

**T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**INCONEL 718 MALZEMESİNİN TEL EROZYON
TEZGÂHINDA İŞLENMESİNDE KESME
PARAMETRELERİNİN KESME PERFORMANSINA
ETKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ VE OPTİMUM
PARAMETRELERİNİN TAYİNİ**

Murat DOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
MAKİNE EĞİTİMİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Yeşim YAYLA**

İSTANBUL 2010

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

INCONEL 718 MALZEMESİNİN TEL EROZYON
TEZGAHINDA İŞLENMESİNDE KESME
PARAMETRELERİNİN KESME PERFORMANSINA
ETKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ VE OPTİMUM
PARAMETRELERİNİN TAYİNİ

Murat DOĞAN
(141101720050025)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
MAKİNE EĞİTİMİ PROGRAMI

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Yeşim YAYLA

İSTANBUL 2010

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABUL ve ONAY BELGESİ

Murat DOĞAN'ın Inconel 718 Malzemesinin Tel Erozyon Tezgahında İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Performansına Etkisinin Deneysel Analizi ve Optimum Parametrelerinin Tayini başlıklı Lisansüstü tez çalışması, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22.02.2010 tarih ve 617 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Makine Eğitimi Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS Tezi olarak Kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Yeşim YAYLA (MÜTEF Makine Eğt.)

1. Üye : Prof. Dr. Mustafa KURT (MÜTEF Makine Eğt.)

2. Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KURT (MÜTEF Metal Eğt.)

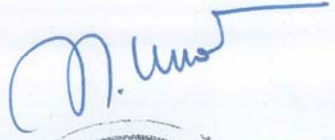
Tezin Savunulduğu Tarih : 19.03.2010

ONAY

M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.04.2010 tarih ve 2010/07-03 sayılı kararı ile Murat DOĞAN'ın Makine Eğitimi Anabilim Dalı Y.Lisans (MSc.) derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Meral ÜNAL





TEŞEKKÜR

Bizleri her zaman tam donanımlı bir şekilde hayata hazırlamaya çalışan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa KURT'a, tez çalışmam boyunca desteğini gördüğüm aynı zamanda tez danışmanım olan değerli hocam Yrd. Doç.Dr. Yeşim YAYLA'ya deneysel çalışmalarında ve tezin oluşturulmasında en büyük desteği gördüğüm değerli hocam Arş. Gör. Barkın BAKIR'a ve yine desteğini gördüğüm Arş. Gör. Uğur KÖKLÜ'ye, bilgi ve birikimlerinden faydalandığım değerli akrabam Okutman Nevin KAHRİMAN'a değerli arkadaşım İrfan ARSLAN'a, değerli iş arkadaşlarım Kalde Klima AR-GE sorumlusu Kevork BOYACIYAN'a Kalite güvence bölüm sorumlusu Hüseyin YILMAZ'a deney ölçümlerimde imkanlarından yararlandığım Kıraç Makine Takım Sanayi sahibi sayın Tufan KIRAÇ ve aynı firmadan kalite güvence bölümü sorumlusu Zubeyir DUMAN'a yardım ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca desteklerinden ötürü Kalde Klima'daki değerli müdürlerim Aykut ÜTÜLER ve Karin ATAN'a da teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi en büyük desteği veren ve hayatımda çok önemli yeri olan Anne'me, Baba'ma ve değerli eşim Birgül KAHRİMAN DOĞAN'a sonsuz şükranlarımı bir borç bilirim.

Mart,2010

Murat DOĞAN

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
SEMBOLLER.....	VII
KISALTMALAR.....	VIII
ŞEKİLLER.....	IX
TABLolar.....	XI
BÖLÜM I. GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM II. GENEL BİLGİLER.....	2
II.1. ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ.....	2
II.1.2. Talaş Kaldırma Mekanizması	2
II.1.2. Elektro Erozyon Çeşitleri	4
II.1.2.1. Elektro Erozyon	4
II.1.2.2. Tel Erozyon	5
II.1.2.3. Freze Erozyon.....	6
II.1.2.4. Taşlama Erozyon	6
II.1.2.5. Ultrasonik Destekli Erozyon	6
II.1.2.6. Oyma Erozyon	7
II.1.2.7. Mikro Elektro Erozyon	7
II.1.2.8. Mikro Tel Erozyon	7
II.1.3. Talaş Kaldırma Teorileri	7
II.1.3.1. Elektro-Mekanik Teori	8
II.1.3.2. Termo -Mekanik Teori	8
II.1.2.3. Termo-Elektrik Teori.....	8
II.2. TEL EROZYON YÖNTEMİ	8

II.2.1. Tel Erozyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	12
II.2.1. WEDM'nin Tarihçesi	15
II.3. TEL EROZYON TEZGAHINDA KESME İŞLEMİNİN	
UYGULAMA ALANLARI	16
II.3.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları	17
II.3.2. Prototip İmalatı	17
II.3.3. Torna Takımları	17
II.3.4. Özel Malzemeler	18
II.3.5. Broşlar	18
II.3.6. Şablonlar	18
II.4. TEL EROZYON TEZGAHINDA KIVILCIM OLUŞUMU	18
II.4.1. Kıvılcım Boşluğu	19
II.5. TEL EROZYON TEZGAHINDA KULLANILAN DİELEKTRİK	
SIVILAR.....	19
II.6. TEL EROZYON TEZGAHININ İŞLEME PARAMETRELERİ.....	20
II.6.1. Puls Süresi	20
II.6.2. Puls Ara süresi	21
II.6.3. Puls Ara Süresi Ayarı	21
II.6.4. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı	22
II.6.5. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi	22
II.6.6. Ana Güç Kaynağı Voltajı	22
II.6.7. Aralık Voltajı	23
II.6.8. Tabla İlerleme Hızı	23
II.6.9. Tel Gerilmesi	24
II.6.10. Tel İlerleme Hızı	24
II.7. TEL EROZYON TEZGAHINDA KESME PERFORMANSINI	
ETKİLEYEN FAKTÖRLER	24
II.7.1. Kesme Doğruluğu	24
II.7.2. Kesme Hızları	25
II.7.3. Tel Eğilmeleri	26
II.7.4. Tel Kırılmaları	26
II.7.5. Tel Gerginliği	27
II.8. TEL KARAKTERİSTİKLERİ	28
II.9. TEL SEÇİMİ	29

II.14.1. İş Parçası Kalınlığına Göre Tel Seçimi.....	29
II.14.2. Köşe Kesme ve Köşe Radyüsüne Göre Tel Seçimi	30
II.10. LİTERATÜR BİLGİLERİNİN İRDELENMESİ	30
BÖLÜM III. TEZ ÇALIŞMALARI	34
III.1. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ	34
III.2. MALZEME ve MATERYAL	34
III.2.1. Deneyde kullanılan İş parçası İNCONEL 718 ve Özellikleri ...	35
III.2.2. CNC Tel Erozyon Tezgahı	37
III.2.3. Deneyde Kullanılan Tel Elektrot.....	38
III.2.4. Deneyde Kullanılan İki Boyutlu Profil Projeksiyon Cihazı	39
III.3. METOT	40
III.3.1. Taguchi İle Deney Tasarımı	40
III.3.2. Deney Tasarımları	42
III.3.2.1. Deneylerde çalışılacak İşleme Parametrelerinin tayini ..	43
III.3.3. Ölçüm Sonuçları	46
III.3.4. Sonuçların analiz edilmesi ve değerlendirme	46
III.3.4.1. AC Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi.....	46
III.3.4.2. BD Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi.....	50
III.3.4.3. H Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi	53
III.3.4.4. ØD Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi.....	57
III.3.4.5. İşleme sürelerinin analizi ve değerlendirilmesi.....	60
III.3.4.6. Yüzey pürüzlülüğünün analizi ve değerlendirilmesi	64
III.3.4.7. Bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiler.....	68
III.3.4.6.1 Yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi arasındaki ilişki	68
III.3.4.6.2 Ortalama boyutsal hata ve işleme süresi arasındaki ilişki	68
III.3.4.8 Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen optimum parametreler ve değerleri.	69
BÖLÜM IV. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	70
BÖLÜM V. SON DEĞERLENDİRMELER ve ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

İNCONEL 718 MALZEMESİNİN TEL EROZYON TEZGÂHINDA İŞLENMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ VE OPTİMUM PARAMETRELERİNİN TAYİNİ

Geleneksel üretim metodları ile yüksek hassasiyette işlenmesi güç olan yüksek mukavemet özelliklerine sahip malzemelerin işlenmesinde tel erozyon tezgahı iyi bir çözüm yolu olabilmektedir. Termoelektrik bir yöntem olan tel erozyon yöntemi, yüksek yoğunlukta üzerinden akım geçirilen bir tel elektrot yardımıyla iş parçasından talaş kaldırma yöntemidir.

Boyut, İşleme süreleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler, İmalat Sanayi için önemli bir yere sahip olan kalite ve maliyet konularına direkt tesir ettiğinden uygun kesme parametrelerinin seçimi önemlidir. Bu çalışmada kesme parametrelerinin boyut, yüzey pürüzlülüğü ve işleme sürelerine etkisi araştırılmıştır.

Inconel 718 Süper alaşım malzemesinden dokuz adet içersinde 10mm lik bir daire olan 20x20x2 mm ölçülerinde kare parçalar kesilmiştir. 0,25 mm çapında Sumitomo denko SBG türü tel kullanılmıştır. İşleme parametreleri olarak, tabla ilerleme hızı, puls süresi ve puls ara süresi değişken olarak alınmıştır. Dielektrik sıvı dolaşım basıncı, tel ilerleme hızı, tel gerginliği puls ara süresi ayarı, ana güç kaynağı maksimum akımı, yardımcı güç kaynağı devresi, ana güç kaynağı voltajı, servo referans voltajı, deney süresince sabit tutulmuştur. Boyut ölçüleri Easson ep-1 model hassas profil projeksiyon cihazı ile, yüzey pürüzlülüğü ise mitutoyo surftest-211 fcr400 model ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Optimizasyon yöntemi olarak Taguchi tekniği kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre doğrusal regresyon modeli ile denklemler oluşturulup optimum değerler elde edilmiştir.

Mart, 2010

Murat DOĞAN

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS TO THE CUTTING PERFORMANCE IN PROCESSING OF INCONEL 718 MATERIAL THROUGH WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE AND DESIGNATION OF OPTIMUM PARAMETERS

Wire Electrical Discharge Machine can provide a solution in processing of high strength materials which are difficult to be processed under high precision with traditional manufacturing methods. As a thermoelectric method, wire electrical discharge method is a chip removal method from the mass by means of a wire electrode over which is imposed with high dense current.

Since factors such as dimension, processing times and surface roughness directly affect the quality and cost issues which are significant for Manufacturing Industry, selecting suitable cutting parameters is important. In this study, the effect of cutting parameters on dimension, surface roughness and processing times.

From Inconel 718 Super alloy material, nine square-shaped parts at 20x20x2 mm dimensions which embody a circle with 10 mm diameter. A Sumitomo denko SBG-type wire with 0.25 mm diameter is employed. As processing parameters, table feed rate, pulse time and pulse off time were taken as variables. Dielectric fluid circulation pressure, wire feed rate, wire tension, pulse off time adjustment, maximum current of main power supply, auxiliary power supply network, main power supply voltage, servo reference voltage were kept fixed during the test. Dimensions were measured with Easson ep-1 precision profile projection device; surface roughness was with mitutoyo surf test-211 fcr400 model-measurement device. As an optimization method, Taguchi technique was used. According to the test results obtained, with the linear regression model equations were developed and optimum values were attained.

March, 2010

Murat DOĞAN

SEMBOLLER

C	: Karbon
Cu	: Bakır
CuZn	: Pirinç
Cr	: Krom
FR	: Kesme hızı
<i>h</i>	: İş parçasının kalınlığı (mm)
<i>K</i>	: Kesme genişliği
L	: Latin kare tabanlı anlamındadır.
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Gerilme Kuvveti Birimi
MRR	: Talaş kaldırma oranı
μ	: Mikron
n	: Deney şartlarında yapılan deney sayısı
Ni	: Nikel
<i>p</i>	: İş parçası malzemesinin yoğunluğu (g/cm ³)
Si	: Silisyum
S/N	: Sinyal Gürültü Oranı
X	: Tasarımdaki deney sayısı,
Y	: Deneydeki seviye sayısı,
y	: Ölçülen karakteristik
Z	: Deneyde kullanılabilecek max. faktör sayısı.

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
DC	: Doğru Akım
DOE	: Deney Tasarımı
EDM	: Elektro Erozyonla İşleme
EDG	: Taşlama Erozyon
HP	: Yardımcı Güç Kaynağı Devresi
HSTR	: Yüksek Sertlik ve Sıcaklığa Dayanıklı
IACS	: Uluslararası Yumuşak Bakır Standardı
IP	: Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı
LMC	: Maksimum Malzeme Durumu
MA	: Puls Ara Süresi Ayarı
MEDM	: Mikro Elektro Erozyon
MMC	: Maksimum Malzeme Durumu
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
SF	: Tabla İlerleme Hızı
SFD	: Doğrusal Ayar
SV	: Aralık Voltajı
UEDM	: Ultrasonik Destekli Erozyon
V	: Ana Güç Kaynağı Voltajı
WEDM	: Tel Erozyonla İşleme
WS	: Tel İlerleme Hızı
WT	: Tel Gerilmesi

ŞEKİLLER

SAYFA NO

Şekil II.1. Talaş Kaldırma Sürecindeki Aşamalar	2
Şekil II.2. Dalma Erozyon tezgahının Şematik görünümü.....	5
Şekil II.3. Tel Erozyonun Şematik Görünümü.....	6
Şekil II.4. Tel Erozyon Tezgahının Çalışma Şeması.....	9
Şekil II.5. Başlangıç Deliğinin Pozisyonu.....	12
Şekil II.6. Tel Erozyonda İşleme Prosesini Etkileyen Faktörler	15
Şekil II.7. Kırılcım Boşluğu.....	19
Şekil II.8. Dielektrik Sıvı Çeşitleri.....	20
Şekil II.9. Puls Süresi	21
Şekil III.1. Deneylerde Kullanılan İnconel 718	36
Şekil III.2. Sodick A320D/EX121 Model Tel Erozyon Tezgahı	37
Şekil III.3. Kesim Sonrası İnconel 718	37
Şekil III.4. Kesilen İnconel 718 Deney Numuneleri.....	38
Şekil III.5. Kesilen Parçaların Teknik Resmi.....	38
Şekil III.6. Deneyde Kullanılan kullanılan profil projeksiyon cihazı	39
Şekil III.7. Deney Parçalarının Ölçülmesi	39
Şekil III.8. Deneylerde Ölçülen ABCD Yüzeyleri.....	45
Şekil III.9. Boyutsal Hata değerleri (AC) için Kontrol Faktörlerinin S/N Oranları..	47
Şekil III.10. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal hata (AC) değişimine etkisi	48
Şekil III.11. Puls ara Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata (AC) değişimine etkisi	49
Şekil III.12. Puls Süresi ve Puls Ara Süresi Parametrelerinin Boyutsal Hata (AC) değişimine Etkisi	50
Şekil III.13. Boyutsal Hata (BD) için Kontrol Faktörlerinin S/N oranları	51
Şekil III.14. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin boyutsal hata Değişimine Etkisi...	53
Şekil III.15. Puls Ara Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata (BD) Değişimine Etkisi	53
Şekil III.16. Puls Süresi ve Puls Ara Süresi Parametrelerinin Boyutsal Hata (BD) Değişimine Etkisi	53

Şekil III.17. Boyutsal Hata (H) için Kontrol Faktörlerinin S/N oranları	54
Şekil III.18. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata (H) Değişimlerine etkisi	56
Şekil III.19. Puls Ara Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata Değişimine Etkisi	56
Şekil III.20. Puls Ara Süresi ve Puls Süresi parametrelerinin boyutsal Hata (H) değişimine etkisi	57
Şekil III.21. Boyutsal Hata (ØD) Değerleri için Kontrol Faktörlerinin S/N oranları	58
Şekil III.22. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata (ØD) Değişimine Etkisi	59
Şekil III.23. Puls Ara Süresi ve SF Parametrelerinin Boyutsal Hata (ØD) Değişimine etkisi	60
Şekil III.24. Puls Ara Süresi ve Puls Süresi Parametrelerinin Boyutsal Hata (ØD) Değişimine Etkisi	60
Şekil III.25. İşleme Süreleri için Kontrol Faktörlerinin S/N Oranları	61
Şekil III.26. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin İşleme Süresi Değişimine Etkisi ..	63
Şekil III.27. Puls Ara Süresi ve SF Parametrelerinin İşleme Süreleri Değişimine Etkisi	63
Şekil III.28. Puls Ara Süresi ve Puls Süresi parametrelerinin İşleme Süreleri değişimine Etkisi	64
Şekil III.29. Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri için Kontrol Faktörlerinin S/N Oranları	65
Şekil III.30. Puls Süresi ve SF Parametrelerinin İşleme değişimine Etkisi	66
Şekil III.31. Puls Ara Süresi ve SF parametrlerinin yüzey pürüzlülük değişimine etkisi	67
Şekil III.32. Puls Ara Süresi ve Puls Süresi Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük Değişimine Etkisi	67
Şekil III.33. Yüzey Pürüzlülüğü ve İşleme Süresi arasındaki İlişki	68
Şekil III.34. İşleme Süresi ve Ortalama Boyut Hatası arasındaki İlişki	68

TABLolar

SAYFA NO

Tablo II.1. Tel Gerginliği İçin Tavsiye Edilen Ayarlar	27
Tablo II.2. Tel Metal Gruplarının Karakteristikleri	29
Tablo II.3. Malzeme Kalınlığına Göre Tavsiye Edilen Tel Kalınlıkları.....	30
Tablo II.4. İçbükey Köşe Radyüs Limitleri	30
Tablo III.1. İncel 718'in kimyasal bileşim sınırları	35
Tablo III.2. İncel 718'in kimyasal ve fiziksel zellikleri	35
Tablo III.3. Deneyde kullanılan 2mm'lik incol 718 in kimyasal analizi	36
Tablo III.4. Deneyde Kullanılan Telin zellikleri	38
Tablo III.5. Profil Projeksiyon Cihazına Ait Teknik zellikler	39
Tablo III.6. Ortogonal Dizin Tipleri	41
Tablo III.7. İşleme Parametrelerinin Tanımlanması	43
Tablo III.8. Deneyde Kullanılan İşleme Parametreleri ve Seviyeleri	44
Tablo III.9. Tabla İlerleme Hızı Değerleri	44
Tablo III.10. Taguchi L ₉ Deney Tasarımı	45
Tablo III.11. Deneylerden Elde Edilen lm Sonuçları.....	46
Tablo III.12. Boyutsal Hata (AC) Değerleri ve S/N Oranları.....	46
Tablo III.13. Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (AC) Değerleri için S/N Oranları ..	47
Tablo III.14. Boyutsal Hata (BD) Değerleri ve S/N Oranları.....	51
Tablo III.15. Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (BD) Değerleri için S/N Oranları ..	51
Tablo III.16. Boyutsal Hata (H) Değerleri ve S/N Oranları	54
Tablo III.17. Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (H) Değerleri için S/N Oranları.....	55
Tablo III.18. Boyutsal Hata (D) Değerleri ve S/N Oranları	57
Tablo III.19. Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (D) Değerleri için S/N Oranları ..	58
Tablo III.20. İşleme Süreleri Değerleri ve S/N Oranları	61
Tablo III.21. Kesilen Parçaların İşleme Süreleri Değerleri için S/N Oranları.....	62
Tablo III.22. Yüzey Pürüzlülük Değerleri ve S/N Oranları.....	62
Tablo III.23. Kesilen Parçaların Yüzey Pürüzlülük Değerleri için S/N Oranları.....	64
Tablo III.24. Sodick A320D/EX21 Model CNC Tel Erozyon Tezgahında elde edilen 2mm kalınlığındaki İncel 718 için Optimum Parametreler	69

BÖLÜM I

GİRİŞ ve AMAÇ

Üretim teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, üretilen ürünlerden beklentiler de buna paralel olarak artmaktadır. Üretimdeki genel beklentilere ulaşılmış olunmakla birlikte, üretimde mikro düzeyde hassasiyetler ve en uygun sonuçları hala araştırılmaya ve yorumlanmaya muhtaç konular olarak araştırmacıların gündemindedir. İmalat prosesinde birçok ürünün istenilen toleranslarda CNC Torna ve Frezede üretilmesi mümkün iken mikro hassasiyetlerin veya yüksek mukavemete sahip malzemelerin, istenilen geometride en uygun şekillendirilmeleri, bazı durumlarda yüksek maliyetli olmakta veya bazen mümkün olamamaktadır. Özellikle kalıp imalatında kullanılan parçaların talaş kaldırılarak şekillendirilmesinde kullanılan Tel Erozyon ile işleme yönteminin, yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı her geçen gün tercih edilme oranı artmaktadır.

Termoelektrik bir yöntem olan Tel Erozyon yöntemi, dielektrik sıvı içindeki Tel Elektrot ve iş parçası arasında fiziksel temas olmaksızın işleme prosesi boyunca tel, iş parçasını ardışık kıvılcımlarla aşındırmak sureti ile üretilecek parçaya istenilen boyutsal özellikleri kazandırır. Geleneksel iş parçası malzemelerini tel erozyon tezgâhında istenilen performanslarda işlenmesi için bilimsel çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların olgunlaşması ile uygun parametreler tayin edilmiştir.

Günümüzde bu parametreler ile kabul edilebilir toleranslar dâhilinde talaşlı imalat gerçekleştirilmektedir. Diğer talaşlı imalat yöntemleri kadar uzun bir geçmişe sahip olmayan tel erozyon ile talaşlı imalat yöntemiyle, gelişen teknolojik malzemelerin optimal şartlarda işlenebilmesi için her bir kesme parametresinin ve koşullarının tayini tam anlamı ile yapılmamıştır.

Tel erozyon yöntemi ile talaşlı imalat konusunda yapılan çalışmalar irdelendiğinde, Inconel 718'in tel erozyon tezgâhında işlenmesi ile ilgili birkaç çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmada yapılacak deneylerden elde edilecek veriler literatüre ve uygulamaya önemli katkılarda bulunacaktır.

