



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME ve İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEL ELEKTRO EROZYON TEZGÂHINDA INCONEL 718 İŞ
PARÇASININ İŞLENMESİNDE KRİYOJENİK İŞLEMİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mesut DURMAN

**Mayıs 2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MALZEME VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEL ELEKTRO EROZYON TEZGÂHINDA INCONEL 718 İŞ
PARÇASININ İŞLENMESİNDE KRİYOJENİK İŞLEMİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mesut DURMAN

**Danışman
Doç. Dr. Şehmus BADAY**

**Mayıs 2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mesut DURMAN tarafından hazırlanan “Tel Elektro Erozyon Tezgâhında Inconel 718 İş Parçasının İşlenmesinde Kriyojenik İşlemin Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 10/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Şehmus BADAY

.....

Üye

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mesut DURMAN

Tarih: 10.05.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEL ELEKTRO EROZYON TEZGÂHINDA INCONEL 718 İŞ PARÇASININ İŞLENMESİNDE KRİYOJENİK İŞLEMİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mesut DURMAN

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Malzeme ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışmanı: Doç. Dr. Şehmus BADAY

2024, 63 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şehmus BADAY

Doç. Dr. Fikret SÖNMEZ

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

Gerçekleştirilen bu deneysel tez çalışmasında, Inconel 718 iş parçasının tel elektro erozyon tezgâhında kesilerek işlenmesi araştırılmıştır. İşleme sonucunda oluşan kerf (kesme genişliği), talaş kaldırma oranı (MRR) ve işlenmiş iş parçasının yüzeyleri üzerinden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), kuadratik ortalama pürüzlülük (Rq) ve maksimum pürüzlülük (Rz) değerleri üzerinde kriyojenik işlemin etkisi incelenmiştir. Kriyojenik işlemin etkisinin daha iyi anlaşılması için kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına da aynı işlemler uygulanmıştır. Bu bağlamda işleme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri, üç farklı tel ilerleme hızı, üç farklı gerilim ve üç farklı dielektrik sıvı basıncı seçilmiştir. İşleme deneylerinde kullanılan soğutma sıvısı olarak dielektrik sıvı (saf su) ve tel elektrot olarak ise 0,25 mm pirinç tel kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerin sayısını ve maliyetleri azaltmak için Taguchi L9(3³) ortogonal dizilim tercih edilmiştir. Kesme deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra, Rq ve Rz) hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçalarının işlenmiş yüzeyinden elde edilmiştir. Taguchi sinyal/gürültü oranlarına göre kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçası için yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde en etkili işleme parametresi “gerilim” iken kriyojenik işlem uygulanmış iş parçası için ise “tel ilerleme hızı” olduğu tespit edilmiştir. Optimum Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerleri kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçası için gerilim 45 V, sıvı basıncı 15 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dk olarak elde edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçası için ise gerilim 65 V, sıvı basıncı 11 kg/cm² tel hızı 6 m/dk olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarından elde edilen kerf değerleri karşılaştırıldığında kriyojenik işlem uygulanmış olan iş parçasında kerf değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Talaş kaldırma oranı açısından değerlendirildiğinde ise kriyojenik işlem uygulanmış iş parçalarında daha az talaş kaldırıldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarının işlenmiş yüzeylerin analizi için SEM ile görüntülemeler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Inconel 718, Kerf, SEM analizi, Taguchi tasarımı, Talaş kaldırma oranı, Tel elektro erozyon ile işleme, Yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRYOGENIC PROCESS ON INCONEL 718 WORKPIECE MACHINED BY WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Mesut DURMAN

**Batman University Graduate Education Institute
Department of Materials and Manufacturing Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şehmus BADAY

2024, 63 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Şehmus BADAY

Assoc. Prof. Dr. Fikret SÖNMEZ

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

In this experimental thesis study, the machining of Inconel 718 workpiece on a wire electro-discharge machine was investigated. The effect of the cryogenic process on the kerf (cutting width), metal removal rate (MRR) and average surface roughness (Ra), quadratic average roughness (Rq) and maximum roughness (Rz) values measured on the surfaces of the machined workpiece were examined. In order to better understand the effect of the cryogenic process, the same processes were applied to the untreated workpiece. In this context, the machining parameters used in the processing experiments were chosen as three different wire feed speeds, voltages and dielectric fluid pressures. Dielectric liquid (pure water) was used as the cooling fluid used in the machining experiments and 0.25 mm brass wire was used as the wire electrode. Taguchi L9 (3³) orthogonal array was preferred to reduce the number of experiments performed and costs. The surface roughness values (Ra, Rq and Rz) obtained as a result of the cutting experiments were obtained from the machined surface of both cryogenically treated and untreated workpieces. According to Taguchi signal/noise ratios, it was determined that the most effective processing parameter on the surface roughness values for the untreated workpiece was "voltage", while it was "wire speed" for the cryogenically treated workpiece. Optimum Ra, Rq and Rz surface roughness values were obtained at voltage 45 V, liquid pressure 15 kg/cm² and wire speed 9 m/min for the untreated workpiece. For the cryogenically treated workpiece, the voltage was 65 V, the liquid pressure was 11 kg/cm² and the wire speed was 6 m/min. When the kerf values obtained from cryogenically treated and untreated workpieces were compared, it was seen that the kerf values with which cryogenic treatment was applied were lower. When evaluated in terms of metal removal rate, it was concluded that less chip was removed in cryogenically treated workpieces. Additionally, SEM imaging was performed to analyze the machined surfaces of cryogenically treated and untreated workpieces.

Keywords: Inconel 718, Kerf, Metal removal rate, SEM analysis, Surface roughness, Taguchi design, Wire electrical discharge machining,

ÖNSÖZ

Gerçekleştirilen bu deneysel tez çalışması 5 (beş) ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerden ilki tezin giriş kısmını oluşturmakta ve yüzey pürüzlülüğü, Inconel 718 süper alaşımı, kerf, kriyojenik ısıtma işlem ve talaş kaldırma oranı hakkında bilgiler verilmiş olup, tezin amacı açık bir şekilde belirtilmiştir. Daha sonra ikinci bölümde gerçekleştirilen tez çalışması ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve yapılan bu çalışmalar hakkında özet bilgiler sunulmuştur. Üçüncü bölümde ise bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler, uygulanan kriyojenik işlem şartları, yüzey pürüzlülük ölçümleri, kerf ve talaş kaldırma oranının hesaplanma şekli ve elde edilen yüzey görüntüleri ile ilgili bilgilerin tamamı materyal ve yöntemde bölümünde verilmiştir. Dördüncü bölümde yapılan çalışma ile ilgili ortaya çıkan sonuçlar açıklanmıştır. Sonuçlar Taguchi ortogonal deney tasarım yöntemi ile grafikler şeklinde değerlendirilmiş olup, SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmış Inconel 718 iş parçasının yüzey pürüzlülüğü, kerf ve talaş kaldırma oranları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar SEM görüntüleri ile de karşılaştırılmıştır. Son olarak beşinci bölümde yapılan bu tez çalışması ile ilgili elde edilen sonuçlar açık bir şekilde izah edilmiştir. Bunun ile birlikte elde edilen sonuçlar doğrultusunda bazı öneriler de bulunulmuştur.

Öğrenme süreci boyunca sağladığı destek, verdiği tavsiye ve teşvik, özellikle de sabrı ve hoşgörülü anlayışından dolayı Danışmanım Doç. Dr. Şehmus BADAY'a teşekkür eder şükranlarımı sunarım.

Yoğun çalışmalarım esnasında her zaman bana katlandığı ve gösterdiği sabır için eşim Fikriye GÜMÜŞ DURMAN'a, varlıklarıyla her zaman manevi desteklerini hissettiğim çocuklarım Ediz ve Sofya İpek'e ve bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mesut DURMAN
Batman 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması.....	5
2. GENEL BİLGİLER.....	15
2.1. Süper Alaşımlar.....	15
2.1.1. Süper alaşımların sınıflandırılması.....	16
2.2. Tel Erozyon İşleme Yöntemi	16
2.3. Deney Tasarımı ve Yöntemi	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. İş Parçası Malzemesi.....	25
3.2. Tel Elektro Erozyon Tezgâhı, Tel Elektrot Özellikleri ve İşleme Şartları.....	25
3.4. Kriyojenik İşlem Uygulanması	29
3.5. İşlenmiş yüzeylerden ölçülen SEM görüntüleri	30
3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	31
3.7. Kesme Genişliği (Kerf)	31
3.10. Mikro sertlik Ölçümü	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	34
4.1. Kriyojenik ısıtıl işlemsiz Inconel 718 İş Parçasına Ait Yüzey Pürüzlülük Değerleri	34
4.2. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları.....	38
4.3. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmış iş parçalarının sem görüntüleri.....	41
4.4. Kerf Değerleri	44

4.5. Talaş Kaldırma Oranları (MRR)	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
5.1. Sonuçlar.....	53
5.2. Öneriler	54
KAYNAKÇA.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ	63



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	Alüminyum oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
TiO_2	Titanyum dioksit
ZnO	Çinko oksit
ZnO_2	Çinko peroksit
CeO_2	Seryum dioksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
SiH_4	Silan
TiB_2	Titanyum diborür
SiC	Silisyum karbür
TiC	Titanyum karbür
Fe	Demir
Al	Alüminyum
Ti	Titanyum
Mg	Magnezyum
Cu	Bakır
Co	Kobalt
Ni	Nikel
Br	Brom
C	Karbon

KISALTMALAR

ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
UV	Ultraviyole
MMK	Metal matrisli kompozit
CMK	Seramik matrisli kompozit
PMK	Polimer matrisli kompozit
ATH	Alümina tri hidrat
WEDM	Wire Electro Discharge Machining



ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 3. 1. Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi.....	25
Tablo 3. 2. WEDM işleme parametreleri ve seviyeleri.....	27
Tablo 3. 3. Taguchi L9 (3 ³) ortogonal dizilime göre yapılan deneyler	29
Tablo 4. 1. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranı değerleri	34
Tablo 4. 2. S/N oranlarına göre Ra, Rq ve Rz değerleri	35
Tablo 4. 3. Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranı değerleri	38
Tablo 4. 4. S/N oranlarına göre Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Ra, Rq ve Rz değerleri	39
Tablo 4. 5. Normal malzeme ve kriyojenik malzemenin Kerf değerleri	44
Tablo 4. 6. Kriyojenikli ve kriyojeniksiz Inconel 718'in Kerf S/N oranı değerleri.....	45
Tablo 4. 7. Yanıt tablosu	45
Tablo 4. 8. Kriyojenik işlemsiz iş parçasının yanıtları.....	47
Tablo 4. 9. Talaş kaldırma oranları değerleri	48
Tablo 4. 10. Normal ve kriyojenikli iş parçasına ait MRR değerleri ve S/N oranları ...	49
Tablo 4. 11. Talaş kaldırma oranı yanıtları	49
Tablo 4. 12. Normal Inconel 718 için talaş kaldırma oranı yanıtları	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Süper alaşımların kullanım alanları (Ezugwu, 2005).....	15
Şekil 2. 2. Tel erozyon tezgâhının çalışma şeması (Kurubaş, 2004).....	17
Şekil 2. 3. Tek seviyeli Taguchi ortogonal tasarım tablosu.....	20
Şekil 2. 4. Taguchi mixed seviyeler	21
Şekil 2. 5. Ra değeri gösterimi	21
Şekil 2. 6. Rz, Rv, Rp ve Ir değerlerinin gösterimi	22
Şekil 2. 7. Rq değerinin grafiksel gösterimi	23
Şekil 3. 1. CNC tel elektro işleme tezgahı a) Kontrol ünitesi b) İş parçasının bağlanması	25
Şekil 3. 2. İşlenmiş Inconel 718 iş parçası	26
Şekil 3. 3. İş parçası detay resmi	26
Şekil 3. 4. Inconel 718'e uygulanan ısıt işlemlerin şematik gösterimi.....	30
Şekil 3. 5. Tel Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (Fe-Sem)	30
Şekil 3. 6. Mitutoyo yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	31
Şekil 3. 7. Hellos 350. V a) Profil projektör cihazı b) Örnek bir gösterim	32
Şekil 3. 8. Mikro sertlik ölçüm cihazı (Anonim 5).....	33
Şekil 3. 9. Ölçülen iz görüntüsü	33
Şekil 4. 1. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları a) Ra, b)Rq ve c) Rz	36
Şekil 4. 2. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için ortalama ana etkileri a) Ra, b)Rq ve c) Rz	37
Şekil 4. 3. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları a) Ra, b)Rq ve c) Rz	40
Şekil 4. 4. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için ortalama ana etkileri a) Ra, b)Rq ve c) Rz	41
Şekil 4. 5. SEM görüntüleri	43
Şekil 4. 6. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının kerf değerleri ait S/N oranları ...	46
Şekil 4. 7. Kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasının kerf değerleri ait S/N oranları	47
Şekil 4. 8. Talaş kaldırma oranlarının Sinyal/Gürültü oranı.....	50
Şekil 4. 9. Normal Inconel 718 için talaş kaldırma oranlarının Sinyal/Gürültü oranı....	51

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile başlayan ve halen devam etmekte olan teknolojik gelişmeler; teknik bakımdan uygun ve ekonomik yönden elverişli özel malzemelere olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu gibi sebepler yüksek mekanik özelliklere sahip, korozyona ve yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımı olan süper alaşımların geliştirilmesinin katkı sağlamıştır. Mevcut olan metal ve metal alaşımlarının yüksek sıcaklığın, aşınma ve korozyonun neden olduğu olumsuz çalışma şartları altında istenilen özellikleri sağlayamadığı için farklı malzeme çeşitlerinin üretilmesi ihtiyacı doğurmuştur. Üretilen bu malzemelerin başında süper alaşımlar gelmektedir. Süper alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklıktaki çalışma şartlarında mekanik özelliklerini koruduğu için diğer malzemelere oranla daha çok tercih edilmektedir. Bunun ile birlikte bu süper alaşımlar üretim esnasında elde edilen mikroyapı kusurlarının daha az olması ve elde edilen kimyasal kompozisyonun korunması bir diğer tercih nedenlerindendir. Süper alaşım malzemelerin bu üstün özelliklere bağlı olarak genellikle nükleer teknolojiler, uzay araçları, havacılık, enerji sistemleri, cam sanayisinde, gaz türbin motorları, sıcak iş takımları ve kalıpların yapımında kullanım sahası oluşmasından dolayı bu malzemelere olan ilgi artan bir talep ile giderek artmıştır. Bu artışın temel sebebi yerlerini aldığı metal ve metal alaşımlarına göre belirgin bir şekilde üstün özelliklerinin olmasıdır. Bu özellikler; yüksek spesifik elastisite modülü, yüksek aşınma dayanımı, yüksek özgül mukavemet ve bu üstün özelliklerini yüksek sıcaklıkta bile muhafaza edebilmesidir. Bu üstün özelliklerinden dolayı yüksek dayanım gerektiren uygulamalar, yüksek sıcaklık uygulamaları ve yüksek ağırlık taşıma oranları için özel olarak tasarlanmışlardır. Titanyum ve nikel esaslı alaşımlar ve kompozit malzemeler gibi mühendislik malzemeleri, uzay sanayisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Nikel esaslı alaşımlar, uzay sanayindeki ekonomik işletme giderleri için gerekli olan yüksek korozyon direncine ve yüksek sürtünmeye sahiptirler (Akşit 2008; Ezugwu, vd. 2003).

650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve yüksek sıcaklığa bağlı korozyon ve erozyona dayanıklılık göstermeleri süper alaşımların en önemli özellikleri olarak gösterilebilir. Özellikle kobalt ve nikel esaslı süper alaşımlar, 1500-1650 °C gibi yüksek sıcaklıklarda bile yüksek dayanıma sahiptirler (Altın, 2004).

Inconel 718 süper alaşımı, 1965 yılında ilk olarak uluslararası bir nikel şirketi olan Huntington Division tarafından dövülerek imalat edilmiş ve nikel esaslı bir alaşım olarak yaşlandırılarak sertleştirilmiştir (Thomas, vd. 2006; Turan, 2013).

Demir-nikel bazlı olan Inconel 718 süper alaşım sınıfında bulunan, yüksek mukavemet değerlerine çökeltme sertleşmesi ile sahip olabilmekte ve bununla birlikte dayanımını 650°C'ye kadar muhafaza edebilmektedir. Inconel 718 süper alaşımının en önemli sertleştirme elementi niyobyum (Nb) olarak bilinmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı Inconel 718 süper alaşımı; uzay teknolojisi, havacılık, nükleer tesisler gibi yüksek mukavemeti ve sıcaklık dayanımı istenen çalışma alanlarında istenilen malzeme grubu olarak ön plana çıkmaktadır (ASM 1990; Dinç, 2013; Turan, 2013).

Döküm veya dövme yöntemleri olmak üzere iki şekilde imal edilebilen Inconel 718 süper alaşımı, çok iyi kaynak edilebilirlik özelliğine sahip olmasından dolayı gaz türbin elemanlarının üretilmesinde vazgeçilmez bir malzeme olarak sıklık ile tercih edilmektedir. Inconel 718 alaşımı ve diğer süper alaşımlar, çok iyi mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen aşınma karakteristiği istenilen düzeyde değildir. Bundan dolayı, bu malzemelere bir dizi yüzey işlemleri uygulayarak korozyon direncini kaybetmeden, tribolojik davranışları daha da iyileştirerek bu alaşımları performansları arttırılmaya çalışılmaktadır. Böylelikle bu olumsuz yanı ortadan kaldırılarak daha geniş uygulama alanlarında kullanılabilmektedir (Donachie, 2002; Turan, 2013).

Süper alaşımların uygulama alanları havacılık ve uzay sanayisi olarak ön plana çıkmaktadır. 1940 yılında, geleneksel malzemeler ile geliştirilen jet motorlarının türbinleri zorlu çalışma şartlarına mukavemet gösterememesinden dolayı süper alaşımların gelişimine katkı sağlamıştır. Geliştirilen süper alaşımlar, endüstriyel türbinlerin yapımına ve modern jet motorlarının gelişimini sağlamıştır. Hava araçlarının toplam ağırlığının % 10'unu motor kısmından oluşurken geriye kalan ağırlığın neredeyse tamamı ise gövdeden oluşturmaktadır. Motor kısmının bütününde yüksek yoğunluğa sahip süper alaşımların kullanılması zorunludur. Süper alaşımlı bu çelikler hem çok yüksek hem de çok düşük sıcaklıklara karşı gösterdiği dayanımdan dolayı da roket motorların aksamalarında da sıklık ile tercih edilmektedirler. Bir diğer kullanım alanı ise yüksek ısı ve yükleme değerlerinde çalışan türbin sistemlerinin ihtiyaç duyduğu, yüksek tahrikli sistem parçaları bu süper alaşımların çoğunlukla kullanım bulduğu alanlar olmuştur (Odabaşı, 2010; Tillack, 2007).

Nikel alaşımlı çeliklerden biri olan Inconel 718, iş parçası malzemesi olarak süper alaşımlı malzemeler arasında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Inconel 718 malzemesi yaşlandırılarak sertleştirilebilir, çok yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini koruyabilmektedir (Çelik, vd. 2014; Kasim vd. 2019; Nath vd. 2015; Ucu

vd. 2013; Yılmaz vd. 2018). Bu özelliklerinden dolayı, çok özel yerlerde kullanılmak üzere üretilmiş ve çok özel spesifikasyonlara sahip olan Inconel 718 havacılıkta ve uzay sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır (Ezugwu vd. 2005; Halim vd. 2019; Kannan&Kui 2019; Li vd. 2006; Luo vd. 2018; Malmelöv vd. 2020; Musfirah vd. 2017; Ni&Dong 2017; Zhao vd. 2020). Kimyasal açılımı NiCr19Fe19Nb5Mo3 olan bu nikel alaşım malzeme, korozyona karşı aşırı derecede yüksek dayanıma sahiptir.

İşlenmesi güç olan malzemelere farklı ısı işlemler uygulayarak malzemenin içyapısında değişiklikler meydana getirilebilir. Bu doğrultuda sıfır altı işleme olarak bilinen kriyojenik ısı işlem Inconel 718 iş parçası malzemesine uygulanarak bu işlemin etkisi araştırılmıştır. İşlenmesi güç olan malzemelerin işleme yöntemi olarak alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan tel elektro erozyon kullanılmaktadır. Sıfır altı ısı işlem olarak da bilinen kriyojenik ısı işlem, genel olarak kesici uçların tokluk, aşınma direnci ve sertlik gibi özelliklerini geliştirmek için uygulanmaktadır. Yaklaşık birkaç on yıldır takım kesici uçlarının kesme performansını artırmak için ısı işlem amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Kriyojenik ısı işlem uygulandığı sıcaklık aralığına göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası sığ kriyojenik işlem ve $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası derin kriyojenik işlem olarak adlandırılmaktadır (Akincioğlu, vd. 2015). Ayrıca bu ısı işlem, birçok metal ve metal alaşımlı malzemelere uygulanan konvansiyonel ısı işlemlerden sonra yapılan tamamlayıcı özel bir ısı işlemdir (Ersöz&Ovalı, 2018).

