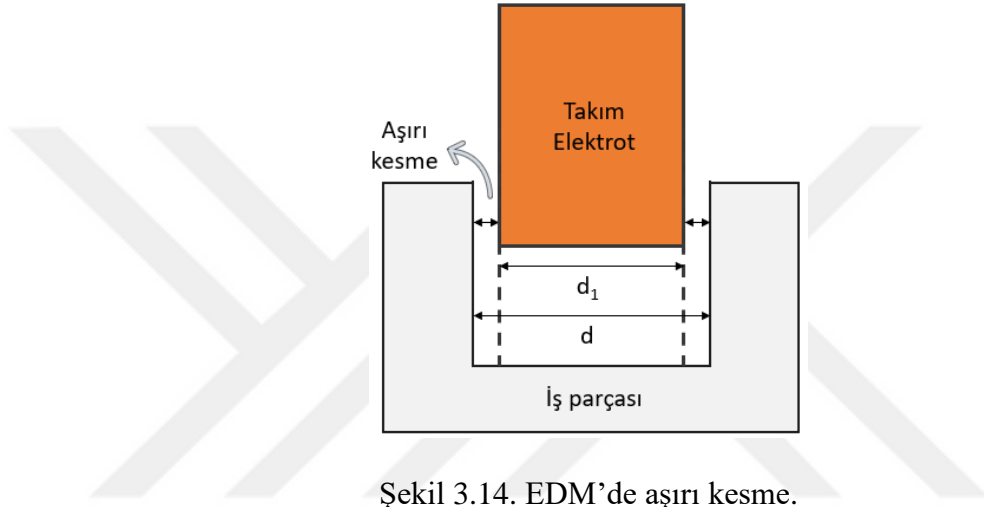
Yüksek ergime noktasına sahip malzemelerden üretilen elektrotlarda, malzemenin yüzeyinde sıcaklık, ergime/buharlaşmaya neden olacak kadar yüksek olmadığından aşınma meydana gelemez. Ayrıca, takımın dayanımı 3D, kompleks ve ince cidarlı şekillerin daha kolay imalatına ışık tutar. Cu, mükemmel elektriksel ve ısıl iletkenliği sayesinde EDM için en sık kullanılan elektrot malzemesidir [33,69]. Ek olarak, işleme sırasında dielektrik sıvıdan elektrot yüzeyine geçen C, elektrot aşınmasını büyük ölçüde etkiler. Takım yüzeyine yapışan karbon malzemenin dayanımını artırarak takımın aşınmasını geciktirir. Dielektrik sıvı olarak C-bazlı yağların kullanılmasının nedeni yukarıda bahsedilen sebepten dolayı küçük takım aşınması sağlamasıdır. Bununla birlikte, elektrot aşınmasının takım geometrisine bağlı olduğu ve takım kenarının, EDM sürecinin başlangıcında önemli düzeyde aşındığı belirtilmiştir [62].

EDM’de, elektrot aşınması, işleme maliyeti ve zamanı dikkate alındığında takım elektrodu basit şekillerde tasarlanmalıdır. Takım, işlenecek parçaya göre geleneksel yöntemler ile daha rahat şekillendirilecek karakteristiklere sahip olmalıdır. Basit geometriye sahip takımlar döküm ve ardından geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmektedir [70]. Karmaşık şekillerdeki takımlar ile kompozit malzemelerden takım üretimleri ise elektro şekillendirme, toz metalurjisi ve eklemeli imalat teknikleri ile üretilir [15].

Dalma EDM sürecinde kullanılan güç düzeyine göre plazma boşluğundaki genişleme yüzünden takım elektrotu iş parçasını toleranslı olarak işlemektedir. Bu tolerans, takım-iş parçası arasındaki yanıl mesafe olup aşırı kesme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu değer, vuruş süresi, boşalım akımı ve elektrot aşınmasına

göre değişmektedir. Bu bağlamda, genellikle takım elektrodu boyutları işlenecek yüzey alanı ölçüsünden aşırı kesme (tolerans) değeri kadar küçük üretilmelidir. Dalma EDM için takım tasarımında, Şekil 3.14’de şematik olarak gösterilen aşırı kesme değerine bağlı Eşitlik 3.7 kullanılabilir. Bu eşitlikte, işlenecek bölge yüzey alanı d ve takım yüzey alanı d_1 ile temsil edilmiştir.

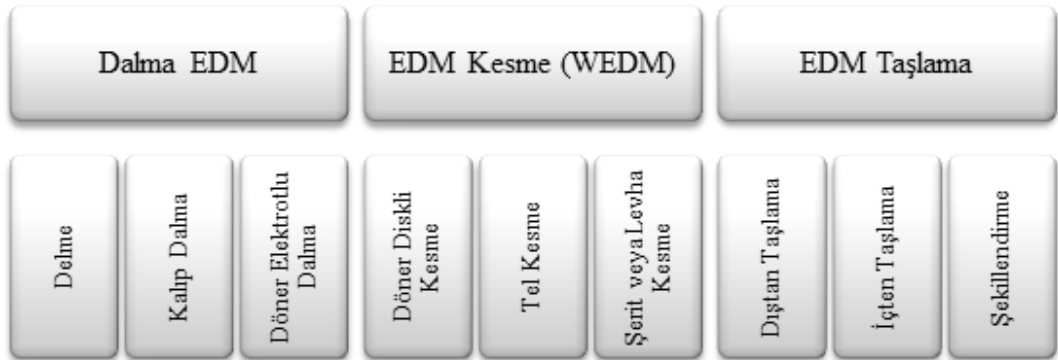
$$d_1 = d - \text{Aşırı kesme} \quad (3.7)$$



Şekil 3.14. EDM’de aşırı kesme.

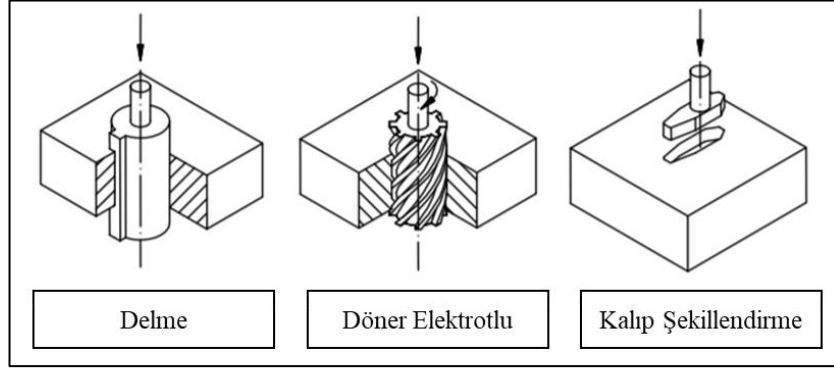
3.4. EDM ÇEŞİTLERİ

Elektro erozyon ile işleme yöntemi kullanım alanına göre farklı biçimlerde uygulanabilmektedir. EDM yöntemleri ve bunların uygulamaları Şekil 3.15’te gösterilmiştir.

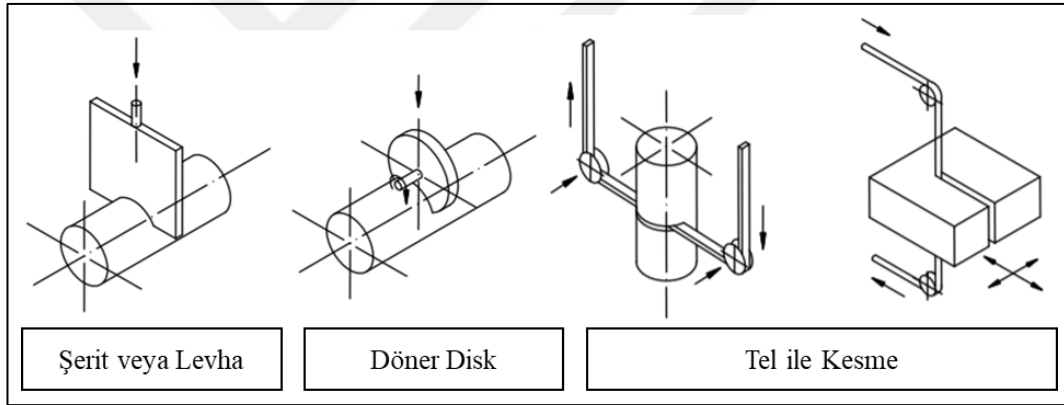


Şekil 3.15. EDM yöntemleri.

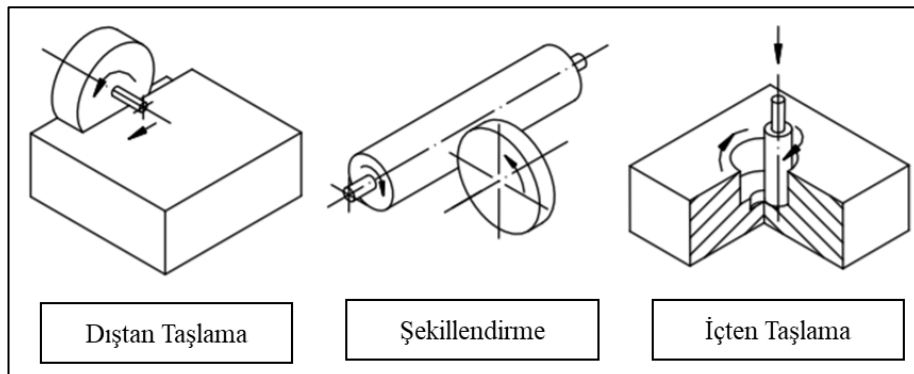
Dalma EDM, WEDM ve EDM taşlama uygulamaları Şekil 3.16-Şekil 3.18 arasında sırasıyla şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Dalma EDM yöntemleri.



Şekil 3.17. EDM kesme yöntemleri.



Şekil 3.18. EDM taşlama yöntemleri [71].

3.5. PERFORMANS KRİTERLERİ

EDM sürecinde, talaş kaldırma hızı (MRR), takım aşınma hızı (TWR), yüzey pürüzlülüğü ve radyal aşırı kesme gibi performans kriterleri üzerinde işleme parametrelerinin etkisinin incelenmesi kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, son zamanlarda işleme zamanı, yüzey bütünlüğü, enerji tüketimi, karbon emisyonları gibi performans kriterleri üzerine çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Genelde işleme parametreleri, deşarj akımı, voltaj, vurum süresi, vurum aralığı, görev faktörü ve yıkama basıncını içerir. EDM’de elektrotların verimliliği ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla analiz edilen performans kriterleri aşağıda açıklanmıştır.

3.5.1. Malzeme Kaldırma Oranı (MRR)

Birim zamanda iş parçasından çıkarılan malzeme miktarıdır. MRR, işleme öncesi ve sonrası iş parçası ağırlığındaki farkın işleme süresine oranı olarak hesaplanabilir.

$$MRR = \frac{\text{İş parçasından kaldırılan malzeme miktarı}}{\text{İşleme süresi}} = \frac{w_b - w_a}{t} \left[\frac{g}{dk} \right] \quad (3.8)$$

3.5.2. Takım Aşınma Hızı (TWR)

Birim zamanda aşınan takım elektotu miktarı olarak atınımlanır. TWR değeri işleme öncesi ve sonrası takım ağırlığındaki farkın işleme süresine oranı olarak hesaplanabilir.

$$TWR = \frac{\text{Elektrotta aşınan malzeme miktarı}}{\text{İşleme süresi}} = \frac{w_{tb} - w_{ta}}{t} \left[\frac{g}{dk} \right] \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.8’de w_b ve w_a işlenen parçanın EDM öncesi ve sonrası ağırlığı, w_{tb} ve w_{ta} elektrotun işleme öncesi ve sonrası ağırlığı, t ise dk olarak işleme süresini gösterir.

3.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

İşlenen yüzeylerde, imalat yöntemi ve nem, korozyon, sıcaklık vb. çevre koşullarına göre bazı düzensizlikler oluşur. Bu anlamda, her imalat yöntemi kendine has yüzey topografyası üretmekte olup, bu yüzey düzensizliği, malzeme nominal yüzeyinde oluşan gelişigüzel sapmalar olarak bilinir. Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş parçaların temas, sürtünme, aşınma ve yağlama durumunu etkileyen temel yüzey özelliğidir. Ayrıca, yüzey özellikleri fonksiyonel parçaların görünümü, optik, elektriksel ve termal performansı üzerinde önemli bir pay sahibidir.

İşlenen malzemelerde, işleme sonrası yüzey bozukluklarının yanı sıra çatlak, ezilme ve çizik gibi ölçümü olumsuz etkileyebilecek unsurlar bulunur. Bu unsurların ölçüm yapılırken filtrelenmesi gerekir. Bu amaçla; birincil, pürüzlülük ve dalga profili olarak üç değişik teknik uygulanmaktadır. Profil filtreleme yöntemleri ve pürüzlülük ölçümünde sıklıkla kullanılan kriterler aşağıda verilmiştir.

Örnekleme uzunluğu: Malzemenin nominal yüzeyinde tekrarlı veya gelişigüzel sapmaları ölçmede kullanılan x-ekseni yönündeki uzunluğu olup, (l_r) sembolü ile gösterilir.