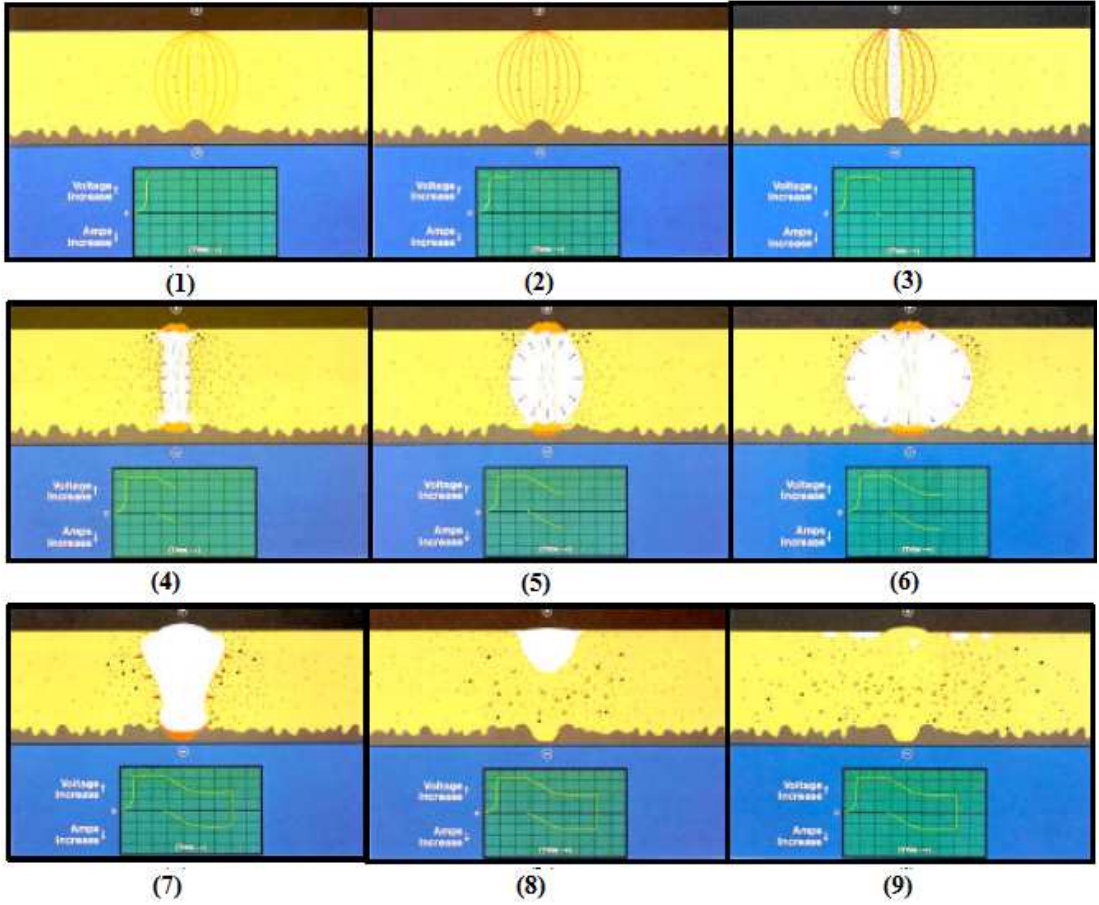
BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

II.1. ELEKTRO EROZYON YÖNTEMİ

II.1.1. Talaş Kaldırma Mekanizması

Elektro Erozyon yönteminin talaş kaldırma sürecinde bir çevrimde meydana gelen olaylar aşağıda dokuz aşamada açıklanmıştır. Bu ardışık On - Off düzeni bir EDM çevirimini temsil etmekte ve saniyede iki yüz elli bin defa tekrarlanmak suretiyle malzemeden talaş kaldırmaktadır. Şekildeki grafikler tanımlanan noktalarda izafi olarak akım ve voltaj değerlerini göstermektedir.



Şekil II.1 Talaş Kaldırma Sürecindeki aşamalar

1.Aşama

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

2. Aşama

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

3. Aşama

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

4. Aşama

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

5.Aşama

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

6. Aşama

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

7. Aşama

Off suresinin başlangıcında akım ve voltaj sıfıra düşer, buhar balonu söner ve iş parçasından ergimiş olan metal atılır.

8. Aşama

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

9. Aşama

İş parçasından ayrılan metal, dielektrik sıvı içerisinde küçük küreler şeklinde katılaşır. Bir miktar buhar yüzeye yükselir. Çevrimin sonunda, yeterli bir Off suresi ile kalıntıların ara bölgeden uzaklaştırılması sağlanır. Böylece iş parçasında ve elektrotta hasar açabilecek arklar önlenmiş olur [1] .

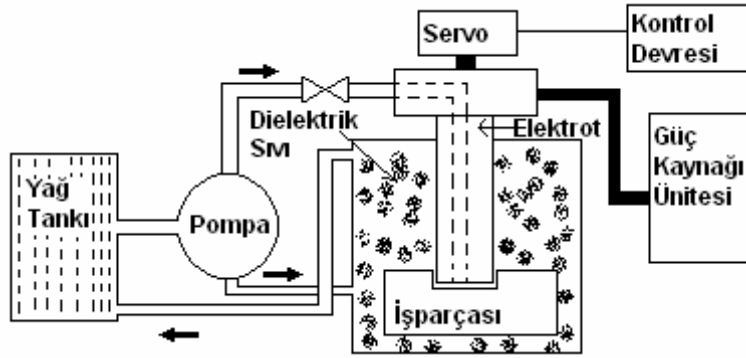
II.1.2. Elektro Erozyon Çeşitleri

Yüksek tamlıkta metal işleme yeteneğine sahip olan ve çeşitli sanayi uygulamalarında mevcut olan bazı farklı erozyon çeşitleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir .

II.1.2.1. Elektro Erozyon (EDM)

Günümüzde elektro erozyon ile işleme yaygın olarak kullanılan ve alışılmamış bir malzeme işleme yöntemidir. Özellikle CNC ve benzeri tezgahlarda yapılması zor olan parçaların, çok sert malzemelerin ve karmaşık biçimlerin kolaylıkla

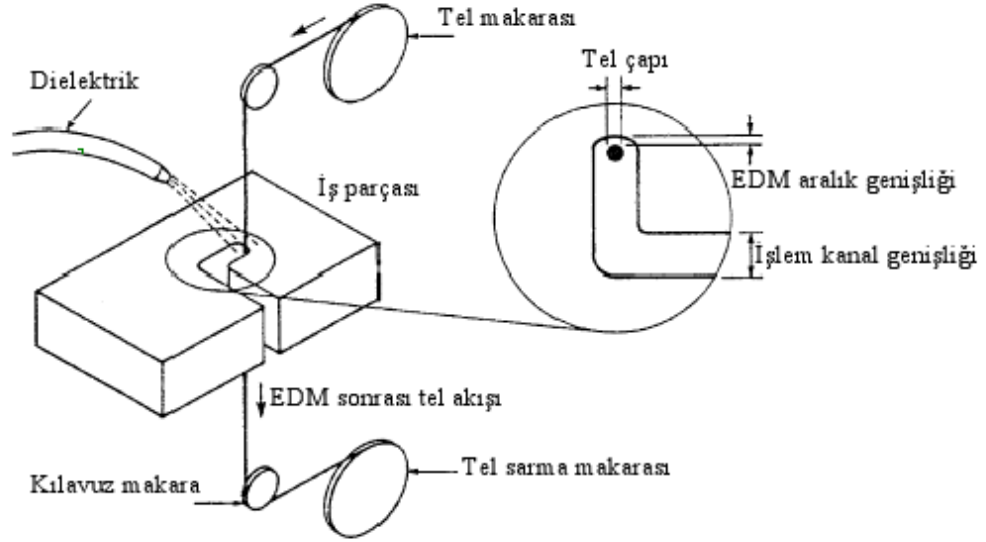
işlenebilmesi bu yöntemin kullanım alanını genişletmiştir [2]. Elektro erozyon tezgahında, kontrollü elektrik arklarıyla talaş kaldırılır. Her bir ark iş parçası üzerinde küçük bir krater meydana getirir. Arkın sürekli dolaşmasıyla şablonun şekli karşı tarafa geçirilir. Klasik tezgahların aksine bu teknikle sertleştirilmiş parçalar ve sert maden uçlar kolaylıkla işlenebilir [3] . Bu özellik, tezgaha çok önemli bir uygulama sahası açmaktadır. Elektro erozyon tezgahının önemli bir avantajı da kesme kuvvetinin olmamasıdır. Şekil II.2’de Dalma elektro erozyon tezgahının şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil II.2 Dalma Erozyon tezgahının şematik görünümü [4]

II.1.2.2. Tel Erozyon (WEDM)

Tel erozyon, üzerinde yüksek yoğunlukta akım geçirilen bir tel yardımıyla kesme yöntemidir. Klasik olmayan imal usulleri arasında yer alan bu yöntemle, sert ve karmaşık profilli iletken parçaların mikron hassasiyetinde işlenebilmesi mümkündür. Bu tezgâhlarda, farklı elektriksel kutuplara bağlanan tel elektrot, iş parçasına yaklaştırıldığında elektriksel boşalımınla yüksek bir sıcaklık meydana gelmekte ve yerel metal ergime yolu ile talaş kaldırılmaktadır. Talaş kaldırma hızı, her bir kıvılcımdaki enerji miktarı ve her kıvılcımın zaman aralığına göre değişmektedir. Tel Erozyon Tezgâhlarında program iki aşamadan meydana gelmektedir. Programın 1. aşamasında, İş parçasının şekli bir koordinat düzlemi içerisinde, şekildeki her bir elemana nokta, daire ve çizgi numaraları verilerek çizilmekte, 2. aşamada ise kesme yolu yardımıyla esas şekil belirlenmektedir. Kesme işlemi başlatıldığında tel kesme yolunu izleyerek kesme işlemi tamamlanmaktadır.



Şekil II.3 Tel Erozyonun Şematik Görünümü [5]

II.1.2.3. Freze Erozyon

Bu yeni yöntem, bir freze çakısı gibi kendi ekseninde dönen bir silindirik elektrot yardımıyla elektro boşalımlarla şekil verme işlemidir. Dişi kalıp imalatında, istenen derinlik verilmek suretiyle kalıp çerçevesi ve iç kısım kolaylıkla işlenebilir. Talaş kaldırma şekli elektro erozyon yani dalma erozyona benzerdir. Freze erozyonda standart silindirik elektrotlar kullanılarak, karmaşık elektrot tiplerinin imalatları ve maliyetleri azaltılmıştır.

II.1.2.4. Taşlama Erozyon (EDG)

Dönel erozyon olarak da bilinen bu erozyon yönteminde, abrasiv taşlama taşı elektrik iletkenliği olan bir tekerlek, takım elektrotu olarak kullanılmaktadır. Taşlama yöntemine benzer şekilde elektro boşalımlarla iş parçası şekillenir. Bu yöntem, karpitler ve çeşitli elmas formları gibi kesici takımların bilinmesinde tercih edilmektedir.

II.1.2.5. Ultrasonik Destekli Erozyon (UEDM)

Bu yöntem, ultrasonik frekanslarla titreyen bir takım elektrotu kullanılarak elektriksel boşalımlarla talaş kaldırma yöntemidir. Ultrasonik titreşim, küçük ya da mikro düzeydeki deliklerin delinmesinde mükemmel bir işleme kararlılığı ve sürekliliği sağlar.

II.1.2.6. Oyma Erozyon

Bu yöntem iş parçasının içine doğru ilerleyen bir delik ya da bir eğri olarak tanımlanmış bir yolda işlem yapabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Sistem, sanki yere bir tünel kazarcasına, parçayı işleyebildiğinden oldukça orijinaldir. Oyma erozyon tezgahında kullanılan elektrotun şekli eğilebilen bir çubuk gibidir.

II.1.2.7. Mikro Elektro Erozyon (MEDM)

Mikro elektro erozyon, dalma erozyonunun küçük bir şekli olarak ele alınabilir. Bu yöntemde takım elektrotu 10.000 rpm kadar döndürülerek V kanalları kolaylıkla işlenebilir. 5 mikrondan daha küçük elektrot çapları mevcuttur. Farklı şekillerin ve mikro deliklerin işlenmesinde kullanılır. Elektrotlar tel erozyonu olarak bilinen yöntemin aksine zıt kutuplu olarak yapılmışlardır. En yaygın olan Mikro erozyon elektrotları 20 µm ile 250 µm arasında değişmektedir.

Mikro erozyonun en önemli üretim alanlarından bir tanesi de X-Y-Z eksenlerinde hareket eden bir bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) programıyla 1 µm toleranslı parçaları imal etmektir. Mikro elektro erozyon $\pm 1-2$ µm toleransında 10 µm ile 200 µm arasındaki delikleri delebilmektedir. Bu işlemin çok küçük ve hassas olması nedeniyle, mikro elektro erozyon uygulamaları mikroskopla incelenebilir.

II.1.2.8. Mikro Tel Erozyon

Bu yöntemde çapı 10 µm kadar olan bir tungsten tel elektrotu kullanılır. Bu sistemle ölçüleri 0,1-1 mm arasında değişen ince plakalar işlenmektedir. Bu makineler oldukça düşük enerji seviyelerinde kontrol edilebilen bir görüntüleme sistemi, enerji jeneratörü ve hareket eden bir tel elektrotundan ibarettir [6].

II.1.3. Talaş Kaldırma Teorileri

Elektriksel deşarj işleminde talaş kaldırma iki elektrot arasında oluşan elektriksel arkın erozyon etkisi üzerine kurulmuştur. Erozyon arkının karmaşık olayını açıklamak için birkaç teori geliştirilmiştir.

Bu teoriler:

- Elektro-Mekanik Teori
- Termo-Mekanik Teori
- Termo-Elektrik Teori

II.1.3.1. Elektro-Mekanik Teori

Bu teori, talaş parçacıklarının abrasyonu yoğunlaştırılmış elektrik alanın sonucunda oluşur. Teori, malzeme düzleminde kohezyon kuvvetleri artarken, elektrik, iş parçasının talaş parçacıklarını parçalanmasını öngörür. Bu teori için yeterli deneysel kanıt mevcut değildir.

II.1.3.2. Termo-Mekanik Teori

Bu teoride; elektro erozyon (EDM) işlemlerinde talaş kaldırma, kıvılcım jetlerinden kaynaklanan talaşın eritilmesi üzerinedir. Kıvılcım jetleri, deşarjın farklı elektriksel sonucu oluşurlar. Ancak, bu teori deneysel verilerle uyuşmamakta ve kıvılcım erozyonun etkisinin mantıklı açıklamasını verememektedir.

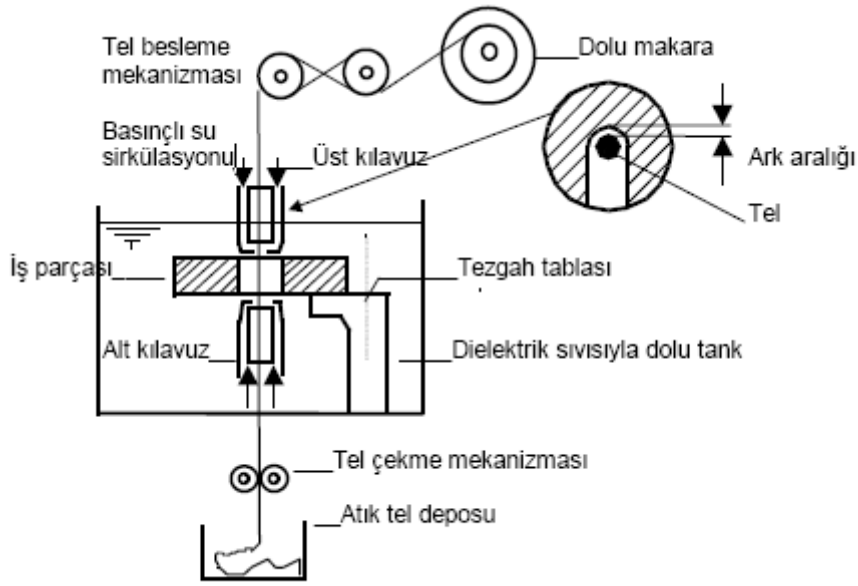
II.1.3.3. Termo-Elektrik Teori

Deneysel kanıtlarla desteklenmiş olan bu teoride; elektro erozyon (EDM) işlemlerinde talaş kaldırma, yüksek yoğunlukta deşarj, akım tarafından üretilen yüksek ısının üretimi sonucunda oluşur. Bu teori iyi desteklenmesine karşın, ifadedeki zorluklar yüzünden tam ve kesin sayılmaz [7].

II.2. TEL EROZYON YÖNTEMİ

Tel erozyonla işleme, bugün endüstride kullanılan, geniş bir alanda tanınmış ve geleneksel olmayan işleme yöntemidir. Tel elektrot ve iş parçası arasındaki boşalıklar veya elektrik kıvılcımların rastgele dağıtılması sonucu dielektrik sıvı içerisine daldırılmış iletken malzemeden talaş kaldıran bir termal aşınma yöntemidir. Tel erozyonla işleme (WEDM), Dünyada tornalama, frezeleme, taşlama ve diğer geleneksel işleme yöntemlerinin hepsinin gün geçtikçe yerlerini almaktadır [8]. Tel erozyon, geleneksel elektro erozyonla işlemenin (EDM) özel bir şeklidir. Elektro erozyonla işleme ile tel erozyonla işlemenin talaş kaldırma mekanizmaları benzerlik gösterdiği halde, işlevsel karakteristikleri aynı değildir. Tel erozyon tezgahı, bir mikro işlemci tarafından yönetilen ve iş parçası içinde kesintisiz olarak gezinen ince bir tel elektrot kullanır. Tel erozyonla işleme (WEDM), ısı etkili bir işleme tekniğidir. Bu yöntemde, dielektrik sıvı içindeki tel elektrot ve iş parçası arasında fiziksel temas olmaksızın işleme prosesi boyunca tel, iş parçasını ardışık

kıvılcımlarla aşındırmak sureti ile üretilecek parçaya istenilen boyutsal özellikleri kazandırır. Tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım boşluğu 0,025-0,05 mm arasında değişmektedir. Bu mevcut değerin bir bilgisayar kontrollü konum izleme sistemi vasıtasıyla sabit kalması sağlanmaktadır [9]. Tel erozyonda kesme işlemine başlamak için hem telin hem de iş parçasının, elektriği yalıtkan bir sıvı içerisinde yerleştirilmesi gereklidir. Aynı zamanda tel kılavuzları aşınmayı minimize etmek için safir veya elmas gibi sert malzemelerden yapılır. Şekil II.4’de tel erozyon tezgahının çalışma şeması yer almaktadır.



Şekil II.4 Tel Erozyon Tezgahının Çalışma Şeması [10]

Kesme işlemi, bir makara bobininden beslenen telden iş parçasına yönelen kıvılcım erozyonun sonucu olarak meydana gelir. Bu işlemde kesici tel ile iş parçası kesinlikle birbirine değmez.

Pozitif yüklü iş parçası ve negatif yüklü tel arasında 1.000.000 Hz frekansa kadar kıvılcım boşalmaları olur. Kıvılcımlar yavaş yavaş iş parçasından partiküller koparır. Bu işlem sırasında tel ve iş parçası dielektrik sıvı içinde bulunurlar.

Dielektrik sıvı, akımı taşıyan hızlı bir şekilde akan ve kontrol edilebilen bir çözeltidir. Dielektrik sıvısının görevleri:

- Çıkan talaşı uzaklaştırır.
- Talaşın iş parçası üzerinde erimesine engel olur.

- Ortamı soğutur.

İş parçasıyla tel arasındaki açıklık işleme hassasiyeti bakımından çok önemlidir. İşleme hassasiyeti ancak iyi bir açıklık değeriyle sağlanır. Açıklık değeri, voltaj değişimlerine göre teli çeken veya ileri süren bir servomotor ile sağlanır.

Malzemenin çıkan talaşın debisi aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- İşleme yüzeyi
- Malzemenin cinsi
- Malzemenin geometrisi
- Elektriksel parametreler
- Çalışma süresi
- Tel malzemesi

Yüksek akım boşalmaları parçayı çabucak aşındırır, ancak kaba yüzey oluşturur. Düzgün yüzey için düşük akım şiddeti ve yüksek frekans istenir [11,12].

Tel ve iş parçası arasında bir elektrik yük boşaltma meydana getirebilmek için dielektriksel aralığın (elektrot-parça boşluğu) kırılma geriliminden daha yüksek bir gerilimin uygulanması gereklidir. Bu kırılma gerilimi; tel ile iş parçası arasındaki mesafeye, dielektrik sıvının izolasyon kabiliyetine ve aralık kirliliğine bağlıdır.

Elektriksel bir boşalım en yüksek elektrik seviyesinde meydana gelir. Pozitif serbest iyonların ve elektronların çok yüksek hıza ulaştığı bölgelerde, hızlı iyonize bölgeler oluşur. Daha sonra, akım yavaşlar. Kıvılcım, tel ve iş parçası partikülleri arasındaki çarpışmalar sonucunda meydana gelir. Bu aşamada tel elektrotlar arasında ark oluşur. Çok yüksek sıcaklıkta 8000 °C'den 12000 °C'ye kadar olan aralıkta hızlıca erişilen bir plazma bölgesi oluşur. Bu bölge şokların etkisiyle ve iş parçasının yüzeyindeki bölgenin ani erimesiyle meydana gelir.

Aynı zamanda elektrotlar ve dielektrikteki buharlaşmadan dolayı bir gaz kabarcığı oluşur. Bu kabarcık, azami basınç seviyesine ulaşıncaya kadar düzenli olarak artar. Akım kesildiğinde, sıcaklıktaki ani düşüş, kabarcığın patlamasına yol açar ve dinamik kuvvetler oluşur. Aşınan malzeme, küçük kürecikler halinde dielektrik sıvı içinde katılaşır ve dielektrik sıvı tarafından boşaltılır.

Tel ve iş parçasının aşınması asimetriktir. Bu aşınma, elektriksel kutuplaşmaya, ısı iletkenliğine, malzemenin erime sıcaklığına, deşarjın süresine ve şiddetine bağlıdır. Parça üzerinde meydana gelen aşınma talaş kaldırma olarak tanımlanır [6-11].

Boşalımalar, genelde deiyonize su veya dielektrik sıvılarda meydana gelir. Bu durumda boşluktaki voltaj düşüşü ve ard arda boşalımların devamlılığı sonucunda iş parçasından talaş kaldırılır [13].

Tel erozyon ile gerçekleşen iyi bir kesim işlemi, temel olarak aşağıdaki özelliklere ihtiyaç duyar,

a) Elektrot (iş parçasına oranla) yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır.

b) İş parçası elektrik iletkenlik özelliği taşımalıdır. Ayrıca malzemenin cinsi, iletkenlik derecesi ve kesme yüksekliği kesim işlemini etkileyen faktörlerdendir.

e) Dielektrik sıvı (saf su) yeterli yalıtkanlık derecesine sahip olmalı ve 18°C’de (ideal) korunmalıdır.

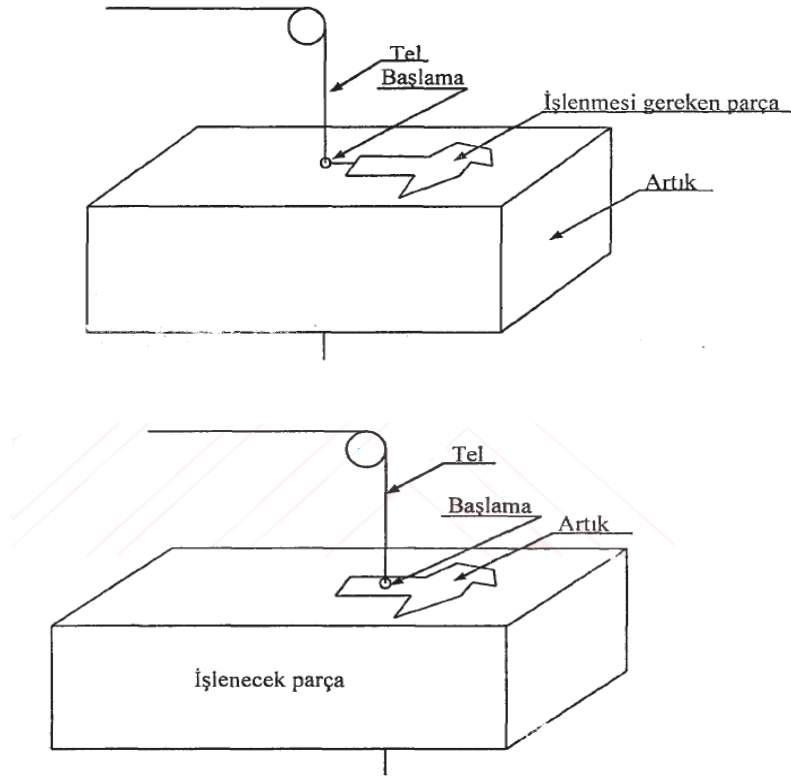
d) Ortam sıcaklığı 20°C ve nem oranı %50 olmalıdır.

Ayrıca bunlara ek olarak akım jeneratörünün gücü, kararlılığı ve iyonlaşma etkisine adaptasyonu kesme işleminin verimi ile doğrudan ilişkilidir. WEDM uygulamalarında, günümüzde programlama dillerinin çeşitli versiyonları kullanılmaktadır. Bu şekilde daha az kalifiye elemana ihtiyaç duyularak ve minimum hata toleranslarında şekil geometrileri elde edilmektedir. Kullanılan bu dilde,operatöre yardımcı olmak amacıyla, iş parçası tanımlanırken diyaloglu veri girişi yöntemi uygulanmaktadır. Matematiksel hesaplamalar çok kısa surede gerçekleştiğinden manüel hesaplamalarda geçen fazla zaman ortadan kaldırılmaktadır.

