



Kriyojenik İşlem Görmüş Nikel Esaslı Süper Alaşımın Elektro-Erozyon İşleme Performansı Optimizasyonu

¹*Engin Nas, ²Sıtkı Akıncıoğlu

¹* Düzce Üniversitesi, Dr. Engin PAK Cumayeri Meslek yüksekokulu, Endüstriyel Kalıpcılık, 81700, Düzce/ TURKEY, enginnas@duzce.edu.tr 

² Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu Makine Tasarımı Bölümü, 81700, Düzce – TURKEY, sitkiakincioglu@duzce.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 02.04.2018

Kabul Tarihi: 26.10.2018

Öz

Bu çalışmada kriyojenik işlem uygulanmış nikel esaslı süper alaşımın elektro erozyon işleme (EEİ) ile işleme performansı araştırılmıştır. Bu amaçla ısı dirençli nikel esaslı süper alaşıma sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Deneylede kullanılan parametreler deney maliyetini azaltmak için Taguchi L₉ ortogonal dizile tasarlanmış olup elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak incelenerek kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı (MAK) etkisi araştırılmıştır. Her iki çıktı parametresi için en ideal parametrelerin belirlenmesinde ise Gray-Taguchi yaklaşımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda; yanıt tabloları incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri için en etkili parametrenin malzeme ve vurum süresi için sırası ile A1B1, malzeme aşınma kaybı için ise A2B1 olarak belirlenmiştir. Anova sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin %70,99 ile vurum süresi olarak, malzeme aşınma kaybı için ise % 71,66 ile malzeme olarak olduğu belirlenmiştir. Maksimum aşınma miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri için gri ilişkisel derecesi hesaplandığında her ikisi için ideal faktörler birinci deney ile gerçekleştirilen parametrelerde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Taguchi Optimizasyon, Gray-Taguchi Optimizasyonu, Elektro Erozyon İşleme, Kriyojenik işlem, Nikel esaslı süper alaşım

Optimization of Cryogenic Treated Nickel-Based Superalloy in Terms of Electro-Erosion Processing Performance

¹*Engin Nas, ²Sıtkı Akıncıoğlu

¹* Düzce University, Dr. Engin PAK Cumayeri Vocational School, Endustriyel Molding, 81700, Düzce/ TURKEY, enginnas@duzce.edu.tr

² Düzce University, Department of Mechine Design, 81700, Düzce – TURKEY, sitkiakincioglu@duzce.edu.tr

Abstract

In this study, electrical discharge machining (EDM) performance of cryogenic nickel based superalloy was investigated. For this purpose, thermal resistance nickel based super alloying was applied to shallow and deep cryogenic process. The parameters used in the experiments are designed with the Taguchi L₉ orthogonal array to reduce the test cost. The obtained results were examined statistically and the effect of surface roughness and material wear loss (MRR) of cryogenic treatment was investigated. The Gray-Taguchi approach is used to determine the ideal processing parameters. The most effective parameters for surface roughness values are A1B1 and A2B1 for MRR. According to ANOVA results, the most effective parameter for the surface roughness was determined as 70.99% of the time on, the material duration was determined as 71.66% for material wear loss. For the maximum wear amount and minimum surface roughness value, it was determined that the ideal factors for the gray relational grade occur in the parameters performed by the first experiment.

Keywords: Taguchi Optimization, Gray-Taguchi Optimization, EDM, cryogenic treatment, nickel-based superalloy

*¹Sorumlu yazar: Düzce Üniversitesi, Dr. Engin PAK Cumayeri Meslek yüksekokulu, Endüstriyel Kalıpcılık, 81700, Düzce/ TURKEY, enginnas@duzce.edu.tr

Doi: 10.21541/apjes.412042

1. GİRİŞ

Kriyojenik işlem metallerin mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için kullanılan bir ısı işlem türüdür. Kriyojenik işlemin etkisini arttırmak için malzemelerin özelliğine göre farklı parametrelerde uygulanmaktadır. Malzeme türüne göre farklı bekleme süresi, farklı ısı değişkeni olarak kullanılmaktadır [1]. Kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü etkileyen, bir kereye mahsus yapılan ucuz ve kalıcı bir işlemdir. Bu yöntem ile takım çeliklerinde ve HSS takımlarda kalıntı östenit yapının martenzit yapıya dönüşmesi, sementit karbür kesici takımlarda ince karbür çökeltilerinin oluşumu, eta karbür fazının oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanmaktadır. Böylece malzemelerin sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde ciddi iyileşmeler elde edilmektedir [2].