Değerlendirme uzunluğu: Ölçülen pürüzlülük kriterlerini değerlendirmede kullanılan x-ekseni yönündeki profil uzunluğu olup, (l_n) sembolü ile gösterilir.

Birincil profil (P-profil): Ölçülen profil ile ilgili olmadığı düşünülen λ_s değerinden kısa dalga boylarını kaldırarak ölçüm yapar. Bu yöntemde, l_n ve l_r değerleri eşittir.

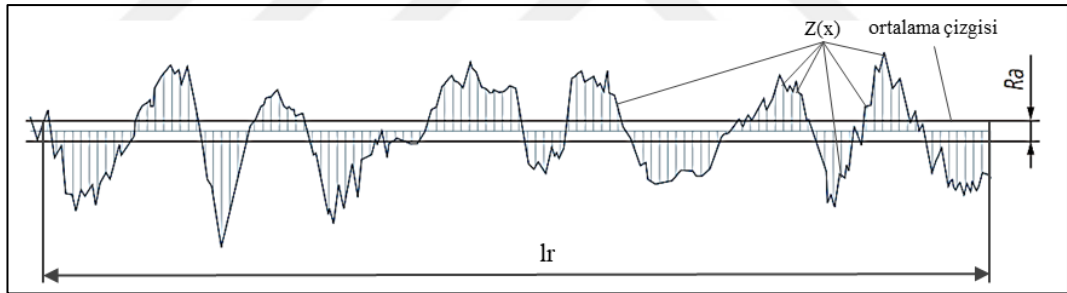
Pürüzlülük profili (R-profil): Birincil profilden dalgalılığı kaldırarak üretilen R-profil, ölçülen profil ile ilgili olmadığı düşünülen kesme dalga boyuna (λ_c) değerinden uzun dalga boyu bileşenlerini kaldırarak ölçüm yapar. Bu yöntemde, l_n içerisinde l_r değeri λ_c 'ye eşittir.

Dalga profili (W-profil): Birincil profilde λ_c 'den kısa, λ_f 'den uzun dalga boylarını kaldırarak ölçüm yapılır. l_r ve λ_f değerleri eşittir.

Yüzey pürüzlülüğü kriterleri, işlevselliğine göre sapmaların dikey özelliğini tespitinde genlik, sapmaların yatay özelliğini tespitinde aralık ve hibrit olmak üzere üçe ayrılır. Pürüzlülük kriterleri tek başına malzeme yüzeyi hakkında yeterince bilgi vermez. Değerlendirilen kriter sayısı arttıkça yüzey hakkında daha doğru bir analiz yapılabilir. Pürüzlülük ölçümüne bağlı değerlendirmelerde en çok uygulanan kriterler aşağıda verilmiştir:

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra): Ra, genel yüzey kalitesi kontrolü için yoğun uygulanan kriterdir. Seçilen l_r değeri içinde ortalama çizgiden sapmaların ($Z(x)$) mutlak değerinin aritmetik ortalamasıdır (Şekil 3.19). Ra, pürüz yüksekliklerini genel olarak gösterir, dalga boyu ve profil üzerindeki küçük değişiklikleri tanımlamaz. Ra'nın matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.10)$$



Şekil 3.19. Ortalama yüzey pürüzlülüğü.

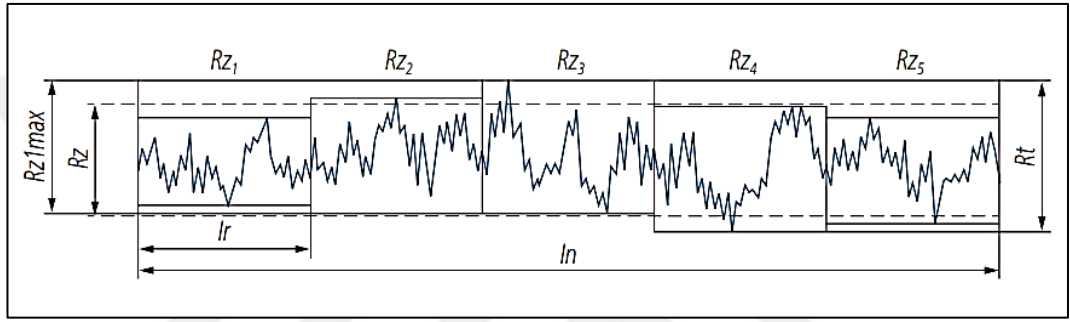
Maksimum yüzey pürüzlülük yüksekliği (Rz): Rz, Ra kriterinde belirlenemeyen ve az sayıdaki en yüksek tepe noktaları ve derin çukurları tanımlar. Bir örnekte en yüksek tepe noktası ve en derin çukurun toplam Rz_i değerini verir. Seçilen l_n değeri boyunca hesaplanan Rz_i değerlerinin ortalaması hesaplanarak Rz bulunur. Rz değerinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$Rz_i = Zp_i + Zv_i \quad (3.11)$$

$$Rz = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rz_i \quad (3.12)$$

Yüzey pürüzlülük yüksekliği (Rt/Rmax): Değerlendirme uzunluğunca en yüksek tepe ve en derin çukurun ortalama çizgiye göre uzunluklarının toplamıdır (Şekil 3.20). Rt değerinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir. Rz1max; maksimum pürüzlülük yüksekliğinin en büyüğü, n ise değerlendirme uzunluğunca örneklem sayısıdır.

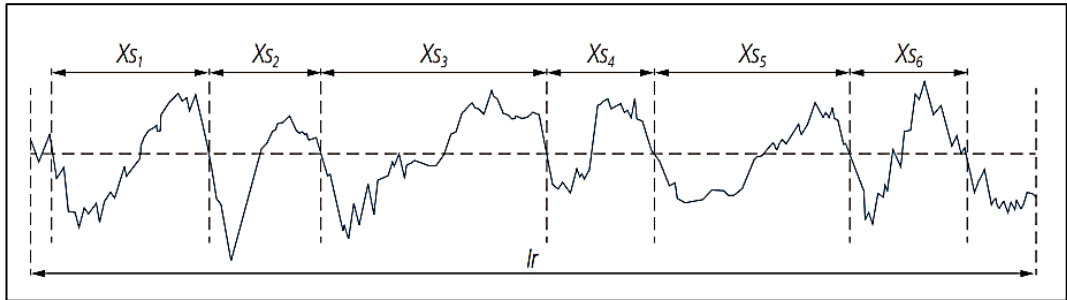
$$R_t = Z_p + Z_v \quad (3.13)$$



Şekil 3.20. Maksimum ve toplam yüzey pürüzlülük yüksekliği.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü genişliği (Rsm/Sm): Rsm, yükseklik kriterlerinde belirlenemeyen tepe ve çukurların genişliğini tanımlar. Değerlendirme uzunluğunca hesaplanan Xs (Profil genişliği) değerlerinin ortalaması alınarak Rsm bulunur (Şekil 3.21). Xs örneklem içerisinde tanımlanır. Rsm değerinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir [72]:

$$R_{sm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{s_i} \quad (3.14)$$



Şekil 3.21. Ortalama yüzey pürüzlülük genişliği

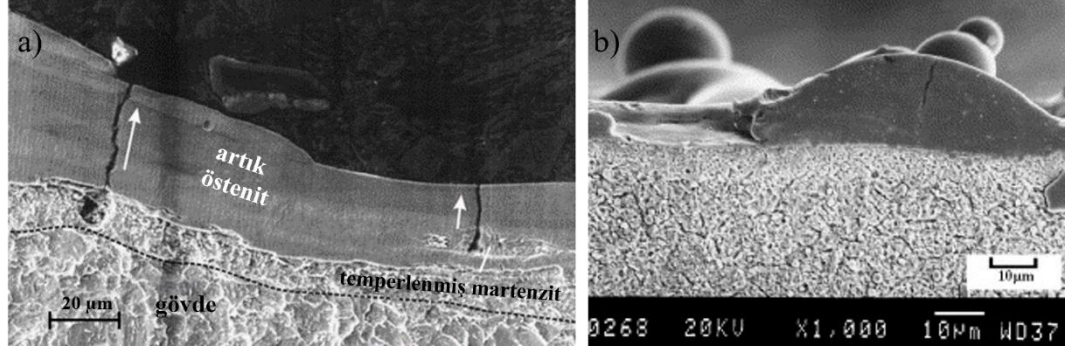
EDM'de işlenen yüzey, kıvılcım plazma kaynaklı malzeme atımıyla aşındırılır. Kıvılcım aşındırma işlemi, işlenmiş yüzeyde mikro boşluklara ve krater oluşumuna neden olur. Bu nedenle, aşınma kaynaklı yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi gerekir. Genellikle Ra, Rz ve Rsm gibi pürüzlülük kriterleri ile yüzey kalitesi değerlendirilir.

3.5.4. Yüzey Bütünlüğü

EDM sürecinde elektrotların (takım ve işparçası) yüzey bütünlüğü kriterleri olan yüzey pürüzlülüğü, mikroyapısı, morfolojisi ve sertliği değişebilmektedir. EDM sırasında dielektrik sıvı kesme bölgesinden erimiş malzemenin tamamını çıkaramaz ve ergimiş malzemenin bir kısmı iş parçası yüzeyinde yeniden katılaşır. İşlenmiş yüzeyde beyaz katman veya yeniden döküm tabakası olarak bilinen bu tabaka yüzey kalitesini düşürür. Bu katmanın derinliği μm cinsinden ölçülür ve işleme parametrelerine göre değişir.

EDM sürecinde, daha önce bahsedilen elektriksel ve elektriksel olmayan parametreler yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli rol oynar. Bu parametrelerden boşalım akımı kıvılcımların şiddetini artırır ve böylece eriyen malzeme derinliği artar. Vurum süresi plazma kanalını genişleterek oluşan ısı enerjisinin daha geniş bir alana yayılması ve daha çok malzeme ergimesine sebep olur. Vurum aralığı, döküntüleri işleme bölgesinden kolayca atılmasını sağlar. Bu bağlamda, düşük akımda vurum süresi arttırıldığında oluşan geniş kraterler sayesinde Ra değeri kararlı bir düzeyde tutulabilir [6]. Bu sonuç, biyomedikal ve enjeksiyon kalıpları gibi imalat endüstrisinde EDM ile üretilen çeşitli parçaların kullanımını artırmıştır. Vurum aralığında giderilemeyen eriyik soğuma aşamasında yeniden katılaşır ve beyaz katman olarak bilinen dalgalı bir yüzey formu oluşturarak yüzey pürüzlülüğünü etkiler [73]. Diğer yandan, hızla soğutmanın etkisiyle meydana gelen beyaz katmanın sertliği ve aşınma direnci işlenen malzemedan daha fazladır. Soğutma sırasında dielektrik sıvıdan çözünen karbon, eriyik içerisine nüfuz ederek beyaz katman sertliğini arttırır. Bu tabakada, ısı dağılımının homojen olmaması ve metalürjik dönüşümlerden kaynaklanan artık gerilmeler oluşabilir. Ayrıca, ergimiş tabakanın soğuması sırasında meydana gelen büzülme alt tabakadaki soğuk bölge tarafından

kısıtlanır. Bu süreç, büyük çekme gerilmelerine sebep olarak işlenen yüzeyde çatlak oluşumuna neden olur [74]. Bahsedilen bu oluşumlar SEM analizleri ile ortaya konulmuştur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. a) Beyaz tabaka çatlakları [75], b) Yüksek akımda beyaz katmandaki değişim [76].

Diğer yandan, beyaz katmanın sertliği ve yüksek aşınma direnci elektro erozyonla işlemenin bir avantajı sayılabilir. Fakat bu katman üzerinde yer alan mikro/nano ölçekli yüzey hasarlarının (çatlak, krater, mikro boşluk) yorulma dayanımı üzerinde negatif etkisi EDM'nin dezavantajı olarak sayılmaktadır. Yüzeydeki çatlaklar işlenen malzemenin çekme mukavemetini aşan ısıl gerilmeler ve hızlı soğutmanın etkisiyle oluşur. Çatlakların büyüklüğü ise beyaz katman (kaba işleme; 20-40 µm, ince işleme; ~3 µm) ile darbe enerjisine göre artmaktadır [77].

EDM yönteminde takım malzemesinin ısıl deformasyonuna bağlı olarak takım yüzeyinde mikro çatlak ve kraterlerin oluşabilir. Ek olarak, katot elektrot anot elektrotta göre daha az aşınır. Ancak vurum süresi uzadığında bunun tam zıttı gerçekleşir. Genellikle işleme sırasında C-bazlı dielektrikten anot olan Cu elektrotta karbon nüfuziyeti olur. Bu süreç, uzun vurum sürelerinde elektrot aşınmasını önleyici daha kalın bir katmana neden olur [6,78].