Tel yolu, kullanıcı tarafından programlanır ve makinenin sayısal kontrolü (NC) tarafından kontrol edilir [13]. İş tablasının yatay hareketi bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) vasıtasıyla kontrol edilir. Parçayı işlemek için hazırlanan program iki aşamadan meydana gelmektedir. Programın birinci aşamasında, iş parçasının geometrik şekli belirli oranlarla sınırlanmış bir koordinat düzlemi içerisinde, şekildeki her bir elemana nokta, daire, çizgi numaraları verilerek çizilmekte, ikinci aşamada ise kesme yolu yardımıyla esas şekil belirlenmektedir. Kesme işlemi başlatıldığında tel, kesme yolunu izleyerek kesme işlemini tamamlamaktadır.

Tel erozyon ile gerçekleştirilen kesme işleminde, yüksek ısı ile eritilerek aşındırılan yüzeylerde, mikron mertebesinde gözenekler oluşmaktadır. Hatta detaylı olarak incelendiğinde gözenekler arasında çatlakların oluştuğu görülebilir. Bunun nedeni, hep aynı yönde gerçekleşen iyonlaşma sonucunda ortaya çıkan elektroliz ve elektro-kimyasal korozyon etkileridir. Meydana gelen yüzey deformasyonu, erken aşındırma veya kırılmalara yol açarak iş parçası ömrünü kısaltmaktadır.

Genellikle kesme işlemine başlamak için başlangıç delikleri gereklidir. Eğer şeklin iç tarafı işlenecek ise başlangıç deliği iş parçasının dışına açılır. Bunun aksine şeklin dış yüzeyi işlenecek ise başlangıç deliği iş parçasının içine açılır (Şekil II.5).



Şekil II.5 Başlangıç Delığinin Pozisyonu [6]

II.2.1. Tel erozyon yönteminin avantaj ve dezavantajları

Tel Erozyonla işlemenin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- 1) Tel elektrot yardımı ile karmaşık şekilli parçaların işlenmesi yüksek hassaslıkta (doğrulukta) gerçekleştirilebilir. Kesme yüzeyinde açıl

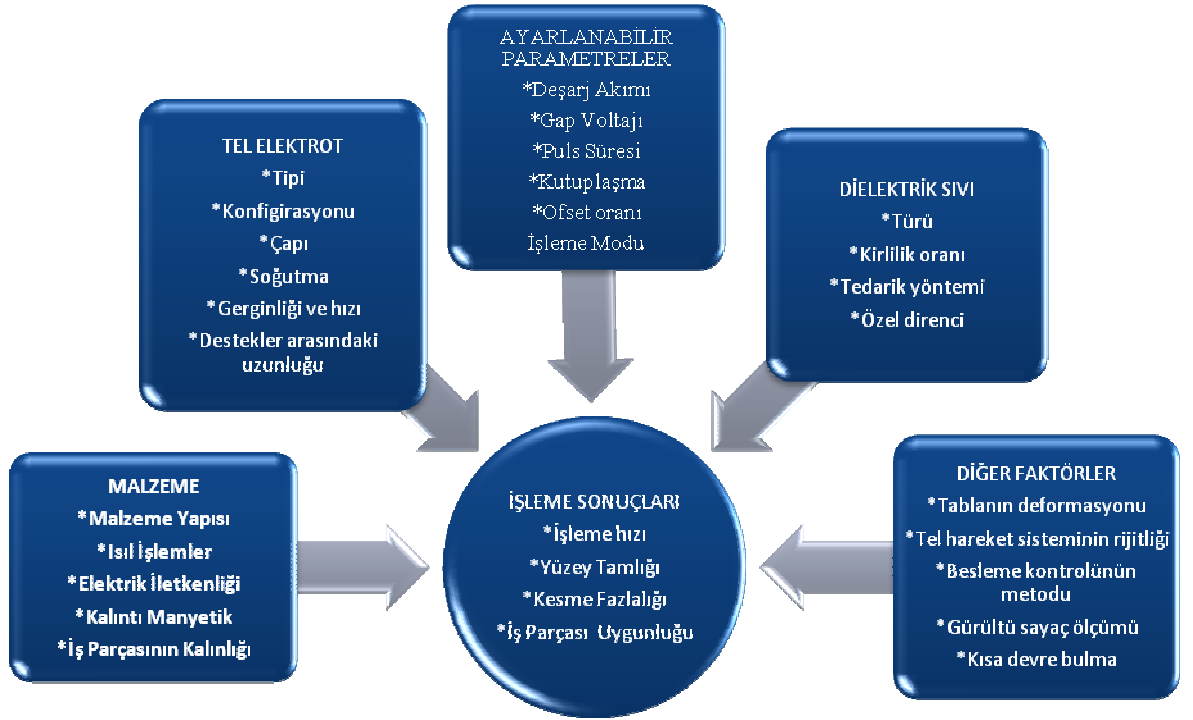
değiştirilerek değişken kalınlığa sahip malzemeler üretmek de mümkündür (100 mm kalınlık için 15° ve 400 mm kalınlık için 30°) [14].

- 2) Bu işleme tekniği sayesinde değişken sertlikte veya karmaşık şekildeki parçaların mikron hassasiyetinde işlenmesi mümkündür.
- 3) Bilinen diğer işleme yöntemleriyle (klasik yöntemlerle) işlenmesi çok zor olan, keskin kenarlara sahip parçaların işlenmesi için tel erozyon yöntemi doğru tercihtir. Tel erozyon tezgâhına ait bu teknoloji, çok tercih edilen ve temassız talaş kaldırma yöntemlerinden biri olan geleneksel elektro erozyonla işleme (EDM) kıvılcımı olgusu üzerine temellendirilmiştir.
- 4) Tel erozyonla işleme prosesi ile yüksek sertlikte ve sıcaklığa dayanıklı (HSTR) malzemeleri işlemek ve ısıl işleminden kaynaklanan geometri değişimlerini elimine etmek mümkündür [14].
- 5) Geleneksel yöntem olan elle taşlama ve parlatma işlemi, tel erozyonla işleme (WEDM) olmadan iş parçası tamlığının imalatı için birçok saat gerektirmektedir [7,8].
- 6) Tel erozyonla işleme (WEDM), yüksek hızlarda ayna ve iş parçasının dönme tehlikesi, keskin talaşların oluşması ve büyük freze çakılarının kullanımı söz konusu olmadığından güvenli işleme yöntemlerinden biridir.
- 7) Başka metotlarla işlenmesi hayli zor olan malzemelerden, pahalı taşlama operasyonuna veya yüksek maliyetli elektro erozyon elektrotu imal etmeye ihtiyaç duymadan, tel erozyon teknolojisi sayesinde komplike kesimler gerçekleştirmek mümkün olmaktadır [9].
- 8) Termoelektrik bir yöntem olan tel erozyon yönteminde iş parçasından talaş kaldırmak için kullanılan ve sürekli hareket eden tel elektrot; bakır, pirinç veya volfram malzemedan 0,05-0,3 mm çap aralığında yapılarak, bu çaplarla işlenen malzemede çok küçük köşe yarıçapları elde edilebilmektedir [15].
- 9) Tel erozyonla iş parçasından talaş, elektro termal enerji ile kaldırıldığı için, talaş kaldırma oranı elektrik iletkenliğine ve iş parçasının ergime sıcaklığına bağlıdır. Yüksek elektrik iletkenliği ve düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler, tel erozyon ile daha etkili işlenebildiği gibi, mukavemeti veya sertliği; takım kırılmasına veya prosesin aksamasına etkin rol oynamaz .

Tel Erozyon Tezgahının avantajlarının yanında dezavantajlarda mevcuttur bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- 1) Kesme hızı geleneksel tezgahlara göre düşüktür.
- 2) Tezgahın ilk yatırım maliyeti yüksek ve tezgahı programlamak ve kullanmak için kalifiye eleman gerekir.
- 3) Yalıtkan malzemelerin işlenmesi mümkündür değildir.
- 4) Tel elektrotun iş parçasının üst ve altından boydan boya geçmesi gerektiği için kör delik, oyuk türü detaylar ve çok büyük parçaların işlenmesi mümkün değildir.
- 5) İşlenmiş köşelerde, tel çapına ve servo motorun hassasiyetine göre kavis oluşur.
- 6) Tel erozyon çok sayıda parametre tarafından kontrol edilir. Deşarj enerjisi, deşarj akımı, aralık voltajı, puls ara süresi ve elektrot karakteristikleri tezgah parametrelerinin bir fonksiyonudur. Tek bir faktör bile sonuca etki edebilmektedir. Bu parametrelerin ve diğer kontrol faktörlerinin yanlış ayarlanması, arzu edilmeyen yüzey hasarlarına ve düşük işleme hızlarına sebep olmaktadır [16] .

Scott ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, talaş kaldırma oranı, yüzey doğruluğu, hassasiyeti ve diğer ölçülebilen parametreleri etkileyen faktörleri Şekil II.6'daki gibi özetlemişlerdir.



Şekil II.6 Tel Erozyon ile İşleme Prosesini Etkileyen Faktörler [14]

II.2.2. WEDM'nin Tarihçesi

İngiliz Fizikçi Priestly elektrik anahtarlarında meydana gelen kontak aşınmasıyla ilgili çalışmasında kontak aşınmasının elektrik akımı ile doğrudan ilişkisi olduğunu gözlemlemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda bu olayın akım şiddeti ve metal özelliğine bağlı olarak gerçekleşen bir aşınma olduğunu tespit etmiştir, bu çalışma erozyon teknolojisinin temellerini atmıştır. İleri tarihlerde ise kasif ve Sovyet bilim adamı olan Boris Lazarenko elektriksel aşınma olayını kontrol altına alarak yapıcı olarak kullanabilme düşüncesini geliştirmiştir. Bu alandaki çalışmalar sonucunda 1943 yılında, elektriksel deşarj yolu ile metal işleyen makine Electrical Discharge Machine - EDM kavramı doğmuştur. Boris Lazarenko, metal işleminde elektriksel kıvılcım metodunu geliştiren ilk kişiler olmalarına rağmen elektro boşalımlarla makineciliğin temel teknolojisi dört İsveçli tarafından atılmıştır. İsveçli arkadaşlar kendi kesiflerinin endüstriyel potansiyelini fark ettiklerinden, bu teknoloji için bir garaj içerisinde birkaç yıl çalışma yaptılar. 1954 yılında İsveçli bilim

adamları çalışma yaptıkları çok amatör ve küçük olan garaj atölyelerini asıp Agie Corp. Şirketini kurdular. 1969 yılında WEDM, kurulan bu şirket tarafından dünyaya tanıtıldı [7].

İkinci dünya savaşından sonraki ilk yıllarda, iş parçasında olduğu gibi elektrot malzemesinde de aşınma gerçekleşmekteydi. Elle besleme mekanizması yüzünden, kıvılcımdan ziyade sürekli ark oluşumu meydana gelmekteydi. 1970’li yılların başlarında microprocessor’ların bulunmasıyla, WEDM teknolojisi büyük oranda gelişme sağladı. Tüm bu yenilikler, WEDM’ye oldukça esnek bir teknolojik avantaj kazandırmanın yanı sıra, takım uygulamalarında gerçekleşen operasyonların zamanında olması ve büyük bir zaman tasarrufu sağlamasıyla piyasada esnek bir yapı kazanmış oldu.

1980’li yılların ortalarında, tel elektrotu teknolojisinin artması yüzünden WEDM makinelerinin kesme hızlarında da artış başladı ve verimlilik oranı büyük ölçüde artmış oldu. 1980’li yılların sonlarında ise CNC’lerin kullanılmaya başlamasıyla, WEDM’ nin önemi önemli ölçüde artmış oldu. CNC makinelerinin yardımıyla karmaşık şekillerdeki üretim oranı arttı ve çok kompleks üç boyutlu karmaşık profiller işlenebilir hale gelmiş oldu.

Sonraki yıllarda WEDM sistemine bir akım kesme devresi ve servo-kontrolör eklenmesiyle iş parçası ile takım arasındaki mesafe bütün işleme boyunca sabit bir hale getirilmiş ve ark oluşumu önemli ölçüde engellenmiştir. Bu sistemin eklenmesiyle EDM yönteminde bir dönüm noktası olmuştur [3].

II.3. TEL EROZYONDA KESME İŞLEMİNİN UYGULAMA ALANLARI

İş parçası boyutlarının doğruluk derecesi ve iyi yüzey bitişi meydana getiren tel erozyonla işleme yöntemi, metal ve ekstrüzyon kalıpları, prototip parçalar, vs. üretimini kapsayan uygulamalar için önemlidir [17].

II.3.1. Kalıp ve Kalıp Parçaları

Tel erozyon yöntemi ile klasik tezgahlarla imalatı mümkün olmayan karmaşık profillerin kalıpları ve kalıp parçalarının üretilmesi mümkündür. Bu yöntemde zımba ve kalıp aynı anda kesilebilir ve zaman kaybı ortadan kaldırılarak işleme süreci hızlanır [3].

Sac pres kalıpları tel erozyon ile uygun bir şekilde kesilir. Isıl işlemten sonra kesme işlemi kolaylıkla sağlanır. Bu suretle malzemedeki çarpılma önlenir. Ekstrüzyon kalıpların imalatında ise frezeleme ve taşlama işlemleri kullanılmaktadır. Bu pahalı işlem tel erozyon yönteminin kullanımı ile ortadan kalkmaktadır. Kalıp imalatında tel erozyon kullanımı önemli tasarruflar sağlar [4].

Yüksek hassasiyetli kalıp ve kalıp parçalarının işlenmesinde tel erozyonla işleme (WEDM) uygun tercihtir. Temassız işleme tekniğine sahiptir ve diğer işleme yöntemlerinden farklı olarak yüksek hassasiyet ve yüksek yüzey kalitesi sağlar. Ancak hızla gelişen kalıp endüstrisinde, yüksek hassasiyetteki kalıplara olan ihtiyacın devamlı artması sonucunda tel erozyon tezgahında kesme tekniğinin yüksek hassasiyetine olan talep de artmıştır [17].

Tel erozyon tezgahında kalıp ve zımba parçalarının imalatı, çok sık olarak yapılmaktadır. Küçük koniklere ve tam boyuta ihtiyaç duyulduğu durumlarda, pahalı kesme elektrotlar kullanılır. Bu elektrotlar tel erozyon için mükemmel bir uygulama sağlar. Kalıp işi, yüksek yüzey kalitesi istediğinden, genellikle tel erozyonla işleme (WEDM) yöntemi kullanılarak kalıp ve kalıp parçaları işlenir.

II.3.2. Prototip İmalatı

Tel erozyonla işleme yöntemi (WEDM), karmaşık şekilli parçaların çabuk ve kolay işlenmesi için kullanılır. Tabaka halinde olan metal katmanlar üst üste konularak tek bir pasoda yüzlerce veya binlerce üretilebilir.

Prototip işlemede, yapılacak küçük değişikliklerle parçaların üretimleri için kullanılabilecek prototipin sayısal kontrol (NC) yardımıyla üretilmesi, tel erozyonla işleme yönteminin avantajlarından biri olup, üretimi hızlandırır [3,4].

II.3.3. Torna Takımları

Torna takımları çelik bir gövde üzerinde lehimlenmiş karbürden oluşur. Genellikle pahalı elmas diskler kullanılarak taşlanır. Çelik gövde genellikle

frezelenerek hazırlanır. Daha sonra, karbür bu çelik gövdeye lehimlenerek alet bileme tezgahında işlem tamamlanır.

Tel erozyonla işleme ile takımların imal edilmesi, form veya optik taşlamanın zorluğunu ve yüksek maliyetini ortadan kaldırır. Karmaşık kesme açısına sahip torna takımlarının tel erozyon tezgahındaki özel programlar yardımıyla işlenmesi mümkündür. Bu programlar işlemede kolaylık sağlar [3,4].

II.3.4. Özel Malzemeler

Karbür, elmas veya diğer standart olmayan malzemeler tel erozyon işlemi ile kesilebilir. Birçok alanda tercih edilen ve oluşturulan yeni malzemeler, geleneksel takım tezgahları kullanılarak ekonomik olarak kesilmezler. Özellikle sentetik elmaslar ve elmas bileşimlerini kesmek için çok sert ve pahalı olan kesicilere ihtiyaç duyulur. Tel erozyon tezgahında bu malzemeler daha düşük maliyetli ve daha kısa zamanda işlenir.

II.3.5. Broşlar

Broşlama (tığ çekme), aslında iç kama yuvası açmak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte düz, iç ve dış silindir veya yarı silindir ve düz olmayan yüzeylerin seri imalatında kullanılır. Birçok uygulama alanı olan broşların geleneksel yöntemlerle işlenmesi pahalıya mal olur ve yüksek oranda kabiliyet gerektirir. Broşların üretiminde kullanılan malzemelerin işlenmesindeki zorluk tel erozyonla işleme yöntemi ile kolaylaştırılabilir. Broşlama işlemleri tel erozyon yöntemi için mükemmel bir uygulama alanıdır.

II.3.6. Şablonlar

Büyük bir beceriye ihtiyaç duyulmadan şablonlar tel erozyon tezgahı ile çabuk ve doğru olarak kesilmektedir. Şablonların tasarımındaki değişikliklere göre basit bir bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) programı yaparak tel erozyon tezgahında bu parçaları işlemek oldukça kolay ve hızlıdır.

II.4. TEL EROZYON TEZGAHINDA KIVILCIM OLUŞUMU

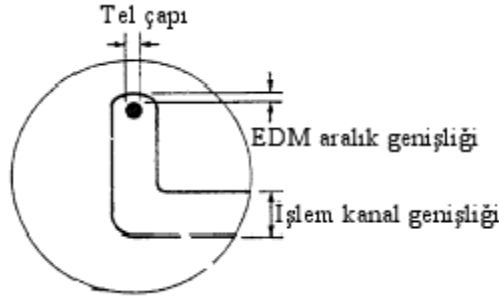
Tel erozyonla işlemede metalik iş parçasını eritmek için, kıvılcım oluşturmak gereklidir. Kıvılcımlar, dielektrik sıvı içine daldırılmış iş parçası ve tel arasında oluşur [8]. Özel bir uygulamada optimum şartları sağlanarak kıvılcım

karakteristikleri kontrol edilebilmelidir. Bu gereksinimler, elektriksel boşalmanın başlaması ve devam etmesi için uygun bir voltaj ister. Aynı zamanda akım yoğunluğu, süresi ve boşalım döngü sayısını sağlayan, gerekli bir kontrol sistemi de talep eder.

İstenmeyen arklar oluştuğu zaman akımlar durdurulur ve elektrot geri çekilir. Kesme hızına bağlı olarak iş parçası ve tel elektrotu arasındaki ark oluşumlarını engellemek amacıyla servo sistem kullanılır.

II.4.1. Kıvılcım Boşluğu

Şekil II.7’de gösterildiği gibi tel erozyonla işlemede kıvılcım boşluğu 0.02 ile 0.05 mm arasındadır. En yaygın kullanılan kıvılcım boşluğu 0.03 mm’dir. Kesme boşluğu, kıvılcım boşluğunun iki katı ile tel çapının toplamına eşit olan bir açıklıktır [8].



Şekil II.7. Kıvılcım Boşluğu

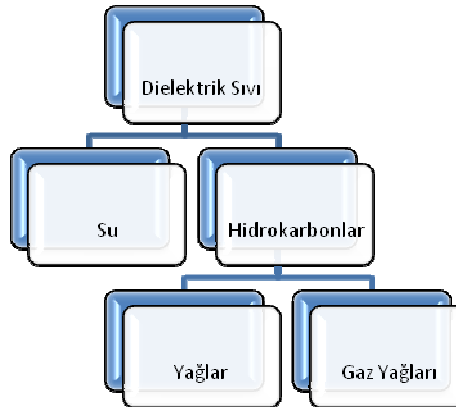
Kesme boşluğu, bitmiş parçanın boyutsal doğruluğuna karar verir. İşleme parametrelerinin ayarlarındaki asıl amaç, minimum kesme boşluğu ile maksimum talaş kaldırma oranıdır [8].

II.5. TEL EROZYON TEZGAHINDA KULLANILAN DİELEKTRİK SIVILAR

Tel erozyon tezgahında kullanılan dielektrik sıvının başlıca fonksiyonları şunlardır;

- İş parçası ve elektrot arasında kıvılcım başlatılmasını sağlaması
- İş parçası ve tel arasında yalıtıcı görevi yapması
- Kısa devreyi önlemek için iş parçası ve tel arasında küçük parçacıkların uzaklaştırılması
- Hem iş parçası hemde tel için soğutma etkisi yapması olarak belirtilebilir.

Tel erozyonla işleme (WEDM) tekniği, dielektrik akışkan olarak hidrokarbon yağlar yerine deiyonize (iyonik tuzlardan arındırılmış) su kullanır ve bu suyu kıvılcım bölgesinde kullanır. Deiyonize olmuş su geleneksel elektro erozyon (EDM) yöntemi için uygun değildir, çünkü elektrotun hızlı aşınmasına sebep olur. Ancak deiyonize suyun düşük viskozitesi ve hızlı soğuma özelliği bu suyu tel erozyonla işleme (WEDM) tekniği için ideal bir tercih yapar .



Şekil II.8 Dielektrik Sıvı Çeşitleri [16]

II.6. TEL EROZYON TEZGAHININ İŞLEME PARAMETRELERİ

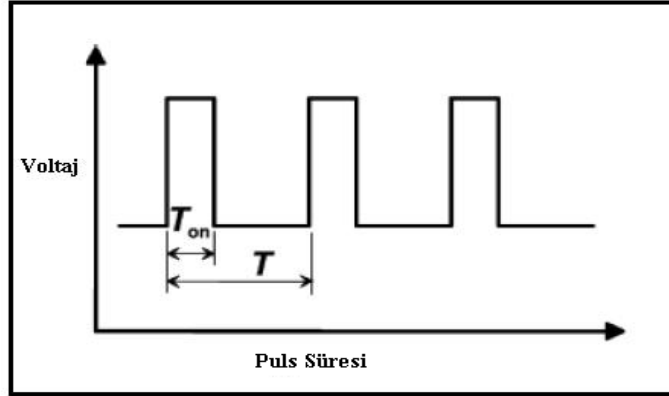
Deşarj akımı, deşarj kapasitesi, puls süresi, puls frekansı, tel hızı, tel gerginliği, ortalama çalışma voltajı ve dielektrik akışkan basıncı performans ölçümlerini etkileyen işleme parametreleridir [7,17].

II.6.1. Puls Süresi (T_{on})

Tel erozyon yönteminde talaş kaldırma süreci puls süresinde gerçekleşmektedir. Bu safhada kıvılcım aralığı kurulmakta, akım oluşturulmakta ve iş yapılmaktadır. Yani, puls süresi her kıvılcımda tele uygulanan elektrik zamanının uzunluğunu kontrol etmektedir. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede puls süresini ayarlamak daha büyük enerji üretimine sebep olur.

Puls süresi, tel için güç ekleyebilen bir faktördür. Puls süresi arttığı zaman, makine daha hızlı kesecektir. Fakat yüzey daha pürüzlü olur ve doğruluk, artan kesme hızından dolayı azalabilir. Genellikle, kaba işleme için puls süresi son

pasodaki puls süresinden daha yüksektir. Eğer puls süresi aşırı büyük olursa tel kırılmaya karşı dayanıksız olacaktır. Şekil II.9 Puls süresini göstermektedir.



Şekil II.9 Puls Süresi (T_{on})

II.6.2. Puls Ara Süresi (T_{off})

Bu parametre her kıvılcım arasındaki zamanın uzunluğunu kontrol eder. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede puls ara süresi parametresini ayarlamak daha büyük olan kıvılcımlar arasındaki zaman demektir ve daha düşük enerji üretimi ile sonuçlanır.