Önceleri kalıp malzemelerine uygulanan kriyojenik işlem günümüzde işlenebilirlik çalışmalarında malzemelere ve kesici takımlara uygulanarak kesme şartlarının iyileşmesi yönünde ciddi gelişmeler sağlanmıştır [3]. Kriyojenik işlemin işleme performansına etkileri, tormalama, frezeleme ve delik delme gibi geleneksel imalat yöntemlerinde geniş kapsamda incelenmektedir [4-7]. Ancak, kriyojenik işlemin geleneksel olmayan imalat yöntemlerine etkileri henüz geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi geniş kapsamda incelenmemiştir. Geleneksel olmayan işleme yöntemlerinden biri elektro erozyon ile işleme yöntemidir.

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), geometrik olarak karmaşık ve sert malzemelerin işlenmesinde kullanılan alışılmamış yöntemdir. EEİ de işleme yönteminde işlenecek malzeme sertliğinin, tokluğunun ve mukavemetinin işleme performansına etkisi yoktur.

Fakat bunda işlenecek malzemenin erime sıcaklığı ve ısı iletkenliği etkilidir [8, 9]. Geleneksel yöntemler ile süper alaşımların işlenmesi esnasında meydana gelen yüksek sıcaklıklar kesici takımları tahrip edip ürün kalitesini bozmakta ve tüketilen kesici takım miktarını arttırmaktadır. Bu tür işlenmesi zor malzemelerin işlenmesine geleneksel olmayan yöntemler kullanılarak ürün kalitesini artırıp, üretim maliyetlerini düşürebilmektedir. EEİ geleneksel olarak işlenmesi zor olan süper alaşımların işlenmesinde de kullanılmaktadır. Deney maliyetlerini düşürmek için imalat sektöründe ürün kalitesini arttırmak ve maliyeti düşürmek için optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride Taguchi optimizasyon yöntemidir.

Taguchi metodu (TM) ile deney tasarımı yaygın olarak yüzey pürüzlülüğü üzerine uygulandığı birçok deneysel çalışma görülmektedir [7]. Deney tasarımı, kesme parametrelerinin deneysel süreç içerisindeki bilinmeyen özelliklerinin belirlenmesi ve değişkenler arasındaki etkileşimlerin analizi ve modellenmesi için güçlü bir istatistiksel yöntemdir.

Endüstriyel alanlarda, Taguchi yöntemi kullanılarak tasarım ve üretim için ürün geliştirme zamanı azaltılmakta ve buna bağlı olarak maliyetler düşürülerek işletmenin kar oranı artırılmaktadır [10]. Çok amaçlı problemleri optimize etmek için TM Gri İlişkisel Analiz (GİA) ile birleştirilmektedir. Isıl dirençli olan nikel esaslı süper alaşımların geleneksel olarak işlenebilmesi zordur.

EEİ ile işlemede malzemenin sertlik ve tokluğu önemsizdir. Fakat böyle ısı direnci yüksek malzemelerin işlenebilmesi için ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması gerekmektedir. Kriyojenik işlemin malzemelerin elektrik iletkenliğini arttırdığı bilinmektedir [11, 12]. Elektrik iletkenliğinin artırılması ile EEİ işleme performansı arasında ilişkinin araştırılması gerekmektedir. Nikel esaslı süper alaşımlara uygulanan kriyojenik işlemin EEİ performansına etkisi ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada; kriyojenik işlemin nikel esaslı süper alaşımın EEİ ile işleme performansına etkisi araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri Taguchi L₉ deneysel tasarımı ile oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemi, ANOVA, regresyon analizi ve Gri ilişki analizi kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü ile malzeme aşınma kaybını etkileyen en ideal şartların belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Elektro Erozyon ile İşleme

Deneysel çalışmada King marka ZNC – K-3200 dalma erozyon tezgâhı kullanılmıştır. EEİ ile numune üzerinden kaldırılan talaşın miktarını (ağırlık/ dak) belirlemek için standart formül Eşitlik (1)' de verilmektedir.

$$\text{Malzeme aşınma kaybı} = \left[\frac{(W_i - W_f)}{t} \right] \quad (1)$$

MAK: Malzeme Aşınma Kaybı (g/dak)
 Wi: Numunenin deney öncesi ağırlığı (g)
 Wf: Numunenin deney sonrası ağırlığı (g)
 t : İşleme süresi (dak)

2.2. Malzeme ve Elektrot Seçimi

Deneysel çalışmada malzeme olarak 20 mm çapında nikel esaslı süper alaşım, elektrot olarak ise 8,9 gr/cm³ yoğunluğa sahip 18 mm çapında elektrolitik bakır kullanılmıştır. Nikel esaslı süper alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Nikel esaslı süper alaşımın kimyasal bileşimi.