Kriyojenik işlemde işlem uygulanan malzeme önceden belirlenen sıfırın altındaki sıcaklığa belirli bir hızda kademeli olarak soğutulur, bu sıcaklıkta bir süre bekletilir ve belirli bir hızla tekrar oda sıcaklığına çıkarılır. Malzemelere bu işlemin uygulanmasındaki amaç, minimum veya önemsiz yan etkilerle malzemeye istenilen mekanik özelliklerin kazandırılmasıdır (Thornton, vd. 2011). Kriyojenik işlemin malzemenin mikroyapısına, performansına, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve kriyojenik işlem parametrelerine bağlıdır. Uygun kriyojenik işlem şartları, işlem uygulanan malzemenin mekanik ve mikro yapı özelliklerinde önemli değişikliklere meydana getirmektedir (Demir&Uygur, 2017).

Tel elektro erozyon ile yapılan kesme işleminde, bir tel elektrotun üzerinden geçirilen yüksek yoğunluktaki akım yardımı ile elektrik iletkenliğine sahip herhangi bir malzemenin elektriksel aşındırma yani küçük parçacıklar şeklinde erozyona tabii tutma yöntemidir (Han, vd. 2007). Alışılmamış imalat yöntemleri arasında yer alan bu geleneksel olmayan yöntem, elektriksel iletkenliğe sahip sert ve karmaşık geometrilili iş parçalarının mikron düzeyde işlenebilmesine olanak vermektedir. Ayrıca Inconel 718

nikel alaşımlar gibi işlenmesi güç olan malzemelerin işlenmesinde de sıklık ile kullanılmaktadır (Devillez, vd. 2011; Tondy&Tigga, 2019).

Tel elektro erozyon ile işlemede, iş parçasından kontrollü bir elektrik ark vasıtasıyla talaş kaldırılır. Oluşan her bir ark iş parçası malzemesi üzerinde küçük bir krater meydana getirerek küçük talaşlar meydana getirir. Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine kullanılan bu yöntem ile sertleştirilmiş iş parçaları ve sert maden uçları kolaylıkla işlenebilmektedir (Doval, vd. 2005). Bu özelliğinden dolayı tel elektro erozyon ile işleme yöntemi çok önemli bir uygulama alanına sahip olmuştur. Elektro erozyon ile işlemenin bir diğer önemli avantajı ise işleme esnasında kesme kuvvetlerinin oluşmamasıdır.

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan tel elektro erozyon ile işleme yaygın olarak işlenmesi güç ve karmaşık iş parçalarının işlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, CNC üniteli tel elektro erozyon tipi tezgâhlarda çok sert malzemeler, yapılması zor olan parçalar ve karmaşık şekilli iş parçalarının kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemin kullanım sahasını genişletmiştir (Ekmekçi, vd. 2005).

Yüzey bütünlüğü kavramı, işlenmiş olan malzemelerin yüzey sertliği, morfolojisi ve pürüzlülüğü gibi değişkenlerden oluşmaktadır. İşlenmiş parçanın işlenmiş yüzeydeki kalitesi, yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü, aşınma, sürtünme ve görsellik gibi farklı parametreleri etkilemektedir. Parçaların birbiri ile temas halinde çalıştığı sistemlerde pürüzlülük parçalar arasındaki sürtünmeyi ve parçanın kullanım ömrünü doğrudan etkilediği için önemlidir. Bundan dolayı işlenerek elde edilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri önem kazanmaktadır ve bir iş parçasının yüzey kalitesini belirlemede kullanılan önemli kriterlerden biri olduğu için ölçülmesi önemlidir. Taguchi metodu, maliyeti ve süreyi azaltmak için deney sayılarının azaltılması ve optimum şartların belirlenmesinde sıklık ile kullanılan bir deney tasarım yöntemidir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri deney düzeneğindeki deney sayılarını mümkün olan en az sayıda ve sonuçları yüksek doğruluk oranlarında optimum şartları sağlamasıdır (Baday&Ersöz, 2022-2023; Baday, vd. 2017; Gürbüz&Baday, 2019).

Tel elektro erozyon ile işlemede, kesme genişliği (kerf) ve kıvılcım aralığı işleme sonrası hazır hale getirilmiş iş parçasının boyutsal doğruluğunu belirler; aynı zamanda işleme sırasında israf edilen malzeme miktarını da ifade eder (Jahan, 2014). İşleme sonrası gerek montaj gerekse de iş parçalarının bir biriyle çalışma yüzeyleri bakımından işlenmiş parçalarda oluşan boyutsal doğruluklar önem arz etmektedir. Bu nedenlerden dolayı tel elektro erozyon ile işlemede iş parçalarının performansının

değerlendirilmesinde kerf değeri önem arz etmektedir. Tel elektro erozyon ile işlemede işleme performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer parametre talaş kaldırma oranıdır. Tel elektro erozyon ile işlemede, hız ve doğruluk esastır ve kaba kesme sırasında kesme hızı çok önemlidir. Tel elektro erozyon ile işlemede, ekonomik işlemeye yönelik farklı yaklaşımlarla talaş kaldırma oranı ve kesme hızını artırmak için birçok girişimde bulunulmuştur. Tel elektro erozyon tezgâhında, talaş kaldırma oranını büyük ölçüde malzeme kalınlığına bağlıdır (Jahan, 2014).

Bu tez çalışmasında, işlenmesi güç olan Inconel 718 süper alaşımlı iş parçalarını tel elektro erozyon tezgâhında slot (yuva) şeklinde kesilerek elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde işleme parametrelerine bağlı olarak kriyojenik ısıtılmanın etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de uygulanmamış Inconel 718 süper alaşımı tel elektro erozyon tezgâhında üç farklı gerilim (G), tel ilerleme hızı (TH) ve sıvı basıncı (SB) gibi işleme parametrelerinde kesilmiştir. İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü değerleri bir biri ile kıyaslanmış ve optimum işleme parametreleri Taguchi ortogonal dizayn kullanılarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca talaş kaldırma oranı ve kerf değerleri bir biriyle karşılaştırılmıştır. Yüzey morfolojilerini daha iyi anlayabilmek için hem kriyojenik işlemler hem de kriyojenik işlemsiz işlenmiş iş parçalarının yüzeylerinden çekilen SEM görüntüleri incelenmiştir.

1.1. Kaynak Araştırması

Paswan vd. (2023) Inconel 718 süper alaşımı üzerinde grafen nano metal ile elektro erozyonla işlemede (EDM: Electro Discharge Machining), mikro düzeyde morfoloji, yüzey topografyası, yüzey bütünlüğü, talaş kaldırma oranı, sertlik ve yüzey altı beyaz ve siyah katmanları (recast layer) analiz etmişlerdir. Elde etmiş oldukları sonuçları optimize etmişlerdir. Ayrıca işlenmiş yüzeyler üzerinde meydana gelen kalıntı gerilmeleri de incelemişlerdir.

Chen vd. (2021) Inconel 718'in tel elektro erozyon ile işlenmesi (WEDM) esnasında kıvılcım yerini (spark location) tespit etmek için ısıya dayanıklı cam, optik filtre, odaklama merceği ve dijital yüksek hızlı video kamerayla görüntülemeler yapmışlardır. Elde etmiş oldukları görüntüleri de bir dizi görüntü işleme yöntemleri kullanarak tespit etmişlerdir.

Ukey vd. (2023) tel elektro erozyon ile işleme sonuçlarını optimize eden çalışmaların bir derlemesiyle ilgili bir çalışma yapmışlardır. Pek çok araştırmacı, çok

sayıda işlem parametresi ve yanıtları ve farklı optimizasyon tekniklerinin mevcut olması ve belirli bir malzeme için en uygun ayarın belirlenmesinin zor olması nedeniyle bu süreci modellemeye çalışmıştır. Bu çalışma, kullanılan farklı optimizasyon teknikleri ile araştırmacılar tarafından seçilen farklı süreç parametreleri arasındaki ilişkiye ilişkin WEDM'deki araştırma eğilimlerini gözden geçirmektedir.

Devanathan vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada 0,25 mm çaplı bakır tel kullanılarak Inconel 738 tel elektro erozyon ile kesilmesini gerçekleştirmişlerdir. Takım ve iş parçası elektrodu arasında dielektrik sıvı olarak minerali giderilmiş su kullanmışlardır. İşleme parametreleri olarak gerilim, tel besleme hızı, darbe açma ve kapatma süresi dört farklı değerde ayarlanarak Inconel 738 malzemesinin on altı slot keserek işleme özelliklerini analiz etmişlerdir. İşlenen yüzeyler yüzey kalitesi, malzeme çıkarma oranı ve kerf açısından incelemişlerdir. İşleme parametrelerinin deney sonuçları üzerinde katkısını bulmak için Minitab yazılımı kullanarak varyans analizi (ANOVA) testini gerçekleştirmişlerdir. En düşük kerf genişliği elde edilmesinde en etkili parametrenin tel besleme hızı olduğunu bulmuşlardır. Gerilim, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında önemli bir proses parametresi olduğunu ifade etmişlerdir.

Patel vd. (2022) tel elektro erozyon ile işleme prosesinde, malzeme kaldırma oranının (MRR) modellenmesi ve tahmin edilmesi için merkezi kompozit (CCD) tasarımı içeren geri yayılım ve yanıt yüzeyi metodolojisine sahip yapay sinir ağlarına dayalı etkili bir proses optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Tahmin modellerinin geliştirilmesinde, darbe vurum süresi (pulse on time), darbe kapalı kalma süresi (pulse off time), tepe akımı (peak current), kıvılcım aralığı ayar gerilimi, tel gerilimi ve tel besleme hızı gibi kesme parametrelerini model değişkenleri olarak dikkate almışlardır. Geliştirilen yapay sinir ağlarının ve yanıt yüzey yöntemi metodolojisi tahmin modellerinin performanslarını belirleme katsayısı ve ortalama karekök hata açısından tahmin doğruluğunu test etmişlerdir. MRR'nin CCD istatistiksel modelleri, oluşturulan BPNN modellerinin performansı ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, yapay sinir ağları modelinin yanıt yüzey yöntemi modelinden daha doğru tahmin sonuçları sağladığını göstermektedir.

Choudhuri vd. (2022) işlenmesi zor olan Inconel 800 üzerinde tel elektro erozyon ile işleme prosesi ile deneyler yapılmıştır. Deneylerin yapılmasında, işleme parametrelerinin kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve tel tüketim oranı gibi performans özelliklerini büyük ölçüde etkilediği ve elde etmiş oldukları sonuçları optimize etmişlerdir. İşleme sürecinin en iyi parametrik kombinasyonunu belirlemek için Yapay Sinir Ağları tabanlı Bayes hibrit optimizasyon algoritması uygulamışlardır. Deşarj

kıvılcımı, işlenmiş yüzey üzerinde gözenekler ve diğer yüzey kusurlarına neden olduğunu ifade etmişlerdir. İşlenmiş yüzeylerin bütünlüğü taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiş ve bu yüzeyler birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Abebe vd. (2022) çalışmada aralık gerilimi (GV), darbe açık kalma süresi (Ton), darbe kapalı kalma süresi (Toff) ve tel besleme hızı (WF) gibi WEDM proses parametrelerinin kerf genişliği (KW) üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonuçlarını Box Behnken yöntemi aracılığıyla yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Her bir proses parametresinin kerf genişliği üzerindeki etkisini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) yapmışlardır. KW için daha iyi işleme koşulları bulmak amacıyla arzu edilirlilik yaklaşımı kullanıldı. ANOVA sonuçlarına göre GV, Ton ve Toff önemli bir etkiye sahipken, WF'nin KW üzerinde daha az etkisi vardır. Minimum aralık gerilimi GV (40 V), Ton (3 ls), Toff (10 ls) ve WF'de (1 m/dk) 0,356 mm'ye ulaşıldığı ifade etmişlerdir. Doğrulama testi sonucu, tahmin edilen değerlerin %95'lik güven ile deneysel değerlerin sonuçlarının iyi bir şekilde uyduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.

Tonday ve Tigga (2019) Inconel 718 malzemesinin tel elektro erozyon ile işlenmesini incelemişlerdir. Darbe vurum süresi (pulse on time), darbe kapatma süresi (pulse off time), kesme voltajı, püskürtme basıncı ve tel besleme proses parametreleri olarak kabul etmişlerdir. Deneysel sonuçların değerlendirilmesinde işleme süresi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini ele alınmışlardır. Elde edilen sonuç parametrelerinin giriş parametreleriyle ilişkili olarak analiz edilmişlerdir. Kesme deneyleri deney tasarımı, her işleme parametresinin üç farklı seviyesine sahip L27 ortogonal dizine göre gerçekleştirilmiştir. İşleme süresi ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin darbe zamanı olduğunu bulmuşlardır.

Mohapatra vd. (2022) dört farklı Inconel süper alaşımının (600, 625, 718 ve 825) elektro erozyon ile işlenmesini incelemişler. İşleme süreç değişkenleri olarak aralık voltajı, tepe deşarj akımı, darbe süresi (yani darbe vurum süresi), görev faktörü ve dielektrik sirkülasyon yıkama basıncı, işlenebilirlik, malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı dikkate alınarak değerlendirildi; çalışma yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü ve yüzey çatlak yoğunluğu incelemişlerdir.

Paturi vd. (2021) Inconel 718 süper alaşımının işlenmesi üzerine farklı işleme yöntemlerinin inceleyen kapsamlı bir derleme makalesi yazmışlardır. Bu derleme çalışmasında bu işleme yöntemlerinin farklı soğutma türleri ile işlenmesini ve ekolojik olarak etkilerini sunmuşlardır. İş parçası davranışı, takım aşınması, kesme sıcaklıkları ve

en son teknoloji yağlama teknikleri altında talaş oluşumu ilgili ve gelecekteki çalışmalara sürdürülebilir işlemeye yönelik önemli bilgiler sunmuşlardır.

Nayak ve Mahapatra (2016) derin kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 süper alaşımının konik kesme yöntemi ile tel elektro erozyon tezgahında işlemişlerdir. İşleme parametreleri olarak parça kalınlığı, koniklik açısı, darbe süresi, deşarj akımı, tel hızı ve tel gerilimi gibi altı adet giriş değişkeni belirlemişlerdir. Bu giriş değişkenlerin çıkış değişkeni olan açılma hatası, yüzey pürüzlülüğü ve işleme hızı üzerinde etkilerini yapay sinir ağları ile araştırmışlardır. Optimum parametreleri belirlemek için yarasa algoritması olarak bilinen yeni bir meta-sezgisel yaklaşım kullanmışlardır.

Patil vd. (2023) Inconel 718 alaşımının elektro erozyon yöntemiyle işlenmesini, giriş parametreleri olan darbe vurum süresi, off time ve servo voltage değiştirilerek yapmışlardır. Deneyleri Taguchi deney tasarımı ile giriş parametrelerini kombinasyonun oluşturmuşlardır. İşlemedeki verimliliği işlenmiş Inconel alaşımının yüzeyinde ölçülen yüzey pürüzlülüğünü alarak değerlendirmişlerdir. Sinyal-gürültü oranı göre yüzey pürüzlülüğü optimize etmek için işleme parametrelerini en uygun dizilimini tespit etmişlerdir. Varyans analizini de her bir işleme değişkeninin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini belirlemek için kullanmışlardır.

Kumar vd. (2023) çeşitli nikel esaslı süper alaşımların ve bunların türlerinin gözden geçirilmesini ve son on yılda geleneksel olmayan işleme yöntemiyle işlenmesi ile ilgili bir derleme çalışması yapmışlardır. Geleneksel olmayan işleme yöntemiyle işlenen nikel bazlı süper alaşımlarla ilgili bazı önemli bulgular bulmuşlardır ve bu alandaki boşlukları gidermişlerdir.

Sudhir vd. (2023) Nimonic-105 alaşımı WEDM ile işlenmiştir. Çalışmada, darbe açık süresi (Ton), darbe kapalı süresi (Toff), tepe akımı (Ip), tel besleme hızı (Wf), tel gerilimi (Wt) ve tel çapı gibi çeşitli giriş parametrelere olarak belirlemişlerdir ve bu parametrelere göre kesme süresini bir çıkış parametresi olarak araştırmışlardır. Darbe açık süresi (Ton) ve tel çapının kesme süresini daha fazla etkileyen parametreler olduğu bulunmuştur. Zaman darbesi (Toff) ve Tepe akımı (Ip) etkili parametrelerdir ancak Ton ve Tel çapından daha az, ancak tel besleme (Wf) ve tel gerginliğinden (Wt) daha fazladır olduğunu ifade etmişlerdir. Tel Besleme (Wf) ve Tel Gerilimi (Wt) değişkenlik açısından diğer parametrelere göre daha az etkili olduğunu bulmuşlardır.

Sahu vd. (2023) titanyum alaşımının wedm ile işlenmesi sonucunda oluşan kerf genişliğini incelemiş ve optimize etmişlerdir. Giriş parametreleri olarak Aralık grilimi Gap Voltage (GV), B: Pulse on time (Ton), C: Pulse off time (Toff) ve tel besleme hızı

belirlemişlerdir. Bu işleme parametrelerine bağlı olarak işlenen süper alaşımın kerf değerlerini elde etmişlerdir. Elde etmiş oldukları kerf genişliği üzerinde etki eden giriş parametrelerinin etkisini ANOVA ile belirlemişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre kerf genişliği üzerinde en önemli parametrenin aralık grilimi Gap Voltage (GV) olduğunu söylemişlerdir.

Patil ve Chanmanwar (2022) titanyum alaşımını WEDM tezgâhında açılı olarak işlemişlerdir. Çalışmada, işleme parametreleri olarak kesme açısı, tel gerginliği ve tel hızı olarak belirlenirken çıkış parametresi olarak ise açılı hatalarını araştırmışlardır. Deney düzeneğini üç seviyeli ve üç faktörlü Taguchi L9 ortogonal tasarımına göre gerçekleştirmişlerdir. İşleme parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisini Anova testine göre analiz etmişlerdir. Anova sonuçlarına göre kesme açısı en önemli parametre olduğunu ve bunu tel gerginliği takip ettiğini söylemişlerdir. Açılı hatasının minimize etmek için kesme açısı 4° , tel hızı 7 m/dk ve tel gerginliğinin 10 N işleme parametreleri ile WEDM tezgâhında titanyum (ASTM'e göre Grade 2) olduğunu ifade etmişlerdir.

Sudhir vd. (2022) nikel esaslı süper alaşımların tel elektro erozyon ile işlenmesinde elde edilen sonuçları makine öğrenmesi ile değerlendirilmesi ve optimizasyonunu inceleyen derleme bir çalışma yapmışlardır.

Tharian vd. (2021) Inconel süper alaşımın kriyojenik işlem uygulanmış grafit elektrotlar ile işlenmesini araştırmışlardır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde talaş kaldırma oranını belirlemişlerdir. Sonuç olarak kriyojenik işlem uygulanmış grafit elektrotlar ile işlemenin daha iyi sonuç verdiğini vurgulamışlardır.

Singh vd. (2023) çalışmalarında Inconel 718 iş parçasının kesilerek işlenmesi sonucunda elde edilen yüzey kalitesini iyileştirmek için öncelik ile gaz destekli lazer işleme ve ardından telli elektrokimyasal işleme işlemini bir arada gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, optimum işleme parametrelerini belirlemek için güç ve ilerleme hızını değiştirerek Inconel 718 iş parçasında yarık yapısını oluşturmak için bir lazer kesim uygulamışlardır. Bu işlemde sonra yarıklar özel olarak geliştirilmiş bir tel elektrokimyasal işleme ile işlemişlerdir. Bu bir birin takip eden işleme yaklaşımla, çentik genişliğinde %10'luk bir artışla yüzey kalitesinde ortalama %90'luk bir iyileştirme elde edilmiştir.

Ranjan vd. (2019) darbe süresi, darbe kapalı süresi, tepe akımı ve boşluk voltajı gibi işleme parametrelerinin Inconel 718'in esnasında toz parçacık boyutu ve konsantrasyonunun talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Elde etmiş

oldukları deneysel sonuçların yanıtlarını modellemek için regresyon analizi yapılmışlar ve ardından parçacık sürü algoritması aracılığı ile de optimizasyon gerçekleştirmişlerdir.

Rahul vd. (2019a) dört farklı kalitedeki Inconel iş parçasının elektro erozyon ile işlenmesini deneysel olarak analiz etmişlerdir. İşleme deneylerini 5 faktörlü 4 seviyeli L16 Taguchi ortogonal dizisine göre gerçekleştirmişlerdir. İşleme parametreleri olarak boşluk voltajı, tepe deşarj akımı, darbe süresi (yani darbe süresi), görev faktörü ve dielektrik sirkülasyon basıncını seçmişlerdir. İş parçalarının işlenebilirliğini değerlendirmek için malzeme kaldırma hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey çatlak yoğunluğunu araştırmışlardır. Taguchi yöntemi ile optimal işleme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır.

Rahul vd. (2019b) kriyojenik işleminin takım/iş parçasının elektro-erozyon ile işlenmesinde iş parçası olan Inconel 825 süper alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmışlardır. İşleme performansını değerlendirmek için işlenmiş yüzeyler üzerinde geliştirilen talaş kaldırma oranı (MRR), yüzey pürüzlülük ortalaması (Ra), yüzey çatlak yoğunluğu (SCD) ve beyaz tabaka kalınlığı (WLT) belirlemişlerdir. İşleme parametreleri olarak tepe deşarj akımı (Ip), darbe süresi (Ton) ve görev faktörünü (s) dikkate almışlardır. Kriyojenik işlemin etkisini görmek için EDM deneylerinde takım/iş kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Bu kombinasyonlar sırasıyla normal takım ve normal iş parçası, kriyojenik işleme tabi tutulan takım ve normal iş parçası ve normal takım ve kriyojenik işleme tabi tutulan iş parçası şeklinde deneyleri yapmışlardır. İşlenmiş numunelerin kimyasal bileşimi, metalürjik yönleri, artık gerilim ve mikro girinti sertliği üzerine karşılaştırmalar yapmışlardır. İşlenmiş yüzeyin morfolojisi taramalı elektron mikroskopu yoluyla incelenmiştir. Ayrıca, takım elektrodunun kriyojenik işleminin etkileri, şekil tutma kapasitesi, aşınma ve takım elektrodunun alt yüzeyinde karbon birikmesinin boyutu açısından da tartışmışlardır.