Takım yüzey pürüzlülüğü, işleme parametrelerine göre değişmekle birlikte işlemeden önceki takımın yüzey profiline göre değişir. İşleme alanında kıvılcımlar en yakın noktadan hareketle ters kutba ulaşır ve öncelikle bu kısımlarda erime/buharlaştırma meydana gelir. Elektrot daha fazla kıvılcım bölgesi ve tepe noktası üretmek amacıyla yüksek tepe noktalarını sürekli eritir. İşleme öncesi takım yüzey pürüzlülüğü arttıkça MRR azalır, yani takım yüzey pürüzlülüğü MRR'yi negatif etkiler. Ancak işleme

zamamı arttıkça (0-450 sn) pürüzlülük ve karbonlu katman en uygun seviyeye ulaşır. Bu sayede, işlenen malzeme ve elektrot yüzey pürüzlülüğü yalnızca parametrelerin etkisiyle değişir [79].

3.5.5. Enerji Tüketimi

Elektro erozyon ile işleme sürecinde, özellikle değişken parametrelerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan karmaşıklık nedeniyle yüksek enerji tüketimi sorunu belirgindir. EDM'nin uzmanlaşmış talaşlı imalat yöntemlerindeki yeri doldurulamaz rolü giderek daha belirgin hale geldikçe, enerji verimliliği ve ekonomik uygulanabilirliği konusunda endişeler ortaya çıkmaktadır. Elektrik enerjisi tüketiminin ölçümü, karbon ayak izi ve üretim ekonomisi ile doğrudan ilişkili olan önemli performans kriterlerinden biridir.

EDM'nin toplam enerji tüketimi, bekleme enerji tüketimi ve işleme enerji tüketiminden oluşur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_t = P_i + P_p \quad (3.15)$$

Bekleme enerji tüketimi (P_i) takım tezgahının performansı ile ilgilidir. İşleme enerji tüketimi (P_p), iş parçası malzemesi, elektrot malzemesi ve işleme parametreleri gibi faktörler tarafından belirlenir. İşleme olmaması durumunda, EDM takım tezgahı elektrot ile malzeme arasında elektrik deşarjı üretmez, bu nedenle takım tezgahının P_i değeri sabittir. EDM süresince P_p değeri, esas olarak elektrot ile işlenen malzeme arasındaki deşarj reaksiyonu tarafından üretilir.

EDM'de işleme gücü veya enerji tüketiminin genellikle talaş kaldırma hızı esaslı modellendiği görülmekte olup, işleme gücü şu şekilde ifade edilebilir [32]:

$$P_p = K \cdot MRR \quad (3.16)$$

K , talaş kaldırma hızının ve tek darbe enerjisinin özgül enerji katsayısı olup, birimi W/mm^3 'tür. Bu değer, iş parçası malzemesi, takım tezgahı performansı ve etkili darbe kullanımı ile ilgilidir ve en küçük kareler yöntemi ile bulunabilir.

EDM sırasında tüketilen gücün (P_t) bulunmasında kullanılan diğer yöntem, kontrol panelindeki elektrik akımlarının ölçülmesine dayanır. P_t (kW), Eş. 3.17 kullanılarak hesaplanır.

$$P_t = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi}{1000} \quad (3.17)$$

Burada, V besleme hattı voltajıdır, I (A) hat akımlarının ortalamasıdır (yani, $I_1 + I_2 + I_3/3$) ve $\cos\varphi$ ise güç faktörüdür ve 0,9'a eşittir [80].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 MALZEME VE APARATLAR

4.1.1. EDM Tezgahı

EDM deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu yerleşkesi laboratuvarındaki Furkan K1Z-NC EDM makinası ile yapılmış olup, tezgahın teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. EDM tezgahı teknik özellikleri.

Jeneratör	Güç 220V 3 faz 380 VAC	3,5 KVA
	Maksimum çalışma akımı	25A / Opsiyonel 50A
	Açık voltaj seviyeleri	90/130 V
Makine Gövdesi	İş tablası ölçüleri	550 x 250 mm
	Tabla hareket ölçüleri	300 x 200 mm
	Tabla hassasiyeti	0,005 mm
	İş haznesi ölçüleri	960 x 505 x 350 mm
	İş parçası ölçüleri (maks.)	790 x 490 x 300 mm
	İş parçası-Elektrot ağırlığı (maks.)	200-25 kg
Z Eksen	Hareket mekanizması	Otomatik kafa ünitesi
	Hareket kursu	180 mm
	Okuma hassasiyeti	0,005 mm
	Kafa hareket	Yüksek hassasiyetli servo
Dielektrik	Dielektrik tank kapasitesi	270 litre
	Pompa kapasitesi	40 lt/dk
	Filtre hassasiyeti	5 µm
Performans	Aşınmasız talaş kaldırma	155 mm ³ /dk (Bakır),270 mm ³ /dk (Grafit)
	Elektrot aşınması (min.)	%0,5
	En iyi yüzey kalitesi	1,5 µ [Ra]

4.1.2. Malzeme

İşlenecek parça malzemesi olarak plastik kalıp çeliği DIN 1.2738 (40CrMnNiMo8-6-4) kullanılmış olup, enjeksiyon, ekstrüzyon, pres ve şişirme kalıplarında, kalıp çekirdeği, maça ve itici olarak kullanılır. Parlatılabilirliği iyi olan ve çok iyi nitrürlenebilen plastik bir kalıp çeliğidir. Çizelge 4.2’de, malzemenin kimyasal bileşimi verilmiş olup, deneylerde iş parçası olarak 20x25 mm ebatlarında numuneler 295 HBN sertliğe sahiptir.

Çizelge 4.2. 1.2738 çeliğinin kimyasal bileşimi (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,37	0,40	1,55	0,013	<0,001	1,86	0,20	0,98

4.1.3. Elektrot

Takım elektrotu olarak Cu malzeme kullanılmıştır. Elektrolitik bakır, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ile kolay şekillendirilmekle birlikte C-bazlı dielektrik sıvı ile kullanıldığında, işleme sırasında elektrot yüzeyine yapışan karbon (C) tabakası sayesinde takım aşınmasını azaltan bir davranış sergiler. Elektrot malzemesi boyutları 6x20x80 mm olarak seçilmiş olup (Şekil 4.1), kaba ve kaba+ince işleme uygulamalarında her deney dizisi için yeni takım kullanılmıştır. Takım yüzeyinde çapak veya pürüzlülük olması için deneylerde kullanılan elektrotlar tel erozyonda kesilerek hazırlanmış olup, takım malzemesi teknik özellikleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1. Cu takım elektrot.

Çizelge 4.3. Cu elektrot teknik özellikleri.

Özellikler	Birim	Değer
Akma dayanımı	MPa	125-145
Çekme dayanımı	MPa	275-350
Uzama	%	22
Sertlik	Vickers	87
Yoğunluk	g/cm ³	2,66
Elektriksel direnç	Ω.cm	0,00000598
Erime sıcaklığı	°C	590,6-638
Isıl iletkenlik	W/mK	117
Özgül ısı	J/g°C	0,900

4.1.4. Dielektrik sıvı

Tez çalışmasında, yüksek alevlenme noktası ve düşük viskozitede Belone EDM-F marka sıvı dielektrik olarak kullanılmıştır. Deneylerde, dielektrik sıvı işleme alanına sürekli yanal akış şeklinde 35 kPa basınçta verilmiştir. Dielektrik spesifik özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Dielektrik sıvı özellikleri.

Özellik	Birim	Test yöntemi	Değer
Görünüş	-	-	C&B
Yoğunluk@15 °C	kg/m ³	ASTM D 4052	0,760
Renk	Saybolt	ASTM D 156	+30
Kinematik viskozite@40 °C	mm ² /s	ASTM D 445	1,910
Alevlenme noktası, (COC)	°C, min.	ASTM D 92	102
Akma noktası	°C, maks.	ASTM 6749	0
Kırılma indisi@20 °C		ASTM D 1218	1,4280

4.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

EDM ile işlenen iş parçası yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri MarSurf M300 tipi cihaz ile yapılmıştır. Plastik kalıp çeliğinin EDM'si sonucunda ulaşılan yüzey kalitesi değerlendirmesinde kriter olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve

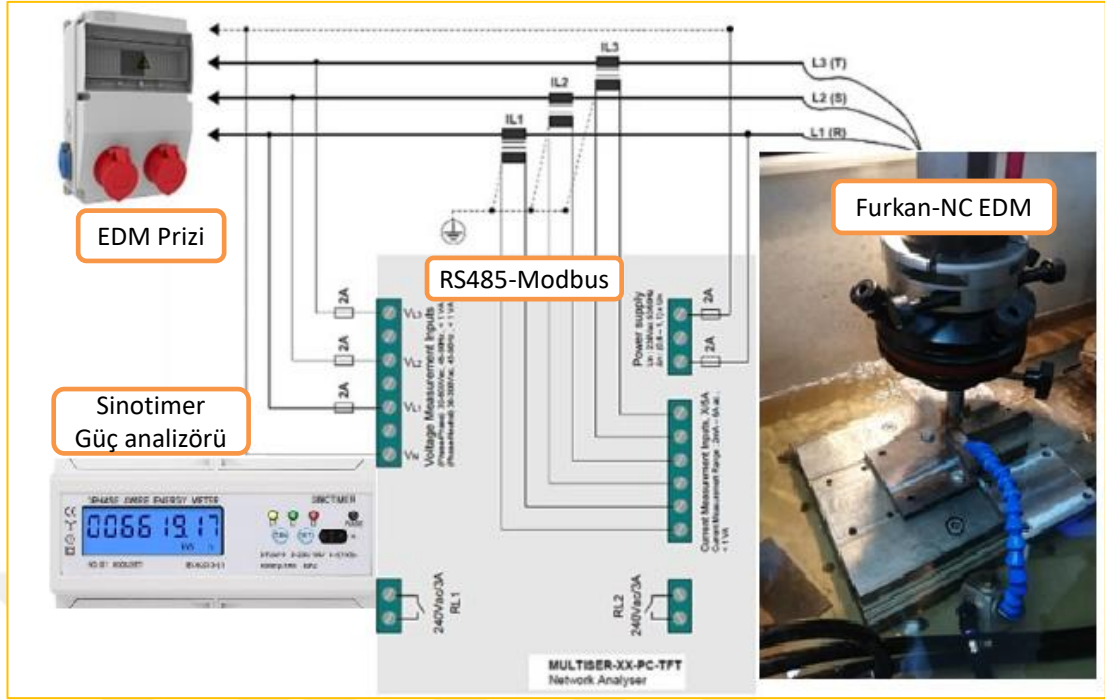
maksimum pürüzlülük yüksekliği (Rz) dikkate alınmıştır. Pürüzlülük ölçümünde örnekleme uzunluğu (λ_c) 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu (λ_s) 5,6 mm uygulanmıştır. Deney dizisine göre her işleme şartı için üç adet ölçüm kaydedilmiş ve aritmetik ortalama alınarak sonuçlar analiz edilmiştir.

4.1.6. Topografik Ölçümler

Elektro erozyon ile işlemede oluşan yüzeylerin üç boyutlu (3D) yüzey yapısını belirlemek amacı ile topografyas ölçümleri yapılmıştır. 3D yüzey profili ölçümleri DÜ Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Phase View marka profilometre ile yapılmıştır. Topografik ölçümlerde işlenen yüzeydeki 2500X2000 μm 'lik bir bölge esas alınmış olup, 3D yüzey görüntüleri elde edilmiştir.

4.1.7. Enerji Tüketimi

EDM ile kaba ve kaba+ince işleme sırasında tüketilen elektrik enerjisi ölçümleri birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2, enerji tüketimini ölçmek için EDM tezgahının güç girişine Sinotimer-DTS6619-016 model bir güç analizörünün bağlantısını göstermektedir. Bu cihaz, üç fazlı bir elektrik şebekesindeki elektriksel değerlerin ölçülmesine, raporlanmasına ve analizine yardımcı olabilmektedir. Cihaz LCD bir ekrana sahip ve RS485 Modbus ile aracılığıyla veriler işlenmemiş haliyle bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ölçülen güç sensörlerden değil, şebeke analizöründen doğrudan okunan değerleri kapsamaktadır.



Şekil 4.2. Güç analizörü ile enerji tüketimi ölçümü şeması.

4.2. DENEY TASARIMI VE ANALİZ

Dalma EDM ile işleme yapılırken deneylerden istikrarlı sonuçlar almak ve verimliliğini arttırmak için elektrodu sabitlemek için bir tutucu ve deney numunesini sabitlemek için mengene Şekil 4.3'te görüldüğü gibi takım tezgahına bağlanmıştır. EDM deneyleri kaba ve kaba+finiş şeklinde iki farklı işleme stratejisi ile gerçekleştirilmiştir. Kaba işlemede derinlik olarak 1 mm, kaba+ince işlemede ise 0,9 mm kaba ve 0,1 mm ince işleme şeklinde bir strateji uygulanmıştır. Tüm ölçümler ve deneysel sonuçların analizleri bu stratejiye göre yapılmıştır.

Literatür incelemeleri neticesinde dalma EDM'de en etkili işleme parametreleri boşalım akımı (I_p), vurum süresi (T_{on}) ve vurum aralığı (T_{off}) olarak belirlenmiştir. EDM tezgah kapasitesi de dikkate alınarak işleme şartları, dielektrik sıvı basıncı 35 kPa, açık devre voltajı 130 V ve referans voltajı 60 V uygulanmıştır. Deneysel çalışmada, özel parametrelerden çalışma süresi 3 sn, elektrot geriye çekilme mesafesi 2 mm ve güvenli yaklaşma mesafesi 200 μm seçilmiştir. Polarite takım +, iş parçası – kutup olarak belirlenmiştir. Kaba ve kaba+finiş işlemede enerji tüketimi ve yüzey

kalitesi değişimlerini net olarak görebilmek amacıyla boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı nispeten yüksek seçilmiştir (Çizelge 4.4).