Puls ara süresi esnasında, parçacıklar, aralığın dışına püskürtüldüğünden çok önemlidir. Puls ara süresi elektro erozyon yönteminde yer almazsa tel iş parçasına degecek şekilde kısa devre yapar ve kırılır. Artan puls ara süresi, genellikle daha yavaş kesme, artan süreklilik ve daha az tel kırılması anlamına gelmektedir. Genellikle puls süresi ve puls ara süresi yaptıkları etkilerinden dolayı bir arada değerlendirilir.

Eğer puls ara süresi çok kısa olursa, deşarj boşluğu yeterli şekilde temizlenememekte ve sonraki deşarjlar sırasında birikmiş parçalardan dolayı çok küçük kısa devreler oluşmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ve yetersiz soğutma devirlerinden dolayı telde kırılmalar olabilmektedir.

II.6.3. Puls Ara Süresi Ayarı (MA)

MA parametresi adaptif kontrolün duyarlılığını ve miktarını kontrol eder. Makinenin adaptif kontrol dengesi kesme işleminin kötü olduğunu belirlediği zaman (malzemenin sert bölgesi, zayıf püskürtme, vs.), MA değerine bakılır. MA iki sayısal numaradır. İlk rakam M, duyarlılığı kontrol eder. Bu parametrenin fonksiyonu IP'nin ayarına göre değişir.

IP 16'dan küçük olmayacak şekilde ayarlandığında;

M: İşleme şartlarının kararlı veya kararsız olmasının hangi seviyede tetkik edileceğini ayarlar.

A: Kararsız işleme sırasında puls ara süresini ayarlar. Bu parametrenin yüksek seviyede ayarlanması, tel kırılma ihtimalini azaltarak işleme kararlılığını artırır.

IP 15'den büyük olmayacak şekilde ayarlandığında;

M: İşleme şartlarının kararlı veya kararsız olmasının hangi seviyede tetkik edileceğini ayarlar.

A: Kararsız işleme sırasında puls ara süresinin ölçek faktörünü ayarlar. Bu parametrenin yüksek seviyede ayarlanması, daha yüksek işleme kararlılığıyla sonuçlanan, puls ara süresinin ölçek faktörünü büyültür. Bu aynı zamanda işlem miktarının da azalmasına sebep olur.

II.6.4. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)

En yüksek akım değerini ayarlayan ve tele uygulanan akım miktarını kontrol eden parametredir. Daha yüksek numaralar daha yüksek akım demektir. Elektro erozyon kıvılcım enerjisi; ana güç kaynağı maksimum akımı (IP), ana güç kaynağı voltajı (V) ve puls süresi (T_{on}) vasıtasıyla belirlenmektedir.

II.6.5. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi (HP)

HP'nin iki rakamından birincisi olan H, artan açık aralık voltajını kullanan bir yüksek voltaj devresidir. Eğer DC elektrik akımı meydana gelirse, HP'nin son rakamı puls süresi olur. P parametresi, MA parametresinin kesmenin kararsız olduğunu belirlediği zaman kullanılır. Daha hızlı kesmek için, yani tele daha fazla güç eklemek için bu değer artırılır.

IP 16'dan daha az bir değere ayarlandığı zaman, H parametresi yüksek voltaj devresini seçer ve normal olarak 0'a ayarlanır. Bu parametre kaba işleme için nadiren kullanılır. P parametresi, kararsız işleme esnasında oluşan elektro erozyon kıvılcımının devam etme süresini seçer. IP 15'den daha fazla bir değere ayarlandığı zamanda, H parametresi yüksek voltaj devresini seçer ve P kullanılmaz.

II.6.6. Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)

Ana güç kaynağı voltajı (V) tele güç ekleyen bir faktördür. Ana güç kaynağı maksimum akımı (IP) parametresi ile birlikte deşarj puls enerjisini ayarlar. Tel için

gerçek gücü, ince ayarlamamanın bir yolu olarak puls süresi ve kaba bir ayarlama olarak da voltajı düşünebiliriz. Daha yüksek sayı daha yüksek voltaj demektir. Voltaj iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları için daha büyük bir voltaj, ince parçalar için daha düşük bir voltaj gerekmektedir.

II.6.7. Aralık Voltajı (SV)

SV servo voltaj anlamına gelir. Bu parametre kesme performansını ve aşırı yanmayı kontrol eder. Tele güç eklemeyi. Tel ve iş parçası arasındaki aralık voltajını ayarlar. Bu ayarın düşürülmesi daha küçük bir aralık meydana getirir. Aşırı düşük değer kesmeyi kararsız yapar, çünkü parçacıklar aralık içinde kalır.

Bu parametrenin yüksek seviyede ayarlanması, daha yüksek işleme kararlılığı ile sonuçlanan, ortalama işleme voltajında yükselmeye sebep olur. Bununla beraber bu ayar, işleme miktarında azalmaya sebep olan, iş parçası ile tel arasındaki boşluğun genişlemesine sebep olur.

Yüksek servo seviyelerinde deşarj boşluğu büyük, iyonlaşma süresi uzun ve talaş kaldırma hızı düşüktür. Bu mekanizma, iş parçası ve tel arasında yaklaşık 0,02-0,05 mm olan sabit boşluğu otomatik olarak sürdürür. İş parçası ve tel arasında fiziksel temasın olmaması önemlidir. Aksi halde kısa devre oluşur. Servo mekanizma, işlem devam ederken iş parçasını tele yaklaştırır, uygun kesme boşluğunu sağlamak için gerektiğinde tahrik motorunu hızlandırır veya yavaşlatır. Ancak başarılı bir kesme işlemi için boşluğun hassas kontrolü gereklidir. Boşluk çok büyükse tel ve iş parçası arasındaki dielektrik sıvı gaz haline geçmez, kıvılcım tel ve iş parçası arasına iletilemez ve bunun sonucunda kesme işlemi gerçekleşmez. Boşluk çok küçük ise tel iş parçasına temas edecek ve telin kırılmasına veya kısa devre yapmasına neden olacaktır.

II.6.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)

SF servo ilerleme anlamına gelir. Bu tablanın maksimum ilerleme hızını ayarlar.

Normal Servo: Tablanın, aralık voltajı referans seviyeye yaklaşacak şekilde, çalışmasına sebep olur.

Sabit Hızda İlerleme: Tablanın, servo kontrol olmadan ayarlanan ilerleme hızında, çalışmasına sebep olur.

Doğrusal Ayar (SFD): Tabla çalışma verilerinin doğrudan bilgisayar tarafından alınmasını sağlar.

II.6.9. Tel Gerilmesi (WT)

WT otomatik bir tel çekici ile donatılan makinelerde tel gerilmesini ayarlar.

II.6.10. Tel İlerleme Hızı (WS)

Tel ilerleme hızının malzeme kalınlığına göre ayarlanması gerekmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça, tel kırılmasının önlenmesi ve tel düzgünlüğünün sağlanabilmesi için tel hızının artırılması gerekmektedir.

Telin hızı; boşluğu, erozyon hızını ve işlenmiş ürünün yüzeyini etkilememektedir. Fakat hızın azalması iş parçasında koniklik sorununa yol açmakta ve telin kırılma olasılığı artmaktadır [16].

II.7. TEL EROZYON TEZGAHINDA KESME PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Tel erozyonla işlemedeki en önemli performans ölçümleri, kesme doğruluğu, kesme hızları, iş parçası yüzey bitimi, tel eğilmeleri, tel kırılmaları ve tel gerginliğidir [7].

II.7.1. Kesme Doğruluğu

Tel erozyon ile işlenmiş parçanın geometrik açıdan hatalı olmasına sebep olan ana faktörler, tele etkileyen ve programlanmış yoldan sapmaya sebep olan çeşitli proses kuvvetleridir. Bu kuvvetler, erozyon mekanizmasına ait plazma tarafından oluşturulan ve gaz kabarcıklarından kaynaklanan basıncın ürettiği mekanik kuvvetleri, teli düzeltmek için yapılan eksenel kuvvetleri, dielektrik sıvı tarafından indüklenen hidrolik kuvvetleri, tele etkileyen elektrostatik kuvvetleri ve kıvılcım oluşumunun temelinde yatan elektrodinamik kuvvetleri içerir [14].

Tel erozyonla işleme (WEDM) uygulamalarında kesme doğruluğu için dikkat edilmesi gereken kurallar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Kesme işlemi boyunca, tel çapı ile iş parçası arasındaki kesme genişliğinin sabit tutulması,
- Telin aynı ekseninde olması,
- Tel kılavuzlarının eksenel dengesi,

- Tel titreşimlerinin minimize edilmesi

Ayrıca kesme doğruluğunda tel titreşimi de önemlidir. Tel titreşimi, tel kılavuzları ve tel tamamen dielektrik sıvı içinde olduğu müddetçe azalacaktır [14].

Tel erozyonla işleme (WEDM) prosesindeki asıl araştırmalardan biri de geometrik tamlığın gelişimidir. Geometrik tamlık, çekme gerilmesi sırasında tel üzerinde meydana gelen deformasyon ve işleme şartlarına (puls süresi, puls ara süresi, dielektrik sıvı ve açık devre voltajı) bağlıdır [13].

II.7.2. Kesme Hızları

Tel erozyon tezgahında kesme hızları, işlemden işleme değişiklik gösterir. Kesme hızı tamamen, malzemenin erime noktası ve elektriksel iletkenlikle belirlenir.

Son yıllarda kesme hızları hızlı bir şekilde artmıştır. Bu aynı zamanda tel teknolojisinin gelişmesinin de bir sonucudur. 1980'lerin başlarında saatte 3.200 mm² hızında çalışan bir tel erozyon tezgahı hızlı olarak nitelendirilmekteydi. Bugün normal bir atelyedeki tel erozyon tezgahı 19.000 mm² / saat hız gibi çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Araştırma-Geliştirme laboratuvarlarında bu oran 25.800 mm²/saat'e kadar ulaşmaktadır [11].

Kesme hızını etkileyen bazı faktörler aşağıdaki gibidir:

- Kesme voltajı,
- Amper,
- Darbe genişliği,
- Güç ve Kapasite
- İş parçasının malzemesi
- İş parçasının kalınlığı
- Tel elektrotun çapı ve fiziksel özellikleri
- Dielektrik sıvısının özgül direnci
- Akım boşalımı
- Puls süresi

Ho ve arkadaşları [14], D2 takım çeliği ve alüminyum için ideal kesme şartlarını aşağıdaki gibi özetlemişlerdir.

50 mm kalınlığında D2 takım çeliği için 300 mm² /min

150 mm kalınlığında alüminyum için 750 mm² /min.

II.7.3. Tel Eğilmeleri

Tel üzerinde oluşan kuvvetin etkisi tamamen farklı bileşenlere uygundur. Yani; elektrostatik kuvvet, elektromanyetik kuvvet, elektrodinamik kuvvet, dielektrik basınç ve gerilebilir kuvvettir. Telde oluşan eğilme ve titreşim her ikisi de deformasyon sonucu ortaya çıkar [13].

Tel eğilmeleri, kesme doğruluğunu etkileyen önemli bir etkidir. Tel, kendi üzerinde rol oynayan ve kıvılcım oluşumunu gerçekleştiren elektro dinamik kuvvetler, elektro statik kuvvetler ve boşluktaki hidrolik kuvvetlerin etkisi altında iki ekseninde çekilmeye maruz kalır ve çekilme neticesinde kendisine uygulanan gerginlik oranını kaybeder. Bundan dolayı, değişik profildeki parçaların, örneğin bir eğrinin etrafı kesilirken, telin geride kalması iş parçası üzerinde geometrik bir hata oluşturur. Bu hata 100 mikron kadar olabilmektedir. Telin geride kalması, keskin köşe kesiminde bu köşelerin yuvarlatılmasına yol açar, böylece geometrik iş parçasının istenen şekilde çıkmasını engeller.

Bu hataların çözümünün bulunması için çeşitli yollar denenmiştir. Bunlardan biri, geniş tel germe kuvvetine uygun olarak tel germe direncini arttırmak veya uygulanan darbe gücünü düşürmek için çeşitli darbe parametrelerinin bir kombinasyonu ile köşe kesiminde kesme hızını düşürmektir. Fakat, kesme hızının düşürülmesi ekonomik bir yaklaşım değildir.

II.7.4. Tel Kırılmaları

Tel elektrot malzemesinin özelliklerine bağlı olarak değişen ani enerji miktarı ancak belirli bir limit değeri aştığında kırılma olayı meydana gelir. Kıvılcım karakteristiği veya sıcaklık dağılımına ilaveten, telin mekanik dayanımı da tel kırılmasında önemli bir etkiye sahiptir [14].

Tel erozyonda yüksek kıvılcım frekansı, işleme hızını arttırmaktadır. Ancak bu durumda, güç yoğunluğuna bağlı olarak telin kırılma riski de artmaktadır. Uygulamalarda, tel kırılması olayı, kesme performansını, işleme doğruluğunu ve yüzey kalitesini büyük oranda düşürmektedir. Birçok kesme şartlarında, bu durumun önüne geçmek amacıyla kıvılcım ara süresi uzun tutulmaktadır [13,18]. Fakat bu durum, tel kırılmasını tamamen engelleyememekte ve işleme süresini de arttırmaktadır.

Puls ara süresinin kısa olması kıvılcımlar arasındaki sürenin kısalmasına yol açmakta ve telin hızı artmaktadır. Aynı zamanda tel ve iş parçası arasındaki akım şiddeti arasında da bir artma olmaktadır. Bu durumda telin kırılma olasılığını

arttırmaktadır. Tel kırılmasını önlemek için genelde puls ara süresi arttırılır bu da talaş kaldırmayı yavaşlatır.

II.7.5. Tel Gerginliği

Tel gerginliği işin zamanını ve doğruluğunu etkilediği için önemli bir faktördür. Bobinden gelen tel, çok yüksek ısı ve kesme basıncına maruz kaldığı için, bu basınç ve ısı kombinasyonu nedeniyle telde plastik deformasyon oluşur ve uzaması kaçınılmaz olur. Eğer telin gerginlik sistemi uzamayı telafi edecek kadar yeterli değilse, telde titreşim oluşur ve eğilme ile bükülme gibi hatalar meydana gelir [11].

Kesme operasyonunun başlayabilmesi için, tel elektrot iş parçası üzerindeki başlama deliğinden geçirilerek diğer makaraya sarılmakta ve tele gerginlik verilmektedir.

Tel gerginliği, parça yüzey hassasiyeti ve düzgünlüğünü büyük ölçüde etkilemektedir. Kalın iş parçalarında ve yüksek işleme hızında tel kırılmasını önlemek için tel gerginliği, parça kalınlığı ve kesimde istenen şartlara bağlı olarak ayarlanmaktadır.

Tel gerginliği, bobin üzerinde yazmasına karşın, telin ince ve esnek olmasından ötürü tel, patlama kuvveti, elektromanyetik kuvvet, elektrostatik kuvvet, vs gibi reaksiyon kuvvetlerine bağlı olarak deformasyona maruz kalır [19]. Tel gerginliği için tavsiye edilen ayarlar Tablo II.1’de gösterilmektedir.

Tablo II.1 Tel Gerginliği İçin Tavsiye Edilen Ayarlar

Tel çapı	Tel gerginliği (g)	
	Sert tel (FKH, HBZ-B)	Yumuşak tel (FKA, ABZ-B)
Ø 0.10	300 ile 400	150 ile 250
Ø 0.20	900 ile 1300	700 ile 1000
Ø 0.25	1200 ile 1700	900 ile 1500
Ø 0.30	1500 ile 2000	1200 ile 1700

Tavsiye edilen değerlerden daha düşük tel gerginliği ayarı telin kırılmasını önler.

II.8. TEL KARAKTERİSTİKLERİ

Tel erozyon yöntemi ile tek pasoda işleme mümkündür. Maliyetin azalmasında bu çok önemli bir faktördür. Teorik olarak her iletken materyal, tel elektrotu olarak kullanılabilir. Fakat pratikte kullanılan birkaç tür mevcuttur. Tel elektrotunun sahip olması gereken bazı özellikler aşağıdaki gibidir:

- Kırılmaya karşı yüksek kırılma dayanımı
- Boşluğa ulaşabilecek maksimum enerjiyi ulaştırmak için yüksek elektriksel iletkenlik
- Aşındırılan parçacıkların, etkili bir şekilde taşınması için düşük buharlaşma enerjisine sahip olmalıdır.

En yaygın olarak pirinç tel kullanılır. Kompozit ve kaplanmış alternatif teller kesme kriterleri için daha iyidirler. Yüksek kesme hızlarında, üç bileşenli kompozitleri (çelik, bakır ve pirinç) kullanarak başarıya ulaşılabilir. Bu tellerde çelik; kırılma dayanıklılığını sağlayan özü, bakır; elektrik iletkenliğini artıran ara tabakayı ve pirinç; sirkülasyon sağlayan dış tabakayı oluşturur. Sirkülasyon tel ile iş parçası arasındaki mesafe ile ilişkilidir. Boşluk ne kadar geniş olursa, sirkülasyon işlemi o kadar kolay olur.

Teller aşağıdaki gibi üç grupta incelenebilir:

- Tek bileşenli teller; bakır, pirinç, pirinç ve molibden alaşımları
- İnce tabaka kompozitleri; çinko kaplı pirinç, çinko kaplı bakır ve molibden grafitleri
- Kalın tabaka kompozitleri; pirinç üstüne pirinç kaplı ve bakır üstüne pirinç kaplı teller

Tel materyal grupları Tablo II.2’de verilmiştir.

Tablo II.2 Tel Metal Gruplarının Karakteristikleri [11]

Tel tipi	Gerilme Kuvveti Psi (MPa)	Kırılma Tokluğu	Elektriksel İletkenlik (% IACS)	Püskürtme Kapasitesi
Tek Bileşen				
Bakır	34000 (1) 234 55000 (2) 379	Düşük	100	Yetersiz
Pirinç	52000 (2) 359 128000 (2) 883	Orta	27	İyi
Pirinç Alaşımı (Somsal, SC-2 TAF)	160000 (2) 1103	Orta -	27 -	İyi
Molibden	280000 (2) 1931	Orta +	32 +	Yetersiz
İnce Tabaka Kompozitler				
Çinko Kaplama Pirinç (Cobra A)	70000 (1) 483 13000 (2) 896	Orta	27	Arttırıcı (4)
Çinko Kaplama Pirinç (Cobra B)	60000 (2) 414	Düşük	65	Arttırıcı (4)
Moli Grafit (Mo21)	280000 (2) 1931	Orta +	32	Arttırıcı (4)
Kalın Tabaka Kompozitler				
Bakır Yüzeyli Pirinç	70000 (2) 483	Düşük	84	İyi
Pirinç Yüzeyli Pirinç	110000 (2)	Orta +	32	İyi
Pirinç/Bakır/Çelik	130000 (2) 8896	Yüksek	45	İyi
(1) Yumuşak (2) Sert (3) Uluslararası Bakır Standartları (4) Yalnızca Yüzey				

II.9. TEL SEÇİMİ

II.9.1. İş Parçası Kalınlığına Göre Tel Seçimi

İş parçası kalınlığına bağlı olarak uygun tel seçmek gereklidir. 0.2mm çapında tel kullanarak 100 mm’ den daha fazla kalınlıkta bir iş parçası kesilirse, yavaş besleme oranı yüzünden çok fazla zaman ister. 0.3 mm çapında tel kullanılarak yaklaşık 10 mm kalınlıkta bir iş parçası kesilirse, ekonomik değildir. İş parçası kalınlığı dikkate alınarak tel seçimi yapılır. Tel çapı ve iş parçası kalınlığı arasındaki

ilişki Tablo II.3’de görülmektedir.

Tablo II.3 Malzeme kalınlığına göre tavsiye edilen tel kalınlıkları

İş parçası Kalınlığı (mm)	Tel Çapı (mm)
50 mm'e kadar	0,1
50-100	0,2
150-200	0,25
200-300	0,3

II.9.2. Köşe Kesme ve Köşe Radyüsüne Göre Tel Seçimi

Bir tel elektro deşarj işlemi, köşe radyüslerin yarıçapı yaklaşık 0 (sıfır) dışbükey köşeleri yuvarlatır. Bununla birlikte radyüslerinin yarıçapı tel yarıçapından daha büyük olur. İşlenmiş oluk genişliği, deşarj aralıklardan dolayı tel çapından daha büyüktür (Şekil II.7). İşlenilen köşe radyüslerin yarıçapı işlenmiş oluğun yarı genişliğinden daha büyük içbükey köşeleri yuvarlatır. İçbükey köşe radyüs limit tablosu Tablo II.14.’de görülmektedir. İnce tel kullanıldığı zaman, içbükey köşe radyüsleri limiti küçük olur. Bununla birlikte, tele geçen maksimum elektrik akımı azaldığı için kesme hızı ve kesilen plakaların maksimum kalınlığı azalır.

Tablo II.4 İçbükey Köşe Radyüs Limitleri

Tel çapı	Yalnız ilk kesim için	Son kesim
Ø 0.10	R0.1 yukarı	R0.07’den 0.1’ye kadar
Ø 0.20	R0.2 yukarı	R0.11’den 0.2’ye kadar
Ø 0.25	R0.25 yukarı	R0.14’den 0.25’ye kadar
Ø 0.30	R0.3 yukarı	R0.17’den 0.3’ye kadar

II.10. LİTERATÜR BİLGİLERİNİN İRDELENMESİ

Tosun ve ekibi [7], tel hızı, dielektrik akışkan basıncı, açık devre voltajı ve çeşitli puls süreleri ile iş parçası yüzey pürüzlülüğünün değişimini deneysel olarak

araştırmışlardır. İş parçası malzemesi olarak 50 mm çapında ve 10 mm kalınlığında SAE 4140 çelik (DIN42CrMo4) malzeme ve tel elektrot olarak 0.25 mm çapında 900 N/mm² gerilme basıncı olan CuZn37 pirinç tel kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde bu parametrelerin etkisi istatistiksel olarak değerlendirilerek ve yüzey pürüzlülüğü etkisi faktörlerinin önem düzeyi değişimin analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir.

Tosun ve ekibi [17], tel erozyon tezgahında talaş kaldırma ve kesme genişliğindeki işleme parametrelerinin optimizasyonu ve etkileri üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Deney malzemesi olarak 200 mm x 140mm x 10 mm ebatlarında AISI 4140 çelik kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda dielektrik sıvı basıncı, tel hızı, açık devre voltajı ve puls süresinin işlemeye olan etkileri araştırılmıştır. İşleme parametrelerinin ayarlarına Taguchi yöntemi kullanılarak karar verilmiştir.

Hargrove ve Ding [8], iş parçası yüzeyi üzerindeki sıcaklıktan etkilenmiş kalınlıkların puls süresi ve boşalım voltajını incelemişlerdir. İşlenmiş iş parçasının yüzeyi üzerindeki tabaka kalınlığına zarar veren puls süresi ve boşalım voltajı gibi WEDM parametrelerini araştırmak için kesme malzemesi olarak düşük karbonlu çelik (AISI 4140) kullanılmıştır.

Spedding ve Wang [15], kesme hızı ve iş parçası yüzeyinin dalgalılığı ve pürüzlülüğünün karakterize edilmesi için yapay sinir ağları kullanarak işleme parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışma yapmışlardır.

Scott ve arkadaşları [20], WEDM için ideal kontrol parametreleri kombinasyonunu belirlemek üzere değişken-dizayn metodunu kullanmışlardır. İşleme performansı talaş kaldırma hızı ile ölçülerek sonuçlar yüzey kalitesi ile ilişkilendirilmiştir. Toplamda 729 adet deney gerçekleştirilmiş olup, 32 işleme ayarının daha iyi yüzey kalitesi ve daha yüksek talaş kaldırma hızı sağladığı belirlenmiştir. Değişken analizine göre (ANOVA), deşarj akımı, puls süresi ve puls frekansı hem talaş kaldırma hızı için hem de yüzey pürüzlülüğü için önemli kontrol faktörleri olduğu bulunmuştur. En az etkiye sahip olan parametreler ise tel gerginliği, tel hızı ve dielektrik sıvı olarak belirlenmiştir.