Zhang vd. (2019) çalışmalarında, Inconel 718'in ince duvarlı bileşeni işlenmesini incelemişlerdir. Inconel 718 iş parçasının sıcaklık dağılımını ve yüzey artık gerilimini hesaplayarak termal deformasyonu araştırmak için termo-fiziksel model geliştirmişlerdir. Darbe süresi, darbe akımı, su basıncı ve tel hızının ince duvarlı iş parçalarının termal deformasyonu üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Farklı termal deformasyon koşulları altında yüzey topografyası, mikro sertlik, yüzey element bileşimi ve yeniden şekillendirilmiş katman kalınlığı dahil olmak üzere artık gerilim ve yüzey özelliklerindeki varyasyonları ortaya koymuşlardır. Artık gerilim ve

yüzey bütünlüğündeki değişimlerin neredeyse termal deformasyonla tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Goyal (2017) çalışmasında, Inconel 625'in tel elektro erozyon ile işlenmesinde proses parametrelerinin talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine araştırmıştır. İşleme deneyleri, normal çinko kaplı tel ve kriyojenik işleminden geçirilmiş çinko kaplı tel kullanılarak yapılmıştır. İşleme parametreleri olarak takım elektrodu, akım yoğunluğu, darbe açık kalma süresi, darbe kapalı süresi, tel besleme ve tel gerilimi olarak belirlenmiştir. İş malzemesinin kalınlığı, çapı ve tel miktarı sabit tutulmuştur. Deneyleri gerçekleştirmek için Taguchi L18 ($2^1 3^5$) ortogonal dizi deney tasarımı kullanılmıştır. Malzeme çıkarma oranını ve yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre darbe süresi, takım elektrodu ve akım yoğunluğunun malzeme kaldırma oranına ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreler olduğu bulunmuştur.

Abhilash ve Chakradhar (2020) çalışmalarında, Inconel 718'in tel elektro erozyon ile işleme esnasında ortalama aralık voltajı değişimini ve tel kırılma olaylarını ilişkilendirmeyi amaçlamışlardır. Ortalama aralık voltajı değişimini, sistemdeki kararsızlıkların bir göstergesi olarak dikkate alarak tel kopmasını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım getirmeyi amaçlamışlardır. Tel kopma durumlarını tahmin etmek için uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemini (ANFIS) kullanarak ortalama voltaj değişimini modellemişlerdir. Yanıt yüzeyi metodolojisinin merkezi bileşik tasarımına dayanarak 31 deney yapmışlardır ve yanıt olarak ortalama aralık voltajı değişimini kaydetmişlerdir. İşleme parametreleri olarak darbe açma süresi, darbe kapatma süresi, servo voltajı ve tel besleme hızını kullanmışlardır. ANFIS modelinin, hangi kablo kopması uyarılarının verilebileceğine bağlı olarak ortalama aralık voltajı değişimini tahmin etmede oldukça doğru olduğu bulunmuşlardır.

Bhowmick vd. (2023) Inconel 718 iş parçasının işlenmesi sonucunda elde edilen talaş kaldırma oranını ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini değerlerinin optimizasyonu için yüzey yanıt yöntemi ve bulanık mantık kullanmışlardır. Deneylerde, girdi parametreleri olarak toz konsantrasyonu, darbe akımı, aralık voltajı, darbe açık kalma süresi ve darbe kapalı süresini belirlemişlerdir. Elde etmiş oldukları yanıtlar için önemli girdi parametrelerini bulmak amacıyla varyans analizi yapmışlardır.

Biswas ve vd. (2023) çok malzemeli sistemler için verimli stratejiler elde etmek amacıyla çok malzemeli optimizasyon için genetik algoritma (GA) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) entegre çok amaçlı çok katmanlı sinir ağı modelleri geliştirmeyi

amaçlamışlardır. Inconel 625 ve Inconel 718'in eşzamanlı WEDM'si için optimum parametreleri belirlemek üzere GA ve PSO teknikleriyle entegre 13–300–300–4 mimarisine sahip MOMLNN adlandırdıkları bir yapay sinir ağı oluşturmuşlardır. GA entegre modelin PSO entegre modele göre biraz daha yüksek bir doğruluğa sahip olduğu görmüşlerdir. Malzeme kaldırma oranı (MRR) ve kerf genişliği, darbe açık zamanı ve darbe kapalı zamanı artmasıyla arttığını bildirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü değerinin darbe açık zamanın azalması ve tel hızının artmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir.

Abhilash ve Chakradhar (2020) tel elektro erozyon ile işlenmiş Inconel 718 iş parçasının işleme stabilitesinin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. İşleme deneylerinde kullanılan tel elektrotun malzemesi sert çinko kaplı pirinçtir. Deşarj enerjileri ve işleme aralığı koşullarına göre tanımlanan çeşitli işleme stabilitesi seviyelerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. İşlenmiş yüzeylerin topografik özelliklerini temaslı yüzey profilometre ve temassız 3D profilometre ile analiz etmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, farklı stabilite seviyelerinde işlenmiş numuneler üzerindeki mikro boşluklar, mikro çatlaklar, mikro kürecikler, mikro kraterler gibi yüzey kusurlarını gözlemlemek ve karşılaştırmak için analiz etmişlerdir. En yüksek deşarj enerjisine, en düşük elektrotlar arası açıklığa ve en az darbe kapalı süresine sahip işleme koşulu, en düzensiz topografyayı ürettiğini vurgulamışlardır.

Johny ve Thiagarajan (2020) çalışmalarında giriş parametreleri tel besleme, değişken frekans ve dielektrik sıvı püskürtme hacmi olarak alınmıştır. WEDM yüksek boyutsal doğruluk elde edebilse de termal ömrü, yüzey bütünlüğü konusunda büyük endişelere neden olmuştur. Bu nedenle mikro yapı analizi gibi yüzey bütünlüğü hususlarının araştırılması gerekmektedir. Yüzey bütünlüğü yönleri ve proses parametreleri arasında bir arzu edirlilik optimizasyon algoritmasının oluşturulması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Naik vd. (2021) işleme parametrelerinin Inconel 718 süper alaşımının WEDM'nin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İşleme parametreleri dönme hızı, darbe açma süresi, darbe kapatma süresi, servo voltajı, tel besleme hızı ve sıvı basıncı olarak seçmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreleri bulmak için varyans analizi (ANOVA) tekniği kullanmışlardır. ANOVA'dan elde edilen sonuçlara göre darbe süresinin WEDM'in Inconel 718 alaşımının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli değişkenler olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, işleme parametrelerini yüzey pürüzlülüğüne göre formüle etmek için bir regresyon yöntemi kullanılarak regresyon

modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, optimal ayar parametreleriyle doğrulanmış ve modelin maksimum tahmin hatası %8'den az olduğunu ifade etmişlerdir.

Thejasree vd. (2021) Inconel 718'in tel elektro erozyonda işlenebilirliğini Taguchi'nin yaklaşımıyla işleme parametrenin optimum şartlarını belirlemişlerdir. Deneysel çalışmaları, Taguchi ortogonal dizilime göre planlanmaktadır. Deneylerdeki işleme parametreleri olarak darbe açık kalma süresi, darbe kapalı kalma süresi ve tepe akımı gibi değişkenlerin üç farklı seviyede dikkate alınarak gerçekleştirmişlerdir. İşleme parametrelerinin yanıtlar üstündeki etkinliğini ANOVA analizi ile belirlemişlerdir.

Paturi vd. (2021) Inconel 718 iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerlerini yapay sinir ağları kullanarak modellemişlerdir. Çok katmanlı aę mimarisinde geri yayılımlı sinir ağı (BPNN), transfer fonksiyonu tansig ve eğitim fonksiyonu olarak Levenberg Marquadt (TrainLM) kullanmışlardır. Sonuç olarak yapay sinir ağları yönteminin WEDM sürecinde parametre optimizasyonu için etkili bir araç olduğunu göstermişlerdir.

Kumar ve Singh (2021) Inconel 718 iş parçasının işlenmesinde deneysel analiz ve parametrik optimizasyon yaparak ele almışlardır. Kesme deneylerinde, darbe süresi, açık devre gerilimi, tel gerginliği ve tel besleme hızı gibi işleme parametrelerini optimize etmişlerdir. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı üzerindeki etkinliklerini Taguchi tasarımı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin açık devre gerilimi olduğunu tespit etmişlerdir.

Kumar vd. (2018) kaplamalı ve kaplamasız pirinç tel kullanılarak Inconel 718 süper alaşımının tel elektro erozyon ile işlenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde çinko kaplı pirinç telin kaplamasız pirinç tele göre daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Dhanunjaya vd. (2018) benzer bir şekilde Inconel 718 süper alaşımının pirinç tel ve çinko kaplı pirinç tel kullanılarak tel erozyon ile kesilmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu deneysel çalışmanın sonucunda; minimum yüzey pürüzlülüğü için çinko kaplı pirinç telin, pirinç tele göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit etmişlerdir.

Divya vd. (2020) farklı malzemelerin; Inconel, titanyum ve alüminyum alaşımlarının tel elektro erozyon kullanılarak kesilmesini araştırmışlardır. Kesme deneyleri sonucunda belirlenen optimum işleme parametreleriyle ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,626 μm değerinde elde etmişlerdir.

Marelli vd. (2020) çalışmalarında süper alaşımların tel erozyon ile işlenmesinde optimum yüzey pürüzlülüğü değerini vurum süresinin %66,70 katkı oranıyla 0,16 μm olarak tespit etmişlerdir.

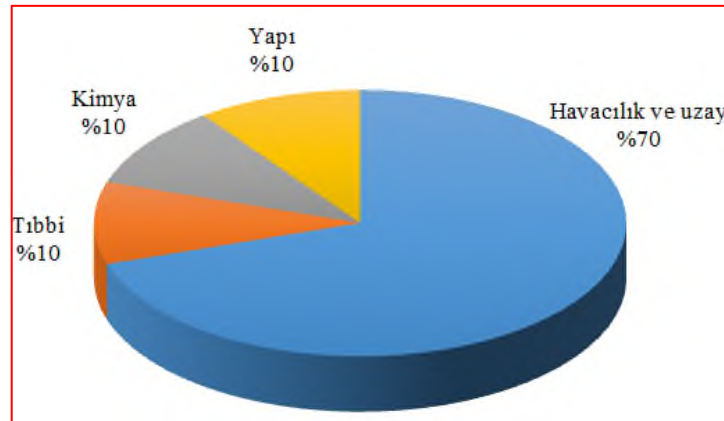
Vani vd. (2018) 0,25 mm pirinç tel ve çinko kaplı pirinç tel kullanarak Inconel 718 süper alaşımının tel erozyon ile kesilmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde etmiş oldukları deneysel sonuçlardan, akım ve vurum süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Gerçekleştirilen literatür doğrultusunda, bu tez çalışmasının amacı; havacılık ve savunma sanayisinde yaygın bir kullanıma sahip ve aynı zamanda işlenmesi zor malzemelerden biri olan Inconel 718'in tel elektro erozyon ile kesilerek işlenmesinde optimum işleme parametrelerini belirleyerek en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini belirlemektir. Aynı zamanda, kesilerek işlenmiş yüzeylerin SEM görüntüleri, kerf ve talaş kaldırma oranı gibi değişkenlerde incelemektir. Literatürdeki araştırmacıların çoğunluğu, genel olarak tel elektro erozyon ile işlemede optimizasyon çalışmalarında işleme parametreleri olarak vurum süresi ve vurum bekleme süresini kullanarak yapmışlardır (Abdil ve Motorcu, 2017; Thejasree ve ark, 2021). Fakat tel ilerleme hızı, gerilim ve dielektrik sıvı basıncının işleme parametresi olarak belirleyen çalışmalar ise kısıtlıdır (Karataş 2022). Bu sebeple; yapılan bu çalışmada hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçaları tel elektro erozyon tezgahında kesilerek işlenmiş yüzeylerden elde edilen yüzey pürüzlülük (R_a , R_q ve R_z) değerlerinin optimum işleme parametrelerinin belirleyebilmek için Taguchi ortogonal tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yüzeylerin SEM görüntüleri ve mikroskoptan alınan görüntüleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, hem kriyojenik işlemli hem de işlemesi iş parçalarının kerf, talaş kaldırma oranları da birbiriyle karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Süper Alaşımlar

Bazı zorlu çalışma koşullarında metaller ve metal alaşımları yeterli performansı sağlayamayabilir; bu nedenle, bu tür koşullarda kullanılmak üzere yeni malzeme grupları geliştirilmiştir. Bu grupların en önde gelenlerinden biri süper alaşımlardır. Günümüz teknolojisi sayesinde, hem ekonomik hem de teknik açıdan gereksinimleri karşılayan süper alaşımlar üretilmektedir. Süper alaşımlar, diğer malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık uygulamalarında daha çok tercih edilir. Bu tercihin nedeni, süper alaşımların sahip olduğu mükemmel performanslarının sadece kimyasal bileşenlerinden değil, aynı zamanda üretim süreçlerinden kaynaklanan mikroyapılarından, mikroyapısal bütünlüklerinden ve ikincil fazlardan da kaynaklanmasıdır. Süper alaşımların metal ve metal alaşımlarına göre üstün yanları, yüksek aşınma direnci, yüksek özgül mukavemet ve yüksek elastik modül gibi özelliklere sahip olmaları ve aynı zamanda yüksek sıcaklıkta bile bu özellikleri koruyabilmeleridir. (Ezugwu, vd. 2003; Karabulut, 2006). Süper alaşımlar, bu özelliklerinden dolayı havacılık, savunma, elektronik, ortopedi, nükleer reaktörler, petrokimya tesisleri, denizcilik donanımları, kirlilik kontrol cihazları, gıda işleme ekipmanları ve ısıtma ekipmanları gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de süper alaşımların genel kullanım alanlarını göstermektedir (Ezugwu, 2005).



Şekil 2. 1. Süper alaşımların kullanım alanları (Ezugwu, 2005)

Süper alaşımlar, nikel, demir-nikel veya kobalt esaslı alaşımlar olup, diğer alaşımlara kıyasla yüksek sıcaklıklarda iyi oksidasyon ve korozyon direnci ile üstün kopma ve sürtünme dayanımına sahiptirler (Choudhury&El-Baradie, 1998). Bu alaşımların önemli

özelliklerinden biri, 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara uzun süre dayanabilmeleri ve sıcaklıkla ilişkili erozyon ve korozyona karşı direnç göstermeleridir (Karabulut, 2006). Yüksek dayanım ve sürtünme direnci elde etmek için, alaşımı oluşturan elementlerin yüksek sıcaklıklarda dengeli bir yapı oluşturmaları önemlidir. Süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımı, içyapılarında bulunan karbürlerin veya diğer ana bileşiklerin oldukça kararlı olmasından kaynaklanmaktadır (Bargel&Schulze, 1980; Askeland, 1998; Dursun, 2007).

Süper alaşımların uygun kimyasal kompozisyonları olanları dövülebilir, haddeleme ile levha haline getirilebilir veya çeşitli diğer yöntemlerle üretilebilir. Genellikle daha yüksek alaşımlı içeriklere sahip olanlar döküm yöntemiyle üretilir. Fabrikasyon yapılar, sert lehimleme veya kaynak yaparak üretilebilir. Ancak, yüksek miktarda sertleşme fazı içeren ve yüksek oranda alaşımlı kompozisyona sahip olanların kaynak yapılması zor olabilir (İnanır, 2012).

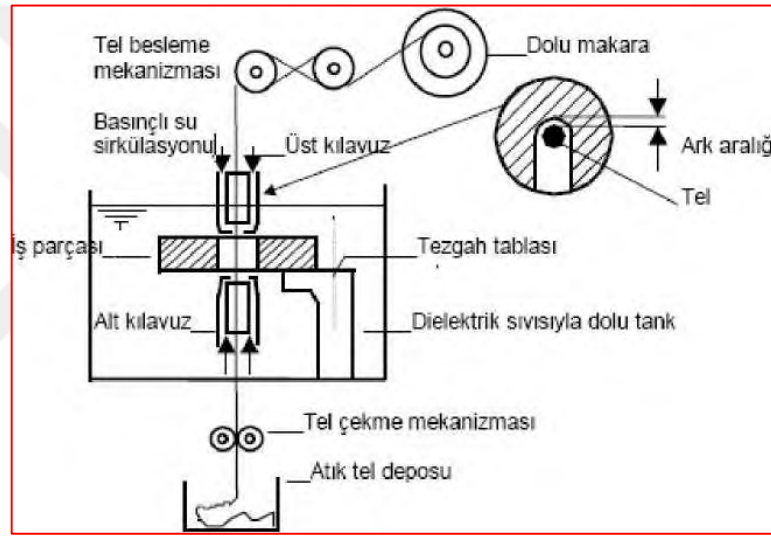
2.1.1. Süper alaşımların sınıflandırılması

Süper alaşımların sınıflandırılması, içerdikleri ana bileşenlere göre yapılmaktadır. Nikel, demir ve kobalt esaslı olmak üzere toplam 3 ana grup bulunmaktadır. Süper alaşımların türünü belirleyen bu 3 element dışında niyobyum, molibden, tantal ve tungsten gibi refrakter elementler ile alüminyum, titanyum, krom, karbon, bor ve zirkonyum gibi birçok element süper alaşımların yapısında bulunabilmektedir (Reed, 2006).

2.2. Tel Erozyon İşleme Yöntemi

Tel erozyon ile işleme, geleneksel olmayan bir endüstriyel işleme yöntemidir ve gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Bu yöntem, dielektrik sıvı içerisinde bir tel elektrot ile iş parçası arasındaki boşlukta meydana gelen elektrik kıvılcımlarının etkisiyle iletken malzemeden talaş kaldıran bir termal aşınma işlemidir. Tel erozyonla işleme, geleneksel tornalama, frezeleme, taşlama gibi yöntemlerin yerini giderek daha fazla almaktadır (Hargrove ve Ding, 2007). Tel erozyon, geleneksel elektro erozyonla işleme (EDM) yönteminin özel bir türüdür. Her iki işleme yöntemi de talaş kaldırma mekanizmalarını paylaşıyor da, işlevsel karakteristikleri farklıdır. Tel erozyon tezgâhı, ince bir tel elektrot kullanır ve bu elektrot, iş parçası üzerinde kesintisiz hareket

eder. Bir mikroişlemci tarafından kontrol edilen bu sistem, iş parçasını istenilen boyutsal özelliklere kavuşturmak için telin iş parçasını ardışık kıvılcımlarla aşındırmasını sağlar. Tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım boşluğu 0,025 ile 0,05 mm arasında değişir ve bu değer, bir bilgisayar kontrollü konum izleme sistemiyle sabitlenir. Bu şekilde, işleme prosesi boyunca tel ile iş parçası arasında fiziksel temas olmaksızın istenilen hassasiyet ve boyutsal özellikler elde edilir (Özdur 1999). Tel erozyon işlemine başlamak için, telin ve iş parçasının her ikisinin de elektrik yalıtkan bir sıvı içinde bulunması gereklidir. Ayrıca, tel kılavuzları aşınmayı en aza indirmek için genellikle safir veya elmas gibi sert malzemelerden yapılmıştır. Şekil 2.2’de tel erozyon tezgâhının çalışma şemasını göstermektedir.



Şekil 2. 2. Tel erozyon tezgâhının çalışma şeması (Kurubaş, 2004)

Tel erozyon ile işlemede kesme işlemi, işleme süresince oluşan kıvılcım bir makara bobininden beslenen telden iş parçasına yönelerek iş parçasının yüzeyini erozyona uğratarak meydana gelmektedir. Bu işlemde esnasında, kesici tel ile iş parçası malzemesi birbirine kesinlikle değmez, arada bir boşluk bulunmaktadır. Negatif yüklü tel ve pozitif yüklü iş parçası arasında 1.000.000 Hz frekansa kadar kıvılcım boşalmaları olmaktadır. Meydana gelen kıvılcımlar bir diğer ifade ile arklar yavaş ve kademeli bir şekilde iş parçası yüzeyinden küçük partiküller koparmaktadır. Bu kesme işlemi esnasında hem tel hem de iş parçası dielektrik sıvı içerisinde bulunmaktadır. Hızlı bir şekilde akan dielektrik sıvı, akımı taşıyan ve kontrol edilebilen bir çözelti türüdür. Bu dielektrik sıvısının görevleri; ortamı soğutur, iş parçasından çıkan talaşı uzaklaştırır ve talaşın iş parçası yüzeyinin üzerinde erimesine engeller. İşleme hassasiyeti bakımından

işlenen iş parçası malzemesi ile tel arasındaki açıklık büyük bir önem arz etmektedir. Bu hassasiyeti ancak iyi bir açıklık değeriyle sağlanabilmektedir. Açıklık değeri, voltaj değişimlerine göre teli çeken veya ileri süren bir servomotor ile sağlanmaktadır.