Şekil 4.3. Elektro erozyon ile işleme deney düzeneği.

Deneyler, toplam deney süresi ve maliyetleri azaltmak amacıyla hem kaba hem de kaba+ince işlemede Taguchi L_9 deney tasarımı kullanılarak yapılmıştır. Kaba işleme için belirlenen işleme parametreleri L_9 dikey dizinine göre Çizelge 4.6’da verilmiştir. Kaba+ince kesme stratejisinde en düşük akım ve optimum yüzey kalitesi hedeflenmiş ve finiş işleme parametreleri sabit olarak alınmıştır. Bu durumda, $I_p=1,5$ A, $T_{on}=150$ μ s ve $T_{off}=75$ μ s seçilmiştir. Deney sonrasında, performans kriterleri için işleme parametreleri optimize edileceğinden deneyler ve ölçümler iki defa yapılmıştır.

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan parametre ve çalışma koşulları.

Parametre/Koşul	Tanımlama
İş parçası	Plastik kalıp çeliği
Elektrot	Cu
Dielektrik	Standard EDM sıvısı
Güç kaynağı voltajı	230-250 V
Basınç	35 kPa
Polarite	Takım (+), iş parçası (-)
Boşalım akımı	15-18-21 A
Vurum süresi	100-150-200 μ s
Vurum aralığı	50-75-100 μ s

Çizelge 4.6. L₉ deney tasarımı.

Deney no	Boşalım akımı (Ip), A	Vurum süresi (Ton), μ s	Vurum aralığı (Toff), μ s
Kaba İşleme			
1	15	100	50
2	15	150	75
3	15	200	100
4	18	100	75
5	18	150	100
6	18	200	50
7	21	100	100
8	21	150	50
9	21	200	75
Kaba+ince İşleme			
	3	100	75

DeneySEL çalışmalar sonucunda; Ip, Ton ve Toff parametrelerinin performans kriterleri olarak seçilen Ra, Rz, 3D topografya ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri parametrik ve istatistiksel analiz ile yorumlanmıştır. Bu amaçla, performans kriterlerinin sağlıklı değerlendirilebilmesi için deneyler tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve verilerin ortalaması alınarak analizler yapılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) ile parametrelerin performans kriterleri üzerindeki etki düzeyleri belirlenmiştir. Ayrıca, EDM sonrası işlenen yüzeyde çatlak, gözenek, krater, beyaz tabaka oluşumu ve mikrosertlik gibi yüzey bütünlüğü kriterleri de değerlendirilmiştir. Bu incelemelerde, tarama elektron mikroskobu (SEM) ve mikrosertlik cihazları kullanılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, dalma EDM yöntemi ile kaba ve finiş işleme süreçleri uygulanarak plastik kalıp çeliği DIN 1.2738 üzerine kanal açma işlemi yapılmıştır. EDM deneyleri, seçilen üç farklı işleme parametresi (Ip, Ton, Toff) esaslı Taguchi L₉ dikey dizinine göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, performans göstergeleri olarak Ra, Rz, mikrosertlik ve enerji tüketimleri ölçülerek değerlendirilmiştir.

EDM teknolojisi ile imalatı yapılan parçaların kalitesi ve işleme maliyeti optimizasyonu açısından işleme hızı, yüzey bütünlüğü ve enerji sarfiyatı en önemli kriterler olarak düşünülmektedir. Bu bağlamda, plastik kalıp çeliğinin EDM’inde dikkate alınan performans kriterlerinin analizi aşağıda verilmiştir.

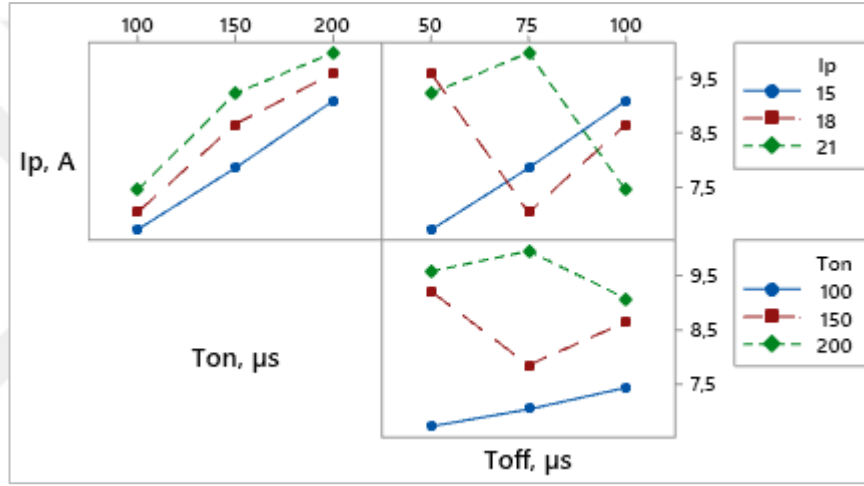
5.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

5.1.1. Kaba İşleme

Kaba işlemede oluşan yüzey pürüzlülüğünün analizinde, kriter olarak Ra ve Rz değerleri incelenmiştir. Ra ve Rz değerlerinin analizi sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilen etkileşim grafikleri üzerinden yapılmıştır.

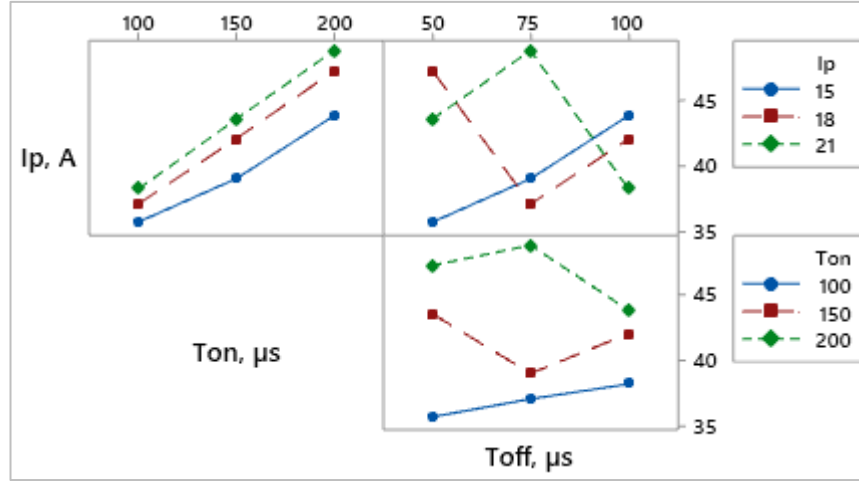
Genel olarak grafikler incelendiğinde, Ra ve Rz değerindeki değişimler benzer bir eğilim göstermektedir. Şekil 5.1 ve 5.2’den, Ip ve Ton parametrelerindeki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Bu sonuç, boşalım akımındaki artışla iş parçası yüzeyine aktarılan enerji yoğunluğunun artarak daha derin kraterler oluşturması ve vurum süresindeki artışla plazma kanalındaki genişlemenin daha geniş çaplı kraterlere neden olmasıyla açıklanmaktadır [6]. Diğer yandan, Toff

parametresinin yüksek olduğu deneylerde pürüzlülüğün olumlu yönde etkilendiği söylenebilir. Örneğin, en yüksek akımda (21 A) 100 μ s vurum aralığında Ra ve Rz'nin neredeyse en küçük değerde ölçüldüğü görülmektedir. Bu sonuç, işleme sırasında oluşan döküntünün işleme bölgesinden daha iyi uzaklaştırılmasına ve böylece daha kararlı bir ergime/buharlaştırma sonucunda daha sıkı yüzey çukurlar/tümseklerin oluşmasına atfedilmiştir [81]. Ip-Toff ve Ton-Toff etkileşimleri incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü değişimlerinin karmaşık bir eğilimde olduğu görülmektedir. Pürüzlülükteki bu değişim, vurum aralığı (Toff) parametresinin deney dizisindeki rastgele dağılımına atfedilmektedir.



Şekil 5.1. Kaba işlemede parametrelere göre Ra değişimi.

En küçük Ra, Ip:15 A, Ton:100 μ s, Toff:50 μ s deney dizisinde, en yüksek Ra ise Ip:21 A, Ton:200 μ s, Toff:75 μ s deney dizisinde ölçülmüştür. En küçük Rz ise Ip:15 A, Ton:100 μ s, Toff:50 μ s parametre seviyelerinde, en büyük Rz Ip:21 A, Ton:200 μ s, Toff:75 μ s seviyelerinde elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Kaba işlemede parametrelere göre Rz değişimi.

Plastik kalıp çeliğinin EDM ile kaba işlenmesinde ölçülen Ra ve Rz değerleri üzerinde elektriksel parametrelerin etki düzeyleri %95 güven seviyesinde uygulanan varyans analizi ile belirlenmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Kaba işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları

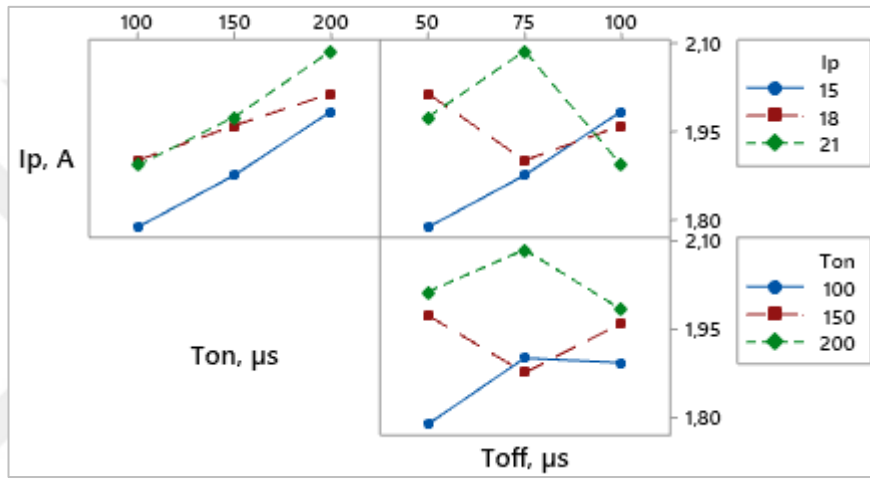
Faktör	DF	SS	MS	F	P	PCR
Ra						
Ip	2	1,4555	0,72777	30,69	0,032	13,35
Ton	2	9,3277	466,384	196,65	0,005	85,52
Toff	2	0,0753	0,03765	1,59	0,386	0,70
Hata	2	0,0474	0,02372			0,43
Toplam	8	10,9059				100
Rz						
Ip	2	24,559	122,7940	25,61	0,038	14,94
Ton	2	137,869	689,3470	143,74	0,007	83,87
Toff	2	1,000	0,5001	1,04	0,489	0,61
Hata	2	0,959	0,4796			0,58
Toplam	8	164,388				100

Çizelge 5.1 incelendiğinde, yüzey pürüzlülük kriterleri Ra ve Rz üzerinde en etkili parametre sırasıyla %85,52 ve %83,87 PCR değeri ile vurum süresi (Ton) olduğu görülmektedir. Tepe akımı, hem Ra hem de Rz pürüzlülük kriteri için ikincil öneme

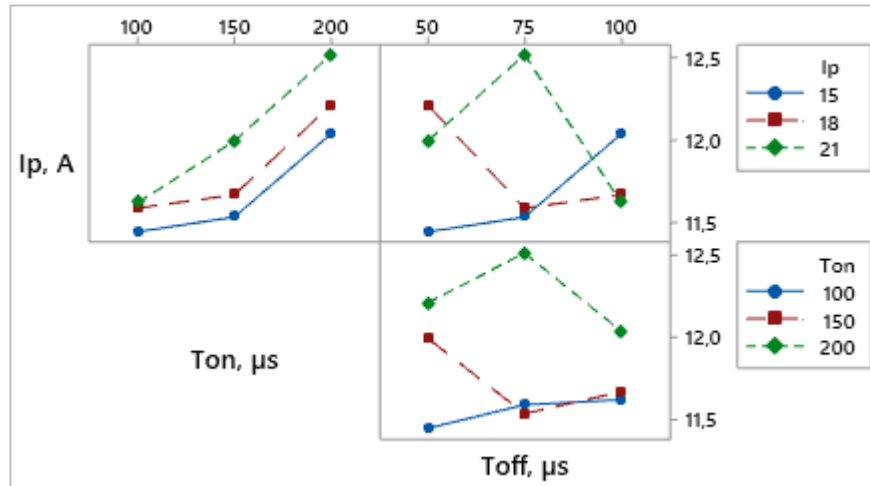
sahip parametre olarak bulunmuştur. Vurum bekleme süresinin ise güven seviyesi kriterine göre ($P>0,05$) istatistiksel olarak önemsiz olduğu anlaşılmaktadır.