Liao ve arkadaşları [21], parametre ayarlarını belirlemek amacıyla bir yaklaşım önermişlerdir. Taguchi kalite dizayn ve değişim analiz metoduna göre işleme performansını etkileyen önemli faktörler (talaş kaldırma hızı, boşluk genişliği, yüzey pürüzlülüğü, kıvılcım sıklığı, ortalama boşluk voltajı) belirlenmiştir. İş parçası

malzemesi olarak SKD11 alaşım çeliği ve tel elektrot olarak 0.25 mm çapında pirinç tel kullanılmıştır. İş parçasının yüksekliliği 30 mm ve kesme boyu 20 mm'dir. Bu çalışmada [21], tel erozyon tezgahları için ideal işleme parametrelerinin belirlenmesi için ileri sürülen metodolojinin sadece zaman ve maliyet tasarrufu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda işleme parametrelerinin belirlenmesinde verim artışı ve kusursuzluk sağlayacağını kanıtlamışlardır.

Konda ve arkadaşları [22] yaptıkları çalışmada, WEDM performansını etkileyen çeşitli faktörleri (olası faktörlerde dahil olmak üzere) 5 ana kategoride sınıflandırmıştır. Bunlar, iş parçası malzemesi ve dielektrik sıvının farklı özellikleri, işleme karakteristikleri, ayarlanabilir işleme parametreleri ve bileşen geometrisidir. Proses tasarımı ve geliştirilmesi esnasında değişkenlerin olası etkilerini optimize etmek ve bu konu üzerinde çalışmak için DOE tekniğini de uygulamışlardır ve deney sonuçlarını (S/N) analizi yaparak doğrulamışlardır.

Özek ve özel [23] çalışmalarında, deney malzemesi olarak dişli çarkların yapımında kullanılan 8620 elik ve tel elektrot olarak 0.25 mm çapında pirinç tel kullanmışlardır. Numuneler 10x10, 20x20 ve 30x30 mm² olarak üç farklı boyutta hazırlanmıştır. İki farklı kesme moduna göre deney yapılmıştır. Kesme işleminden önce ve sonra numuneler üzerinde ölçüm yapılarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Deney sonucunda ısıl işlem uygulanmayan ve sertleştirilen numunelerin her iki kesme modunda da, kesme alanı büyüdükçe sertlik ve talaş kaldırma hızının düşmekte olduğu ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı saptanmıştır.

Tarng ve arkadaşları [24], kesme hızı ve yüzey kalitesi tahminindeki en kritik parametrelerin elektrik kapasitans, tabla hızı, servo referans voltajı, açık devre voltajı, puls süresi ve puls ara süresi olduğunu bir sinirsel aę sistemi kullanarak saptamışlardır.

Huang ve arkadaşları [25], işleme parametreleri ve ince işlemedeki işlem sayılarının işlenmiş iş parçası yüzeyi üzerindeki beyaz tabakanın derinliğine ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Huang ve Liao [26], grey bağıntısı ve sinyal başına gürültü oranı (S/N) analizini kullanmışlardır ve sonuçların benzer olduğunu görmüşlerdir. Tabla ilerleme hızı ve puls süresinin talaş kaldırma hızı üzerine olan etkisini onaylamışlardır.

Kunieda ve arkadaşları [27], ince operasyonları iyileştirmek için kuru WEDM yönteminin yapılabilirliğini araştırdılar. Bu yöntemde dielektrik sıvı yerine bir gaz atmosferi kullanmışlardır.

Kinoshita ve arkadaşları [18] çalışmalarında, tel kopmadan 5-40 ms önce boşluk voltajında hızla artan puls frekansını gözlemlemiştir. Bunun üzerine telin kopmasını engellemek için görüntüleme ve kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Bu sayede tel kopmadan önce puls jeneratörü ve servo sistemi durduracak bir sistem tasarlamışlardır.

Rajurkar ve Wang [28] optimum tezgah ayarları için kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi bir model yardımıyla belirleyerek tel kırılmasını analiz etmişlerdir.

Sanchez ve arkadaşları [13] çalışmalarında, köşe kesiminde kesme hızı sınırlarının doğruluğa olan etkisini araştırmışlardır. Deneyler ONA Prima E-250 tel erozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak AISI D2 (ISO 160CrMoV12) çelik ve tel elektrot olarak 0,25 mm pirinç tel kullanılmıştır.

D.K. Aspinwal ve arkadaşları Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemesi iki farklı tezgahta işlenmiş ve kalite kriteri olarak yüzey pürüzlülüğü ve oluşan yeni tabaka kalınlığı olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma micro yapı, mikro sertlik açısından da incelenmiş ve önemli bir değişik gözlemlenmemiştir [29].

R. Ramakrishnan, L. Karunamoorthy, yapay sinir ağı modeli ile en iyi işleme parametrelerin seçimini açıklamaya çalışmıştır. Kalite karakteristiği olarak MRR talaş Kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü seçilmiştir. İş parçası inconel 718 olup tel çapı 0,25 mm dir. Deney reçetesi Taguchi nin L9 dizisine göre tasarlanmıştır. Kontrol faktörleri olarak puls Süresi, puls bekleme süresi, tel ilerleme hızı ve akım şiddeti olarak belirlenmiştir [30].

Shreyes N. Melkotea, bu çalışmada geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç olan Inconel 718 'in kesimden sonra oluşan tabaka kalınlığına göre karar verilecek ana makine parametrelerinin deneysel çalışmalarla belirlenmesi'ne çalışılmışlardır. Çalışmaların neticesinde, tabaka kalınlığının , kıvılcım şiddeti, akım şiddeti ve pulls süresi ile birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen ortalama tabaka kalınlıkları 5 ila 9 mikron arasındadır [31].

BÖLÜM III

TEZ ÇALIŞMALARI

III.1. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Bu çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deney reçetesi hazırlanırken Taguchi deney tasarım yöntemi uygulanmıştır. İkinci bölümde ise deneysel çalışmada elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Değerlendirme ve optimizasyon yöntemi olarak ise Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada, kesilen parçaların boyut ölçümünü gerçekleştirmek için iki boyutlu koordinat ölçüm yöntemi (profil projeksiyon) kullanılmıştır. Bu yöntemde kesilen parça optik camda 20 kat büyütülerek 0,001 mm hassasiyetinde ölçülmüştür.

III.2. MALZEME ve MATERYAL

III.2.1. Deneyde kullanılan İş parçası İNCONEL 718 ve Özellikleri

Inconel 718 yüksek mukavemetli, korozyon dirençli ve 423 - 1300 F° sıcaklıkları arasında kullanılan nikel - krom süper alaşımıdır. Inconel 718 iyi çekme, yorulma, sürünme ve kopma gerilimine sahiptir. Bundan dolayı geniş bir uygulama alanında kullanılır. Süper alaşımlar; gaz türbini, deniz altı, uzay araçları, roket motorları, nükleer reaktörler, Petro kimyasal cihazlar, sıcak takımlar ve cam endüstrisi alanlarında kullanılırlar. Çünkü bu bölümler yüksek sıcaklık gerilimi ve yüksek korozyon direnci gerektirirler. Inconel 718 uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan ticari süper alaşımıdır. Bu malzemenin tipik bileşim sınırları Tablo III.1’de verilmiştir .Malzemeye ait bazı fiziksel sabitler, modül bilgileri ve ısıl özellikleri Tablo III.2’de verilmiştir. Tablodaki değerler deney numunesinin koşuluna ve bileşimine bağlı olarak çok az değişmektedir. Bu değerler tipik değerler olmaktadır .

Tablo III.I. Inconel 718'in kimyasal bileşim sınırları,

Nikel	50.00–55.00
Krom	17.00–21.00
Demir	Kalan
Niyobyum	4.75–5.50
Molibden	2.80–3.30
Titanyum	0.65–1.15
Alüminyum	0.20–0.80
Kobalt	1.00 en yüksek
Karbon	0.08 en yüksek
Manganez	0.35 en yüksek
Silisyum	0.35 en yüksek
Fosfor	0.015 en yüksek
Sülfür	0.015 en yüksek
Bor	0.006 en yüksek
Bakır	0.30 en yüksek

Tablo III.2. Inconel 718'in kimyasal ve fiziksel özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	8.193
Çözündürme	8.221
Çözündürme ve yaşlanma	1260–1336
Ergime aralığı (°C)	435
Özgül ısı (21 °C , J/kg °C)	1,0011
Manyetik geçirgenlik	
Elastikiyet modülü (Gpa)	
21.111 °C'de	199.897
1093.333 °C'de	98.570
Isıl iletkenlik (kcal/hm °C)	
21.111 °C'de	9.80
1093.333 °C'de	24,7
Elektriksel öz direnç (ohm/circ mil/ft)	
21.111 °C'de	725
1093.333 °C'de	796
Çekme dayanımı (Mpa)	
Oda sıcaklığında	1240,8–1275,2
648.889 °C'de	965–999
Akma dayanımı (Mpa)	
Oda sıcaklığında	1034
648.889 °C'de	792,7–965

Inconel 718 çözündürme ve yaşlanma uygulamalarıyla belirlenmiş bir alaşımdır. Alaşım ikincil fazların metal matris içerisinde çökertilmesiyle sertleştirilir. Nikelin ikincil fazlarının (alüminyum, titanyum, niyobyum) çökmesine, 593 C° ve 815 C° sıcaklık değişimindeki ısı işlemi sebep olur. Isıl işlem sırasında nikel matrisindeki iç metalik bileşenlerin (Ni₃Nb) çökmesiyle kuvvetlendirme mekanizmaları gerçekleştirilir. Eğer ikincil fazlar zamanından önce meydana gelirse, doğru olarak çökmeyecektir ve alaşımın mukavemeti gerçekleştirilemeyecektir. Alaşımın ikincil fazlarından niyobyuma diğer alternatifler olsa da niyobyumun benzersiz olduğu görülmüştür. Çünkü niyobyum sayesinde yaşlanma gerilmesi kırıkları gerçekleşmemektedir ve kaynak sırasında yavaş yaşlanma sağlamaktadır. Bundan dolayı çözündürme ısı işlemi çok dikkatli yapılmalıdır. Alaşımın metalik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde çözündürme ve yaşlanma uygulamalarının çok büyük etkisi vardır. Farklı ısı işlem uygulamalarıyla farklı özellikler elde edilir. Alaşıma uygulanan ısı işlemin tayininde, alaşımın kullanıldığı yerdeki çalışma sıcaklığı en büyük faktördür. Çünkü ısı işlem uygulanmış malzemenin dayanımına en büyük etki eden faktör yaşlanma sıcaklığıdır. Eğer malzeme bu sıcaklıklarda kullanılırsa aşırı yaşlanır ve dayanımını

kısa sürede kaybeder. Inconel 718 için genellikle iki ısıl işlem uygulanmaktadır. Bu iki işlem arasındaki farklılık çözündürme sıcaklıkları, yaşlanma sıcaklık ve bekleme sürelerindedir. Birinci ısıl işlemimizde alaşıma 926–1010 C° arasında çözündürme uygulanır ve takibinde 718 C°'ye su ile hızla soğutulur ve bu sıcaklıkta 8 saat bekledikten sonra 621 C°'de 18 saat tutularak yaşlanma işlemi uygulanır ve daha sonra hava ile soğutulur. ikinci ısıl işlemde alaşıma 1037–1065 C° arasında çözündürme uygulanır ve takibinde 760 C°'ye su ile hızla soğutulur ve bu sıcaklıkta 10 saat bekledikten sonra 648 C°'de 20 saat tutularak yaşlanma işlemi uygulanır ve daha sonra hava ile soğutulur [32].



Şekil III.1 Deneylerde Kullanılan Inconel 718

Tablo III.3. Deneyde kullanılan 2mm'lik inconel 718'in kimyasal analizi

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Co	Ta	B	Cu	Fe
0.048	-	0.22	0.008	0.022	17.9	54.4	2.8	4.54	0.7	0.6	-	-	-	-	18.65

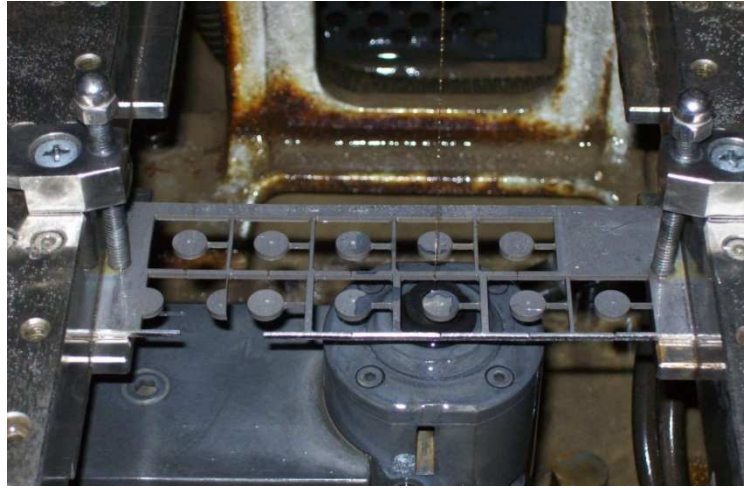
III.2.2. CNC Tel Erozyon Tezgahı

Deney düzeneğinde kullanılan CNC tel erozyon tezgahı; beş eksenli lineer ve dairesel interpolasyon yapabilen, metrik ve inç birimlerinde ISO format programlama yapabilmektedir.

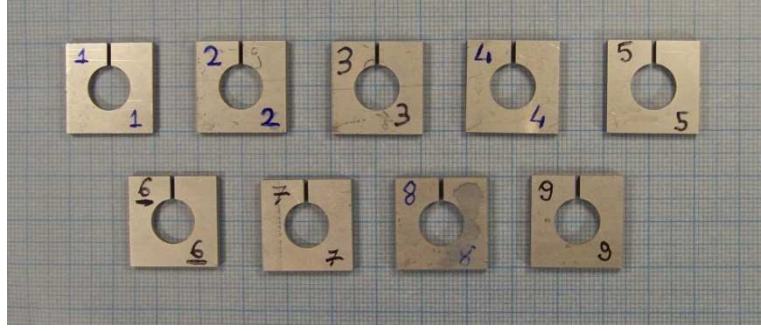


Şekil III.2 Sodick A320D/EX21 Model CNC Tel Erozyon Tezgahı

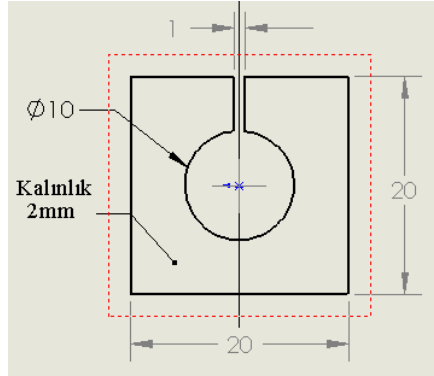
Tel dikliği ayarlanmasında tezgahın master parçası kullanılmıştır. Telin dikliği ayarlandıktan sonra kesilecek parça özel bağlama aparatları yardımı ile tezgah tablasına rijit bir biçimde bağlanmıştır (Şekil III.3). Mastercam programında çizilen teknik resim ile takım yolu çıkarılmıştır. Program kodları bir disket ile tezgaha yüklenerek kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil III.3 Kesim sonrası inconel 718



Şekil III.4 Kesilen deney numuneleri



Şekil III.5 Kesilen Parçaların Teknik Resimi

Deneyde tel erozyon tezgahında kesilen deney numuneleri ve İş parçasının bağlanma şekli Şekil III.3 ve Şekil III.4’de gösterilmektedir.

III.2.3. Deneyde Kullanılan Tel Elektrot

0.25 mm çapında Sumitomodenko SBG 25H tel kullanılmıştır. Tablo III.4’de telin özellikleri gösterilmektedir.

Tablo III.4 Telin Özellikleri

Tel Çapı	0.25 mm
Kopma Mukavemeti	900 N/mm ²

III.2.4. Deneylerde kullanılan Profil Projeksiyon Cihazı



Şekil III.6 Deneyde kullanılan iki boyutlu profil projeksiyon ölçüm cihazı

Profil Projeksiyon cihazına ait teknik özellikler Tablo III.5’de gösterilmektedir.

Tablo III.5 Profil Projeksiyon Cihazına Ait Teknik Özellikler

Teknik Özellikler	
Tabla Ölçüsü (mm)	300
Maks.Tabla Hareketleri (mm)	X : 200 / Y : 100 / Z : 90
Cam Ölçüsü (mm)	225 x 120
X – Y Çözünürlüğü	0.001 mm
Ekran Çapı	315 mm
Okuma Aralığı	0-360 Derece
Derece Hassasiyeti	0.01 Derece
Büyütme Oranı	10 – 20 – 50 Kat

Deney parçası 20 kat büyütülerek optik cam’a yansıtılmıştır.Buradan optik üzerinde hareket edebilen düşey ve yatay çizgiler vasıtasıyla parçanın doğrusal ve dairesel ölçüleri 0,001 çözünürlüğünde ölçülmüştür (Şekil III.7).



Şekil III.7 Deney Parçalarının Ölçülmesi

III.3. METOT

III.3.1 Taguchi İle Deney Tasarımı

Düşük maliyetli, yüksek kalitede ve güvenilir ürünler üretmek veya hizmet sunmak bugünün global ekonomisinde hayatta kalabilmenin anahtarıdır. Bir çok kalite uzmanı bunu sağlamanın en iyi yolunun, ürün tasarımına odaklanmak olduğunu belirtmektedir. Bu da aslında kaliteyi kontrol ile sağlamak yerine tasarım aşamasında sağlamanın daha kolay olacağını göstermektedir[3]. Kaliteyi tasarlamak, üretilmiş ürünü muayene ile iyi veya kötü olarak ayırmaktan ve kötü olarak ayrılmış ürünleri yeniden iyileştirip iyi ürün haline getirmekten çok daha ucuzdur. Bundan dolayı yeni felsefe düşük maliyetli, ancak yüksek kaliteli ürünleri üretebilmek için teknolojiyi ve istatistiki metotları tasarım aşamasında etkin bir şekilde kullanmak olmalıdır.

Dr. Genichi Taguchi kaliteyi geliştirmek için temeli deney tasarımına dayanan, Taguchi yöntemi olarak bilinen deney tasarım metodunu geliştirmiştir. Bu yöntem, kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemine, robust (sağlam) tasarım ve ortogonal dizinler gibi kavramları dahil edilmesiyle oluşturulmuştur. Ortogonal diziler Taguchi tarafından aşağıdaki gibi kodlanmıştır [33].

$$LX(Y^Z) \quad (III.1)$$

Bu kodlamada;

L: Latin kare tabanlı anlamındadır.

X: Tasarımdaki deney sayısı,

Y: Deneydeki seviye sayısı,

Z: Deneyde kullanılabilecek max. faktör sayısı.

Tablo III.6 Ortogonal Dizin Tipleri

L4(2 ³)	L8(2 ⁷)	L16(4 ⁵)	L16(4 ¹ x2 ¹²)
L12(2 ¹¹)	L20(2 ¹⁹)	L64(4 ²¹)	L16(4 ³ x2 ⁶)
L16(2 ¹⁵)	L32(2 ³¹)	L8(4 ¹ x2 ⁴)	L32(4 ⁹ x2 ⁴)
L9(34)	L12(3 ¹ x2 ⁴)	L25(5 ⁶)	L128(4 ⁴¹ x2 ⁴)
L18(3 ⁷ x2 ¹)	L18(6 ¹ x3 ⁶)	L50(5 ¹⁰ x10 ¹)	L50(5 ¹¹ x2 ¹)
L24(3 ¹ x2 ¹⁶)	L24(3 ¹ x4 ² x2 ¹³)	L49(7 ⁸)	L125(5 ³¹)
L27(3 ¹³)	L36(2 ¹ x6 ² x3 ⁵)	L98(7 ¹⁴ x14 ¹)	L98(7 ¹⁵ x2 ¹)
L36(3 ³ x6 ³)	L54(3 ²⁵ x2 ¹)	L64(8 ⁹)	L27(9x3 ⁹)
L54(6 ³ x3 ²⁴)	L81(3 ⁴⁰)	L16(8x2 ⁸)	L81(9 ¹⁰)
L81(3 ⁴ x9 ¹)		L121(11 ¹²)	L169(13 ¹⁴)

Taguchi yönteminin asıl amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Bunu sağlamak için, bu değişkenliğe sebep olan kontrol edilebilir faktörler tanımlanmalı ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisinin en az olacağı ürün ve proses geliştirme süreci tasarlanmalıdır [16].

Taguchi yöntemlerinde yapılacak işlemler aşağıdaki gibi 10 başlık altında toplanabilir [33].

1. Problemin belirlenmesi.
2. Performans karakteristiğinin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi.
3. Performans karakteristiğini etkileyen faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesi.
4. Faktörlerin kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler olarak ayrılması.
5. Etkileşimlerin belirlenmesi.
6. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi ve faktörlerin bu dizinlere atanması.
7. Performans istatistiklerinin belirlenmesi.
8. Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi.
9. Verilerin analizi.
10. Doğrulama deneyinin yapılması.

Profesör Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla , deney tasarımımda performans kriteri olarak kullanılmak üzere,sinya/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü (S/G) oranı tanımlanmıştır.

En küçük en iyi durumunda kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal gürültü oranı şöyle tanımlanır ;

$$S / N = -10x \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (III.2)$$

Denklemdaki n=deney şartlarında yapılan deney sayısı ve y ise ölçülen karakteristiği ifade etmektedir.

En büyük en iyi durumunda Y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal gürültü oranı aşağıdaki gibi tanımlanır ;

$$\frac{S}{N} = -10x \log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (III.3)$$

III.3.2. Deney Tasarımları

Daha az deney ile daha geniş kapsamlı sonuçlara ulaşmak için Taguchi tekniğinden istifade edilmiştir. Bu sayede zaman ve maliyetten kazanım sağlanmıştır.

Deneyisel çalışmalarla işleme süresi, boyutsal hata ve yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi üretimde önemli bir husustur. Üç kalite karakteristiğinde ölçüm sonuçlarının en küçük olması için Taguchinin en küçük en iyi formülasyonu kullanılarak sinyal ve gürültü oranları hesaplanmıştır.

Bu çalışmadaki hedef Inconel 718 süper alaşım malzemesinin Tel Erozyonda işlenmesi neticesinde, maliyet için önemli olan süre, kalite için önemli olan boyutsal hata ve yüzey pürüzlülük değerlerini minimize etmektir.

Bu deneyisel çalışmada işleme parametreleri olarak, tabla ilerleme hızı (SF), puls süresi ve puls ara süresi değişken olarak kullanılmıştır. Puls ara süresi ayarı (MA=15), ana güç kaynağı maksimum akımı (IP=17), yardımcı güç kaynağı devresi (HP=1), ana güç kaynağı voltajı (V=3), servo referans voltajı (SV=02), tel ilerleme

hızı (WS=2), tel gerginliği (WT=4) deney süresince sabit tutulmuştur. İşleme parametrelerine ait bu seviyeler Tablo III.7’de gösterilmiştir.

Tablo III.7 İşleme Parametrelerinin Tanımlanması

İşleme Parametreleri	Fonksiyon	Seçme Alanı
ON	Puls süresi	00-09, 10-19
OFF	Puls ara süresi	00-31
IP	Ana güç kaynağı max akımı	00-17
HP	Yardımcı güç kaynağı devresi	H: 0-9 P: 0-4
MA	Puls ara süresi ayarı	M: 0-9 A: 0-9
SV	Servo referans voltajı	00-31
V	Ana güç kaynağı voltajı	00-03
SF	Servo hızı	0-9
C	Elektrotlar arası kapasitör devresi	00-04
WT	Tel gerilmesi	00-15(elle seçme)
WS	Tel hızı	00-12(elle seçme)
WP	Kullanılmaz	
WC	Kullanılmaz	

III.3.2.1. Deneylerde çalışılacak işleme parametrelerinin tayini

İdeal parametrelerin ve düzey değerlerinin belirlenmesi için Inconel 718 malzemesi ile ilgili literatürde kullanılan parametreler incelendikten sonra birkaç deneme kesimi yapılmış , elde edilen ideal parametrelerin alt ve üst limitleri seçilerek işleme parametreleri belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılacak işleme parametreleri ve seviyeleri Tablo III.8’de sunulmuştur.