İşleme esnasında iş parçası malzemesinden çıkan talaşın debisi; malzemenin cinsi ve geometrisi, işleme yüzeyi, elektriksel parametreler, çalışma süresi ve tel malzemesi gibi etkenlere bağlıdır. Yüksek akım boşalmaları parçayı çabucak aşındırırken aynı zamanda iş parçasında kaba yüzey meydana getirir. Daha düzgün yüzey için düşük akım şiddeti ve yüksek frekans istenir (Bayraktutar, 2000; Kurubaş, 2004).

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 işlemi etkileyen faktörlerdendir.
- c) 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 sürede gerçekleştiğinden manuel hesaplamalarda geçen fazla zaman ortadan kaldırılmaktadır.

2.3. Deney Tasarımı ve Yöntemi

Taguchi metodu, robust (güçlü) deney tasarımı yoluyla bir süreçteki varyasyonu azaltmayı hedeflemektedir. Metodun genel amacı, üreticiye düşük maliyetlerde yüksek kalitede ürün üretmektir. Taguchi yöntemi, bu varyasyonu sürdüren Japon bilim adamı Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Taguchi, farklı parametrelerin, sürecin ne kadar iyi çalıştığını tanımlayan bir süreç performans özelliğinin ortalamasını ve varyansını nasıl etkilediğini araştırmak için deneyler tasarlamak için bir yöntem geliştirdi.

Taguchi tarafından önerilen deneysel tasarım, süreci etkileyen parametreleri ve bunların değişmesi gereken seviyeleri düzenlemek için ortogonal dizilerin kullanılmasını içerir. Faktöriyel tasarım gibi tüm olası kombinasyonları test etmek yerine, Taguchi yöntemi kombinasyon çiftlerini test eder. Bu, minimum deneme miktarı ile ürün kalitesini en çok hangi faktörlerin etkilediğini belirlemek için gerekli verilerin toplanmasını sağlar, böylece zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlar. Taguchi yöntemi, orta düzeyde değişken sayısı (3 ila 50) olduğunda, değişkenler arasında az sayıda etkileşim olduğunda ve yalnızca birkaç değişken önemli ölçüde katkıda bulunduğunda en iyi şekilde kullanılır (Anonim 1).

Taguchi dizileri türetilbilir veya aranabilir. Küçük diziler manuel olarak çizilebilir; büyük diziler deterministik algoritmalarla türetilir. Genellikle diziler çevrimiçi olarak bulunabilir. Diziler, parametre sayısı (değişkenler) ve düzey sayısı (durumlar) tarafından seçilir. Bu, bu makalenin ilerleyen bölümlerinde daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Deneylerin Taguchi tasarımından toplanan veriler üzerindeki varyans analizi, performans karakteristiğini optimize etmek için yeni parametre değerleri seçmek için kullanılabilir. Dizilerden elde edilen veriler, verilerin grafiği çizilerek ve görsel bir analiz, ANOVA, kutu verimi ve Fisher'in kesin testi veya anlamlılığı test etmek için Ki-kare testi yapılarak analiz edilebilir (Anonim 1).

Taguchi'nin önerdiği ortogonal dizi deneysel tasarımı kullanarak, yoğunlaştırılmış deney setindeki performans karakteristiğinin çeşitli parametreler üzerindeki etkisi incelenebilir. Prosese etki eden parametreler belirlendikten sonra, bu parametrelerin hangi seviyelerde değiştirileceği belirlenmelidir. Her bir değişkenin hangi seviyelerinin test edileceği, ilgili parametrenin minimum, maksimum ve geçerli değerlerini içeren sürecin derinlemesine anlayışını gerektirir. Bir parametrenin minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark büyükse, test edilen değerler birbirinden daha uzak olabilir veya daha fazla değer test edilebilir. Ancak, bir parametrenin aralığı küçükse, daha az değer test edilebilir veya test edilen değerler birbirine daha yakın olabilir. Örneğin, bir reaktör ceketinin sıcaklığı 20 ila 80 °C arasında değişebiliyorsa ve mevcut çalışma ceket sıcaklığının 50 °C olduğu biliniyorsa, 20, 50 ve 80 °C'de üç seviye seçilebilir. Deney tasarımına dâhil edilecek bir parametrenin seviye sayısı belirlenirken deney yürütme maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Önceki ceket sıcaklığı örneğinde, 1 derecelik aralıklarla 60 seviye yapmak çok maliyetli olacaktır. Tipik olarak, deneysel tasarımdaki tüm parametreler için seviye sayısı, uygun ortogonal dizinin seçimine yardımcı olmak için aynı olacak şekilde seçilir.

Parametre sayısı ve seviye sayısı bilindiğinde, uygun ortogonal dizi seçimi için aşağıda gösterilen dizi seçme tablosu kullanılabilir. Bu tablo, parametre sayısını belirleyen sütunlar ve her bir parametrenin seviye sayısını belirleyen satırlar içerir. Bu şekilde, tablodaki ilgili sütun ve satırlara bakılarak uygun dizi adı bulunabilir. Ad belirlendikten sonra (alt simge, tamamlanması gereken deney sayısını temsil eder), önceden tanımlanmış diziye bakılabilir. Dizi seçici tablosunda verilen önceden tanımlanmış dizilerin birçoğuna bağlantılar sağlanır. Bu diziler, Taguchi'nin geliştirdiği bir algoritma kullanılarak oluşturulmuş ve her değişkenin ve ayarın eşit şekilde test edilmesine izin vermektedir. Örneğin, üç parametremiz (gerilim, sıcaklık, basınç) ve iki seviyemiz (yüksek, düşük) varsa, uygun dizinin L4 olduğu görülebilir. L4 dizisini görüntülemek için L4 bağlantısına tıklandığında, dizide dört farklı deneyin verildiği görülebilir. Dizide 1, 2, 3 vb. olarak belirtilen seviyeler değiştirilecek gerçek seviye değerleri ile değiştirilmeli ve P1, P2, P3 gerçek parametrelerle (yani voltaj, sıcaklık vb.) değiştirilmelidir. Faktör ve seviyelerin ortogonal dizilimini gösteren tablo Şekil 2.3'te verilmiştir.

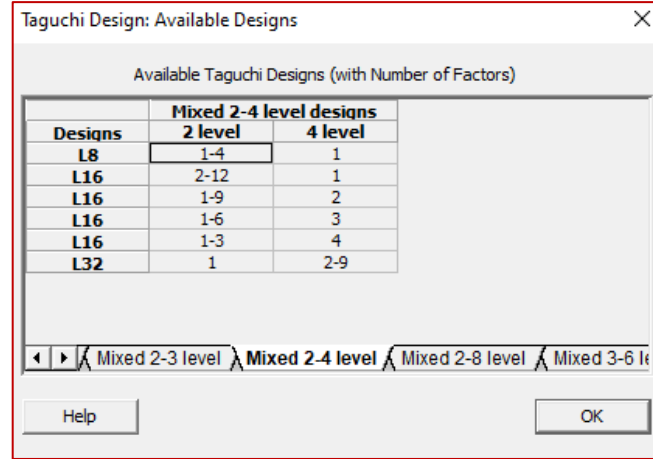
Designs	Single-level designs			
	2 level	3 level	4 level	5 level
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

Single-level Mixed 2-3 level Mixed 2-4 level Mixed 2-8 level

Help OK

Şekil 2. 3. Tek seviyeli Taguchi ortogonal tasarım tablosu

Şekil 2.3'deki ortogonal dizilim 2, 3, 4 ve 5 seviye bu seviyelere uygun olarak seçilen faktör sayılarını ve deney tasarımını ise L4, L8, L9, L12, L16, L25, L27 ve L32 şeklinde ifade edildiği görülmektedir. Ayrıca mixed seviyeler veren tablo da Şekil 2.4'te verilmiştir.



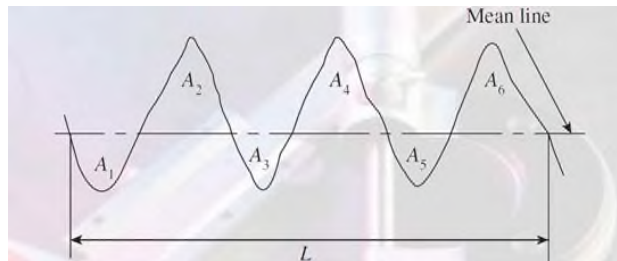
Şekil 2. 4. Taguchi mixed seviyeler

Deney tasarımı yapılırken parametrelerin ve faktörlerin seçimi bu dizilimlere göre seçilmesi programın daha etkin bir şekilde kullanımına ve daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır. Şekil 2.4'deki dizilim ortogonal dizilim dışına çıkıldığında mixed (karışık) her faktörün seviyesinin eşit olmadığı durumda kullanıcılara seçim yapmayı sağlayan deney düzeneği seçeneklerini vermektedir.

2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, genellikle pürüzlülük olarak kısaltılan, bir yüzeyin dokusunun bir özelliğidir. Bir diğer ifade ile yüzey pürüzlülüğü, çoğunluk ile belirlenmiş olan referans düzlemine göre yüzeyin yüksekliğindeki değişimi ifade etmektedir (Rao, vd. 2016). Gerçek bir yüzeyin ideal biçiminden normal vektörü yönündeki sapmalarla ölçülür. Eğer bu sapmalar büyükse, yüzey pürüzlüdür; küçükse, yüzey pürüzsüzdür (Anonim 2).

Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a)



Şekil 2. 5. R_a değeri gösterimi

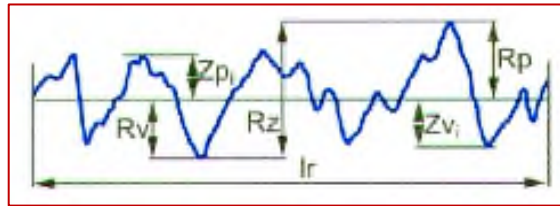
Ra, ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak da ifade edilen, evrensel olarak tanınan pürüzlülük parametresidir. Yüzeyde oluşan tepe ve dip değerlerin gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Aşağıda ifade edilen Eşitlik 2.1 yardımı ile hesaplanır (Eşitlik 2.1).

$$Ra = (A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N) / L \quad (2.1)$$

(Rz) On- nokta yükseklik ortalama değeri

DIN EN ISO 4287 standartına göre; Şekil 2.6'daki Rp ifadesi ölçülen yüzeyin yüzey profilinin ölçü bölümünde verilmiş olan en geniş profil tepesi ifade ederken Rv değeri ise en derin profil koyağı derinliğine dayanan değeri ifade etmektedir. Rz, yüzey pürüzlülük profilinin en düşük ve en yüksek noktaları arasındaki dikey mesafeye karşılık gelmektedir. Diğer bir deyişle yüzey pürüzlülüğüne karşılık gelen y-koordinat aralıklarının ölçülmesine yol teşkil eder. Kural olarak Rz beş ölçü bölümü Ir'nin maksimum pürüzlülük derinliğine karşılık gelen aritmetik ortalaması olarak hesaplanır, bu parametre DIN 4768'e göre ortalama pürüzlülüğü ifade eder. Rp düzleme derinliği daha önce tanımlanan DIN 4762'i ifade eder.

- Rz Ölçme bölümü IR ye karşılık gelir.
- DIN 4768 e göre Rz beş ölçme bölümü Ir'nin ortalamasını verir.
- Sadece giderlerin beşincisi hesaba katılır.
- Rz sıkıştırma veya temaslı alıştırmanın yanı sıra yatak veya sürgülü yüzeyleri ölçmek için kullanılabilir (Anonim 3).

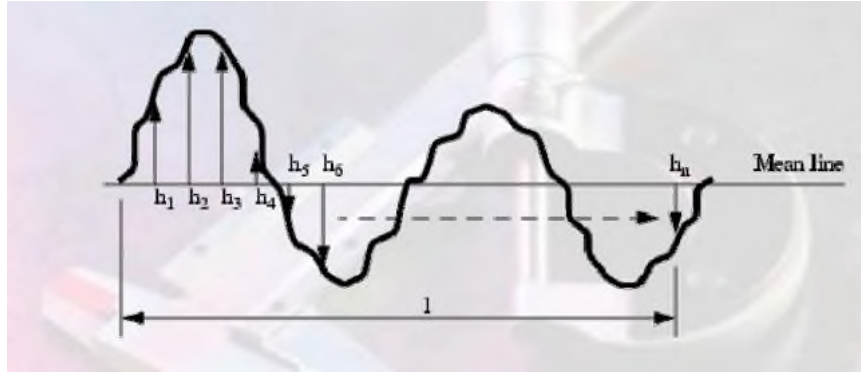


Şekil 2. 6. Rz, Rv, Rp ve Ir değerlerinin gösterimi

(Rq) Ortalama kare kök (RMS) değeri

Şekil 2.7'de Rq değerinin hesaplaması için gerekli olan ölçüler grafiksel olarak gösterilmiştir. Rq, ortalama karekök (Root Mean Square (RMS)) pürüzlülüğü, pürüzlülük

profili yüksekliklerin (Şekil 2.7) karelerinin toplamının karekök ortalamasıdır. Rq değerinin elde edilmesi için kullanılan Eşitlik 2.2 verilmiştir.



Şekil 2. 7. Rq değerinin grafiksel gösterimi

$$h_{RMS} = \frac{\sqrt{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2)}}{n} \quad (2.2)$$

2.5. Sertlik

Sertlik göreceli bir ölçü olup, mekanik olarak (sürtünme, batma, kesme ve çizme) malzeme üzerinde oluşturulan iz veya aşınmanın neden olduğu bölgesel plastik deformasyona karşı direncin bir ölçüsüdür. Genel olarak, sertlik ölçümü, standart bir koni veya küresel ucu malzemeye batırarak malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Uygun bir sert uç seçilir ve bu uç, belirli bir yük altında malzemeye batırıldığında malzeme üzerinde bir iz bırakır. Genel bir kural olarak, malzemenin sertliği, oluşan izin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Sertlik ölçümleri, uygulanan kuvvetin tatbik şekline göre statik veya dinamik sertlik ölçme yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir. Statik sertlik ölçme metotları; Brinell sertlik ölçme metodu ve Vickers sertlik ölçme metodudur. Mikro sertlik ölçme metotları ise Rockwell sertlik ölçme metodu olup ölçülen parçanın gerçek sertlik değerlerini verir. Dinamik sertlik metotlarının amacı mümkün olduğu kadar hızlı ve istenen her çalışma yerinde muayenesi yapabilmektedir. Bu metotlarda; Shore sklereskopu ve Poldi çekiçidir. Sertlik ölçmeleri yapılırken kullanılan ölçme metotları ne olursa olsun, numunelerin üzerinde birkaç ölçme yapıp ortalamasının alınması gerekir. Yapılan sertlik deneylerinde değerler birbirinden çok farklı ise ortalamaya dahil edilmeyip bu farkın mevcudiyeti raporda mutlak olarak belirtilmelidir. Brinell sertlik (Hb,

BSD) ve Vickers sertlik (Hv, VSD) iz büyüklükleri ölçülerek yapılırken Rockwell sertliği (HR) ise batma derinliği ölçülerek yapılır (Anonim 4).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İş Parçası Malzemesi

Bu tez çalışmasında kullanılan iş parçası malzemesi 100x100x11 mm boyutlarında Inconel 718 süper alaşımı üretici firmadan temin edilmiştir. Üretici firmadan alınan kimyasal bileşim Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi

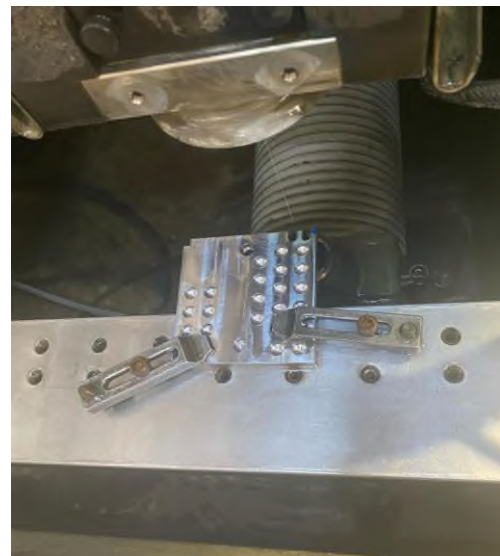
Element	Ni	Cr	Fe	Nb + Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu
Ağırlıkça %	53,45	18,55	17,64	5,18	5,17	2,92	0,98	0,56	0,23	0,22
Element	Mn	Si	C	P	Ta	B	S	Pb	Bi	Se
Ağırlıkça %	0,09	0,065	0,03	0,008	0,004	0,002	0,001	0,00002	<,000001	<,000001

3.2. Tel Elektro Erozyon Tezgâhı, Tel Elektrot Özellikleri ve İşleme Şartları

Kesme deneylerinde kullanılan CNC tel elektro erozyon tezgâhı +GF+ AgieCharmilles CUT 300 ve iş parçasının bağlanılmış hali Şekil 3.1’de verilmiştir.



a)



b)

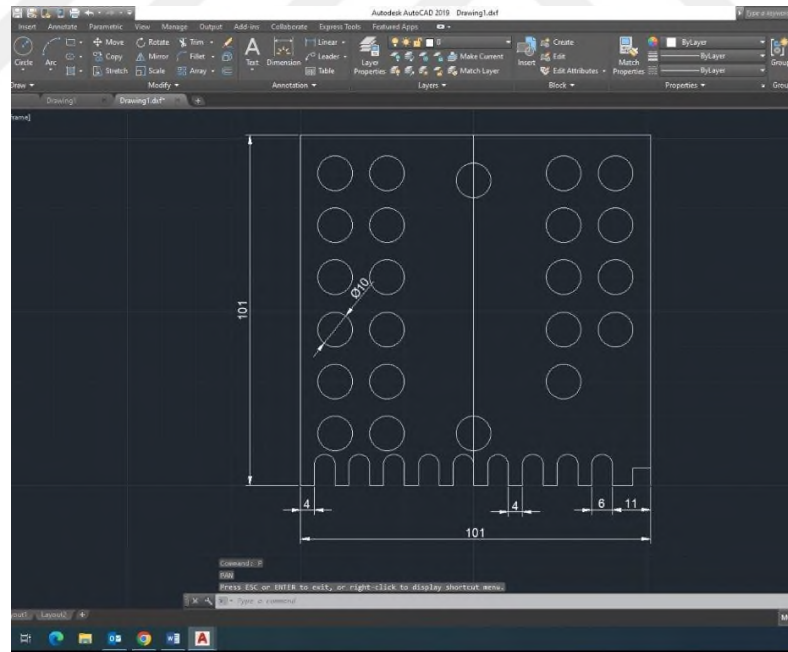
Şekil 3. 1. CNC tel elektro işleme tezgâhı a) Kontrol ünitesi b) İş parçasının bağlanması

Hem Kriyojenik işlem uygulanmış hem de kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçaları, CNC tel elektro erozyon tezgâhında Şekil 3.2'deki gibi slotlar şeklinde kesilerek işlenmiştir. Tel elektro erozyon tezgâhında kullanılan telin kalınlığı olarak 0,25 mm pirinç AgieCharmilles Cut 300 tel markası ve dielektrik sıvı olarak 5-15 iletkenliğe sahip saf su kullanılmıştır.