5.1.2. Kaba+İnce İşleme

İnce işlemede oluşan yüzey pürüzlülüğünün analizinde dikkate alınan Ra ve Rz değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de gösterilen etkileşim grafikleri yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 5.3. İnce işlemede parametrelere göre Ra değişimi.



Şekil 5.4. İnce işlemede parametrelere göre Rz değeri.

Genel olarak grafikler incelendiğinde. Ra ve Rz değerlerindeki değişimler benzer bir eğilim göstermektedir. Şekil 5.3 ve 5.4'den, Ip ve Ton parametrelerindeki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün nispeten arttığı görülmektedir. Bu sonuç, tepe akımındaki artışla birlikte artan boşalım enerjisinin daha derin kraterler oluşturması ve vurum süresindeki artışla genişleyen plazma kanalının daha geniş kraterlere neden olmasıyla açıklanmaktadır [62,82]. Kaba işleme benzer şekilde, Toff parametresinin yüksek olduğu deneylerde pürüzlülüğün olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. Bu sonuç, işleme sırasında oluşan döküntünün daha iyi uzaklaştırılmasına ve böylece daha kararlı bir ergime/buharlaştırma sonucunda daha sıkı yüzey çukurları/tümseklerinin oluşmasına atfedilmiştir [81]. Diğer yandan, Ip-Ton, Ip-TOFF ve Ton-TOFF etkileşimleri incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü değişimlerinin karmaşık bir eğilimde olduğu görülmektedir. Vurum aralığı (TOFF)'na bağlı etkileşimlerde Ra ve Rz'deki bu eğilim Toff parametresinin deney dizisindeki rastgele dağılımına atfedilmektedir.

En küçük Ra, Ip:15 A, Ton:100 µs, Toff:50 µs deney dizisinde, en yüksek Ra ise Ip:21 A, Ton:200 µs, Toff:75 µs deney dizisinde ölçülmüştür. En küçük Rz ise Ip:15 A, Ton:100 µs, Toff:50 µs parametre seviyelerinde, en büyük Rz ise Ip:21 A, Ton:200 µs, Toff:75 µs seviyelerinde elde edilmiştir.

Plastik kalıp çeliğinin EDM ile kaba+ince işlenmesinde ölçülen Ra ve Rz değerleri üzerinde elektriksel parametrelerin etki düzeyleri %95 güven seviyesinde uygulanan varyans analizi ile belirlenmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 incelendiğinde, yüzey pürüzlülük kriterleri olarak seçilen Ra ve Rz üzerinde en etkili parametre sırasıyla %68,83 ve %76,45 PCR değeri ile vurum süresi (Ton) olduğu görülmektedir. Tepe akımı (Ip) ise Ra ve Rz üzerinde sırasıyla %27,36 ve %19,95 PCR değeri ile ikincil derecede önemli bulunmuştur. Vurum bekleme süresi (TOFF) ise $P>0,05$ güven düzeyine göre istatistiksel olarak önemsizdir.

Çizelge 5.2. Kaba+ince işlemede yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

Faktör	DF	SS	MS	F	P	PCR
Ra						
Ip	2	0,016738	0,008369	16,73	0,056	27,36
Ton	2	0,042118	0,021059	42,11	0,023	68,83
Toff	2	0,00133	0,000665	1,33	0,429	2,17
Hata	2	0,001	0,0005			1,64
Toplam	8	0,061186				100
Rz						
Ip	2	0,20741	0,103703	13,9	0,067	19,95
Ton	2	0,79479	0,397394	53,26	0,018	76,45
Toff	2	0,02242	0,011211	1,5	0,400	2,16
Hata	2	0,01492	0,007462			1,44
Toplam	8	1,03954				100

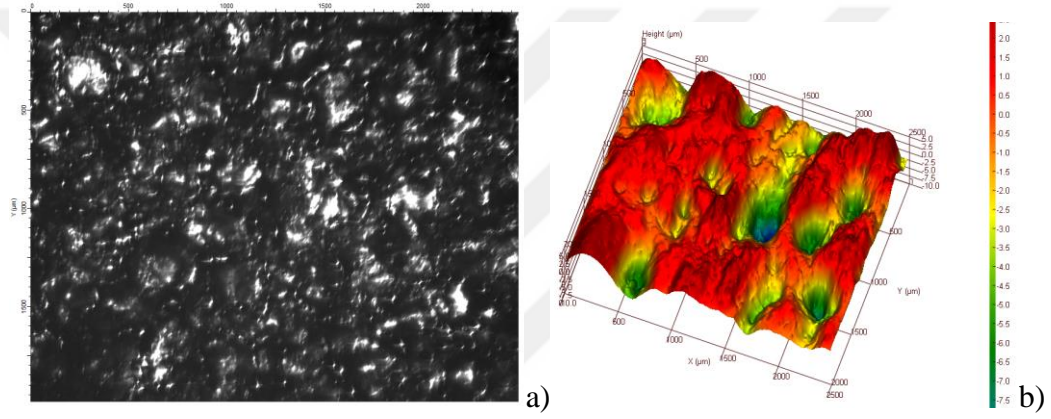
5.2. YÜZEY TOPOGRAFYASI

EDM sürecinde talaş kaldırma mekanizması, elektrota en yakın konumdaki malzeme yüzeyinde oluşan kıvılcımlar ile krater oluşturma esasına dayanır. Bu durum işlenmiş parçanın yüzey morfolojisinde rasgele çukurlar, kraterler ve tepeler oluşturur [83]. Diğer yandan. EDM ile işleme sonucunda yüzey morfolojisindeki değişimleri analiz etmek yorulma ve kırılma gibi bazı mekanik özellikler açısından kayda değerdir. Bu amaçla, kaba ve ince olarak işlenen parçaların taban yüzeylerinden 2D ve 3D yüzey görüntüleri alınmıştır.

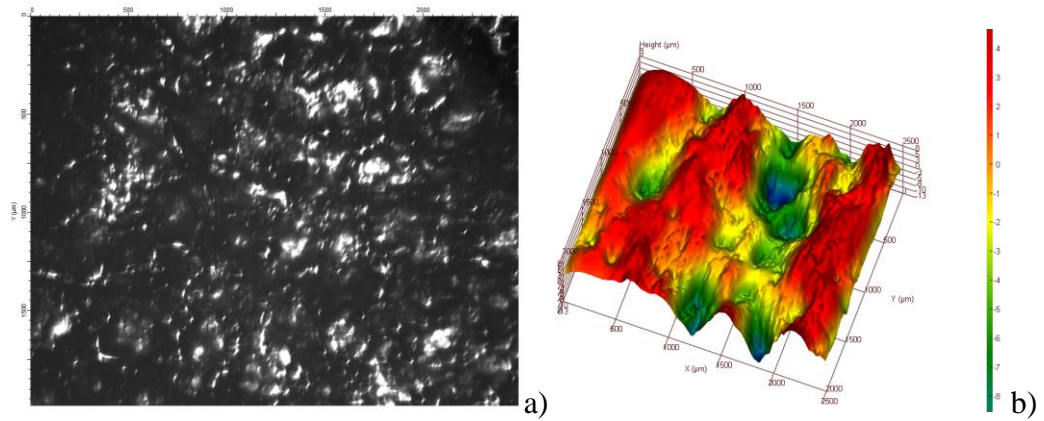
5.2.1. Kaba İşleme

Şekil 5.5-Şekil 5.7’de, 1. ve 3. deney parametrelerinde kaba işleme sonrası oluşan yüzey topografik görüntüleri verilmiştir. 2D yüzey görüntülerindeki beyaz/parlak renkli yerler tepeleri, siyah renkli yerler ise çukurları göstermektedir. 3D topografya görüntülerinde kırmızı renk tepelere, mavi renkler çukurlara/kraterlere işaret etmektedir. Boşalım akımı arttıkça yüzeyde oluşan tepelerin/kraterlerin yükseklikleri/derinlikleri azalırken, genişliklerinde artış olduğu görülmektedir. Bu sonuç, boşalım akımının artmasıyla yayılan enerjinin işleme alanında daha fazla ergime ve buharlaşmaya sebep olmasıyla açıklanmaktadır [45]. Azalan boşalım

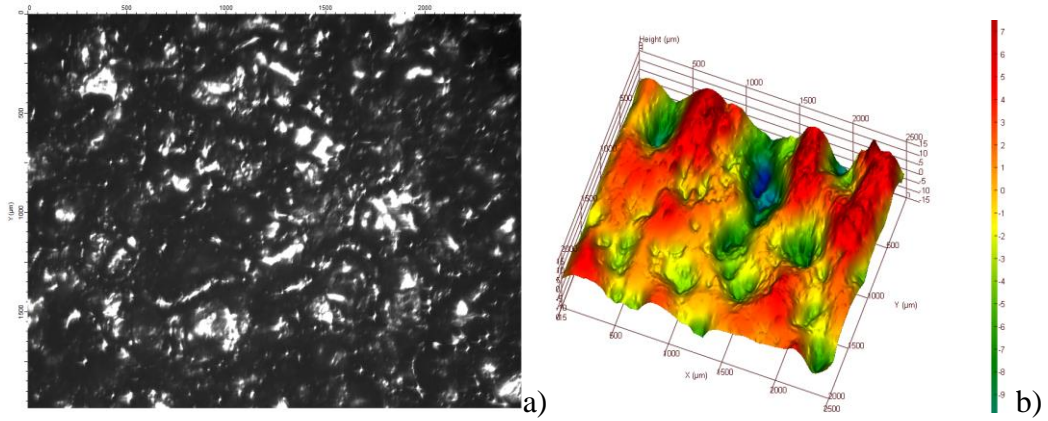
akımı işleme bölgesinde yeterli ısı oluşturamadığından eriyen malzeme katılarak tepe yoğunluğunda artışa neden olur. Vurum süresi ve aralığı arttığında ise oluşan çukur ve tepe yükseklikleri azalır. Vurum süresinin plazma kanalı çapını arttırmaktan dolayı birim alana dağılan enerji yoğunluğu azalır [24]. Bu durum, yüksek darbe süresinde derin kraterleri engellediği gibi çukurlar ve tepelerin genişliğini artırır. Diğer yandan, vurum aralığındaki artış döküntülerin daha iyi uzaklaştırılmasını sağlayarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirir. Ancak, vurum aralığı yeterince uzun olmadığında döküntülerin bir kısmı katılarak hem beyaz katman kalınlığında hem de pürüzlülükte artışa sebep olabilir.



Şekil 5.5. Kaba işleme 1.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.



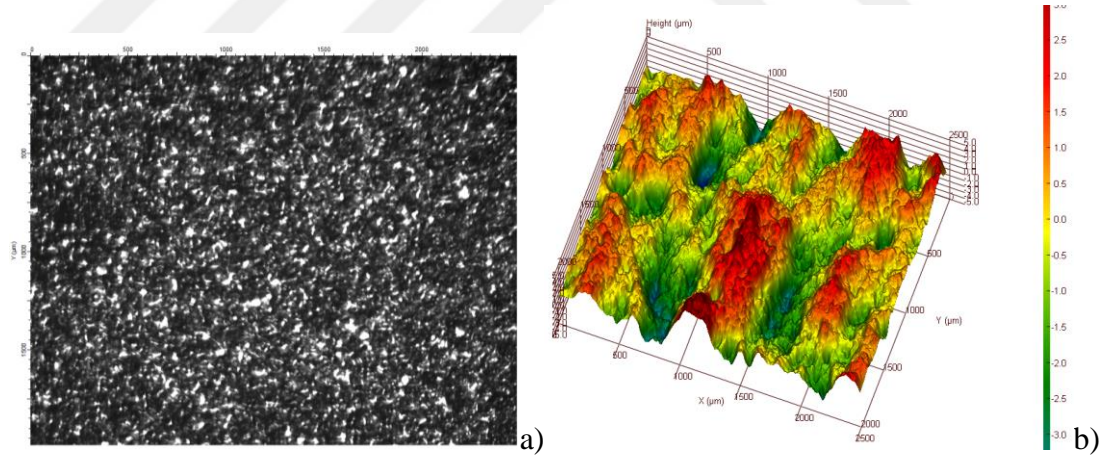
Şekil 5.6. Kaba işleme 2.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.



Şekil 5.7. Kaba işleme 3.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.