Tablo III.8 Deneyde Kullanılan İşleme Parametreleri ve Seviyeleri

Seviye	Puls Süresi (A) (μ s)	Puls Ara Süresi (B) (μ s)	SF (C) (mm/min)
1	1	11	2
2	4	14	4
3	7	17	6

SF için kullanılan seviyelere ait tabla ilerleme hızı değerleri Tablo III.9’da gösterilmektedir.

Tablo III.9 Tabla İlerleme Hızı Değerleri

SF	Tabla İlerleme Hızı (mm/min)
0	40.0
1	30.0
2	20.0
3	15.0
4	10.0
5	7.5
6	5.0
7	4.0
8	3.0
9	2.0

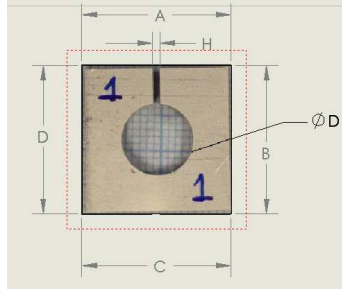
Tablo III.8’deki faktörler ve seviyeler göz önünde bulundurularak, deneysel çalışma için en uygun tasarım olarak 9 deneyli Taguchi L_9 ortogonal dizin seçilmiştir. Tablo III.10’da Minitab 14 istatistik yazılımı yardımı ile belirlenen L_9 ’luk deney reçetesi görülmektedir.

Tablo III.10 Taguchi L₉ Deney Tasarımı

Deney No	Değişkenler	(A) Puls Süresi (μs)	(B) Puls Ara Süresi (μs)	(C) SF (C) (mm/min)
1	A ₁ B ₁ C ₁	1	11	2
2	A ₁ B ₂ C ₂	1	14	4
3	A ₁ B ₃ C ₃	1	17	6
4	A ₂ B ₁ C ₂	4	11	4
5	A ₂ B ₂ C ₃	4	14	6
6	A ₂ B ₃ C ₁	4	17	2
7	A ₃ B ₁ C ₃	7	11	6
8	A ₃ B ₂ C ₁	7	14	2
9	A ₃ B ₃ C ₂	7	17	4

III.3.3. Ölçüm Sonuçları

Yapılan ölçümler sonucu elde edilen boyutsal hata , işleme süreleri ve yüzey pürüzlülük değerleri Tablo III.11’de verilmiştir.

**Şekil III.8** Deneylerde ölçülen ABCD yüzeyleri

Tablo III.11 Deneylerden Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

Deney No	Değişkenler	Boyutsal Hata (AC) (mm)	Boyutsal Hata (BD) (mm)	Boyutsal Hata (H) (mm)	Boyutsal Hata (ØD) (mm)	İşleme Süresi (Dakika)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,056	0,050	0,069	0,069	35,416	2,160
2	A ₁ B ₂ C ₂	0,056	0,044	0,065	0,071	27,650	2,130
3	A ₁ B ₃ C ₃	0,060	0,040	0,090	0,090	27,083	1,967
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,053	0,030	0,049	0,051	14,210	2,690
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,042	0,026	0,066	0,066	25,550	2,947
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,031	0,046	0,054	0,054	16,750	2,897
7	A ₃ B ₁ C ₃	0,024	0,007	0,044	0,044	25,083	3,860
8	A ₃ B ₂ C ₁	0,035	0,002	0,038	0,025	12,125	3,733
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,020	0,023	0,030	0,035	12,950	3,907

III.3.4. Sonuçların analiz edilmesi ve değerlendirme

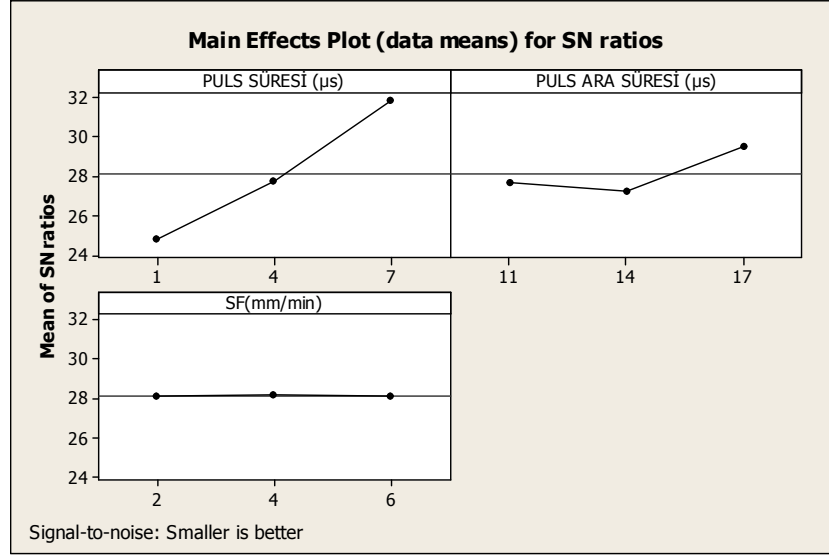
III.3.4.1. AC boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.12’de her bir kesilen parça için ölçülen AC boyutsal hata değerleri üzerinden denklem III.2 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.12 Boyutsal Hata(AC) Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	Boyutsal Hata (AC) (mm)	S/N (dB)
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,056	25,0362
2	A ₁ B ₂ C ₂	0,056	25,0362
3	A ₁ B ₃ C ₃	0,060	24,4370
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,053	25,5145
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,042	27,5350
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,031	30,1728
7	A ₃ B ₁ C ₃	0,024	32,3958
8	A ₃ B ₂ C ₁	0,035	29,1186
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,020	33,9794

Deneyisel sonuçlar neticesinde ölçülen hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.9’da boyutsal hata (AC) değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafiksel gösterimi verilmektedir.



Şekil III.9 Boyutsal hata(AC) için kontrol faktörlerinin S/N oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre minimum hata değeri, puls süresinin üçüncü seviyesinde (7), puls ara süresinin üçüncü seviyesinde (17) ve SF’nin ikinci seviyesinde (4) elde edilmiştir. Aşağıdaki Tablo III.13’de ise S/N oranları tablo olarak verilmiştir.

Tablo III.13 Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (AC) Değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	24,84	27,65	28,11
2	27,74	28,23	28,18
3	31,83	29,53	28,12
Rank	1	2	3

Deneyisel sonuçlarda ölçülen boyutsal hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerlere ait parametreler deneylerde mevcut olduğundan doğrulama deneyi yapılmamıştır.

Deneydeki kontrol faktörleri ile boyutsal hata (AC) arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 84 olarak hesaplanmıştır. Bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma için elde edilen AC boyutsal hata denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Boyutsal Hata (AC)} = 0,0783 - 0,00517 T_{\text{on}} - 0,00122 T_{\text{off}} + 0,00033 \text{ SF} + \varepsilon \quad (\text{III.4})$$

$$R^2 = \% 84$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

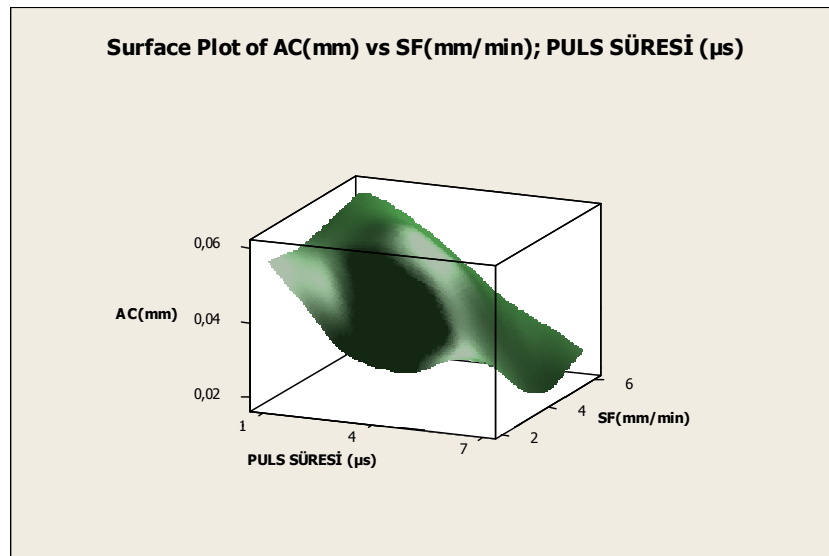
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ε : hatayı ifade etmektedir.

İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 % 84 olduğu için kabul edilebilirliği yüksektir.

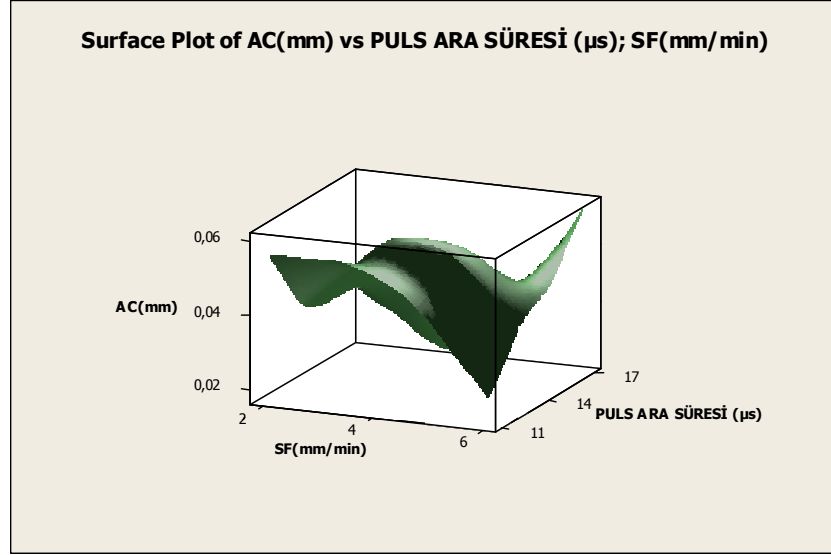
Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin Boyutsal Hata (AC) değişimine etkisi Şekil III.10'da görülmektedir.



Şekil III.10 Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (AC) değişimine etkisi

Şekil III.11’de görüldüğü gibi, Boyutsal Hata değişimine etki eden en önemli faktörün puls süresi olduğu görülmektedir. Puls Süresi arttıkça boyutsal hata azalmaktadır.

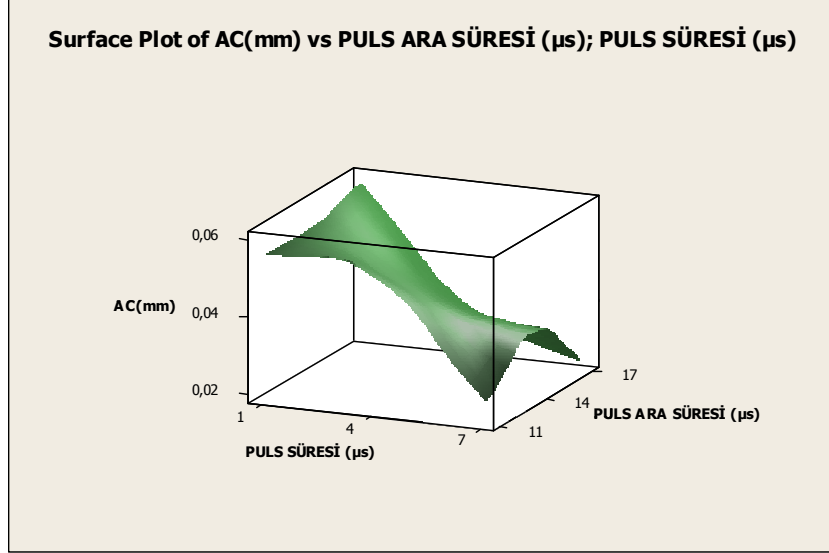
Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (AC) değişimine etkisi Şekil III.11’de görülmektedir.



Şekil III.11 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata değişimine etkisi

Şekil III.11 de görüldüğü gibi SF ve Puls Ara süresi değeri arttıkça boyutsal hata (AC) artmaktadır.

Yapılan deneysel çalışma neticesinde, puls süresi ve puls ara süresi parametrelerinin boyutsal hata değişimine etkisi Şekil III.12’de görülmektedir.



Şekil III.12 Puls süresi ve puls ara süresi parametrelerinin boyutsal hata (AC) değişimine Etkisi

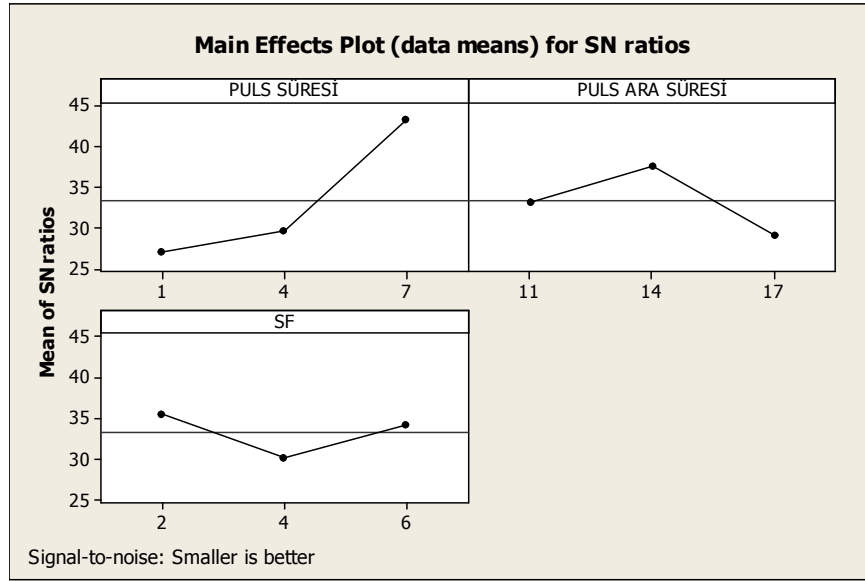
III.3.4.2. BD Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.14’de her bir kesilen parça için ölçülen BD boyutsal hata değerleri üzerinden denklem III.1 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.14 Boyutsal Hata(BD) Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	Boyutsa Hata (BD) (mm)	S/N (dB)
1	$A_1B_1C_1$	0,050	26,0206
2	$A_1B_2C_2$	0,044	27,1309
3	$A_1B_3C_3$	0,040	27,9588
4	$A_2B_1C_2$	0,030	30,4576
5	$A_2B_2C_3$	0,026	31,7005
6	$A_2B_3C_1$	0,046	26,7448
7	$A_3B_1C_3$	0,007	43,0980
8	$A_3B_2C_1$	0,002	53,9794
9	$A_3B_3C_2$	0,023	32,7654

Deneyisel sonuçlar neticesinde ölçülen hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.13’de boyutsal hata değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları sunulmuştur.



Şekil III.13 Boyutsal hata(BD)değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre minimum hata değeri, puls süresinin üçüncü seviyesinde (7), puls ara süresinin ikinci seviyesinde (14) ve SF'nin birinci seviyesinde (2) elde edilmiştir. Aşağıdaki Tablo III.15'de ise S/N oranları tablo olarak verilmiştir. Tahmin edilen parametreler deneylerde kullanıldığından doğrulama deneyi yapılmamıştır.

Tablo III.15 Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (BD) Değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	27,04	33,19	35,58
2	29,63	37,60	30,12
3	43,28	29,16	34,25
Rank	1	2	3

Deneydeki kontrol faktörleri ile boyutsal hata (BD) arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 82,4 olarak hesaplanmıştır. Bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma için elde edilen çap denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Boyutsal Hata (BD)} = 0,0437 - 0,00567 T_{\text{on}} + 0,00122 T_{\text{off}} - 0,00208 \text{ SF} + \epsilon \quad (\text{III.5})$$

$$R^2 = \% 82,4$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

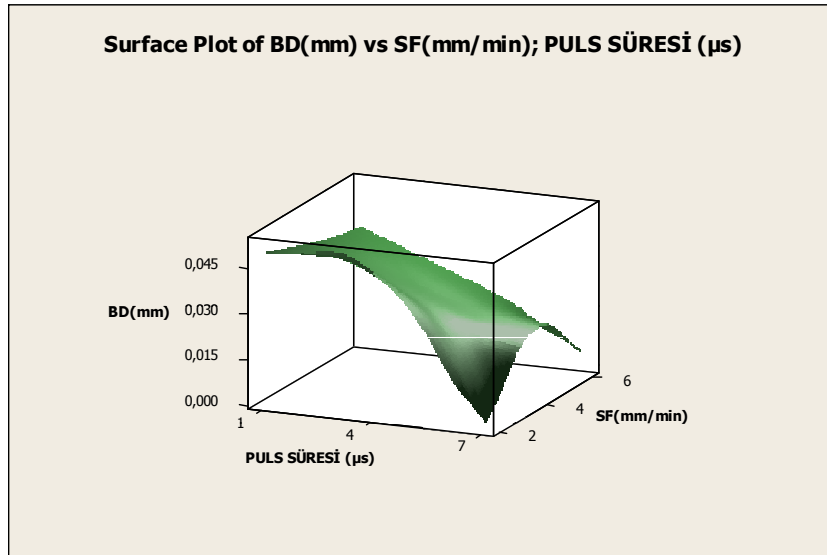
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ϵ : hatayı ifade etmektedir.

İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 % 82,4 olduğu için kabul edilebilirliği yüksektir.

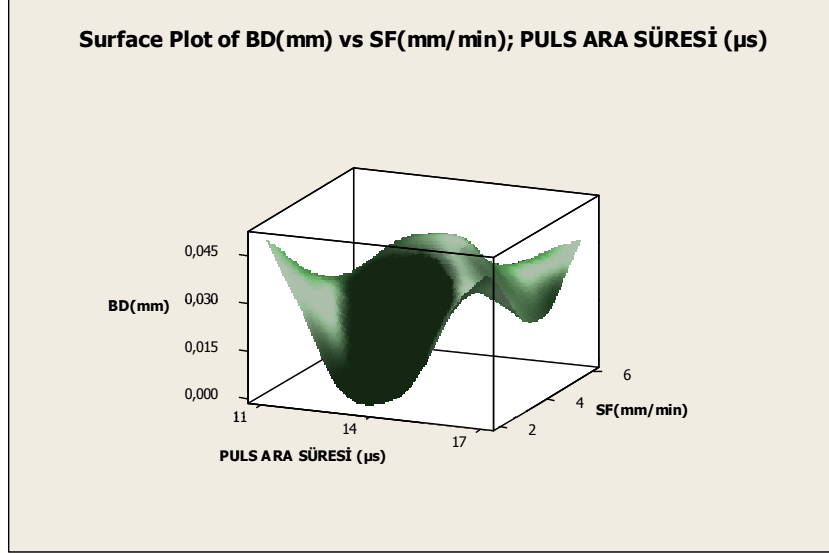
Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin Boyutsal Hata (BD) değişimine etkisi Şekil III.14'de görülmektedir



Şekil III.14 Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (BD) değişimine etkisi

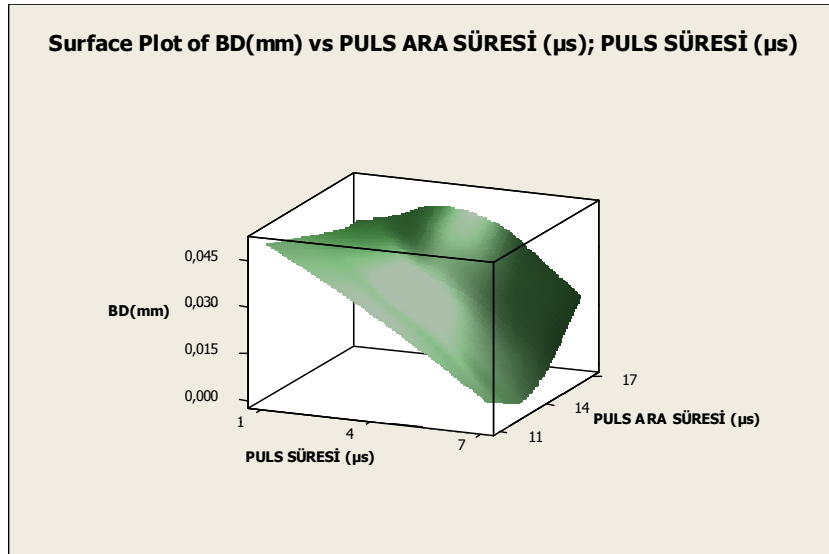
Şekil III.14'de görüldüğü gibi, boyutsal hata (BD) değişimine etki eden en önemli faktörün puls süresi olduğu görülmektedir. Puls süresi azalışı ile boyutsal hata artmaktadır.

Yapılan deneysel çalışma neticesinde, puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata değişimine etkisi Şekil III.15'da görülmektedir.



Şekil III.15 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (BD) değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışma neticesinde, puls süresi ve puls ara süresi parametrelerinin boyutsal hata değişimine (BD) etkisi Şekil III.16’de görülmektedir.



Şekil III.16 Puls süresi ve Puls ara süresi parametrelerinin boyutsal hata (BD) değişimine etkisi

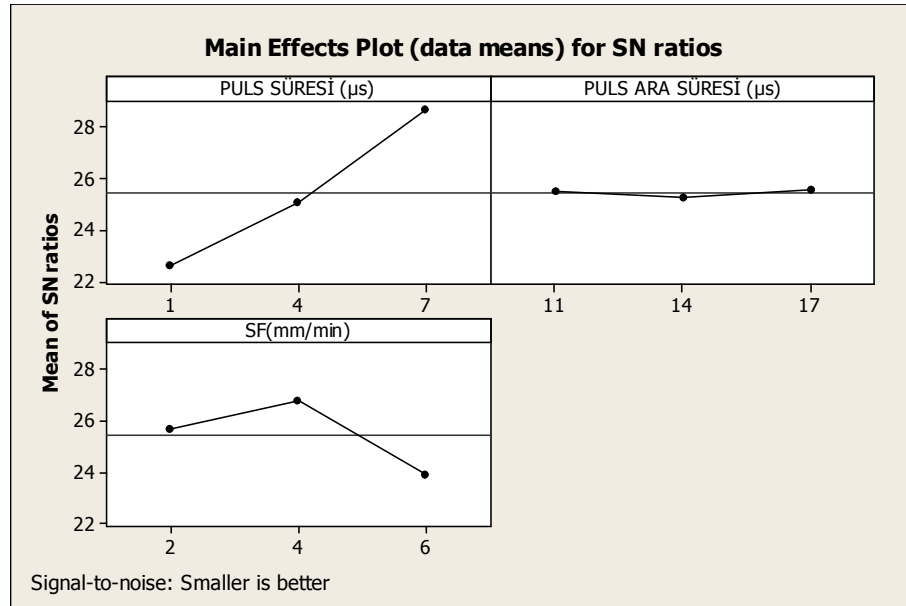
III.3.4.3. H Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.16’da Her kesilen parça için ölçülen H boyutsal hata değerleri üzerinden denklem III.2 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.16 Boyutsal Hata(H) Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	Boyutsal Hata (H) (mm)	S/N (dB)
1	A ₁ B ₁ C ₁	0,069	23,2230
2	A ₁ B ₂ C ₂	0,065	23,7417
3	A ₁ B ₃ C ₃	0,090	20,9151
4	A ₂ B ₁ C ₂	0,049	26,1961
5	A ₂ B ₂ C ₃	0,066	23,6091
6	A ₂ B ₃ C ₁	0,054	25,3521
7	A ₃ B ₁ C ₃	0,044	27,1309
8	A ₃ B ₂ C ₁	0,038	28,4043
9	A ₃ B ₃ C ₂	0,030	30,4576

Deneyisel sonuçlar neticesinde ölçülen hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.17’de kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafiksel gösterimi verilmektedir.