Şekil 3. 2. İşlenmiş Inconel 718 iş parçası

İşleme deneylerinde kullanılan iş parçasına ait ölçüler aşağıdaki Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 3. İş parçası detay resmi

3.3. Taguchi Deney Tasarımı ve İşleme Parametreleri

CNC tel elektro erozyon tezgâhı, “darbe vurum süresi, pulse off time”, tel hızı, sıvı basıncı gibi birden çok girdi parametresi sahiptir. Bu girdi parametrelerinin tamamını tek seferde tezgâha işleme parametresi olarak kabul etmek zordur ve işleme parametresinin artması gerçekleştirilecek olan deney sayılarını da önemli oranda artırmaktadır. Bundan dolayı gerçekleştirilen işleme deneylerin sayısını azaltmak, zaman ve maliyetlerden kazanmak için Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi tasarımı, olası en az sayıda deney yaparak işleme parametrelerinin tümünün kombinasyonlarını kapsayacak şekilde deneylerin yapılması için bir ortogonal dizilim sunmaktadır. İşleme parametrelerinin sonuçlar veya yanıtlar (çıkış) üzerinde için optimum şartları bulmak için kullanılmaktadır (Durairaj, 2013; Parashar, 2019). CNC tel elektro erozyon ile yapılan kesme deneylerinde; gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı basıncı işleme parametreleri olarak belirlenmiştir (Tablo 3.2). Geriye kalan işleme parametreleri parça kalınlığı dikkate alınarak üretici firmanın tavsiyesine göre otomatik olarak hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasındaki kesme deneylerinde; üç farklı gerilim, üç farklı tel ilerleme hızı ve üç farklı dielektrik sıvı basıncı CNC tel elektro erozyon tezgâhında giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Bu işleme parametrelerin değerleri ve seviyeleri Tablo 3.2’de verilmiştir. İşleme parametresi olarak verilmeyen diğer işleme parametreleri ise üretici firmanın tavsiyesine göre parça kalınlığı dikkate alınarak tezgâh sisteminde otomatik olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. 2. WEDM işleme parametreleri ve seviyeleri

İşleme Parametreleri	Seviyeler
Gerilim (V)	45, 55, 65
Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm²)	7, 11, 15
Tel ilerleme hızı (m/dk.)	6, 9, 12

CNC tel elektro erozyon tezgâhının önemli değişkenlerinden biri olan “Gerilim”, tel elektrot ile iş parçası arasındaki işleme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek değerlerdeki gerilim deşarj enerjisinin artmasına yol açmakta ve bu da tepe akımını da artırmaktadır. WEDM ile işlemede dielektrik sıvı hem soğutma hem de iş parçasında

talaşın kaldırılması için kullanılan elektriği iletmeyen saf bir sudur. Bu dielektrik (yalıtkan) sıvı özellikle ısı iletkenlik kat sayısı düşük olan iş parçalarının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı zamanda bu sıvı, verimli bir şekilde soğutma, elektrik deşarjını stabilize etme ve hem talaşın atılması hem de talaşın kaldırılması için önem arz etmektedir (Jahan, 2014). Uygun seçilemeyen tel ilerleme hızı, tel aşınma oranını ve tel tüketimini önemli ölçülerde etkilemektedir. Artan tel hızı, tel tüketimini artırmakta ve bunun sonucunda işleme maliyetleri de buna paralel olarak artmaktadır. Ayrıca, düşük tel hızları, tel aşınma oranını artırmakta ve özellik ile kaba işlemede tel kırılmasına neden olmaktadır (Jahan, 2014). Bu tez çalışmasında, CNC tel elektro erozyon ile işlemede kesme performansını değerlendirmek için Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerleri, kerf ve talaş kaldırma oranları alınmıştır. Hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de uygulanmamış iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerine etki eden işleme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek ve belirlenen bu işleme parametrelerinin etkilerini analiz etmek için Taguchi L9 ortogonal dizayn kullanılmıştır. Kesme deneyleri Tablo 3.3'deki Taguchi L9 ortogonal deney tasarımına göre sırası ile gerçekleştirilmiştir. Taguchi tasarımı çıkış karakteristiği için istenen değere Sinyal (S) çıkış karakteristiği için istenmeyen değere ise Gürültü (G) denmektedir. İşlenmiş iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olması istenmektedir. Bundan dolayı yüzey pürüzlülüğü değerlerinin analiz edilmesinde Taguchi L9(3³) ortogonal dizilimde “en küçük en iyidir” yaklaşımına göre S/N oranları hesaplanmıştır. Aynı zamanda daha iyi bir ürün kalitesi için Ra, Rq ve Rz pürüzlülüğü değerlerinin minimum değer alınması istenmektedir. Bundan neden ile bu tez çalışmasında en küçük en iyidir yaklaşımına göre deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerin analizinde, Taguchi tasarımı “en küçük en iyidir” S/N oranı formülü Eşitlik 1'de verilmiştir. Bu formül;

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

Eşitlik 1'deki $\bar{y}$; deneysel sonuçların ortalaması, y_i yüzey pürüzlülüğü için ölçülen değerleri, n ise gerçekleştirilen deneylerin sayısını temsil etmektedir. Bu analizlerin yapılması için kullanılan paket program Minitab 21'dir. Taguchi L9 ortogonal

tasarımına göre kesme deneylerinin yapılması için işleme parametrelerinin dizilimi Tablo 3.3'te verilmiştir. Tüm işleme deneylerinde akım değeri 0,7A olarak sabit alınmıştır.

Tablo 3. 3. Taguchi L9 (3³) ortogonal dizilime göre yapılan deneyler

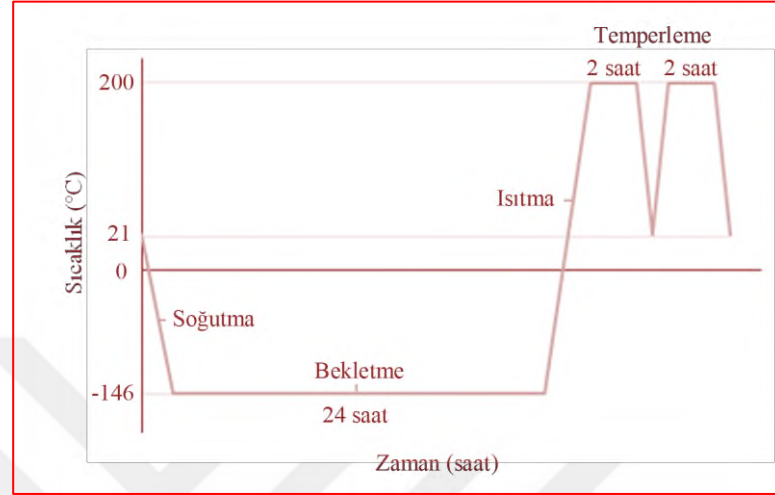
Deney No	Gerilim (V)	Sıvı basıncı (kg/cm ²)	Tel ilerleme Hızı (m/dk.)
1	45	7	6
2	45	11	9
3	45	15	12
4	55	7	9
5	55	11	12
6	55	15	6
7	65	7	12
8	65	11	6
9	65	15	9

Tablo 3.3'teki işleme parametrelerine göre hem kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçası malzemesi için hem de kriyojenik işlem uygulanmış iş parçası için deney sırasına göre gerçekleştirilmiştir.

3.4. Kriyojenik İşlem Uygulanması

Sıfır altı ısıl işlem olarak bilenen kriyojenik ısıl işlem, malzemelerin içerisinde yer alan kalıntı östenitik fazları martenzite dönüştürmek için kullanılan bir ısıl işlemdir. Kriyojenik işlem, genellikle metallerin sertliğini ve aşınmaya karşı direncini artırmak, dayanıklılığını artırmak veya arzu edilen çok özel uygulamalar için malzemelerin yapısal özelliklerini değiştirmek amacıyla sıklık ile yapılmaktadır. Malzemelere katmış olduğu bu özelliklerden dolayı bu tez çalışmasında 1 adet Inconel 718 iş parçasına derin kriyojenik ısıl işlem uygulanmıştır. Birinci adım olarak fırın içerisine yerleştirilen Inconel 718 iş parçası bilgisayar kontrollü sistemde iş parçasında ani çatlaklar meydana gelmemesi için yaklaşık 2 saat sürede oda sıcaklığından -146 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak soğutulmuştur. İkinci adım olarak fırın içerisindeki iş parçası malzemesi -146 °C derin kriyojenik işlem sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Üçüncü adımda ise fırın

kademeli bir şekilde oda sıcaklığına tekrar geri getirilmiştir. Son adımda iş parçasında meydana gelen gerilmeleri gidermek için 200°C’de 2 saat süreyle temperleme işlemi yapılmış ve bu işlem 2 döngü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işleme ait şematik gösterim Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3. 4. Inconel 718’e uygulanan ısıl işlemlerin şematik gösterimi

3.5. İşlenmiş Yüzeylerden Ölçülen SEM Görüntüleri

Kriyojenik ısıl işlemli ve işlemsiz Inconel 718 iş parçası malzemesinin işlenmiş yüzeylerinden ölçülen SEM görüntüleri Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan HITACHI SU5000 ALAN EMİSYONLU TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOPU (FE-SEM) cihazından ölçülmüştür. Şekil 3.5’te kullanılan cihaza ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3. 5. Tel Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Fe-Sem)

3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

CNC tel elektro erozyon tezgâhında işleme şartlarının Taguchi L9 ortogonal tasarımına göre kesilen kriyojenik ısıtılmış ve işlemsiz Inconel 718 iş parçalarının işlenmiş yüzeylerinin 3 farklı bölgesinden alınmıştır. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak R_a , R_q ve R_z değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan yüzey pürüzlülük ölçümleri 0,8 mm ölçme aralığında ve 4,8 mm ölçme boyu göz önüne alınarak yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Makine ve Kimya Endüstrisinde bulunan Mitutoyo marka cihaz kullanılmıştır. Şekil 3.6'da yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 3. 6. Mitutoyo yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

3.7. Kesme Genişliği (Kerf)

Cnc tel elektro erozyon ile işlenen slotların (yuvaların) kesme genişliğini bulmak için Hellos 350.V profil projektör cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.7a'da profil projektör cihazına ve Şekil 7.b'de örnek bir ölçüme ait şekiller gösterilmiştir. Slotun üç farklı boyundan ölçüler alınarak kesilen parçanın genişliği hesaplanmıştır. Daha sonra kesilen parçanın genişliği ölçüleri hassas kumpas ile ölçülmüştür. Kesilen slot genişliğinden kesilen parçanın genişliği çıkartılarak kesme genişliği hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 3. 7. Helios 350. V a) Profil projektör cihazı b) Örnek bir gösterim

3.8. Talaş Kaldırma Oranı

Talaş kaldırma oranı, dakikada kaldırılan malzemenin hacmi olarak tanımlanır ve genellikle “mm³/dk” birim cinsinden ifade edilir (Jahan, 2014). Talaş kaldırma oranının hesaplanmasında, işlenmiş iş parçasının işleme öncesi ve sonrasındaki ağırlık farkı alınarak hesaplanabilir (Jahan, 2014). Bu tez çalışmasında, Inconel 718 süper alaşımının tel elektro erozyon ile işlenen iş parçasından çıkarılan malzeme miktarını (mm³/dk) belirlemek için Eşitlik 3.2 kullanılmıştır.

$$MRR = Vc \cdot b \cdot h \quad (3.2)$$

Burada “Vc” kesme hızını (mm/dk), “b” kesme genişliğini (mm) ve “h” iş parçasının kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

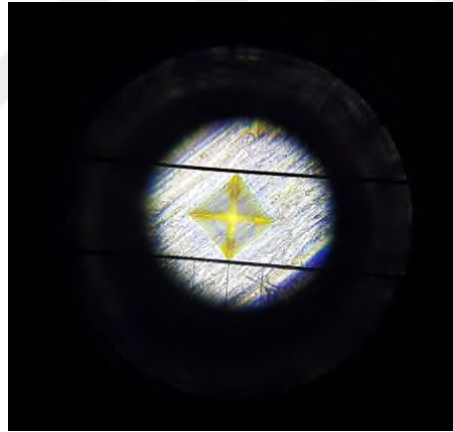
3.10. Mikro Sertlik Ölçümü

Hem kriyojenik ısıtılmış hem de kriyojenik ısıtılmamış Inconel 718 iş parçalarının mikro sertlik değerlerinin ölçülmesi, Süleyman Demirel Üniversitesine ait YETEM laboratuvarındaki mikro Vickers TTS Matsuzawa HWMMT-X3 marka mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de mikrosertlik ölçüm cihazına ait

görüntü ve Şekil 3.9’da Inconel 718 iş parçasının yüzeyi üzerinde sertlik ölçümü yapılması sırasında oluşan iz görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 8. Mikro sertlik ölçüm cihazı (Anonim 5)



Şekil 3. 9. Ölçülen iz görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu deneysel çalışmada hem kriyojenikli hem de kriyojeniksiz Inconel 718 iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde gerilim, dielektrik su basıncı ve tel hızının optimum parametrelerini belirlemek için Taguchi L9(3³) ortogonal tasarım yöntemi kullanılmıştır.

4.1. Kriyojenik Isıl İşlemsiz Inconel 718 İş Parçasına Ait Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Taguchi L9 ortogonal dizilimini göz önünde bulundurularak işleme parametrelerinin kombinasyonu göre kesilen Inconel 718 iş parçasının kesilen yüzeylerden elde edilen Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca Taguchi “en düşük en iyidir” sinyal gürültü oranları göre elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri de Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranı değerleri

Deney No	Gerilim (V)	Sıvı Basıncı (kg/cm ²)	Tel Hızı (m/dk)	Ra (µm)	S/N Ra (dB)	Rq (µm)	S/N Rq (dB)	Rz (µm)	S/N Rz (dB)
1	45	7	6	3,952	-11,9363	5,022	-14,0175	24,803	-27,8901
2	45	11	9	3,996	-12,0325	4,840	-13,6969	22,192	-26,9239
3	45	15	12	3,819	-11,6390	4,679	-13,4031	22,670	-27,1090
4	55	7	9	4,167	-12,3965	5,105	-14,1599	25,511	-28,1345
5	55	11	12	4,696	-13,4346	5,964	-15,5108	29,522	-29,4029
6	55	15	6	4,261	-12,5902	5,252	-14,4065	25,250	-28,0452
7	65	7	12	4,775	-13,5795	6,132	-15,7520	30,162	-29,5892
8	65	11	6	4,259	-12,5862	5,299	-14,4839	25,754	-28,2169
9	65	15	9	4,421	-12,9104	5,466	-14,7534	26,053	-28,3172

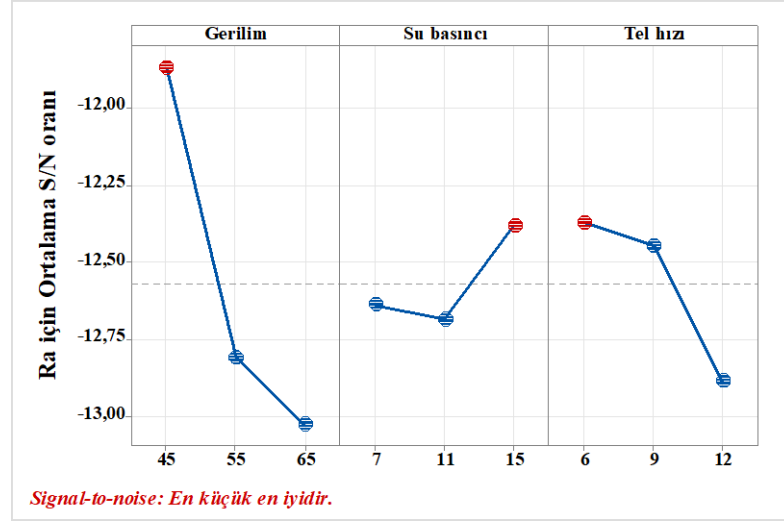
Tablo 4.1’deki yüzey pürüzlülüğü değerlerine incelendiğinde, en düşük Ra değeri 3,819 µm gerilim 45V, sıvı basıncı 15 kg/cm² ve tel hızı 12 m/dk işleme şartlarında elde edilmiştir. Benzer şekilde aynı işleme şartlarında en düşük Rq değeri 4,679 µm’dur. Fakat en düşük Rz değeri gerilim 45V, sıvı basıncı 11 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dk işleme şartlarında 22,192 µm olarak ölçülmüştür. “En düşük en iyidir” sinyal gürültü oranı yaklaşımına göre elde edilen Ra, Rq ve Rz değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4. 2. S/N oranlarına göre Ra, Rq ve Rz değerleri

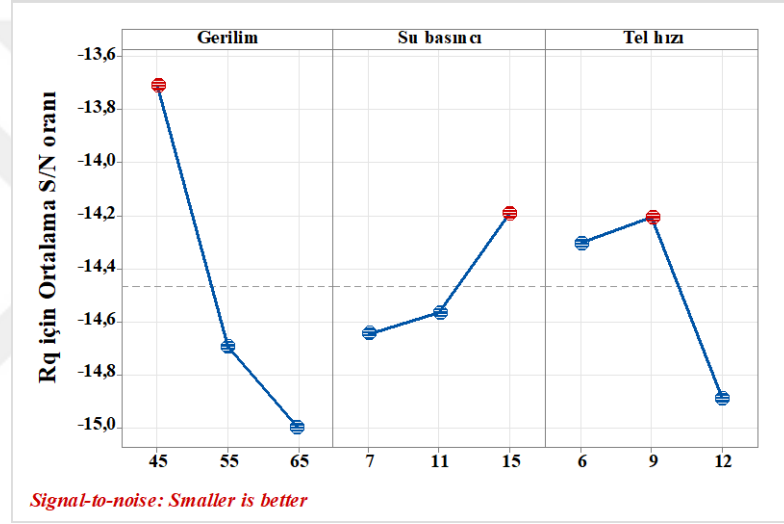
Seviyeler	Ra			Rq			Rz		
	G	SB	TH	G	SB	TH	G	SB	TH
	S/N oranı (dB)			S/N oranı (dB)			S/N oranı (dB)		
1	-11,87	-12,64	-12,37	-13,71	-14,64	-14,30	-27,31	-28,54	-28,05
2	-12,81	-12,68	-12,45	-14,69	-14,56	-14,20	-28,53	-28,18	-27,79
3	-13,03	-12,38	-12,88	-15,00	-14,19	-14,89	-28,71	-27,82	-28,70
Fark	1,16	0,30	0,51	1,29	0,46	0,69	1,40	0,71	0,91
Sıralama	1	3	2	1	3	2	1	3	2

Tablo 4.2'deki sinyal gürültü oranlarını veren değerler incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkisinin “Sıralama” satırında verildiği görülmektedir. Her üç yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rq ve Rz) üzerinde de önem sırası G1SB3TH2 şeklinde dizildiği görülmektedir. Bir diğer ifade ile yüzey pürüzlüğünü optimum yapan işleme şartları gerilim 45 V, su basıncı 15 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dak değerlerinde elde edildiği tespit edilmiştir. Tablo 4.2'deki S/N oranlarına göre ve her üç yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde en etkili parametrenin “gerilim” olduğu görülmektedir. Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkinliği sırasıyla gerilim, su basıncı ve tel hızı şeklinde olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'deki S/N oranlarını gösteren grafikler incelendiğinde, optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri için işleme parametrelerini gösteren değerler kırmızı yuvarlak olarak işaretlenmiştir.

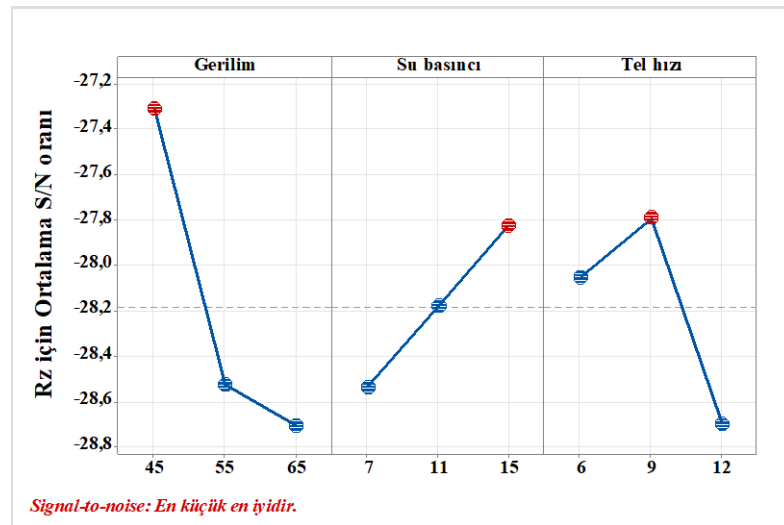
Optimum Ra değeri için G1(45V)SB3(15 kg/cm²)TH1(6 m/dk) olarak elde edilmiştir. Rq için G1(45V)SB3(15 kg/cm²)TH2(9 m/dk) olduğu görülmektedir. Rz değerini optimum yapan parametreler ise G1(45V)SB3(15 kg/cm²)TH2(9 m/dk) şeklinde sıralanmıştır. Her üç yüzey pürüzlülüğünün optimum şartları için düşük gerilme, yüksek su basıncı ve düşük veya orta tel ilerleme hızlarındaki işleme parametrelerinin tercih edilmesi önerilmektedir.



a)



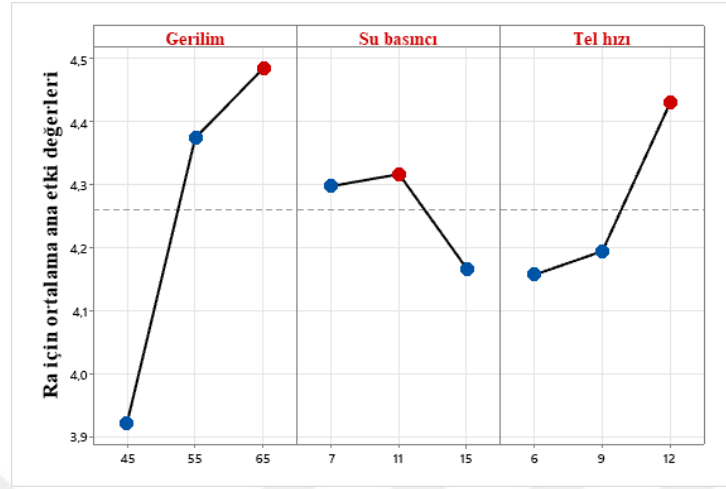
b)



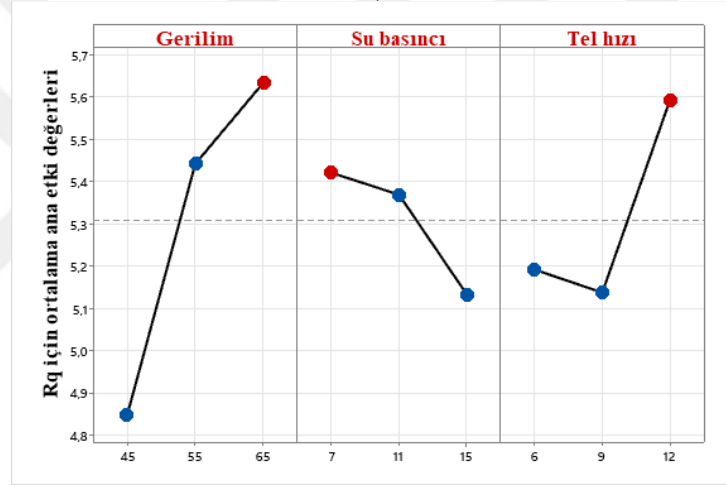
c)

Şekil 4. 1. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları a) Ra, b)Rq ve c) Rz

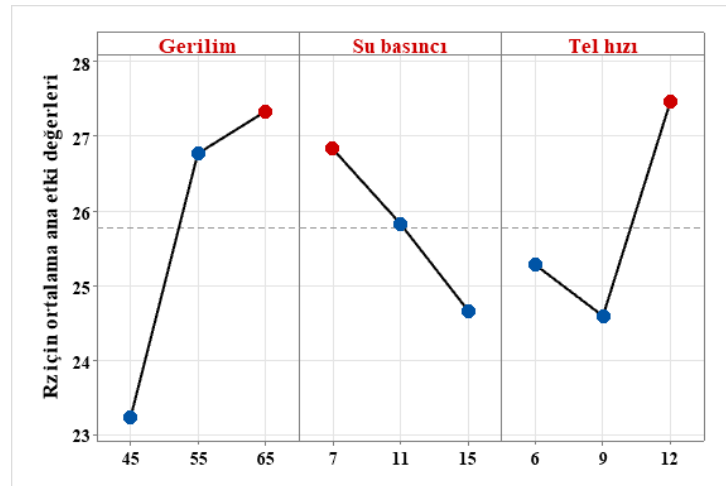
Kriyojenik işlem uygulanmamış gerçek değerlerin ortalama ana etkisini gösteren grafikler Şekil 4.2’de verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4. 2. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için ortalama ana etkileri a) Ra, b)Rq ve c) Rz

Şekil 4.2'deki ortalama ana etki grafikleri incelendiğinde, gerilimin artması ile Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Bu durum artan gerilme ile iş parçası yüzeyinden kaldıran talaş miktarının artması ve bunun sonucunda iş parçasının talaş kaldırılan yüzeyine daha fazla cürufun yapışmasıyla olduğu düşünülmektedir. Su basıncının artması ile her üç yüzey pürüzlülük değerinde bir düşmenin olduğu Şekil 4.2'den de anlaşılmaktadır. Söz konusu bu durum artan su basıncı ile iş parçası işlenirken meydana gelen cürufların daha rahat bir şekilde kesme bölgesinden tahliyesi ile açıklana bilinir. Genel olarak tel hızının artması iş parçası yüzeyini olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak düşük tel ilerleme hızlarında daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmektedir.