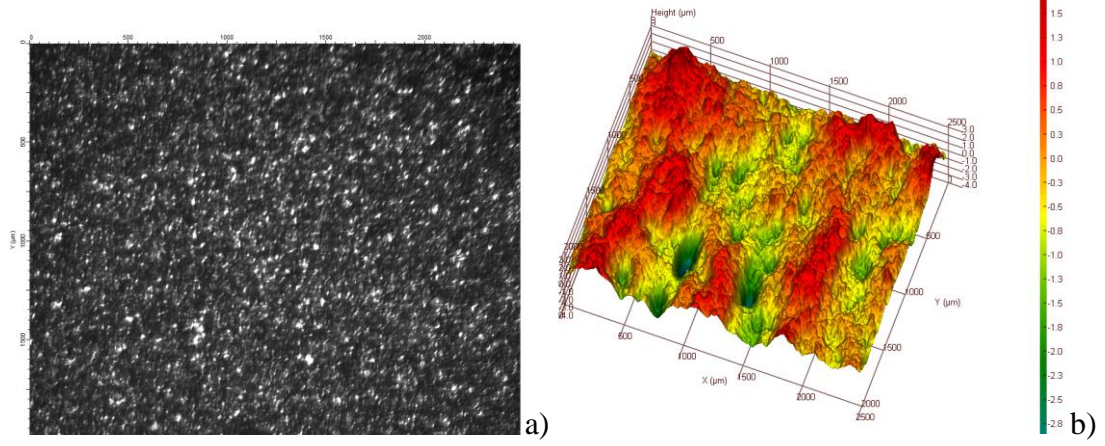
5.2.2. Kaba+İnce İşleme

EDM işleme parametrelerinin I_p , Ton ve Toff'un yüzey topografyası üzerine etkilerini incelemek için L9 deney tasarımındaki ilk üç deney sonucu analiz edilmiştir. Şekil 5.8-Şekil 5.10'da, 1. ve 3. deney parametrelerinde ince işleme sonrası oluşan yüzey topografik görüntüleri verilmiştir.

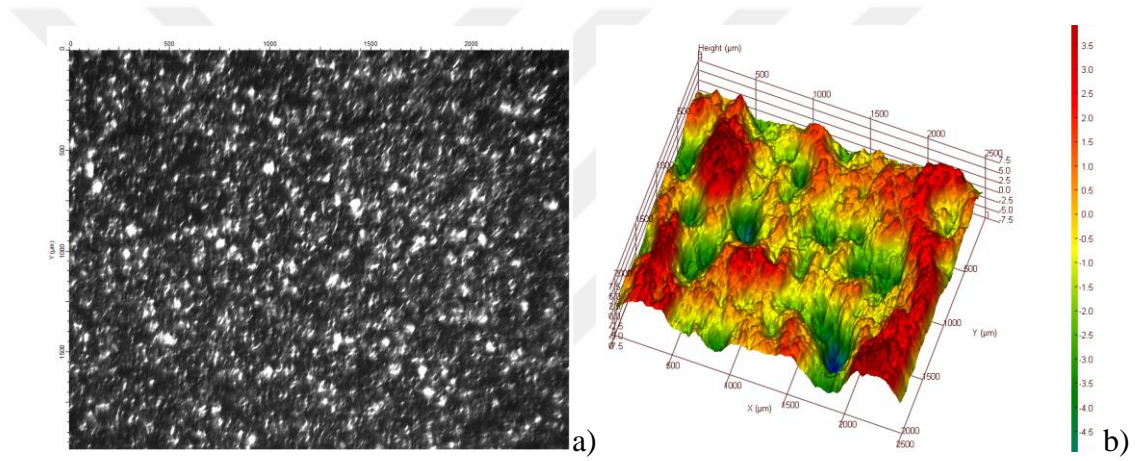


Şekil 5.8. İnce işleme 1.deney yüzey; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.

2D yüzeylerden anlaşılacağı gibi, işlenmiş yüzeydeki tepeler ve kraterlerin genişliklerinin kaba işlemedeki yüzeylere göre daha küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, 3D topoğrafik görüntüler incelendiğinde, birim alandaki kırmızı renkli bölgeler (tepler) ile mavi/yeşil renkli bölgelerin (çukurlar) sayılarının kaba işlemeye göre daha az olduğu söylenebilir. Yüzey yapısındaki bu oluşumlar, yüzey pürüzlülüğünün ince işlemede daha düşük olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 5.9. İnce işleme 2.deney yüzeyi; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.



Şekil 5.10. İnce işleme 3.deney yüzeyi; a) 2D yüzey görüntüsü. b) 3D topografya.

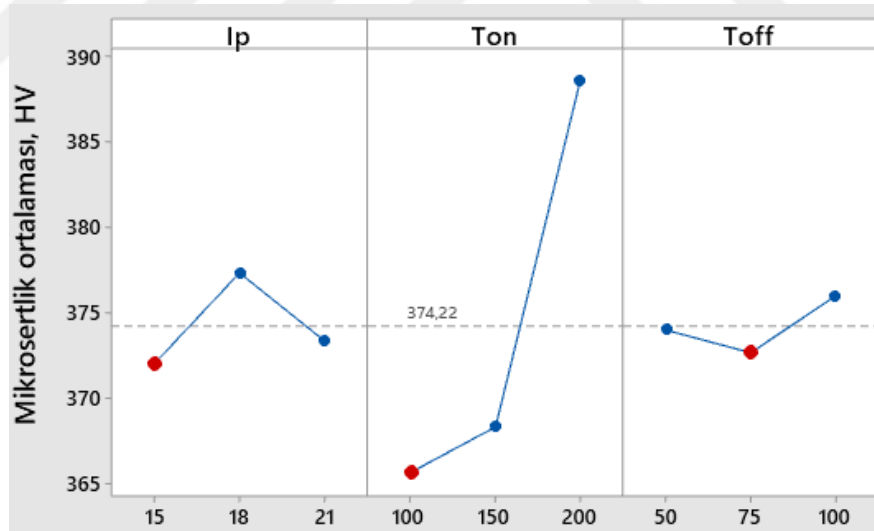
5.3. MİKROSERTLİK

Plastik kalıp çeliğinin (DIN 1.2738) EDM ile kaba ve kaba+finiş işlenmesi sonucunda oluşan mikrosertlik değişimleri ana etki grafikleri ile analiz edilmiştir.

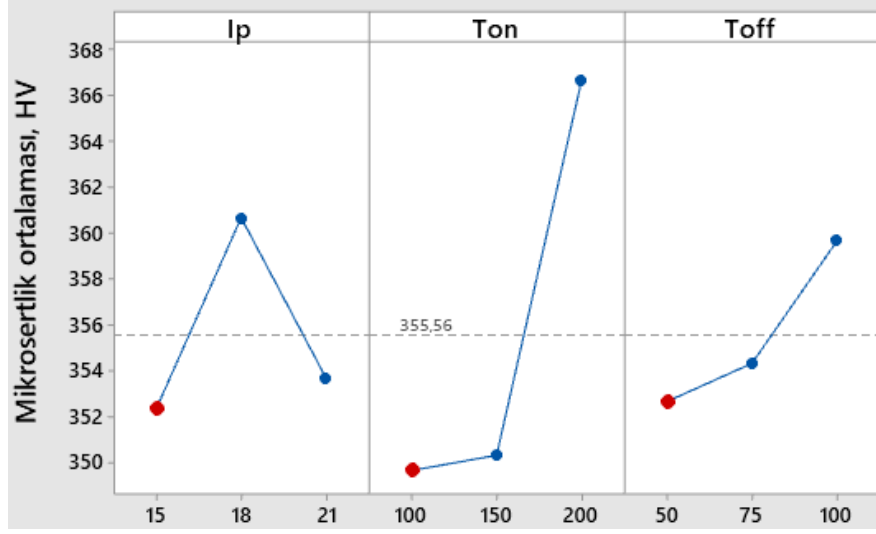
Şekil 5.11’de, kaba işlemede oluşan yüzeylerden ölçülen sertlik değerleri ortalaması gösterilmiştir. İp değerinin artmasıyla mikrosertliğin arttığı, ancak Ton ve Toff değerlerindeki artışla mikrosertlikteki değişimin aynı eğilimde olmadığı görülmektedir. Kaba işleme sırasında, İp ve Ton değerlerinin artmasıyla açığa çıkan yüksek enerji yoğunluğu daha derin bir katmanda malzemenin metalürjik dönüşümüne neden olmuş ve bu oluşum mikrosertliğin artmasını sağlamıştır. Diğer yandan, Ton değeri artmasına rağmen Toff değerinin artırıldığında mikrosertlikte bir

azalmadan bahsedilebilir. Bu sonuç, Toff'un artmasıyla döküntülerin daha iyi uzaklaştırılması ve böylece beyaz katman kalınlığının minimum düzeyde kalması ile açıklanabilir. Kaba işleme stratejisindei, en küçük mikrosertlik değerleri Ip:15 A, Ton:100 μ s ve Toff:75 μ s parametre seviyelerinde ölçülmüştür.

Şekil 5.12'de, ince işlemede oluşan yüzeylerden ölçülen sertlik değerleri ortalaması gösterilmiştir. Genel olarak, işleme parametrelerinin mikrosertlik üzerindeki etkisi kaba işlemedekine benzer eğilimdedir. Ancak, mikrosertlik değerlerinin tüm deney şartlarında daha küçük olduğu görülmektedir. Plastik kalıp çeliğinin EDM ile ince işlenmesinde oluşan mikrosertlik değerleri kaba işlemeye göre %3-7 aralığında daha küçük ölçülmüştür. Ayrıca, Ip, Ton ve Toff parametrelerinin belirli bir değere kadar mikrosertliği çok fazla etkilemediği ince işlemede daha belirgin hale gelmiştir. Bu sonuç, grafikler üzerinde kırmızı nokta ile gösterilmiştir. Kaba+ince işleme stratejisindei, en küçük mikrosertlik değerleri Ip:15 A, Ton:100 μ s ve Toff:50 μ s parametre seviyelerinde ölçülmüştür.



Şekil 5.11. Kaba işleme sonrası mikrosertlik değişimi



Şekil 5.12. Kaba+ince işleme sonrası mikrosertlik değişimi

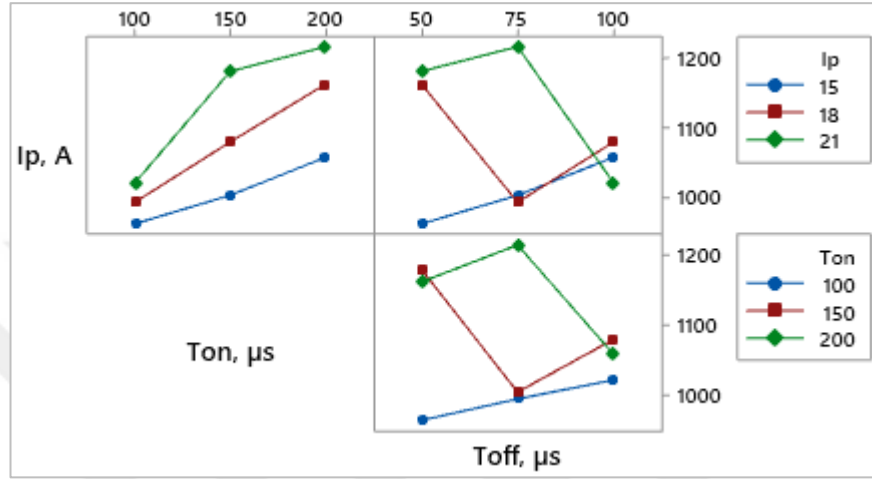
5.4. ENERJİ TÜKETİMİ

EDM yöntemi benzersiz avantajlara sahip olması sayesinde özellikle havacılık, nükleer ve otomotiv endüstrilerinde daha sık tercih edilmeye başlamıştır. Ancak uzun işleme süresi, düşük talaş kaldırma hızı, dielektrik sıvı türüne göre açığa çıkan tehlikeli emisyonlar/gazlar ve yüksek enerji tüketimi gibi çeşitli dezavantajları vardır. Bu nedenle, istenilen kalite kriterlerini ve işleme verimliliğini koruyarak EDM'de enerji tüketimini azaltmak önemli bir araştırma alanıdır.

DIN 1.2738 çeliğinin kaba ve kaba+finiş işleme stratejileri ile işlenmesinde tüketilen toplam enerji miktarının elektriksel parametrelere göre değişimleri Şekil 5.13 ve 5.14'te verilmiştir. Enerji tüketiminin değerlendirilmesinde, 1 mm derinlik için sadece talaş kaldırma anındaki süreler dikkate alınmıştır.

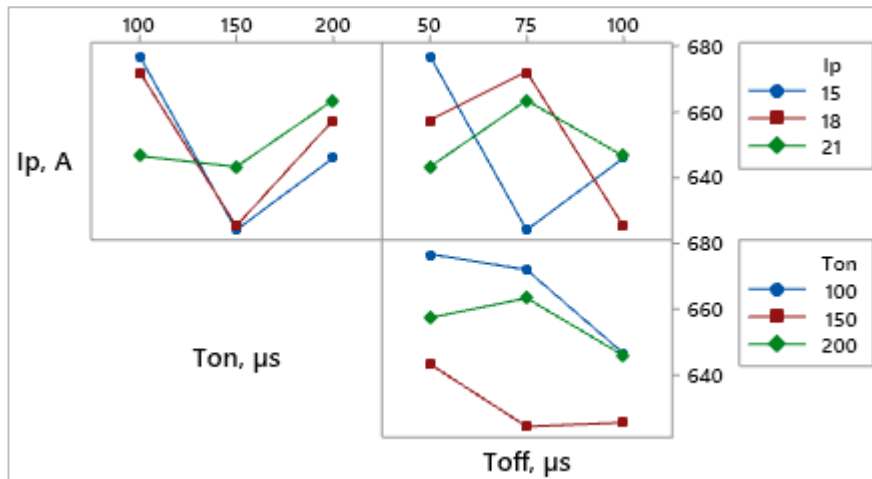
L9 dikey dizinine göre kaba işlemede hedef derinliğe ulaşmak için harcanan süreler 3,5-6 dk aralığında değişmektedir. Şekil 5.13'deki etkileşim grafikleri incelendiğinde, boşalım akımı (Ip) ve vurum süresinin (Ton) artmasıyla toplam enerji tüketiminin oransal olarak arttığı görülmektedir. Bu sonuç, deşarj süresince şebekeden çekilen akım değerinin artmasıyla doğru orantılıdır. Aynı zamanda, vurum süresi boyunca sistemden sürekli olarak akım çekilmesine bağlı olarak enerji tüketimi belirli bir oranda artması doğaldır. Ancak, vurum aralığı (Toff) boyunca

deşarj akımının azalması toplam enerji tüketiminde azalmaya neden olmuştur. Ip-Toff etkileşiminde en yüksek akımda (21 A) enerji tüketimindeki azalma bu çıkarımı desteklemektedir. Benzer şekilde, Ton değeri en yüksek iken (200 ms), en yüksek Toff (100 ms) sayesinde enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir. Bu noktada, Toff'un enerji tüketiminde azalma sağlayan bir parametre olduğu söylenebilir.