**Şekil III.17** Boyutsal hata(H) için kontrol faktörlerinin S/N Oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre minimum hata değeri, puls süresinin üçüncü seviyesinde (7), puls ara süresinin üçüncü seviyesinde

(17) ve SF'nin ikinci seviyesinde (4) elde edilmiştir. Aşağıdaki Tablo III.17'de ise S/N oranları tablo olarak verilmiştir.

Tablo III.17 Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (H) Değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	22,63	25,52	25,66
2	25,05	25,25	26,80
3	28,66	25,57	23,89
Rank	1	3	2

Deneyisel sonuçlarda ölçülen Boyutsal hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametrenin $A_3B_2C_2$ parametreleri olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelerle deney yapıldığı için doğrulama deneyine ihtiyaç yoktur.

Deneydeki kontrol faktörleri ile boyutsal hata (H) arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 87,6 olarak hesaplanmıştır. Bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu deneyisel çalışma için elde edilen boyutsal hata (H) denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Boyutsal Hata (H)} = 0,0587 - 0,00622 T_{\text{on}} + 0,00067 T_{\text{off}} + 0,00325 \text{ SF} + \varepsilon \quad (\text{III.6})$$

$$R^2 = \% 87,6$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

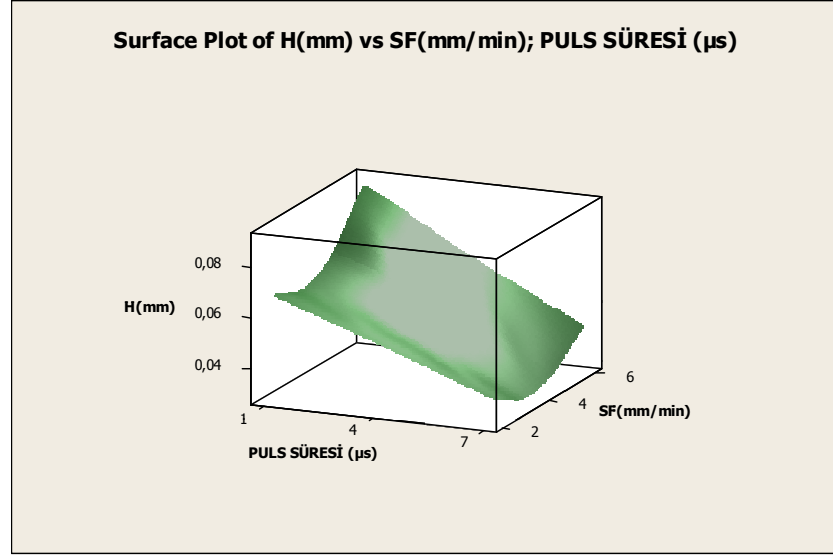
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ε : hatayı ifade etmektedir.

İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 % 87,6 olduğu için kabul edilebilirliği yüksektir.

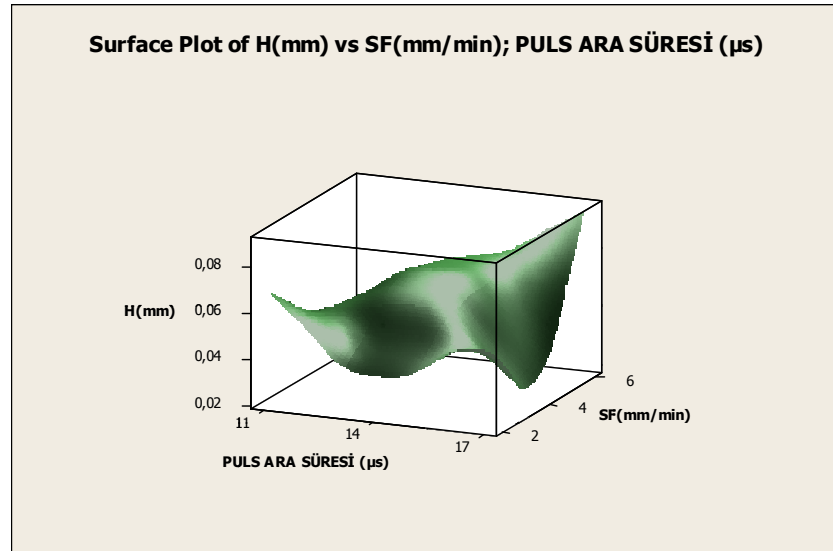
Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin Boyutsal Hata (H) değişimine etkisi Şekil III.18’de görülmektedir.



Şekil III.18 Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (H) değişimine etkisi

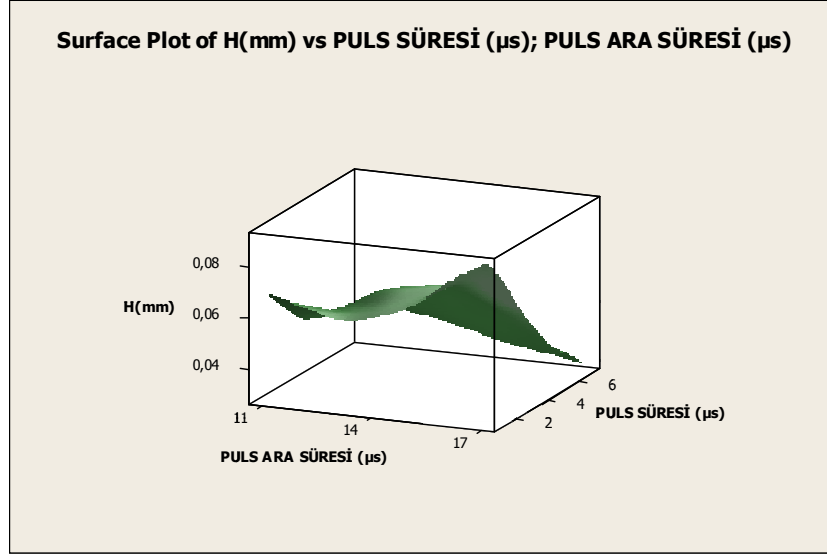
Şekil III.19 da görüldüğü gibi puls süresi boyutsal hata(H) değerini etkileyen en önemli parametredir.Puls süresinin artmasıyla boyutsal hatada artmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (H) değişimine etkisi Şekil III.19’da görülmektedir.



Şekil III.19 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (H) değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve Puls Süresi parametrelerinin boyutsal hata (H) değişimine etkisi Şekil III.20’de görülmektedir.



Şekil III.20 Puls ara süresi ve puls süresi parametrelerinin boyutsal hata (H) değişimine etkisi

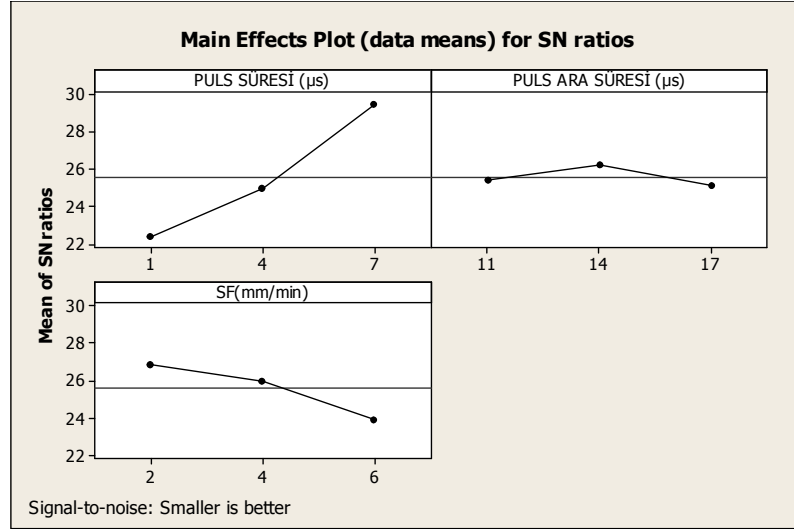
III.3.4.4. ØD Boyut hatalarının analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.18’de her kesilen parça için ölçülen ØD boyutsal hata değerleri üzerinden denklem III.2 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.18 Boyutsal Hata(ØD) Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	Boyutsal Hata (D) (mm)	S/N (dB)
1	$A_1B_1C_1$	0,069	23,2230
2	$A_1B_2C_2$	0,071	22,9748
3	$A_1B_3C_3$	0,090	20,9151
4	$A_2B_1C_2$	0,051	25,8486
5	$A_2B_2C_3$	0,066	23,6091
6	$A_2B_3C_1$	0,054	25,3521
7	$A_3B_1C_3$	0,044	27,1309
8	$A_3B_2C_1$	0,025	32,0412
9	$A_3B_3C_2$	0,035	29,1186

Deneysel sonuçlar neticesinde ölçülen hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.21’de boyutsal hata (ØD) değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları grafiksel bir şekilde sunulmuştur.



Şekil III.21 Boyutsal hata(ØD) değerleri için kontrol faktörlerinin S/N Oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre minimum hata değeri, puls süresinin üçüncü seviyesinde (7), puls ara süresinin ikinci seviyesinde (14) ve SF’nin birinci seviyesinde (2) elde edilmiştir. Tablo III.19’da Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (ØD) Değerleri için S/N oranları sunulmuştur.

Tablo III.19 Kesilen Parçaların Boyutsal Hata (ØD) Değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	22,37	25,4	26,87
2	24,94	26,21	25,98
3	29,43	25,13	23,89
Rank	1	3	2

Deneysel sonuçlarda ölçülen Boyutsal hata değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler $A_3B_2C_1$ olarak tespit edilmiştir.

Deneydeki kontrol faktörleri ile boyutsal hata (ØD) arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 97,2 olarak hesaplanmıştır. Bunlar

arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma için elde edilen boyutsal hata (ØD) denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\text{ØD} = 0,0551 - 0,00700 T_{\text{on}} + 0,000833 T_{\text{off}} + 0,00433 \text{ SF} + \varepsilon \quad (\text{III.7})$$

$$R^2 = \% 97,2$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

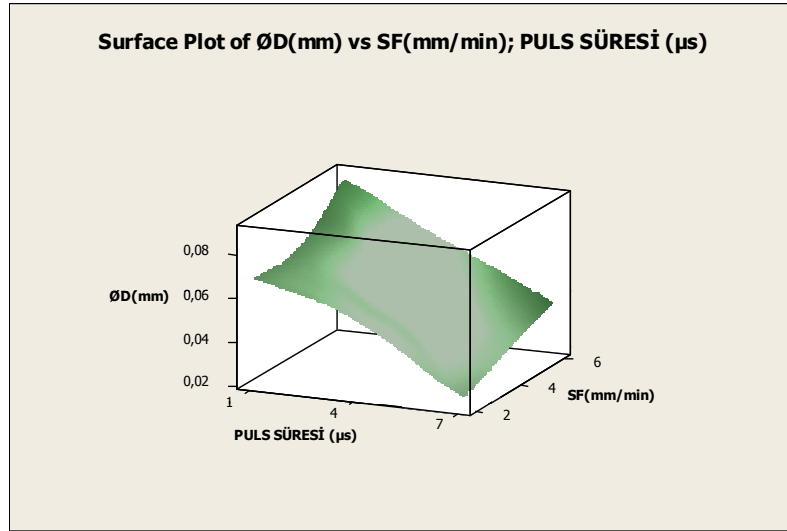
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ε : hatayı ifade etmektedir.

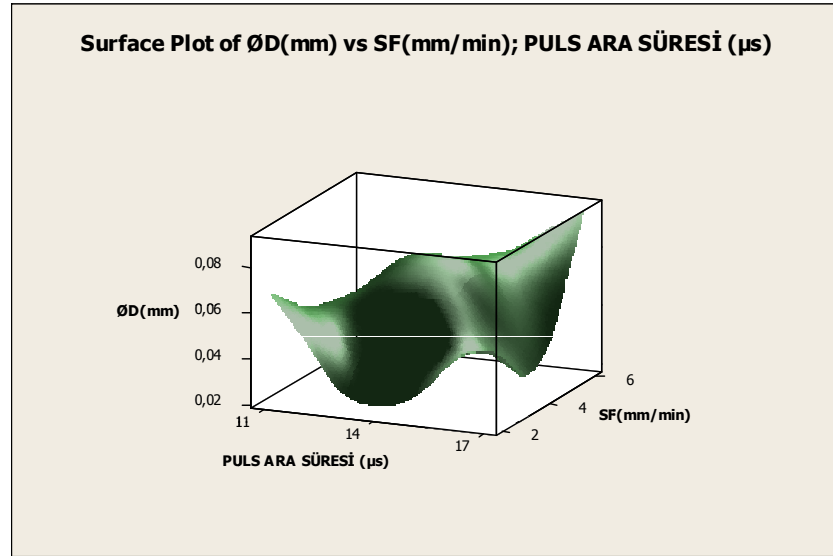
İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 % 97,2 olduğu için kabul edilebilirliği yüksektir.

Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (ØD) değişimine etkisi Şekil III.22'de görülmektedir.



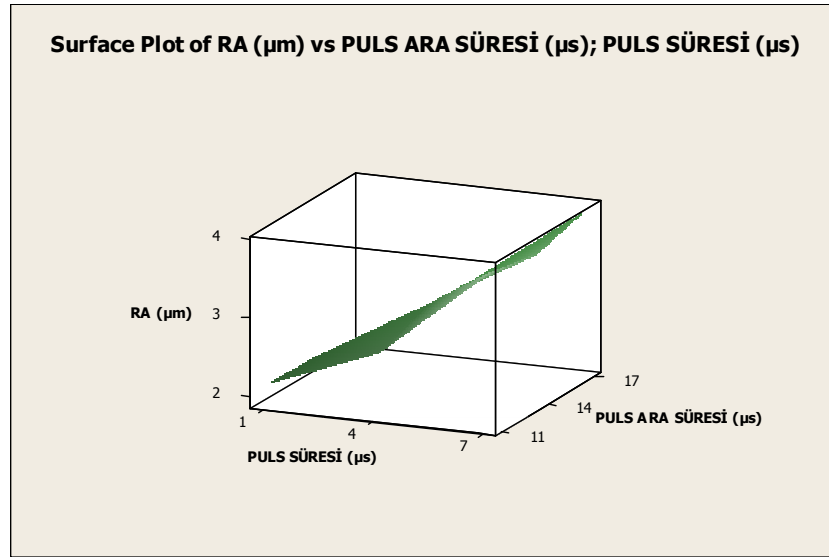
Şekil III.22 Puls süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (ØD) değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal Hata (ØD) değişimine etkisi Şekil III.23'de görülmektedir.



Şekil III.23 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin boyutsal hata (ØD) değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmaların neticesinde, puls ara süresi ve puls süresi parametrelerinin boyutsal hata (ØD) değişimine etkisi Şekil III.24’de görülmektedir.



Şekil III.24 Puls ara süresi ve puls süresi parametrelerinin boyutsal hata(ØD) değişimine etkisi

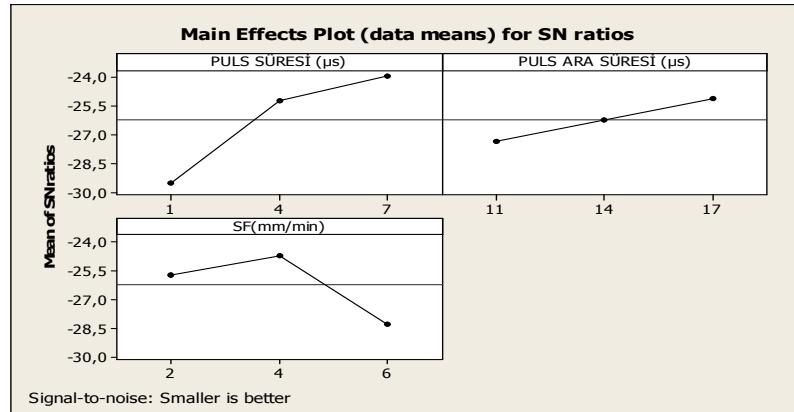
III.3.4.5. İşleme sürelerinin analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.20’de her kesilen parça için ölçülen işleme süreleri değerlerinin üzerinden denklem III.2 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.20 İşleme Süreleri Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	İşleme Süreleri (dakika)	S/N (dB)
1	A ₁ B ₁ C ₁	35,416	-30,9840
2	A ₁ B ₂ C ₂	27,650	-28,8339
3	A ₁ B ₃ C ₃	27,083	-28,6539
4	A ₂ B ₁ C ₂	14,210	-23,0519
5	A ₂ B ₂ C ₃	25,550	-28,1478
6	A ₂ B ₃ C ₁	16,750	-24,4803
7	A ₃ B ₁ C ₃	25,083	-27,9876
8	A ₃ B ₂ C ₁	12,125	-21,6736
9	A ₃ B ₃ C ₂	12,950	-22,2454

Deneysel sonuçlar neticesinde ölçülen işleme sürelerinin değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.25’de işleme süreleri için kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafiksel gösterimi verilmektedir.

**Şekil III.25** İşleme süreleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre optimum işleme süresi, puls süresinin üçüncü seviyesinde (7), puls ara süresinin üçüncü seviyesinde (17) ve SF’nin ikinci seviyesinde (4) elde edilmiştir. Tablo III.21’de ise kesilen parçaların işleme süreleri değerleri için S/N oranları sunulmuştur.

Tablo III.21 Kesilen parçaların işleme süreleri değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	-29,49	-27,34	-25,71
2	-25,23	-26,22	-24,71
3	-23,97	-25,13	-28,26
Rank	1	3	2

Deneydeki kontrol faktörleri ile İşleme süreleri arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 66,4 olarak hesaplanmıştır. Bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma için elde edilen İşleme süresi denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\text{İŞLEME SÜRELERİ (dakika)} = 40,2 - 2,22 T_{\text{on}} - 0,996 T_{\text{off}} + 1,12 \text{ SF} + \varepsilon \quad (\text{III.8})$$

$$R^2 = \% 66,4$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

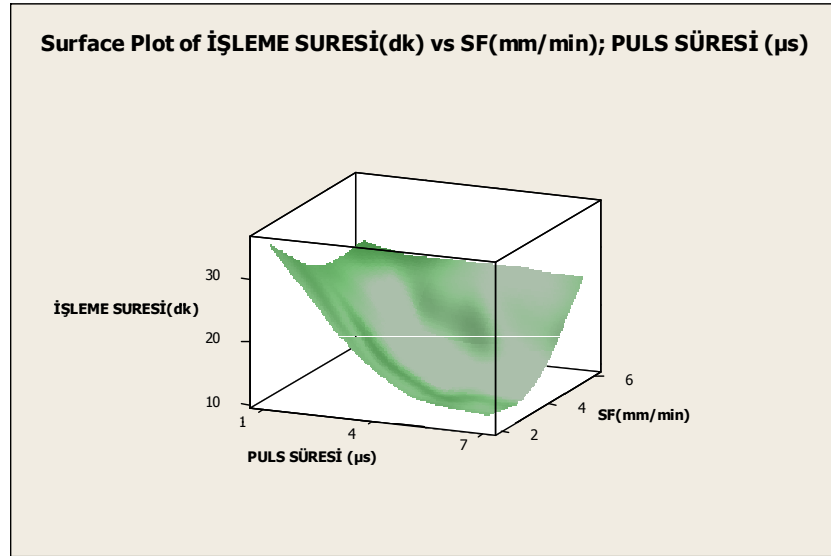
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ε : hatayı ifade etmektedir.

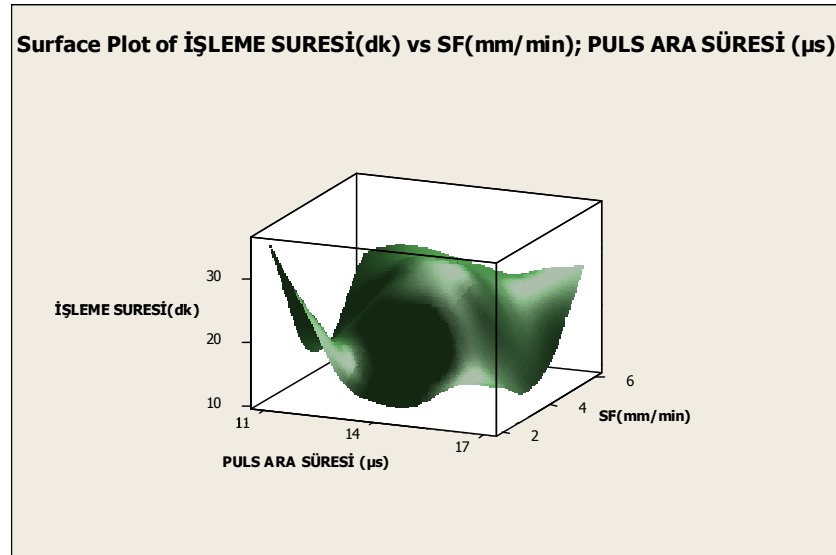
İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 0,80 'in altında olduğu için kabul edilebilirliği bulunan diğer tahminsel denklemlere nazaran düşüktür.

Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin işleme sürelerine etkisi Şekil III.26'da görülmektedir.



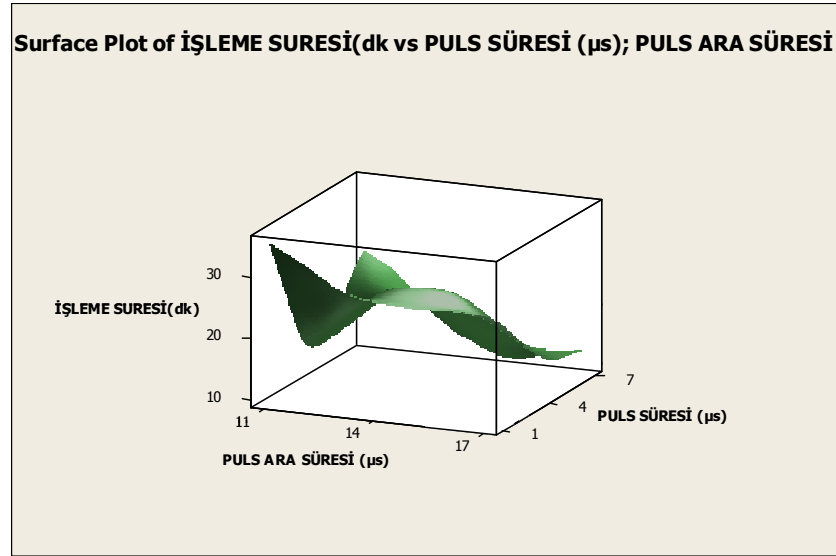
Şekil III.26 Puls süresi ve SF parametrelerinin işleme süresi değişimine Etkisi

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve SF parametrelerinin işleme sürelerine etkisi Şekil III.27’de görülmektedir.



Şekil III.27 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin işleme süreleri değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve puls süresi parametrelerinin işleme sürelerine etkisi Şekil III.28’de görülmektedir.



Şekil III.28 Puls ara süresi ve puls süresi parametrelerinin işleme süreleri değişimine etkisi

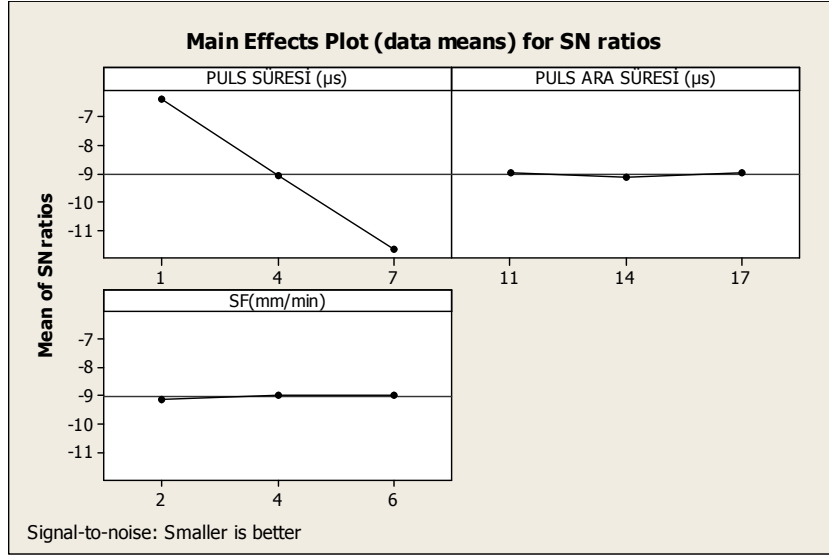
III.3.4.6. Yüzey pürüzlülüğünün analizi ve değerlendirilmesi

Tablo III.22’de her kesilen parça için ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri üzerinden denklem III.2 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir.