4.2. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Gerilim, sıvı basıncı ve tel hızı gibi işleme parametrelerinin Taguchi L9 (3³) ortogonal dizilime göre gerçekleştirilen kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçasının kesme deneyi sonuçlarından elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra, Rq ve Rz) Tablo 5'te gösterilmiştir. Buna ilaveten, Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerlerinin “en düşük en iyidir” sinyal gürültü oranları değerleri de Tablo 4.3'te verilmiştir. Tablo 4.3'teki değerlere bakıldığında, Ra ve Rq için en düşük yüzey pürüzlülüğü gerilim 65 V, sıvı basıncı 11 kg/cm² ve tel hızı 6 m/dk işleme parametrelerinde sırasıyla 3,849 µm ve 4,775 µm olarak elde edilmiştir. En düşük Rz değeri ise gerilim 55 V, sıvı basıncı 15 kg/cm² ve tel hızı 6 m/dk işleme parametrelerinde 23,491 µm olarak ölçülmüştür.

Tablo 4. 3. Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranı değerleri

Deney No	Gerilim (V)	Su Basıncı (kg/cm ²)	Tel Hızı (m/dk)	Ra (µm)	S/N Ra (dB)	Rq (µm)	S/N Rq (dB)	Rz (µm)	S/N Rz (dB)
1	45	7	6	3,925	-11,8768	4,859	-13,7309	24,172	-27,6663
2	45	11	9	5,097	-14,1463	6,400	-16,1236	31,222	-29,8892
3	45	15	12	3,939	-11,9077	4,954	-13,8991	26,060	-28,3195
4	55	7	9	4,497	-13,0585	5,637	-15,0210	28,567	-29,1173
5	55	11	12	4,324	-12,7177	5,383	-14,6205	28,144	-28,9877
6	55	15	6	3,880	-11,7766	4,803	-13,6303	23,491	-27,4180
7	65	7	12	4,047	-12,1427	5,048	-14,0624	24,614	-27,8236
8	65	11	6	3,849	-11,7070	4,775	-13,5795	24,512	-27,7876
9	65	15	9	4,371	-12,8116	5,599	-14,9622	29,311	-29,3406

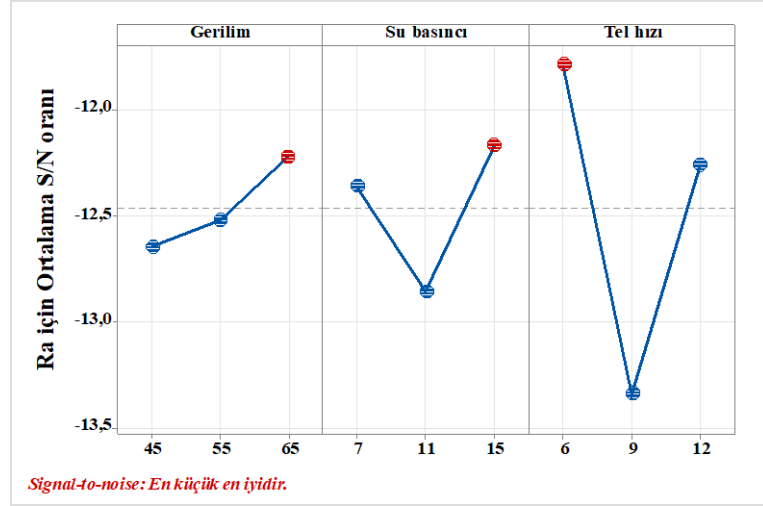
Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasına ait elde edilen S/N oranlarını Tablo 4.4'te verilmiştir. Tablo 4.4'deki S/N oranlarına göre optimum yüzey pürüzlülüğü için işleme parametrelerinin etki sıralaması tel hızı, sıvı basıncı ve gerilim şeklinde verildiği görülmektedir.

Tablo 4. 4. S/N oranlarına göre Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Ra, Rq ve Rz değerleri

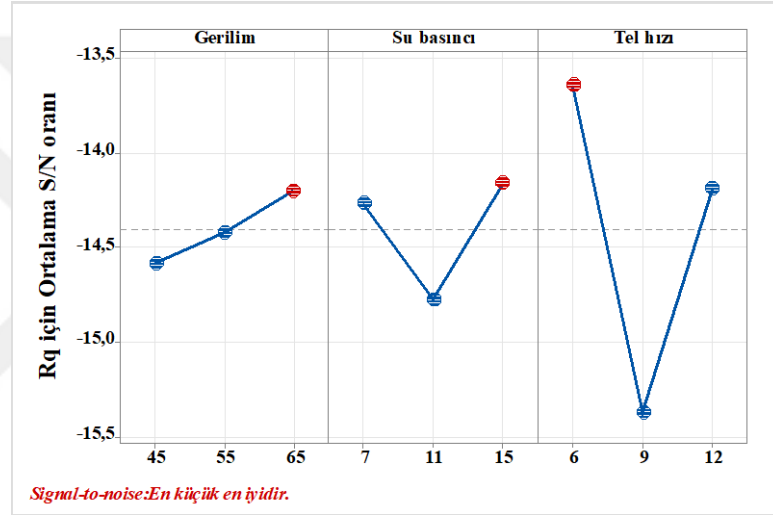
Seviyeler	Ra			Rq			Rz		
	G	SB	TH	G	SB	TH	G	SB	TH
	S/N oranı (dB)			S/N oranı (dB)			S/N oranı (dB)		
1	-12,64	-12,36	-11,79	-14,58	-14,27	-13,65	-28,62	-28,20	-27,62
2	-12,52	-12,86	-13,34	-14,42	-14,77	-15,37	-28,51	-28,89	-29,45
3	-12,22	-12,17	-12,26	-14,20	-14,16	-14,19	-28,32	-28,36	-28,38
Fark	0,42	0,69	1,55	0,38	0,61	1,72	0,31	0,69	1,83
Sıralama	3	2	1	3	2	1	3	2	1

Yüzey pürüzlülüğünü optimum yapan işleme şartları gerilim 65 V, su basıncı 11 kg/cm² ve tel hızı 6 m/dk değerlerinde elde edildiği tespit edilmiştir. Tablo 4.4'teki S/N oranlarına göre ve her üç yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde en etkili parametrenin “tel hızı” olduğu görülmektedir.

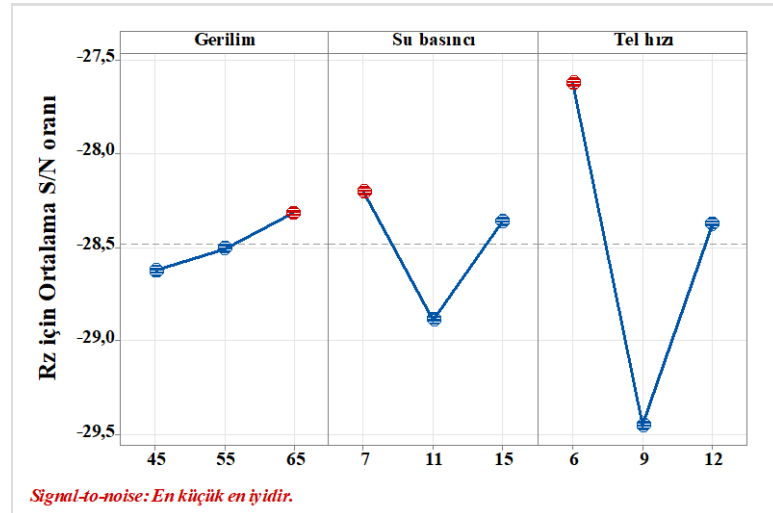
Kriyojenik ısıtılmış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları grafiği Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.3'deki S/N oranı grafiklerine bakıldığında, optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri için işleme parametrelerini gösteren değerler kırmızı yuvarlak olarak işaretlenmiştir. Optimum Ra değeri için G3(65V)SB3(15 kg/cm²)TH1(6 m/dk) olarak elde edilmiştir. Rq için G3(45V)SB3(15 kg/cm²)TH1(6 m/dk) olduğu görülmektedir. Rz değerini optimum yapan parametreler ise G3(65V)SB1(7 kg/cm²)TH1(6 m/dk) şeklinde sıralanmıştır. Kriyojenikli Inconel 718 iş parçasının yüzeylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerini optimum yapan işlem parametreleri yüksek gerilme, yüksek su basıncı ve düşük tel ilerleme hızlarındaki işleme parametrelerinin tercih edilebileceği görülmüştür.



a)



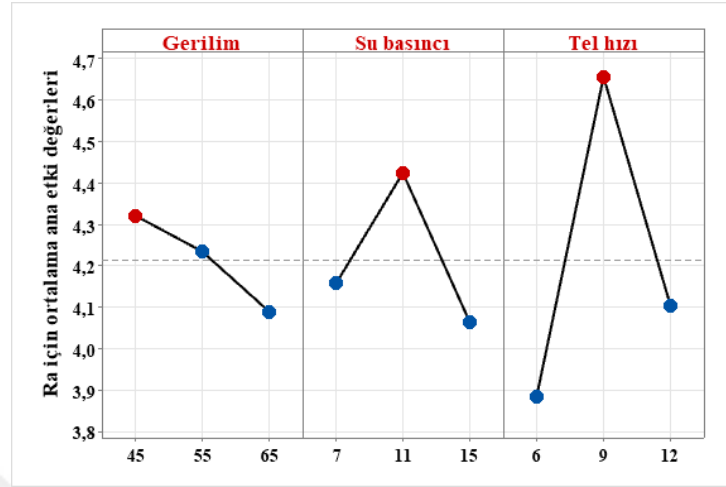
b)



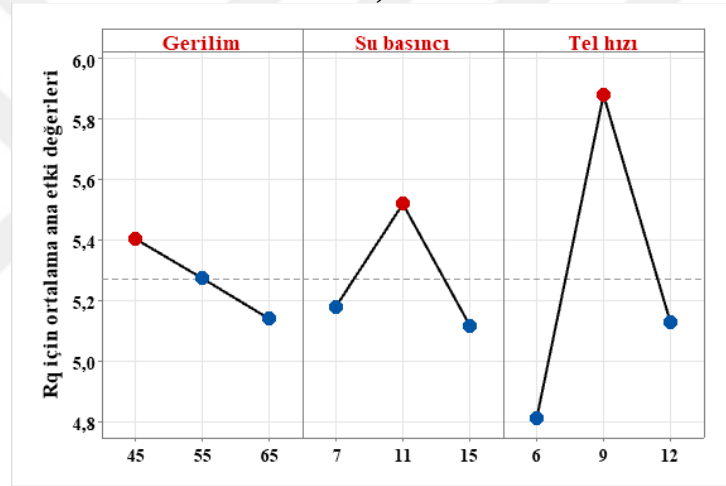
c)

Şekil 4. 3. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 iş parçası için elde edilen S/N oranları a) Ra, b)Rq ve c) Rz

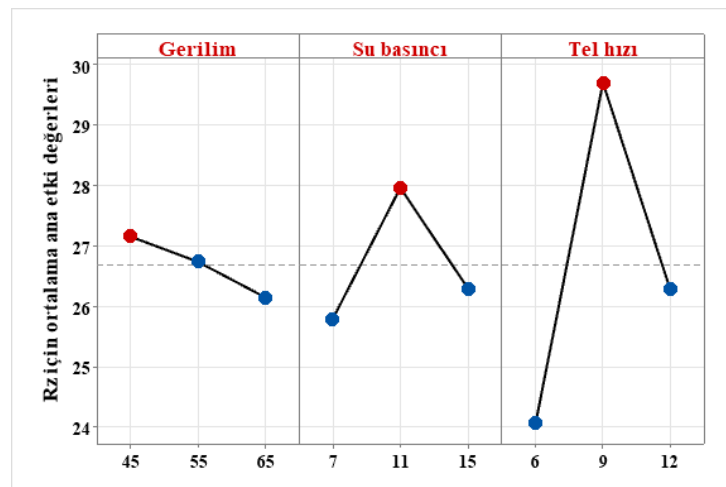
Kriyojenik işlem uygulanmış gerçek değerlerin ortalama ana etkisini gösteren grafikler Şekil 4.4'te verilmiştir.



a)



b)



c)

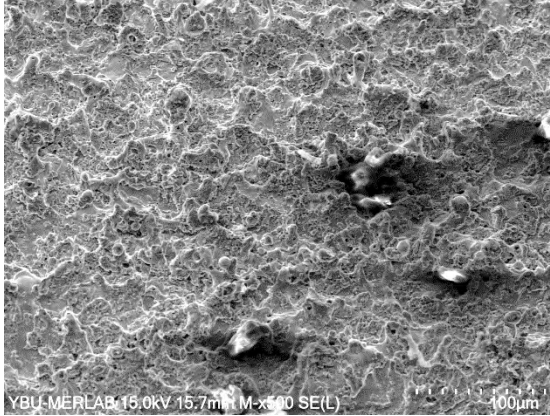
Şekil 4. 4. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için ortalama ana etkileri a) Ra, b)Rq ve c) Rz

Şekil 4.4'teki ana etki grafikleri incelendiğinde, gerilimin artması ile Ra, Rq ve Rz yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum Inconel 718 iş parçasına uygulanan kriyojenik işlemin elektrik iletkenliğini artırmasına paralel olarak artan gerilme ile iş parçası yüzeyinden daha iyi talaş kaldırıldığı düşünülmektedir. Su basıncı ve tel ilerleme hızının artması ile öncelik ile yüzey pürüzlülük değerleri ilk olarak artmış daha sonra artan su basıncı ve tel hızı ile tekrar düşmüş olduğu Şekil 4.4'teki grafikte görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü için, orta su basıncı ve orta bir tel ilerleme hızının daha ideal olacağı görülmüştür.

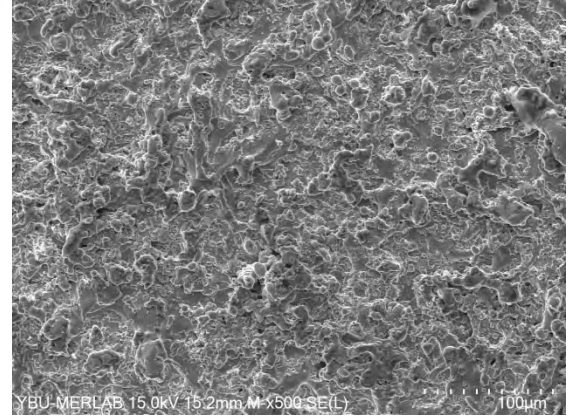
4.3. Kriyojenik İşlem Uygulanmış Ve Uygulanmamış İş Parçalarının SEM Görüntüleri

Gerilim, dielektrik sıvı basıncı ve tel ilerleme hızlarına bağlı olarak kesilerek işlenen kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarının işlenmiş yüzeylerinden çekilen SEM görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

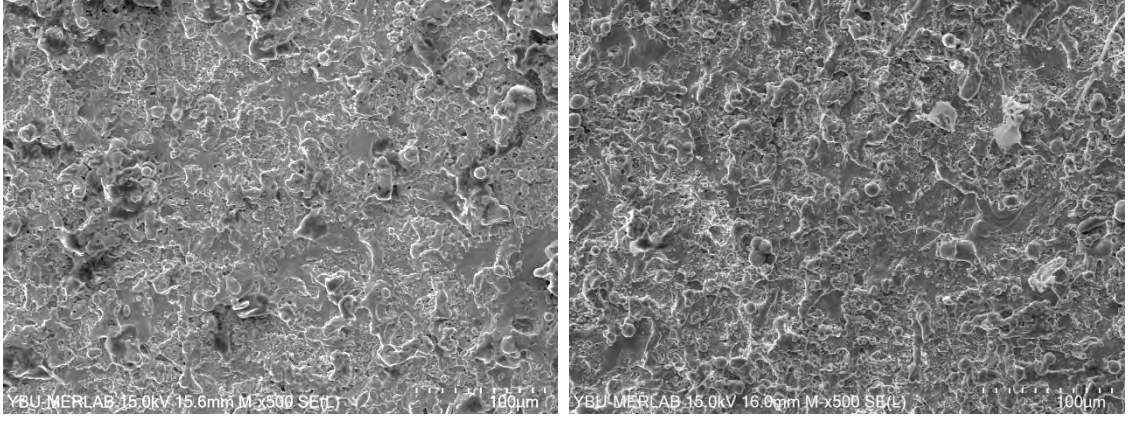
Kriyojenik işlemli



Kriyojenik işlemsiz



a) 45V gerilim, 15 kg/cm² sıvı basıncı ve 12 m/dk tel ilerleme hızındaki görüntüler



b) 65V gerilim, 7 kg/cm² sıvı basıncı ve 12 m/dk tel ilerleme hızındaki görüntüler

Şekil 4. 5. SEM görüntüleri

45V gerilim, 15 kg/cm² sıvı basıncı ve 12 m/dk tel ilerleme işleme parametrelerinde kesilen kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarının yüzeylerinden çekilen Şekil 4.3a'daki SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.5a'daki sem görüntüleri incelendiğinde, kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasının yüzeyinde daha fazla yığıntı küreciklerin yüzeye yapıştığı görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçasının işlenmiş yüzeyine daha az yığıntı kürecikler yapıştığı da Şekil 4.3a'ya bakıldığında görülmektedir. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarının işlenmiş yüzeylerine yapışan yığıntı kürecikler Şekil 4.5b'de işaretlenmiş görüntüleri görülmektedir. Ortaya çıkan bu durum kriyojenik ısıl işlemin uygulanış olduğu parçalara elektrik iletkenliğini artırdığı ve bunda dolayı uygulanan aynı akımda daha fazla kıvılcım göndererek işlenebilirliğini kolaylaştırdığı düşünülmektedir. Tablo 4.3'teki yüzey pürüzlülüğü değerleri de incelendiğinde, kriyojenik ısıl işlemlili iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kriyojenik ısıl işlemsiz iş parçasından daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum kriyojenik ısıl işlemlili iş parçasının yüzeylerine daha az yığıntı talaşların yapışmasını desteklememektedir. Daha fazla kıvılcımın kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının yüzeyinde mikro çatlaklıklara sebep olduğu ve bundan dolayı yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük gerilmelerde daha kötü olduğu Şekil 4.5b'deki görüntüler ile desteklenmektedir. Şekil 4.5b'deki SEM görüntülerine bakıldığında, kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının yüzeyine yapışan yığıntı talaşların daha az olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Tablo 4.3'teki yüzey pürüzlülüğü değerleri de daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum yüksek gerilmelerde kriyojenik ısıl işlem uygulanmış iş parçasında yüksek tel ilerleme hızı ile

uyumlu bir şekilde kıvılcımların iş parçası yüzeyinden daha homojen bir şekilde talaş kaldırılması ile açıklanabilir.