Şekil 5.13. Kaba işlemede parametrelere göre Pc değişimi.

Kaba+ince işleme stratejisinde, sadece ince işleme derinliğinde tüketilen toplam enerjinin parametrelere göre değişimi Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. İnce işlemede parametrelere göre Pc değişimi.

Kaba işleme sonrasında, her deney şartı için 0,1 mm derinlik için uygulanan Ip, Ton ve Toff değerleri sabit olmasına rağmen harcanan enerjinin değiştiği görülmektedir. Pc değerindeki bu eğilimi birkaç nedenle açıklanabilir. Birincisi, kaba işleme sonrasında oluşan beyaz katman kalınlığının farklı olması ince işleme süresince deşarj oluşumunu etkileyerek işleme süresinde artışa neden olmuştur. İkincisi, kaba işleme deneylerinde yüzey morfolojisinin farklı oluşması, plazma kanalının farklı genişlikte oluşması ve akım yoğunluğunun değişmesine neden olabilir. Bu oluşumlar neticesinde, hedef derinliğe ulaşmada geçen sürelerin değişerek toplam enerji tüketiminin farklı ölçüldüğü düşünülmektedir. Parametre değişiminde ise kaba işlemedekine benzer etkileşimlerin oluştuğu söylenebilir.

DIN 1.2738 çeliğinin EDM'sinde kaba ve kaba+ince stratejisi ile işlenmesinde ölçülen toplam enerji tüketimi üzerinde elektriksel parametrelerin etki düzeyleri %95 güven seviyesinde uygulanan varyans analizi ile belirlenmiştir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. Enerji tüketimi için ANOVA sonuçları

Faktör	DF	SS	MS	F	P	PCR
Kaba						
Ip	2	25490,8	12745,4	29,86	0,032	39,05
Ton	2	35297,8	17648,9	41,34	0,024	54,07
Toff	2	3633,3	1816,6	4,26	0,19	5,57
Hata	2	853,8	426,9			1,31
Toplam	8	65275,5				100
Kaba+ince						
Ip	2	11,4	5,699	0,04	0,961	0,42
Ton	2	1856,31	928,154	6,65	0,131	67,05
Toff	2	621,44	310,722	2,23	0,31	22,44
Hata	2	279,1	139,551			10,08
Toplam	8	2768,25				100

Çizelge 5.3 incelendiğinde, kaba işlemede enerji tüketimi üzerinde en etkili parametre %54,07 PCR değeri ile vurum süresi (Ton) olurken, ikincil seviyede önemli parametrenin %39,05 PCR ile boşalım akımı (Ip) olduğu görülmektedir.

Mevcut işleme şartlarında, vurum aralığının ise istatistiksel olarak önemsiz olduğu ortaya çıkmıştır.

Kaba+ince işlemede enerji tüketimi üzerinde en etkili parametre %67,05 PCR değeri ile vurum süresi (Ton) olurken, ikincil seviyede önemli parametrenin %22,84 PCR ile vurum aralığı (Toff) olduğu görülmektedir. Mevcut işleme şartlarında, boşalım akımının ise istatistiksel olarak önemsiz olduğu ortaya çıkmıştır.

ANOVA sonuçlarına göre, kaba ve kaba+ince işleme stratejilerinde elektriksel parametrelerin seçilen performans kriterleri üzerindeki önem seviyelerinin değiştiği buunmuştur. Bu sonuç, performans kriterlerine göre optimum parametrelerin değişebileceğine işaret etmekte olup, EDM işleme stratejisi için ayrı ayrı parametre optimizasyonunun gerekliliğini göstermektedir. Bu amaçla, EDM gibi karmaşık işleme yöntemlerinde parametre optimizasyonu için çok kriterli optimizasyon tekniklerinin uygulanması önerilmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, dalma EDM yöntemi ile plastik kalıp çeliği üzerine iki farklı işleme stratejisi (kaba ve kaba+ince) uygulanarak kanal açma işlemi yapılmıştır. Deneysel, elektriksel parametreler (boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı) değişken olarak kullanılmıştır. Taguchi L9 deney dizisine göre yapılan EDM deneyleri sonucunda, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, yüzey topografyası ve enerji tüketimi gibi performans kriterlerinin parametrelere göre değişimleri analiz edilmiştir. Deneysel ve istatistiksel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Her iki işleme stratejisinde, Ip ve Ton parametrelerindeki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç, boşalım akımındaki artışla birlikte artan deşarj enerjisinin daha derin kraterler oluşturması ve vurum süresindeki artışla genişleyen plazma kanalının daha geniş kraterlere neden olmasına atfedilmektedir.
2. Kaba ve kaba+ince işleme uygulamalarında, Toff parametresi yüksek seçildiğinde, pürüzlülüğün nispeten azaldığı görülmüş olup, bu sonuç işleme sırasında oluşan döküntünün daha iyi uzaklaştırılmasına ve böylece daha kararlı bir ergime/buharlaştırma sonucunda daha sığ yüzey çukurları veya tepelerin oluşmasına atfedilmiştir.
3. Kaba ve ince işlemede; en küçük Ra, Ip:15 A, Ton:100 µs, Toff:50 µs deney dizisinde, en yüksek Ra ise Ip:21 A, Ton:200 µs, Toff:75 µs deney dizisinde ölçülmüştür.

4. Kaba ve ince işlemede; en küçük Rz ise Ip:15 A, Ton:100 µs, Toff:50 µs parametre seviyelerinde, en büyük Rz Ip:21 A, Ton:200 µs, Toff:75 µs seviyelerinde elde edilmiştir.
5. ANOVA sonuçlarına göre, kaba işleme sürecinde Ra ve Rz üzerinde en etkili parametre sırasıyla %85,52 ve %83,87 PCR değeri ile vurum süresi (Ton) olmuştur. İnce işleme sürecinde ise, Ra ve Rz üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla %68,83 ve %76,75 PCR değeri ile Ton parametresi olduğu belirlenmiştir.
6. 3D topografik görüntülerden, Ip değerinin artmasıyla işlenmiş yüzeydeki tepe ve krater sayısında azalma, bu oluşumların genişliklerinde artış olduğu anlaşılmıştır. Ton değeri arttıkça artan plazma kanalı çapından dolayı birim alana dağılan termal enerji azalarak derinliği düşük olan kraterlere neden olmuştur. Diğer yandan Toff değerindeki artış döküntülerin daha iyi uzaklaştırılmasını sağlayarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir.
7. İnce işlemede elde edilen 3D topoğrafik görüntüler, birim alandaki tepeler ile çukurların sayılarının kaba işlemeye göre daha az olduğunu göstermektedir. Yüzey yapısındaki bu oluşum, yüzey pürüzlülüğünün ince işlemede daha düşük olduğunun bir kanıtıdır.
8. Kaba işlemede, Ip ve Ton değerlerinin artması daha derin bir katmanda malzemenin metalürjik dönüşümüne neden olmuş ve böylece mikrosertlik artmıştır. Diğer yandan, Ton değeri artmasına rağmen Toff değerinin artırıldığında mikrosertlikte bir azalma olmuştur. Bu sonuç, Toff'un artmasıyla döküntülerin daha iyi uzaklaştırılması ve böylece beyaz katman kalınlığının minimum düzeyde kalması ile açıklanmaktadır.
9. Paslanmaz çeliğin kaba+ince stratejisiyle işlenmesinde oluşan mikrosertlik değerleri kaba işlemeye göre %3-7 aralığında daha küçük ölçülmüştür. En küçük mikrosertlik değeri Ip:15 A, Ton:100 µs ve Toff:50 µs parametre seviyelerinde ince işlemede ölçülmüştür.

10. Kaba işlemede, Ip ve Ton değerlerinin artmasıyla toplam enerji tüketiminin oransal olarak arttığı görülmüştür. Ancak, Toff süresince deşarj akımının azalması toplam enerji tüketiminde azalmaya neden olmuştur. İnce işlemede, Ip, Ton ve Toff değerleri sabit olmasına rağmen harcanan enerjinin değiştiği görülmektedir.
11. Kaba işlemede, toplam enerji tüketimi üzerinde en etkili parametre %54,07 PCR değeri ile Ton olurken, ikincil seviyede önemli parametrenin %39,05 PCR ile Ip olduğu görülmektedir. Kaba+ince işlemede en etkili parametre %67,05 PCR değeri ile Ton olurken, ikincil seviyede önemli parametrenin %22,84 PCR ile Toff olduğu belirlenmiştir.
12. Deneysel ve istatistiksel analizler, kaba ve kaba+ince işleme stratejilerinde elektriksel parametrelerin seçilen performans kriterleri üzerindeki önem seviyelerinin değiştiğini göstermiştir. Bu sonuç, performans kriterlerine göre optimum parametreler değiştiğinden, EDM işleme stratejisi için ayrı ayrı parametre optimizasyonunun gerekliliğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Internet: The Nickel Institute, "Stainless Steels for Machining", https://www.nickelinstitute.org/media/4662/ni_aisi_9011_machining.pdf.
2. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., "Materials Science and Engineering: An Introduction", *John Wiley & Sons*, New York, (2007).
3. Internet: Isakov, E., "Stainless Made Painless", <https://www.ctemag.com/articles/stainless-made-painless>.
4. Muthuswamy, P., "Investigation on sustainable machining characteristics of tools with serrated cutting edges in face milling of AISI 304 Stainless Steel", *Procedia CIRP*, 105: 865–871 (2022).
5. Yu, Z., Jun, T., and Masanori, K., "Dry electrical discharge machining of cemented carbide", *J. Mater. Process. Technol.*, 149: 353–357 (2004).
6. Işık, A. T. and Cakiroglu, R., "Investigation of Workpiece and Tool Surface Quality in Electro Discharge Machining of Al 5083 Alloy Produced by Powder Metallurgy", *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 3 (1): 47–58 (2022).
7. Abbas, N. M., Solomon, D. G., and Bahari, M. F., "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 47: 1214–1228 (2007).
8. Singh, S., Maheshwari, S., and Pandey, P. C., "Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials", *J. Mater. Process. Technol.*, 149: 272–277 (2004).
9. Günay, M. and Işık, A. T., "Eco-Friendly Dielectrics for EDM and WEDM Processes", *Environmentally Benign Machining*, 1. Ed., *CRC Press*, (2024).
10. Abu Qudeiri, J. E., Saleh, A., Ziout, A., Mourad, A. H. I., Abidi, M. H., and Elkaseer, A., "Advanced electric discharge machining of stainless steels: Assessment of the state of the art, gaps and future prospect", *Materials*, 16 (6): (2019).
11. Ozgedik, A. and Cogun, C., "An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 27 (5–6): 488–500 (2006).

12. Czelusniak, T., Higa, C. F., and Torres, R. D. et al., "Materials used for sinking EDM electrodes: a review", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41 (14): (2019).
13. Kern, R., "Sinker electrode material selection", *EDM Today*, 4: 32–38 (2008).
14. Jha, B., Ram, K., and Rao, M. ., "An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining", *J Eng Sci Technol Rev*, 4: 118–130 (2011).
15. Sharma, D. and Hiremath, S. S., "Review on tools and tool wear in EDM", *Machining Science And Technology*, 25 (5): 802–873 (2021).
16. Muthuramalingam, T. and Mohan, B., "A review on influence of electrical process parameters in EDM process", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 15 (1): 87–94 (2015).
17. Yerui, F., Yongfeng, G., and Zongfeng, L., "Experimental Investigation of EDM Parameters for TiC/Ni Cermet Machining", *Procedia CIRP*, 42: 18–22 (2016).
18. Guu, Y. H., Tsai, K.-L., and Chen, L.-K., "An Experimental Study on Electrical Discharge Machining of Manganese–Zinc Ferrite Magnetic Material", *Materials And Manufacturing Processes*, 22 (1): 66–70 (2007).
19. Davis, R., Singh, A., and Kachhap, S., "Experimental Investigation of the Effect of Input Control Variables in Near Dry Electric Discharge Drilling Proces", *Materials Today: Proceedings*, 18: 3027–3033 (2019).
20. Qudeiri, J. E. A., Zaiout, A., Mourad, A. H. I., Abidi, M. H., and Elkaseer, A., "Principles and Characteristics of Different EDM Processes in Machining Tool and Die Steels", *Applied Sciences (Switzerland)*, 10 (6): (2020).
21. Chaudhury, P. and Samantaray, S., "A comparative study of different dielectric medium for sustainable EDM of Non-Conductive material by Electro-Thermal modelling", *Materials Today: Proceedings*, 41: 437–444 (2021).
22. Yoon, H. S., Lee, J. Y., Kim, H. S., Kim, M. S., Kim, E. S., and Shin, Y.J., et al., "A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, 1: 261–79 (2014).
23. Li, W. and Kara, S., "Characterising energy efficiency of Electrical Discharge Machining (EDM) processes", *Procedia CIRP*, 29: 263–268 (2015).
24. Zheng, J., Zheng, W., Chen, A., Yao, J., Ren, Y., and Zhou, C., et al., "Sustainability of unconventional machining industry considering impact factors and reduction methods of energy consumption: A review and analysis", *Sci Total Environ*, 722: 137897 (2020).