Tablo III.22 Yüzey Pürüzlülük Değerleri ve S/N Oranları

Deney No	Değişkenler	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	S/N (dB)
1	A ₁ B ₁ C ₁	2,160	-6,6891
2	A ₁ B ₂ C ₂	2,130	-6,5676
3	A ₁ B ₃ C ₃	1,967	-5,8761
4	A ₂ B ₁ C ₂	2,690	-8,5950
5	A ₂ B ₂ C ₃	2,947	-9,3876
6	A ₂ B ₃ C ₁	2,897	-9,2390
7	A ₃ B ₁ C ₃	3,860	-11,7317
8	A ₃ B ₂ C ₁	3,733	-11,4412
9	A ₃ B ₃ C ₂	3,907	-11,8369

Deneysel sonuçlar neticesinde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil III.29’da yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin S/N oranları grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil III.29 Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin S/N oranları

En küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan optimizasyona göre optimum yüzey pürüzlülükleri, puls süresinin birinci seviyesinde (1), puls ara süresinin üçüncü seviyesinde (17) ve SF’nin üçüncü seviyesinde (6) elde edilmiştir. Tablo III.23’de ise kesilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri için S/N oranları verilmiştir.

Tablo III.23 Kesilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri için S/N oranları

Seviye	Puls süresi	Puls ara süresi	SF
1	-6,378	-9,005	-9,123
2	-9,074	-9,132	-9,000
3	-11,670	-8,984	-8,998
Rank	1	2	3

Deneydeki kontrol faktörleri ile yüzey pürüzlülükleri arasında tahmini denklem oluşturulmuş ve korelasyon katsayısı % 97,9 olarak hesaplanmıştır. Bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışma için elde edilen yüzey pürüzlülüğü denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$RA (\mu m) = 1,71 + 0,291 T_{on} + T_{off} - 0,0013 SF + \varepsilon \quad (III.9)$$

$$R^2 = \% 97,9$$

Bu denklemde ;

SF : Tabla İlerleme Hızı

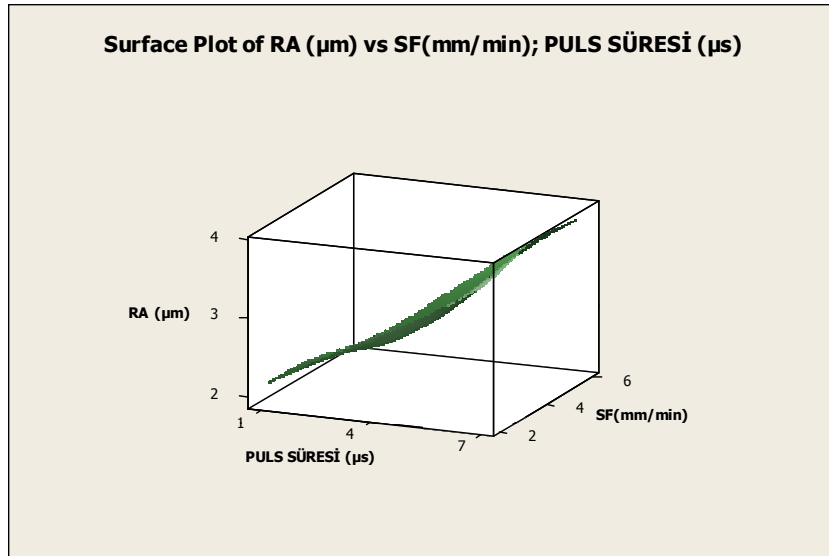
T_{on} : Puls Süresi

T_{off} : Puls Ara Süresi

ε : hatayı ifade etmektedir.

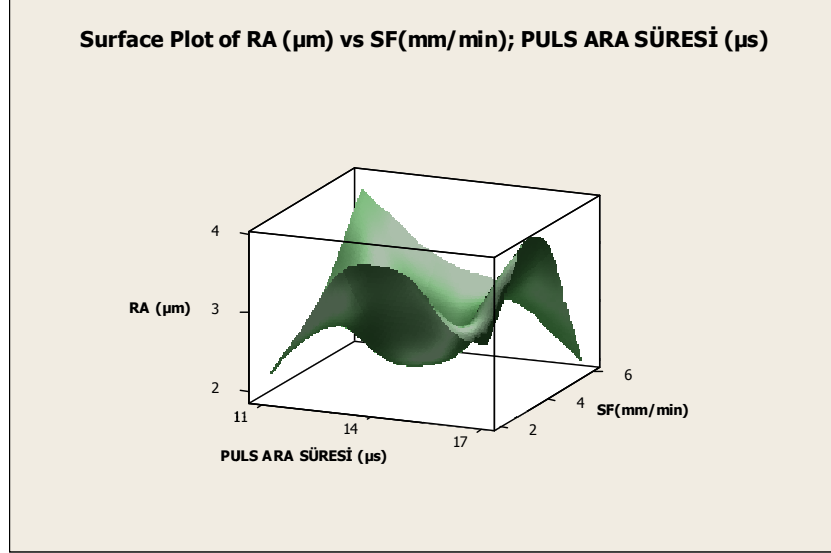
İstatistiksel olarak R^2 değerinin 1'e yaklaşması, tahmin modelinin gerçek ilişkiye yakınlığını ifade etmekte ve 0,80 ve üzeri olması durumunda kuvvetli ilişki olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen tahminsel denklemde R^2 % 97,9 olduğu için kabul edilebilirlik derecesi yüksektir.

Yapılan deneysel çalışmada, Puls süresi ve SF parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil III.30'da görülmektedir.



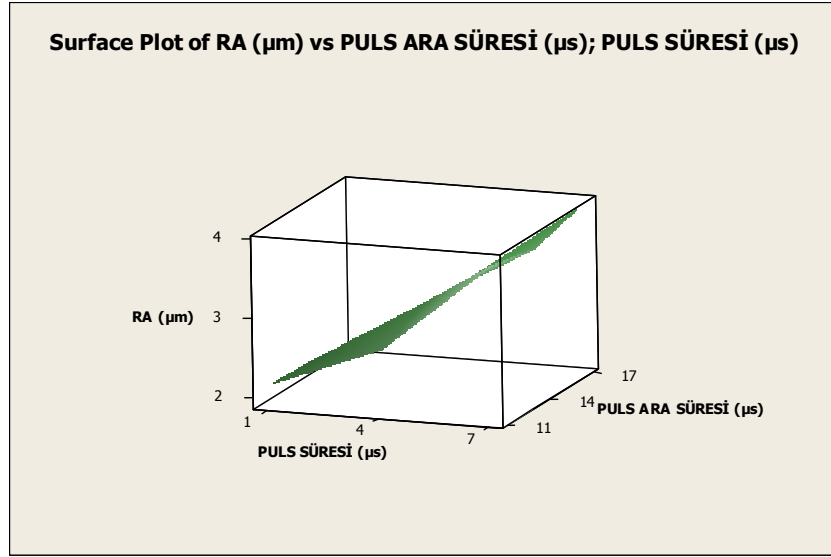
Şekil III.30 Puls süresi ve SF parametrelerinin işleme süresi değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmada, Puls ara süresi ve SF parametrelerinin işleme sürelerine etkisi Şekil III.31'de görülmektedir.



Şekil III.31 Puls ara süresi ve SF parametrelerinin yüzey pürüzlülük değişimine etkisi

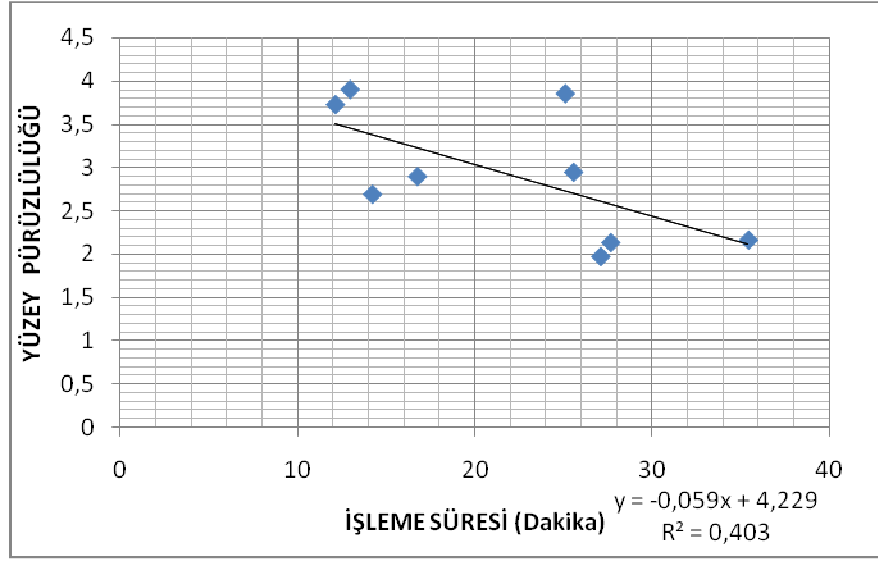
Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, Puls ara süresi ve Puls süresi parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil III.32’de görülmektedir.



Şekil III.32 Puls süresi ve Puls ara süresi parametrelerinin yüzey pürüzlülük değişimine etkisi

III.3.4.7. Bağımlı değişkenler arasındaki ilişki

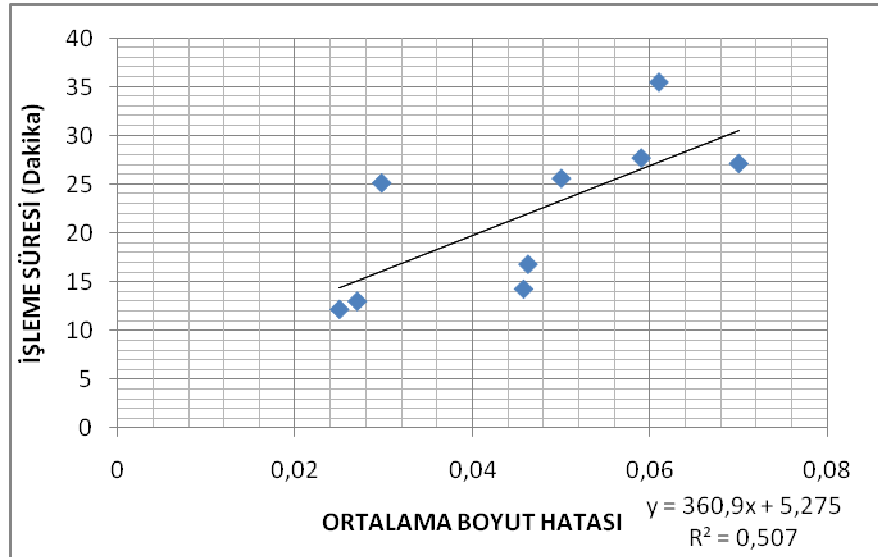
III.3.4.7.1. Yüzey pürüzlülüğü ve işleme süreleri arasındaki ilişki



Şekil III.33 Yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi arasındaki ilişki

Yapılan çalışmalar neticesinde yüzey pürüzlülüğü ve işleme süreleri arasındaki ilişki Şekil III.33'te sunulmuştur. Burada görüldüğü gibi genel olarak İşleme süresinin artmasının aksine yüzey pürüzlülüğü'nde azalmaktadır. Fakat R^2 düşük olduğundan dolayı her nokta için böyle bir yargıya ulaşma güvenilirliği düşüktür.

III.3.4.7.2. Ortalama boyutsal hata ve işleme süreleri arasındaki ilişki



Şekil III.34 İşleme süresi ve ortalama boyut hatası arasındaki ilişki

Ortalama boyut hatası ve işleme süreleri arasındaki ilişkiyi belirten grafik Şekil III.34 te sunulmuştur. Burada yine R^2 değeri düşük olduğundan aralarında tam

olarak doğrusal bir ilişkiden söz edilemez. Noktalar incelendiğinde işleme süresi ile birlikte boyut hatasının arttığı görülmektedir. Fakat bu yargı her nokta için güvenilir değildir.

III.3.4.8. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen optimum parametreler ve değerleri

Tablo III.24 Sodick A320D/EX21 Model CNC Tel Erozyon Tezgahında elde edilen 2mm kalınlığındaki Inconel 718 için Optimum Parametreler

BAĞIMLI DEĞİŞKENLER	PULS SÜRESİ	PULS ARA SÜRESİ	SF	ÖLÇÜLEN OPTİMUM DEĞERLER	BİRİM
Boyutsal Hata (AC)	7	17	4	0,02	mm
Boyutsal Hata (BD)	7	14	2	0,002	mm
Boyutsal Hata (H)	7	17	4	0,03	mm
Boyutsal Hata (ØD)	7	14	2	0,025	mm
İşleme Süresi	7	17	4	12,95	dakika
Ra	1	17	6	1,967	µm

BÖLÜM IV

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan bu deneysel tez çalışmasında Inconel 718 süper alaşımının tel erozyonda işlenmesinde ana kesme parametrelerinin boyut hataları, işleme süreleri ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri incelenmiştir.

Taguchi deney tasarım yöntemine tabi tutulacak parametrelerin (bağımsız değişkenlerin) tayini için, literatür ve test kesimlerinden istifade edilmiştir. Test kesimleri neticesinde en iyi performansı sergileyen parametrelerin bir alt ve bir üst değerleri alınarak deneylerde kullanılacak parametre değerleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçları, deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ve Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar olmak üzere iki bölüm halinde sunmak mümkündür.

Taguchi deney tasarımı yöntemi ile onlarca deney yapılarak ulaşılabilecek optimum sonuçlara 9 deney ile ulaşılmıştır. Zaman ve maliyet açısından değerlendirildiğinde, deneyler gayet ekonomik olmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir,

- Inconel 718 süper alaşımının tel erozyon tezgahında kesilmesi mümkündür.
- Kesilen parçalardaki boyutsal hataların incelenmesi ile AC boyutsal hatasına en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls süresi için 7, puls ara süresi için 17 ve SF için 4'tür. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum boyutsal hata 0,02 mm olup AC boyutsal hatasının parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,84 'dir. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçek ile ilişkisi yüksek değerlere ulaşılabilir.

- Kesilen parçalardaki boyutsal hataların incelenmesi ile BD boyutsal hatasına en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls süresi için 7, puls ara süresi için 14 ve SF için 2'dir. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum boyutsal hata 0,002 mm olup BD boyutsal hatasının parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,824 'tür. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçek ile ilişkisi yüksek değerlere ulaşılabilir.
- Kesilen parçalardaki boyutsal hataların incelenmesi ile H boyutsal hatasına en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls süresi için 7, Puls ara süresi için 17 ve SF için 4'tür. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum boyutsal hata 0,03 mm olup H boyutsal hatasının parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,876 'dır. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçek ile ilişkisi yüksek değerlere ulaşılabilir.
- Kesilen parçalardaki boyutsal hataların incelenmesi ile ØD boyutsal hatasına en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls süresi için 7, Puls ara süresi için 14 ve SF için 2' dir. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum boyutsal hata 0,025 mm olup ØD boyutsal hatasının parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,972 'dir. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçek ile ilişkisi yüksek değerlere ulaşılabilir.
- Kesilen parçalar için harcanan işleme sürelerinin incelenmesi ile işleme süresine en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls

süresi için 7, Puls ara süresi için 17 ve SF için 4' tür. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum işleme süresi 12,95 dakika olup işleme süresinin parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,664 'dir. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçeğe yakın değerler tahmin edilebilir.

- Kesilen parçalardaki yüzey pürüzlülük değerlerinin incelenmesi ile yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkiyi SF ve puls ara süresine nazaran puls süresinin yaptığı tespit edilmiştir. Taguchi'nin en küçük en iyidir prensibi ile yapılan optimizasyon çalışmasında elde edilen optimum parametre değerleri puls süresi için 1, Puls ara süresi için 17 ve SF için 6' dır. Bu parametrelerle yapılan kesme işlemi neticesinde ölçülen minimum yüzey pürüzlülük değeri 1,967 μm olup yüzey pürüzlülüğünün parametrelere bağlı tahmini değerleri için oluşturulan denklemin korelasyon katsayısı 0,972 'dir. Elde edilen bu denklem yardımı ile gerçek ile ilişkisi yüksek değerlere ulaşılabilir.

BÖLÜM V

SON DEĞERLENDİRMELER ve ÖNERİLER

Inconel 718, uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan şekillendirilmesi güç yüksek mukavemetli bir süper alaşım çeşidi olduğundan işleme maliyetleri yüksektir. İşleme parametreleri, yapılan imalatın kalite ve ekonomikliğini doğrudan etkilediğinden seçimi çok iyi yapılmalıdır. Bu çalışmada, kalite ve ekonomikliğe tesir eden işleme süreleri, boyut hataları ve yüzey pürüzlülüğü gibi kriterlerin puls süresi, puls ara süresi ve SF faktörleri ile modellemeleri yapılarak bir çok denklem elde edilmiştir. Bu denklemler ile yeni deneysel çalışmalara gerek duyulmadan istenilen boyutsal hatalara, işleme sürelerine ve yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılması mümkündür. Bu çalışma ile, Inconel 718 süper alaşımının kesme parametrelerinin; boyut, işleme süreleri ve yüzey pürüzlülük değerlerine olan etkileri literatüre kazandırılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Jun Qu: “A dissertation submitted to the Graduate Faculty of “A dissertation sub”mitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Ph.D.” Raleigh, North Carolina State University (2002)
- [2] Ekmekçi B., Elkoca O., Erden A., A “ Comparative Study on the Surface Integrity of Plastic Mold Steel due to Electric Discharge Machining ”, *Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 36* (2005) 117-117
- [3] Doval-Gandoy, J., Pasandin, R., Fernandez, B., “Sharpened of saw blades by electrical discharge Machining”, *Industrial Electronics Society*, (2005) 6-10
- [4] İsmail COŞKUN, Mehmet Fatih IŞIK : “ Elektro erozyon Yöntemi ile Tornalama ”(2008) 285-291
- [5] www.femmuhendislik.com (Erişim Tarihi : 10.02.2010)
- [6] İmamoğlu, O.: “Tel erozyon tezgahında 2379 çeliğinin işlenmesinde kesme parametrelerinin şekil ve boyut toleranslarına etkisi” *Y. Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., İstanbul (2007)
- [7] Tosun, N.; Coğun, C.; İnan, A.: “The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM” *Machining science and technology*, 7:2, (2003) 209-219
- [8] Hargrove, S.K.; Ding, D.: “Determining cutting parameters in wire EDM based on workpiece surface temperature distribution” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2007) 295-299
- [9] Özdur, Z.: “CNC tel elektro erozyon tezgahında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, işleme hızı ve ölçü tamlığına etkilerinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma” *Y. Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Ankara (1999)
- [10] Özdemir A. , Karataş K.Ç.,Güllü K. “MA956 Süper Alaşım Malzemesi için Tel Erozyonda İşleme parametrelerinin Ön Tayini ” *Politeknik Dergisi* vol:4 (2002) 7-14

- [11] Kurubaş, H.: “Yüksek manganlı çeliklerin tel erozyon tezgahında işlenmesinde tel aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi” *Y. Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Elazığ (2004)
- [12] Bayraktutar, M.: “Tel erozyon tezgahında yüzey kalitesine etki eden parametrelerinin incelenmesi” *Y. Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. İstanbul (2000)
- [13] Sanchez, J.A.; Rodil, J.L.; Herrero, A., Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A.: “ On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire EDM corner cutting” *Journal of materials processing technology* 182 (2007) 574-579
- [14] Ho, K.H.,; Newman, S.T.; Rahimifard, S.; Allen, R.D.: “State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)” *International journal of machine tools&manufacture* 44, (2004) 1247-1259
- [15] Spedding, T.A.; Wang Z.Q.: “Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process”, *Precis Eng.* 20 (1997) 5-15
- [16] Aydoğdu, D.: “Tel Erozyonun Kesme Parametrelerinin Parçanın Boyut ve Şekil Toleranslarına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” *Y. Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., İstanbul (2009)
- [17] Tosun, N.; Coğun, C.; Tosun, G.: “A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on taguchi method” *Journal of materials processing technology* 152 (2004) 316-322
- [18] Saha, S.; Pachon, A.: “Finite element modeling and optimization to prevent wire breakage in electro-discharge machining” *Mechanics research communications*, Volume 31, (2004) 451-463
- [19] Han, F.; Zhang, J.; Soichiro, I.: “Corner error simulation of rough cutting in wire EDM” *Precision engineering* 31, (2007) 331-336
- [20] Rajurkar, K.P.; Wang, W.M.; Lindsay, R.P.: “On-line monitor and control for wire breakage in WEDM” *Ann. CIRP* 40 (1991) 219-222
- [21] Liao, Y.S.; Huang, J.T.; Su, H.C.: “A study on the machining parameters optimization of wire electrical discharge machining” *Journal of materials processing technology* 71, (1997) 487-493

- [22] Konda, R.; Rajurkar, K.P.; Bishu, R.R.; Guha, A.; Parsen, M.: “Design of experiments to study and optimize process performance” *International journal quality reliabl. Manage* 16 (1999) 56-71
- [23] Özek, C.; Özel, C.: “Tel erozyon tezgahında Ç8620 dişli çeliğinin kesilme davranışlarının araştırılması” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 5,2, (2003) 47-42
- [24] Tarng, Y.S.; Ma, S.C.; Chung, L.K.: “Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining” *International journal mach. tolls manuf* 35 (1995) 1693-1701
- [25] Tarng, Y.S.; Ma, S.C.; Chung, L.K.: “Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining” *International journal mach. tolls manuf* 35 (1995) 1693-1701
- [26] Huang, J.T.; Liao, Y.S.: “Optimization of machining parameters of wire-EDM based on grey relational and statistical analyses” *International journal prod. Res.* 41 (2003) 1707-1720
- [27] Kunieda, M.; Furudate, C.: “High precision finish cutting by dry WEDM” *Ann. CIRP* 50 (2001) 121-124
- [28] Rajurkar, P.; Wang, V.M.: “Thermal modelling and on-line monitoring of wire EDM” *Journal of materials processing technology* (1993) 417-430
- [29] Aspinwall, D.K., Soon, S.L., Berrisford, A.E., Walder, G., Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology, *CIRP Annals- Manuf. Technol*, 57 (2008) 187-190
- [30] Ramakrishnan, R., Karunamoorthy, L., Modeling and multi-response optimization of Inconel 718 on machining of CNC WEDM process, *Int. Mater.Proc.Technol.*, 207 (2008) 343-349
- [31] Shreyes N. Melkotea, Thomas R.Watkinsb, Rosa M. Trejob, Laura Reister, *Materials Science and Engineering A* 513–514 ,2009 208–215 Tosun, N.; Coğun, C.; İnan, A.: “The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM” *Machining science and technology*, 7:2, (2003) 209-219
- [32] Altın, A.: “Nikel Esaslı Inconel 718 süper alaşımının İşlenebilirliğinin incelenmesi” *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Ankara (2005)

- [33] Şanyılmaz , M.: “Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile bir uygulama” *Y. Lisans Tezi*, Dumlupınar, Fen Bilimleri Enst., Kütahya (2006)

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında İstanbul’da doğdu. Orta öğretim eğitimini Malazgirt İlköğretim okulunda tamamladı. Lise eğitimini 1996–2000 tarihleri arasında Bağcılar Abdurrahman ve Nermin Bilimli Teknik Lisesi Makine bölümünde tamamladı. 2000-2005 yıllarında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Ana Bilim Dalından birincilik derecesi ile mezun oldu.Yüksek lisans eğitimine 2005 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında başladı. 2008 yılında başladığı özel bir şirkette çalışmaya devam ediyor.

Murat DOĞAN