4.4. Kerf Değerleri

Kerf, işleme sırasında atılan malzeme miktarının ölçüsü olarak tanımlanır. Kesme genişliğini ifade eden bu terim WEDM'deki işleme performansının değerlendirilmesinde önem arz etmektedir. Kerf, işlenmiş iş parçasının boyutsal olarak doğruluğunu ve ürünün iç köşe yarıçapını belirleyebilir. İşleme parametrelerine bağlı olarak kesilen kriyojenik ısıtılmış ve ısıtılmamış Inconel 718 iş parçalarının kerf değerleri aşağıdaki Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4. 5. Normal malzeme ve kriyojenik malzemenin Kerf değerleri

NORMAL MALZEME				KRİYOJENİK MALZEME			
DENEY NO	SLOT GENİŞLİĞİ	KESİLEN		DENEY NO	SLOT GENİŞLİĞİ	KESİLEN	
		PARÇA GENİŞLİĞİ	KERF b			PARÇA GENİŞLİĞİ	KERF b
1	6,001	5,395	0.606	1	5,974	5,433	0.541
2	6,023	5,408	0.615	2	5,992	5,421	0.571
3	5,995	5,510	0.485	3	5,977	5,384	0.593
4	6,008	5,472	0.536	4	6,000	5,523	0.477
5	5,990	5,431	0.559	5	5,998	5,368	0.630
6	5,997	5,369	0.628	6	5,996	5,381	0.615
7	6,011	5,421	0.590	7	5,981	5,389	0.592
8	5,998	5,505	0.493	8	5,984	5,362	0.622
9	5,995	5,376	0.619	9	5,987	5,357	0.630

Taguchi L9 (3^3) ortogonal dizine göz önünde bulundurularak yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan kerf değerleri üç farklı kesme bölgelerinden ölçülerek elde edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Inconel 718 iş parçalarına ait elde edilen S/N oranlarını Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4. 6. Kriyojenikli ve kriyojeniksiz Inconel 718'in Kerf S/N oranı değerleri

Deney No	Gerilim (V)	Sıvı Basıncı (kg/cm ²)	Tel Hızı (m/dk)	Kriyojenikli Kerf	S/N Ra (dB)	Kriyojeniksiz Kerf	S/N Rq (dB)
1	45	7	6	0.541	5.33605	0.606	4.35055
2	45	11	9	0.571	4.86728	0.615	4.22250
3	45	15	12	0.593	4.53891	0.485	6.28517
4	55	7	9	0.477	6.42963	0.536	5.41670
5	55	11	12	0.630	4.01319	0.559	5.05176
6	55	15	6	0.615	4.22250	0.628	4.04081
7	65	7	12	0.592	4.55357	0.590	4.58296
8	65	11	6	0.622	4.12419	0.493	6.14306
9	65	15	9	0.630	4.01319	0.619	4.16619

Tablo 4.6'daki kerf değerleri incelendiğinde, en düşük kerf değeri, gerilim 55 V, sıvı basını 7 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dk işleme şartlarında kriyojenik ısıtılmış iş parçasından elde edilmiştir. Kriyojenik ısıtılmamış iş parçasında ise 45 V, sıvı basını 15 kg/cm² ve tel hızı 12 m/dk işleme şartlarında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kerf değerleri kriyojenik ısıtılmış iş parçasında 0,630 mm değerindeyken kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasında bu değer 0,628 mm değerinde elde edilmiştir.

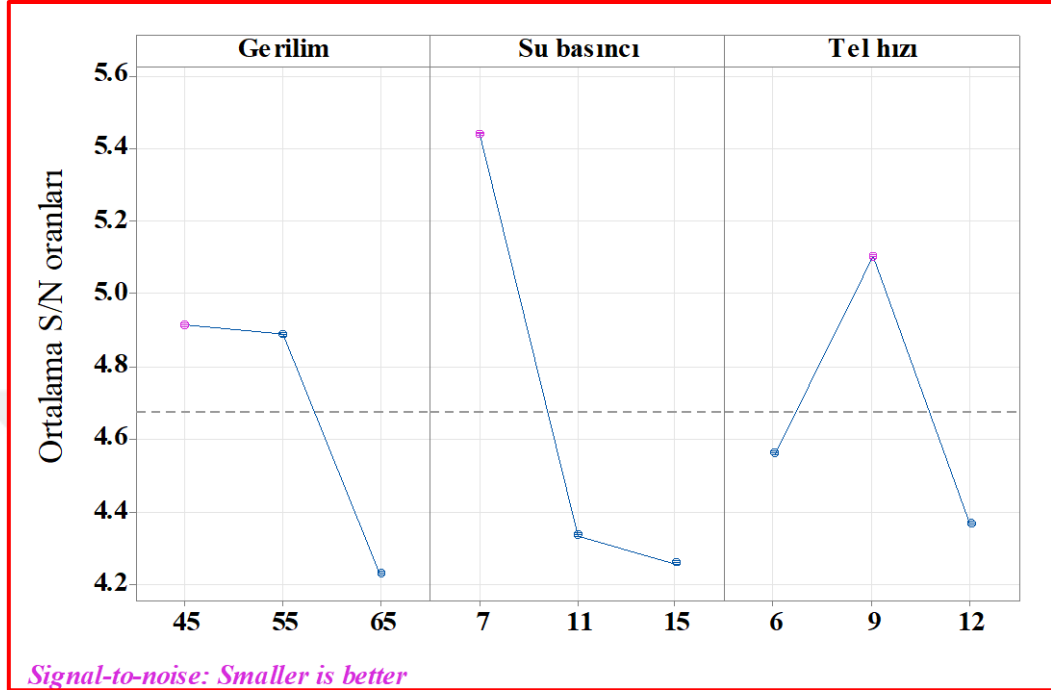
İşleme şartlarına bağlı olarak tel elektro erozyon tezgahında kesilen kriyojenikli Inconel 718 iş parçasından ölçülen kerf değerleri sinyal gürültü oranları değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4. 7. Yanıt tablosu

Seviye	Gerilim	Su basıncı	Tel hızı
1	4.914	5.440	4.561
2	4.888	4.335	5.103
3	4.230	4.258	4.369
Delta	0.684	1.182	0.735
Sıralama	3	1	2

Tablo 4.7'deki değerlere bakıldığında, Kerf değeri üzerinde işleme şartlarının önem sırasının su basıncı, tel hızı ve gerilim şeklinde sıralandığı görülmektedir. Kriyojenik ısıtılmış iş parçasında en önemli işleme parametresinin "Su

basıncı” olduğu tespit edilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin kriyojenik ısıtıl işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçasının Kerf değeri üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4. 6. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının kerf değerleri ait S/N oranları

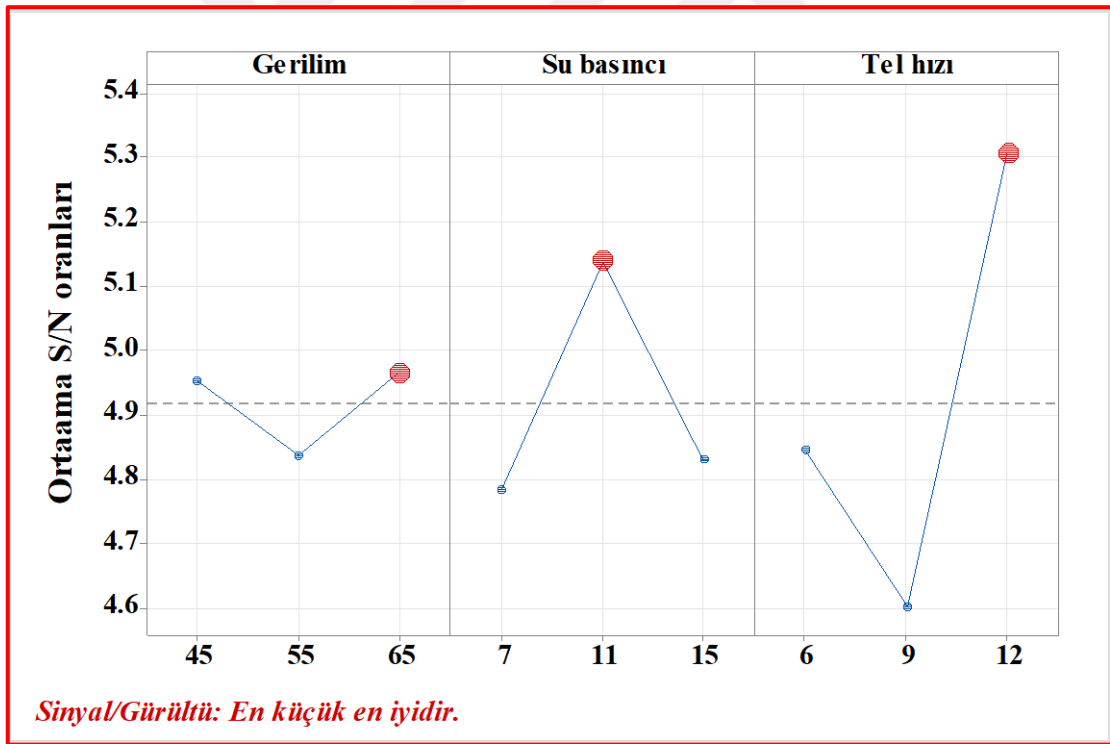
Şekil 4.6’daki grafiğe bakıldığında, en fazla değişimin su basıncında olduğu ve bundan dolayı kriyojenik işlem uygulanmış iş parçası üzerinde en etkili işleme parametresinin bu olduğu söylenebilir. Bunu sırasıyla tel hızı ve gerilim parametrelerinin takip ettiği görülmektedir. Sinyal gürültü oranlarına göre optimum kerf değerinin veren işleme parametrelerinin G1SB1TH2 şeklinde bir dizilim şeklinde seviyelerin belirlendiği Şekil 4.6’daki grafikte magenta rengi ile işaretlenmiştir. Bir diğer ifade ile optimum Kerf değerlerini veren işleme şartları sırasıyla gerilimin 45 V, su basıncının 7 kg/cm² ve tel hızının 9 m/dk kesme şartlarıdır.

İşleme şartlarına bağlı olarak tel elektro erozyon tezgahında kesilen kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçasından ölçülen Kerf değerleri sinyal gürültü oranları değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4. 8. Kriyojenik işlemsiz iş parçasının yanıtları

Seviye	Gerilim	Su basıncı	Tel hızı
1	4.953	4.783	4.845
2	4.836	5.139	4.602
3	4.964	4.831	5.307
Delta	0.128	0.356	0.705
Sıralama	3	2	1

Tablo 4.8’deki değerlere incelendiğinde, Kerf değeri üzerinde işleme şartlarının önem sırasıyla tel hızı, su basıncı ve gerilim olacak şekilde sıralandığı Tablo 4.8’deki “Sıralama” satırındaki sayılara göre anlaşılmaktadır. Kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmamış Inconel 718 iş parçasında en önemli işleme parametresinin “Tel hızı” olduğu Sıralama değerinin 1 (bir) yani ilk sırada olduğu ile belirlenmektedir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin kriyojenik ısıtım işlemi uygulanmamış iş parçasının Kerf değeri üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 4.7’te verilmiştir.

**Şekil 4. 7.** Kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasının kerf değerleri ait S/N oranları

Şekil 4.7’deki grafiğe incelendiğinde, en fazla değişimin herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmamış Inconel 718 iş parçası için “tel hızı” olduğu görülmektedir ve bu değişimden dolayı kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçası üzerinde en etkili işleme parametresinin tel hızı olduğu söylenebilir. İşleme parametrelerini normal iş parçasının

Kerf değeri üzerindeki önem sıra ise tel hızı, su basıncı ve gerilim parametrelerinin takip ettiği görülmektedir. Normal iş parçası için sinyal gürültü oranlarına göre optimum kerf değerinin veren işleme parametrelerinin G3SB2TH3 şeklinde bir dizilim şeklinde seviyelerin belirlendiği Şekildeki grafikteki içi dolu kırmızı renkli yuvarlak ile işaretlenmiştir. Bir diğer ifade ile optimum kerf değerlerini veren işleme şartları sırasıyla gerilim 65 V, su basıncı 11 kg/cm² ve tel hızı 12 m/dk kesme şartlarıdır.

4.5. Talaş Kaldırma Oranları (MRR)

Normal malzeme ve kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış Inconel 718 iş parçasının tel elektro erozyon ile kesilerek işlenmesi sonucunda elde edilen talaş kaldırma oranları değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir. İş parçasının işleme şartlarına göre en ideal şekilde ve en uygun işleme maliyetlerinde mümkün olan en iyi zamanda talaş kaldırılması önemlidir. Talaş kaldırma oranının yüksek olması iş parçasından kaba işleme şartlarında hızlı bir sonuç elde edilmesine katkı sağlayabilir.

Tablo 4. 9. Talaş kaldırma oranları değerleri

NORMAL MALZEME				KRİYOJENİK MALZEME			
TALAŞ KALDIRMA				TALAŞ KALDIRMA			
DENEY NO	KERF b	KESME HIZI Vc	ORANI MRR	DENEY NO	KERF b	KESME HIZI Vc	A ORANI MRR
1	0.606	1.198	7.260	1	0.541	1.201	6.497
2	0.615	1.289	7.927	2	0.571	1.295	7.394
3	0.485	1.223	5.932	3	0.593	1.179	6.991
4	0.536	1.274	6.829	4	0.477	1.246	5.943
5	0.559	1.226	6.853	5	0.630	1.247	7.856
6	0.628	1.258	7.900	6	0.615	1.239	7.614
7	0.590	1.282	7.564	7	0.592	1.250	7.400
8	0.493	1.286	6.340	8	0.622	1.230	7.651
9	0.619	1.208	7.478	9	0.630	1.140	7.182

Bu çalışmada talaş kaldırma oranının en büyük en iyidir Taguchi yaklaşımı göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Sinyal gürültü oranlarına göre elde edilen bu değerler Tabloda 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4. 10. Normal ve kriyojenikli iş parçasına ait MRR değerleri ve S/N oranları

Deney No	Gerilim (V)	Sıvı Basıncı (kg/cm ²)	Tel Hızı (m/dk)	Kriyojenikli MRR	S/N Ra (dB)	Normal MRR	S/N Rq (dB)
1	45	7	6	6.497	16.2543	7.260	17.2187
2	45	11	9	7.394	17.3776	7.927	17.9822
3	45	15	12	6.991	16.8908	5.932	15.4640
4	55	7	9	5.943	15.4801	6.829	16.6871
5	55	11	12	7.856	17.9040	6.853	16.7176
6	55	15	6	7.614	17.6323	7.900	17.9525
7	65	7	12	7.400	17.3846	7.564	17.5750
8	65	11	6	7.651	17.6744	6.340	16.0418
9	65	15	9	7.182	17.1249	7.478	17.4757

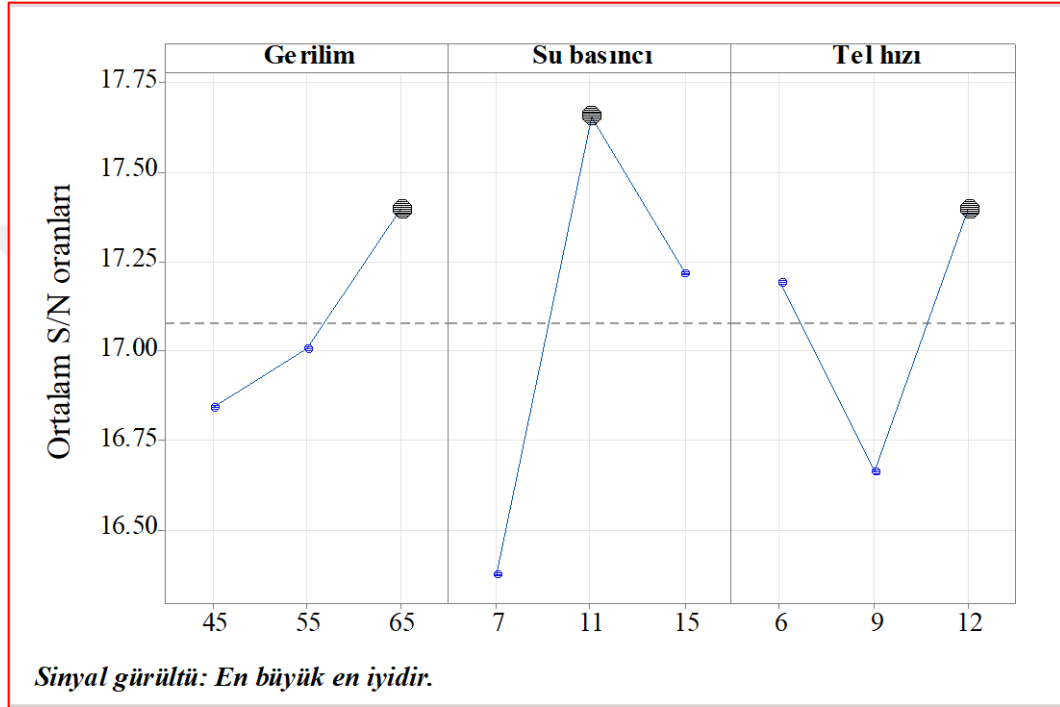
Tablo 4.10'daki normal ve kriyojenikli iş parçalarının MRR değerleri incelendiğinde, en yüksek MRR değeri gerilim 45 V, sıvı basını 11 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dk işleme şartlarında normal iş parçasından elde edilmiştir. Kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasında ise 65 V, sıvı basını 11 kg/cm² ve tel hızı 6 m/dk işleme şartlarında olduğu tespit edilmiştir. Sinyal gürültü oranları açısından normal ve kriyojenikli iş parçasının MRR değerleri karşılaştırıldığında, normal iş parçasının daha fazla talaş kaldırıldığı anlaşılmaktadır.

İşleme şartlarına bağlı olarak CNC tel elektro erozyon tezgahında kesilen kriyojenik ısıtılmış iş parçasından ölçülen talaş kaldırma oranı (MRR) Taguchi analizi sonuçlarına göre elde edilen sinyal gürültü oranları değerleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4. 11. Talaş kaldırma oranı yanıtları

Seviye	Gerilim	Su basıncı	Tel hızı
1	16,84	16,37	17,19
2	17,01	17,65	16,66
3	17,39	17,22	17,39
Delta	0,55	1,28	0,73
Sıralama	3	1	2

Tablo 4.11'deki MRR değerlerine bakıldığında, talaş kaldırma oranı üzerinde işleme şartlarının önem sıra su basıncı, tel hızı ve gerilim şeklinde sıralandığı görülmektedir. Kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış iş parçasında en önemli işleme parametresinin “Su basıncı” olduğu tespit edilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış Inconel 718 iş parçasının MRR değeri üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4. 8. Talaş kaldırma oranlarının Sinyal/Gürültü oranı

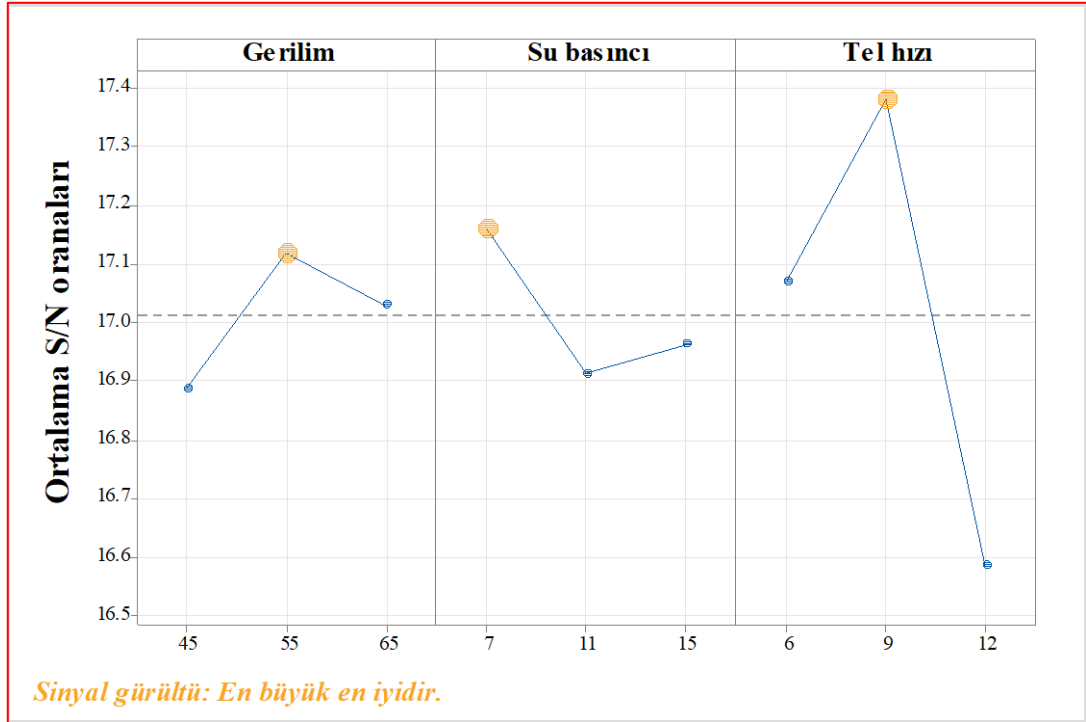
Şekil 4.8’deki talaş kaldırma oranı grafiği incelendiğinde, en fazla değişimin su basıncında olduğu görülmektedir. Bundan dolayı kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçası üzerinde en etkili işleme parametresinin bu olduğu söylenebilir. Bunu sırasıyla “tel hızı” ve “gerilim” işleme parametrelerinin takip ettiği “Sıralama” değerindeki sayılardan anlaşılmaktadır. Sinyal gürültü oranlarına göre optimum MRR değerinin veren işleme parametrelerinin G3SB2TH3 şeklinde bir dizilim şeklinde seviyelerin belirlendiği Şekildeki grafikteki siyah renk ile işaretlenmiştir. Bir diğer ifade ile optimum MRR değerlerini veren işleme şartları sırasıyla gerilim 65 V, su basıncı 11 kg/cm² ve tel hızı 12 m/dk kesme şartlarıdır.