25. Arif, U., Ali Khan, I., and Hasan, F., "Green and sustainable electric discharge machining: a review", *Advances In Materials And Processing Technologies*, 9 (3): 970–1044 (2022).
26. Zheng, J., Jia, R., Hu, X., Qi, T., Pan, Q., Zhu, J., Qiu, X., Xia, Z., Xv, B., Deng, C., Zhang, Z., and Ling, W., "Regulating cutting fluid parameters for optimal energy and economic performance: Methods for efficient and Low-Energy electrical machining", *Energy Conversion And Management*, 314 (April): (2024).
27. Xu, J., Wang, K., Liu, Y., and Zhang, Q., "Evaluation of energy consumption and carbon emission in EDM", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 132 (3–4): 1511–1524 (2024).
28. Guo, Y., Duflou, J. R., Qian, J., Tang, H., and Lauwers, B., "An operation-mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools", *Journal Of Cleaner Production*, 101: 348–59 (2015).
29. Sultan, T., Kumar, A., and Gupta, R. D., "Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology", *International Journal Of Manufacturing Engineering*, 2014: 1–16 (2014).
30. Agarwal, N., Shrivastava, N., and Pradhan, M. K., "Optimisation of EDM process parameters using Jaya Algorithm", *Materials Today: Proceedings*, 24: 825–834 (2020).
31. Mascaraque-Ramírez, C. and Franco, P., "Comparison between different methods for experimental analysis of surface integrity in die-sinking electro-discharge machining processes", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 234 (3): 479–488 (2020).
32. Yang, M., Zhang, D., Wu, B., and Zhang, Y., "Energy consumption modeling for EDM based on material removal rate", *IEEE Access*, 8: 173267–173275 (2020).
33. Ahmed, N., "Die-sinking EDM performance under the effect of tool designs and tool materials", *International Journal On Interactive Design And Manufacturing*, (2024).
34. Çakıroğlu, R. and Günay, M., "Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (4): 7305–7317 (2020).
35. Nieslony, P., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., Chudy, R., Krolczyk, J. B., Maruda, R., and Krolczyk, G. M., "Relationship between energy consumption and surface integrity aspects in electrical discharge machining of hot work die steel", *Sustainable Materials And Technologies*, 36 (April): e00623 (2023).

36. Sharma, K. K., Sharma, L., and Sharma, K., "Evaluation of Material Removal Rate on Various Electrodes for Stainless Steel 316 Material on Die-Sinking EDM by Using Taguchi Technique", *National Academy Science Letters*, (2024).
37. Kumar, S., Ghoshal, S. K., Arora, P. K., and Nagdeve, L., "Multi-variable optimization in die-sinking EDM process of AISI420 stainless steel", *Materials And Manufacturing Processes*, 36 (5): 572–582 (2021).
38. Sahoo, R., Singh, N. K., and Bajpai, V., "A novel approach for modeling MRR in EDM process using utilized discharge energy", *Mechanical Systems And Signal Processing*, 185 (September 2022): (2023).
39. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems", 4. Ed., *John Wiley & Sons*, (2020).
40. Luo, H., Wang, Y., and Zhang, P., "Effect of cutting and vibration parameters on the cutting performance of 7075-T651 aluminum alloy by ultrasonic vibration", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 107 (1–2): 371–384 (2020).
41. Shreyas, R. R., Sachin, B. K. S. K., and Nanjundeswaraswamy, T. S., "Selection of Non-Traditional Machining Process", *International Journal Of Engineering Research And Technology (IJERT)*, 8 (11): 148–155 (2019).
42. Jahan, M. P., "Electrical Discharge Machining (EDM) Types, Technologies and Applications", *Nova Science Publishers*, New York, (2015).
43. Işık, A. T., "Semente Karbürün Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu", *Yüksek Lisans Tesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi*, (2022).
44. Joshi, S. N. and Pande, S. S., "Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process", *Journal Of Manufacturing Processes*, (2010).
45. Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., and Sethi, B. L., "Surface modification by electrical discharge machining: A review", *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8): 3675-3687 (2009).
46. Prakash, V., Shubham, Kumar, P., Singh, P. K., Das, A. K., Chattopadhyaya, S., Mandal, A., and Dixit, A. R., "Surface alloying of miniature components by micro-electrical discharge process", *Materials And Manufacturing Processes*, 33 (10): 1051–1061 (2018).
47. Razzell, A. G., "Joining and Machining of Ceramic Matrix Composites", *Comprehensive Composite Materials*, *Elsevier*, 689–697 (2000).

48. Saha, S. K., "Experimental investigation of the dry electric discharge machining (Dry EDM) process", *M. Tech. Thesis, IIT Kanpur*, (2008).
49. Sanghani, C. R. . and Acharya, G. D., "A Review of Research on Improvement and Optimization of Performance Measures for Electrical Discharge Machining", *Int. Journal Of Engineering Research And Applications*, 4 (1): 433–450 (2014).
50. Grigoryev, E. G. and Olevsky, E. A., "Thermal processes during high-voltage electric discharge consolidation of powder materials", *Scripta Materialia*, 66 (9): 662–665 (2012).
51. Singh, V., Bhandari, R., and Yadav, V. K., "An experimental investigation on machining parameters of AISI D2 steel using WEDM", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93 (1–4): 203–214 (2017).
52. Huang, S. F., Liu, Y., Li, J., Hu, H. X., and Sun, L. Y., "Electrochemical Discharge Machining Micro-Hole in Stainless Steel with Tool Electrode High-Speed Rotating", *Materials And Manufacturing Processes*, 29 (5): 634–637 (2014).
53. Rajmohan, K. and Kumar, A. S., "Experimental investigation and prediction of optimum process parameters of micro-wire-cut EDM of 2205 DSS", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93 (1–4): 187–201 (2017).
54. Jegan, T. M. C., Anand, M. D., and Ravindran, D., "Determination of Electro Discharge Machining Parameters in AISI202 Stainless Steel Using Grey Relational Analysis", *Procedia Engineering*, 38: 4005–4012 (2012).
55. Doreswamy, D., Sai Shreyas, D., Bhat, S. K., and Rao, R. N., "Optimization of material removal rate and surface characterization of wire electric discharge machined Ti-6Al-4V alloy by response surface method", *Manufacturing Review*, 9: 15 (2022).
56. Selvakumar, G., Jiju, K. B., and Veerajothi, R., "Experimental Study on Wire Electrical Discharge Machining of Tapered Parts", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 41 (11): 4431–4439 (2016).
57. Sharif, S., Safiei, W., Mansor, A. F., Isa, M. H. M., and Saad, R. M., "Experimental Study of Electrical Discharge Machine (die sinking) on Stainless Steel 316L Using Design of Experiment", *Procedia Manufacturing*, 2: 147–152 (2015).
58. Jahan, M. P., Rahman, M., and Wong, Y. S., "A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 51 (12): 837–858 (2011).

59. Lin, Y.-C., Chen, Y.-F., Wang, D.-A., and Lee, H.-S., "Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (7): 3374–3383 (2009).
60. Shen, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Dong, H., Sun, W., Wang, X., Zheng, C., and Ji, R., "High-speed dry electrical discharge machining", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 93: 19–25 (2015).
61. Mandal, P., Mondal, S., Cep, R., and Ghadai, R. K., "Multi-objective optimization of an EDM process for Monel K-500 alloy using response surface methodology-multi-objective dragonfly algorithm", *Scientific Reports*, 14 (1): 20757 (2024).
62. Işık, A. T., Çakıroğlu, R., and Günay, M., "Multiresponse optimization of performance indicators through Taguchi-grey relational analysis in EDM of cemented carbide", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 41: 490–500 (2023).
63. Gugulothu, B., Aravindan, N., Widjaja, G., Lakshmanan, S. A., and Suresh, M., "Electrical Discharge Machining Parameters and Dielectric Fluid: A Review", In Book: Handbook of Research on Advanced Functional Materials for Orthopedic Applications, 137–147 (2023).
64. Dhakar, K., Kumar, R., Katheria, A., Nagdeve, L., and Kumar, H., "Effect of various dielectric fluids on electric discharge machining (EDM): a review", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 44 (10): 487 (2022).
65. Singh, A. K., Mahajan, R., Tiwari, A., Kumar, D., and Ghadai, R. K., "Effect of Dielectric on Electrical Discharge Machining: A Review", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 377: 012184 (2018).
66. Wong, Y. S., Lim, L. C., and Lee, L. C., "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", *Journal Of Materials Processing Technology*, 48 (1–4): 299–305 (1995).
67. Ayesta, I., Flaño, O., Izquierdo, B., Sanchez, J. A., and Plaza, S., "Experimental Study on Debris Evacuation during Slot EDMing", *Procedia CIRP*, 42: 6–11 (2016).
68. Koyano, T., Suzuki, S., Hosokawa, A., and Furumoto, T., "Study on the Effect of External Hydrostatic Pressure on Electrical Discharge Machining", (2016).
69. Singh, V., Sharma, A. K., Goyal, A., Kumar Saxena, K., Negi, P., and Rao, P. C. S., "Electric discharge machining performance measures and optimisation: a review", *Advances In Materials And Processing Technologies*, 10 (2): 517–530 (2024).

70. Jha, B., Ram, K., and Rao, M., "An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining", *Journal Of Engineering Science And Technology Review*, 4 (2): 118–130 (2011).
71. Pandey, P. C. and Shan, H. S., "Modern Machining Processes", *Tata McGraw-Hill Education*, 190 (1980).
72. TS 6956 EN ISO 4287, "Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Profile method-Terms, definitions and surface texture parameters", (1997).
73. Antar, M., Hayward, P., Dunleavey, J., and Butler-Smith, P., "Surface Integrity Evaluation of Modified EDM Surface Structure", *Procedia CIRP*, 68 (April 2017): 308–312 (2018).
74. Bleys, P., Kruth, J. -P., Lauwers, B., Schacht, B., Balasubramanian, V., Froyen, L., and Van Humbeeck, J., "Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM", *Advanced Engineering Materials*, 8 (1–2): 15–25 (2006).
75. Cusanelli, G., Hessler-Wyser, A., Bobard, F., Demellayer, R., Perez, R., and Flükiger, R., "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique", *Journal Of Materials Processing Technology*, 149 (1–3): 289–295 (2004).
76. Lee, H. T. and Tai, T. Y., "Relationship between EDM parameters and surface crack formation", *Journal Of Materials Processing Technology*, 142 (3): 676–683 (2003).
77. Guu, Y. H., Hocheng, H., Chou, C. Y., and Deng, C. S., "Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel", *Materials Science And Engineering: A*, 358 (1–2): 37–43 (2003).
78. Muttamara, A. and Kanchanomai, C., "Effect of Carbon in the Dielectric Fluid and Workpieces on the Characteristics of Recast Layers Machined by Electrical Discharge Machining", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 47 (6): 3248–3255 (2016).
79. Hadad, M., Bui, L. Q., and Nguyen, C. T., "Experimental investigation of the effects of tool initial surface roughness on the electrical discharge machining (EDM) performance", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (5–8): 2093–2104 (2018).
80. Devarajaiah, D. and Muthumari, C., "Evaluation of power consumption and MRR in WEDM of Ti–6Al–4V alloy and its simultaneous optimization for sustainable production", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 40 (8): (2018).

81. S., L., M., T., K., M., and M., A.-A. A., "Influence of Adaptive Gap Control Mechanism and Tool Electrodes on Machining Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy in EDM Process", *Materials*, 15 (2): 513 (2022).
82. Mahesh, K., Philip, J. T., Joshi, S. N., and Kuriachen, B., "Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures", *Materials And Manufacturing Processes*, 36 (7): 753–791 (2021).
83. Guu, Y. H. and Hou, M. T. K., "Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy", *Materials Science And Engineering: A*, 466 (1–2): (2007).



ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Hüseyin TOKMAK, Ankara’da ilk, orta ve lise öğrenimini tamamladı.

Bilgisayar Bilgisi

Autocad, SolidWorks, SolidCAM, Minitab, Adobe (Photoshop, Illustrator, InDesign), MS Office

Hobiler

Yüzme, Kamp, Dağcılık, Bilişim teknolojileri