İşleme şartlarına bağlı olarak CNC tel elektro erozyon tezgâhında kesilen normal Inconel 718 iş parçasına ait ölçülen MRR değerleri ve Taguchi en büyük en iyidir yaklaşımına göre elde edilen sinyal gürültü oranları değerleri Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4. 12. Normal Inconel 718 için talaş kaldırma oranı yanıtları

Seviye	Gerilim	Su basıncı	Tel hızı
1	16.89	17.16	17.07
2	17.12	16.91	17.38
3	17.03	16.96	16.59
Delta	0.23	0.25	0.80
Sıralama	3	2	1

Tablo 4.12’deki değerlere incelendiğinde, MRR değeri üzerinde işleme şartlarının, önem sırasıyla tel hızı, su basıncı ve gerilim şeklinde sıralandığı anlaşılmaktadır. Normal Inconel 718 iş parçasında en önemli işleme parametresinin “Tel hızı” olduğu Sıralama değerinin 1 (bir) yani ilk sırada olduğu ile belirlenmektedir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin normal iş parçasının MRR değeri üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4. 9. Normal Inconel 718 için talaş kaldırma oranlarının Sinyal/Gürültü oranı

Şekil 4.9'daki MRR grafiğine bakıldığında, en fazla değişimin normal Inconel 718 iş parçası için “tel hızı” olduğu görülmektedir. Bu değişim normal iş parçası üzerinde en etkili işleme parametresinin tel hızı olduğunu göstermektedir. İşleme parametrelerinin normal iş parçasının MRR değeri üzerindeki önem sırasının ise tel hızı, su basıncı ve gerilim şeklinde sıralandığı görülmektedir. Normal iş parçası için sinyal gürültü oranlarına göre optimum MRR değeri veren işleme parametreleri G2SB1TH2 şeklinde bir dizilim olarak seviyelerin belirlendiği Şekil 4.9'daki grafikteki içi dolu turuncu renkli yuvarlak ile işaretlenmiştir. Bir diğer ifade ile optimum MRR değeri veren işleme şartları sırasıyla gerilim 55 V, su basıncı 7 kg/cm² ve tel hızı 9 m/dk kesme şartlarıdır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Gerçekleştirilen bu deneysel ve tez çalışmada, kriyojenik ısıtma işlemli ve ısıtma işlemleri Inconel 718 iş parçasının tel elektro erozyon tezgâhında kesilerek işlenmesi sonucunda iş parçasının yüzeyinde oluşan Ra, Rq ve Rz değerleri üzerinde tezgâh girdi parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü değerlerini optimum yapan işleme parametrelerinin seviyeleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış iş parçalarının kerf, talaş kaldırma oranı ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen işleme deneyleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Kriyojenik ısıtma işlemleri Inconel 718 iş parçası için en düşük Ra, Rq ve Rz değerleri sırasıyla 3,819 μm , 4,679 ve 22,192 μm olarak elde edilmiştir. Kriyojenikli Inconel 718 iş parçası için ise en düşük Ra, Rq ve Rz değerleri sırasıyla 3,849 μm ve 4,775 μm ve 23,491 μm olarak ölçülmüştür.
- Kriyojenik ısıtma işlemleri Inconel 718 iş parçasının optimum Ra, Rq ve Rz değeri üzerinde en fazla etkiye sahip parametre gerilim olur iken kriyojenikli Inconel 718 iş parçası üzerinde ise tel hızı olduğu görülmüştür.
- Kriyojenik ısıtma işlemleri Inconel 718 iş parçasından elde edilen Ra, Rq ve Rz değeri üzerinde işleme şartlarının etki sıralaması gerilim, tel hızı ve sıvı basıncı iken kriyojenikli iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi ise sırasıyla tel hızı, sıvı basıncı ve gerilim olduğu tespit edilmiştir.
- Düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri için, kriyojenikli Inconel 718 iş parçasının işleme parametreleri olarak yüksek gerilim ve sıvı basıncı, düşük tel hızı kullanılırken, kriyojeniksiz Inconel 718 için ise düşük gerilim, yüksek sıvı basıncı ve düşük veya orta tel hızları kullanıldığı görülmüştür.
- Taguchi ortogonal tasarım yöntemine göre yapılan optimizasyona göre; kriyojeniksiz Inconel 718 iş parçasının tel erozyon ile işlenmesinde Ra için optimum şartlar G1SB3TH1 (G=45 V, SB= 15 kg/cm² ve TH=6 m/dk), Rq ve Rz için optimum şartlar G1SB3TH2 (G=45 V, SB= 15 kg/cm² ve TH=9 m/dk) olarak belirlenmiştir. Kriyojenikli Inconel 718 iş parçası için Ra ve Rq için optimum şartlar G3SB3TH1 (G=65 V, SB= 15

kg/cm² ve TH=6 m/dk), Rz için optimum şartlar G3SB1TH1 (G=65 V, SB= 7 kg/cm² ve TH=6 m/dk) olduğu tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışması sonucunda elde edilen veriler ışığında aşağıda çalışma alanları ve endüstriyel uygulamalarda faydalı olabileceği düşünülen konular sırayla önerilmiştir.

- Talaşlı imalat yönteminde talaş kaldırma işlemi sonucunda malzemeden koparılarak ortaya çıkan talaşların görüntüleri derin öğrenme yöntemleri kullanarak sınıflandırılabilir.
- Kesici takımlarda bulunan talaş kırıcı formları derin öğrenme yöntemi kullanılarak sınıflandırılabilir.
- Derin öğrenme yöntemi ile talaşlı imalat işlemi sırasında kullanılan kesici takımlarda meydana gelen kusurlar tespit edilebilir.

KAYNAKÇA

- Abdil, K. U. Ş., & Motorcu, A. R. (2017). Nikel esaslı Waspaloy alaşımının tel erozyon yöntemiyle işlenmesinde Taguchi metodu ile yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 195-204.
- Abebe, T., Palani, S., & Prakash, J. U. (2022). Kerf width analysis of wire electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4 V ELI) using response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 481-487.
- Abhilash, P. M., & Chakradhar, D. (2020). ANFIS modelling of mean gap voltage variation to predict wire breakages during wire EDM of Inconel 718. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 153-164.
- Abhilash, P. M., & Chakradhar, D. (2020). Surface integrity comparison of wire electric discharge machined Inconel 718 surfaces at different machining stabilities. *Procedia CIRP*, 87, 228-233.
- Akincioğlu, S., Gökkaya, H., & Uygur, İ. (2015) A review of cryogenic treatment on cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12):1609-1627.
- Akşit, İ., (2008). Plazma nitrürlenmiş inconel 718' in yüksek sıcaklık oksidasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Altın, A., (2004). Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının işlenebilirliğinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Anonim1, [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays). [Erişim Tarihi: 2.04.2024].
- Anonim2, <chromeextension://efaidnbmnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>. [Erişim Tarihi: 1.08.2024].
- Anonim3, <https://yamasa.com.tr/242/1/4/yamasa/yuzeyolcumparametreleri.aspx>. [Erişim Tarihi: 3.22.2024].
- Anonim4, <https://www.makelektronik.com.tr/bbk/6/sERTL%C4%B0K-Olcumned%C4%B0R-.html>. [Erişim Tarihi: 4.12.2024].
- Askeland, D. R., 1998, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt-1, Nobel Akademik Yayıncılık.
- ASM Handbook Vol. 1., (1990). Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys, *ASM International*, Ohio, USA.

- Baday, Ş., Başak, H., & Sönmez, F. (2017). The assessment of cutting force with taguchi design in medium carbon steel–applied spheroidization heat treatment. *Measurement and Control*, 50(4), 89-96.
- Baday, Ş., & Ersöz, O. (2022). Comparative investigations of cryo-treated and untreated inserts on machinability of AISI 1050 by using response surface methodology, ANOVA and Taguchi design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(3), 1751-1765.
- Baday, Ş., Gürbüz, H., & Ersöz, O. (2023) Prediction of Cutting Forces Obtained through Cryo-Treated and Untreated Cutting Tools Using Optimum ANN Determined by Taguchi Design. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 13(2), 13-27.
- Bargel H. J. ve Schulze G., 1980, Malzeme Bilgisi Cilt-2, MBEAE Matbaası, Gebze.
- Bayraktutar, M. (2000). Tel Erozyon tezgahında yüzey Kalitesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Bhowmick, S., Mondal, R., Sarkar, S., Biswas, N., De, J., & Majumdar, G. (2023). Parametric optimization and prediction of MRR and surface roughness of titanium mixed EDM for Inconel 718 using RSM and fuzzy logic. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 10-28.
- Biswas, S., Paul, A. R., Dhar, A. R., Singh, Y., & Mukherjee, M. (2023). Multi-material modelling for wire electro-discharge machining of Ni-based superalloys using hybrid neural network and stochastic optimization techniques. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 350-364.
- Candane, D., Alagumurthi, N., & Palaniradja, K. (2013). Effect of cryogenic treatment on microstructure and wear characteristics of AISI M35 HSS. *International journal of materials science and applications*, 2(2), 56-65.
- Choudhury, I. A. ve El-Baradie, M. A., 1998, Machinability of nickel-base super alloys: a general review, *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 278–284.
- Chen, Z., Zhou, H., Yan, Z., Han, F., & Yan, H. (2021). A new high-speed observation system for evaluating the spark location in WEDM of Inconel 718. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 184-196.
- Choudhury, B., & Sen, R. (2022). Optimization of WEDM parameters for Machining Inconel 800 by ANN based Bayesian hybrid algorithm. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1098-1101.
- Çelik A, Alağaç MS, Turan S, Kara A, Kara F (2017) Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718. *Wear*, 378:58–67.

- Devanathan, C., Natarajan, M. S., Shankar, E., Giri, R., & Vigneshwaran, K. (2023). An effect of process parameters during wire cut electrical discharge machining of Inconel 738. *Materials Today: Proceedings*, 84, 83-88.
- Devillez, A., Le Coz, G., Dominiak, S., & Dudzinski, D. (2011). Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(10), 1590-1598.
- Dhanunjaya, M., Madduleti, M., & Boosa, G. C. (2018). The process of EDM cutting parameters optimizing by using Taguchi Method and Anova on Inconel 718. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(12), 1305-1311.
- Dinç, H., 2013. Inconel 718 süper alaşımasının termokimyasal borlanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Divya, M., Sateesh, N., & Subbiah, R. (2020). Review on multi objective optimization of wire cut EDM process parameters using grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3124-3130.
- Donachie, M. J., Donachie, S.J., (2002). Superalloys: A Technical Guide, ASM International, USA.
- Doval-Gandoy, J., Pasandin, R., & Fernández, B. (2005, November). Sharpened of saw blades by electrical discharge Machining. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2005. IECON 2005. (pp. 5-pp). IEEE.
- Durairaj, M., Sudharsun, D., & Swamynathan, N. (2013). Analysis of process parameters in wire EDM with stainless steel using single objective Taguchi method and multi objective grey relational grade. *Procedia Engineering*, 64, 868-877.
- Ekmekci, B., Elkoca, O., & Erden, A. (2005). A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 36, 117-124.
- Ersöz E. ve Ovalı I., 2018, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin aşınma davranışları üzerindeki etkisi, *Politeknik Dergisi*, 21(2), 411-417.
- Ezugwu, E. O., Bonney, J., & Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of materials processing technology*, 134(2), 233-253.
- Ezugwu EO, Fadare DA, Bonney J, Da Silva RB, Sales WF (2005) Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. *Int J Mach Tool Manu*, 45(12-13):1375–1385.
- Goyal, A. (2017). Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by

- cryogenic treated tool electrode. *Journal of King Saud University-Science*, 29(4), 528-535.
- Güler, H., & Özcan, R. (2014). Yüksek Karbonlu Çeliklere Su Verme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 19(2), 77-83.
- Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2019). CNC torna tezgâhlarında ayna ve punta basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerine etkisinin Taguchi metodu ile optimizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 119-134.
- Halim NHA, Haron CHC, Ghani JA, Azhar MF (2019) Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO2 conditions. *Wear*, 426:1683– 1690.
- Han, F., Jiang, J., & Yu, D. (2007). Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 538-546.
- Hargrove, S. K., & Ding, D. (2007). Determining cutting parameters in wire EDM based on workpiece surface temperature distribution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 295-299.
- İnanır, Z., 2012, Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2012.
- Jahan, M.P. (2014), Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications, Nova Science Publishers, New York.
- Johny, A., & Thiagarajan, C. (2020). Investigation of surface integrity and it's optimization on pure titanium using molybdenum wire by reciprocated travelling WEDM–A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2581-2584.
- Kannan S, Kui L (2019) Experimental investigation of surface integrity during abrasive edge profiling of nickel-based alloy. *J Manuf Process*, 39:40–51.
- Karabulut, Ş., 2006, Inconel 718 süper alaşımların işlenmesinde talaş kırılma problemleri ve talaş kırıcı tasarımı, Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-104.
- Karataş, M.A. (2022). Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4), 516-532.
- Karataş, M. A. (2022). Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli

- optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4), 516-532.
- Kasim MS, Hafiz MSA, Ghani JA, Haron CHC, Izamshah R, Sundi SA, Othman IS (2019) Investigation of surface topology in ball nose end milling process of Inconel 718. *Wear*, 426:1318–1326.
- Kumar, A., Abhishek, K., Vivekananda, K., & Maity, K. P. (2018). Effect of wire electrode materials on die-corner accuracy for Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12641-12648.
- Kumar, A., & Singh, S. (2021). Parametric optimization of wire electro discharge machining of Inconel 718 using Taguchi's methodology. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2025-2031.
- Kumar, P., Rathi, N., & Gupta, A. (2023). Non-conventional machining of nickel based superalloys: A review. *Materials Today: Proceedings*. (Erken görünüm)
- Kurubaş, H. (2004). Yüksek manganlı çeliklerin tel erozyon tezgahında işlenmesinde tel aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. *Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Elâzığ*.
- Li HZ, Zeng H, Chen XQ (2006) An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts. *J Mater Process Technol*, 180(1-3):296– 304.
- Luo M, Luo H, Zhang D, Tang K (2018) Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy. *J Mater Process Technol*, 252:105–115.
- Ma JW, Wang FJ, Jia ZY, Xu Q, Yang YY (2014) Study of machining parameter optimization in high speed milling of Inconel 718 curved surface based on cutting force. *Int J Adv Manuf Technol*, 75(1-4):269–277.
- Marelli, D., Singh, S. K., Nagari, S., & Subbiah, R. (2020). Optimisation of machining parameters of wire-cut EDM on super alloy materials—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1021-1027. Malmelöv, A., Fisk, M., Lundbäck, A., & Lindgren, L. E. (2020). Mechanism based flow stress model for alloy 625 and alloy 718. *Materials*, 13(24), 5620.
- Mohapatra, S., Rahul, & Sahoo, A. K. (2022). Comparative study of Inconel 601, 625, 718, 825 super-alloys during Electro-Discharge Machining. *Materials Today: Proceedings*, 56, 226-230.
- Musfirah AH, Ghani JA, Haron CC (2017) Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. *Wear*, 376:125–133.

- Naik, G. M., Anjan, B. N., Badiger, R. I., Bellubbi, S., & Mishra, D. K. (2021). An investigation on effects of wire-EDT machining parameters on surface roughness of Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 35, 474-477.
- Nath C, Brooks Z, Kurfess TR (2015) Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts. *J Manuf Process*, 20:88–97.
- Nayak, B. B., & Mahapatra, S. S. (2016). Optimization of WEDM process parameters using deep cryo-treated Inconel 718 as work material. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), 161-170.
- Ni, T., & Dong, J. (2017). Creep behaviors and mechanisms of Inconel718 and Allvac718plus. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 406-415.
- Odabaşı, A., (2010). Süper alaşımların karbondioksit lazer kaynak şartlarının optimizasyonu, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, A., Türker, M., Karataş, Ç., & Güllü, A. (2002). MA 956 süperalaşım malzemesi için tel erozyonda işleme parametrelerinin ön tayini. *Politeknik Dergisi*, 4, 7-14.
- Özdur, Z. (1999). CNC tel elektro erozyon tezgâhında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, işleme hızı ve ölçü tamlığına etkilerinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma. *Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Ankara*.
- Parashar, V., Rehman, A., Bhagoria, J.L., & Puri, Y.M. (2009). Investigation and optimization of surface roughness for wire cut electro discharge machining of SS 304L using Taguchi dynamic experiments. *International Journal of Engineering Studies*, 1(4), 257-267.
- Paswan, K., Sharma, S., Dwivedi, S. P., Abdulameer, M. K., Li, C., Yasin, Y., ... & Tag-Eldin, E. M. (2023). An analysis of microstructural morphology, surface topography, surface integrity, recast layer, and machining performance of graphene nanosheets on Inconel 718 superalloy: Investigating the impact on EDM characteristics, surface characterizations, and optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 7138-7158.
- Patel, S., Prajapati, J. M., Patel, D., Patel, M., & Patel, K. (2022). Evaluation of different approach for WEDM process optimization. *Materials Today: Proceedings*, 66, 1988-1993.
- Patil, A. A., & Chanmanwar, R. M. (2022). Experimental investigation of angular error during taper cutting of titanium (ASTM grade 2) using WEDM process. *Materials Today: Proceedings*, 59, 379-386.
- Patil, S. P., Prasad, G. L., Kiran, C. S., Kumar, S., Ramasamy, V., & Ali, H. M. (2023). Surface roughness and topography of EDM machining of Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*. (Erken görünüm)

- Paturi, U. M. R., & Reddy, N. S. (2021). Progress of machinability on the machining of Inconel 718: A comprehensive review on the perception of cleaner machining. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100323.
- Paturi, U. M. R., Devarasetti, H., Reddy, N. S., Kotkunde, N., & Patle, B. K. (2021). Modeling of surface roughness in wire electrical discharge machining of Inconel 718 using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*, 38, 3142-3148.
- Podgornik, B., Leskovšek, V., & Vižintin, J. (2009). Influence of deep-cryogenic treatment on tribological properties of P/M high-speed steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(7-8), 734-738.
- Rahul., Datta, S., Biswal, B. B., & Mahapatra, S. S. (2019a). Machinability analysis of Inconel 601, 625, 718 and 825 during electro-discharge machining: on evaluation of optimal parameters setting. *Measurement*, 137, 382-400.
- Rahul, Datta, S., & Biswal, B. B. (2019b). Experimental studies on electro-discharge machining of Inconel 825 super alloy using cryogenically treated tool/workpiece. *Measurement*, 145, 611-630.
- Ranjan, A., Chakraborty, S., Kumar, D., & Bose, D. (2019). Multi-objective optimization of a hybrid machining process abrasive powder mixed WEDM of Inconel 718 using particle swarm optimization technique. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3606-3616.
- Rao, C. M., Venkatasubbaiah, K., & Rao, K. J. (2016). Experimental investigation of surface roughness characteristics Ra, Rq and Rz. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 9(7), 373-388.
- Sahu, S. K., Anand, M. V., Kumar, T. C. A., Kumar, A., Prasad, G. S., & Niraj, V. V. (2023). Kerf width analysis of wire electrical discharge machining of titanium alloy. *Materials Today: Proceedings*. (Erken görünüm)
- Sanchez, J. A., Rodil, J. L., Herrero, A., De Lacalle, L. L., & Lamikiz, A. (2007). On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. *Journal of materials processing technology*, 182(1-3), 574-579.
- Senthilkumar, D., & Rajendran, I. (2011). Influence of shallow and deep cryogenic treatment on tribological behavior of En 19 steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(9), 53-59.
- Singh, T., Arab, J., & Chen, S. C. (2023). Improvement on surface quality of Inconel-718 slits via laser cutting and wire electrochemical machining processes. *Optics & Laser Technology*, 167, 109637.
- Sudhir, Sehgal, A. K., & Nain, S. S. (2022). Machine learning algorithms evaluation and optimization of WEDM of nickel based super alloy: A review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1793-1798.

- Sudhir, Sehgal, A.K., & Nain, S.S. (2023). Machine learning models behavior analysis for WEDM of super alloy. *Materials Today: Proceedings*. (Erken görünüm)
- Tillack, D.J., (2007). Welding superalloys for aerospace applications, *Welding Journal*, 86, 28–32.
- Tharian, B. K., Dhanish, P. B., & Manu, R. (2021). Enhancement of material removal rate in Electric Discharge Machining of Inconel 718 using cryo-treated graphite electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5172-5176.
- Thejasree, P., Binoj, J. S., Manikandan, N., Krishnamachary, P. C., Raju, R., & Palanisamy, D. (2021). Multi objective optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 39, 230-235.
- Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J.M., ve Prado, J.M., (2006). High temperature deformation of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 177, 469–472.
- Tondy, H. R., & Tigga, A. M. (2019). An empirical evaluation and optimization of performance parameters of wire electrical discharge machining in cutting of Inconel 718. *Measurement*, 140, 185-196.
- Turan, T., (2013). Inconel 718 süper alaşımasının nitrülenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ucun İ, Aslantas K, Bedir F (2013) An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy. *Wear*, 300(1-2):8–19.
- Ukey, K., Sahu, A. R., Gajghate, S. S., Behera, A. K., Limbadri, C., & Majumder, H. (2023). Wire electrical discharge machining (WEDM) review on current optimization research trends. *Materials Today: Proceedings*. (Erken görünüm)
- Vani, P. N., Arun, K., Reddy, M. C. S., & Madduleti, M. (2018). Optimizing the process parameters of EDM using Taguchi Method and Anova on Inconel 718. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 5(12), 487-494.
- Yılmaz B, Karabulut Ş, Güllü A (2018) Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters. *J Manuf Process*, 32: 553–563.
- Zhang, Y., Guo, S., Zhang, Z., Huang, H., Li, W., Zhang, G., & Huang, Y. (2019). Simulation and experimental investigations of complex thermal deformation behavior of wire electrical discharge machining of the thin-walled component of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 306-322.
- Zhao, M., Zhao, Z., Liu, L., Luo, G., & Chen, W. (2020). Influence of heat treatment on cyclic response of nickel-based superalloy Inconel 718 up to very-high cycle regime. *Materials*, 13(23), 5358.