Ni	Cr	Mo	Fe	W	Diğer
58,2	21,28	12,94	4	2,87	0,71

Elektrot malzemesi ve deney malzemesinin özellikleri Tablo 2' de gösterilmektedir.

Tablo 2. Elektrot malzemesinin özellikleri.

Özellikler		Değer	
Elektrot Malzemesi			
1	Ergime noktası (°C)	1083	
2	Elastik modül (N/mm ²)	1,23×105	
3	Poisson oranı	0,26	
4	Yoğunluk (g/cm ³)	8,9	
Deney Malzemesi			
Sertlik (HRB)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Isıl İletkenlik (W/m-K)
93	358	735	10.1

2.3. Taguchi Method

Taguchi yöntemi geleneksel deney tasarımının dikkate almadığı kontrol edilemeyen faktörlerin meydana getirdiği değişkenlerin denetimine izin vermektedir. Taguchi, bu faktörlere karşı kontrol faktörlerinin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürür. S/N oranı, istenilmeyen rastgele gürültü değeri için istenilen sinyal oranı olarak tanımlanmakta olup, deneysel verilerin kalite karakteristiklerini göstermektedir [13]. Ayrıca, kesme parametrelerinin istatistiksel önemini belirlemek için ANOVA uygulanmaktadır. ANOVA ve S/N oranı yardımıyla kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenmektedir [14]. Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin her kombinasyonu deney tasarımında ölçülür, kontrol faktörlerinin optimizasyonunda S/N oranları kullanılır. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, ürün kalitesi, maliyeti ve ömrü açısından büyük bir öneme sahiptir [15]. S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı nominal en iyidir, en büyük en iyidir, en küçük en iyidir metotları kullanılır. Eşitlik (2)'te "en büyük en iyidir", Eşitlik (3)'te ise "en küçük en iyidir" amaç fonksiyonu verilmiştir.

$$\text{En büyük en iyi} \quad : \frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{En küçük en iyi} \quad : \frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Deneyisel çalışmada işlem uygulanmamış (UT), sıg kriyojenik işlem uygulanmış (SCT) ve derin kriyojenik işlem uygulanmış (DCT) nikel esaslı süper alaşım kullanılmıştır. Üç farklı vurum süresi (300, 400 ve 500 µs), bekleme süresi (10 µs) ve amper (10 A) kullanılmıştır. Kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 3. Deney faktörleri ve seviyeleri.

No	Faktörler	Sembol	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1	Numuneler	A	-	UT	SCT	DCT
2	Vurum süresi	B	µs	300	400	500

EEİ işleme için deney düzeni Taguchi L₉ orthogonal deney düzenine göre (Tablo 4) tasarlanmıştır.

Tablo 4. Taguchi L₉ ortogonal düzeni.

No	Factor A	Factor B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

2.4. Gri İlişki Analizi

Taguchi Metodu az sayıda deney ile kontrol faktörlerinin etkilerinin ve en uygun seviyelerinin belirlendiği için deneysel çalışmalarda tercih edilen verimli bir yöntemdir. Fakat sadece tek yanıtli optimizasyon problemleri ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla geleneksel TM çok amaçlı optimizasyon problemini optimize edememektedir. Çok amaçlı problemleri optimize etmek için TM Gri İlişkisel Analiz (GİA) ile birleştirilmektedir [16,17,18]. Gri ilişkisel Analiz, karar verme ve analiz aracıdır. Gri ilişkisel analiz metodunun hesaplama adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Referans (Ra, MAK) değerlerin sıralanması

$$x_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots \dots x_0(n)) \quad (4)$$

Adım 2: Deney sonuçlarından elde edilen verilerin normalize edilmesi

Normalizasyonda sık kullanılan yöntemlerden birisi olan lineer veri ön işleme metodudur. Örneğin yüzey pürüzlülüğünde en düşük en iyi normalizasyonu tercih edilmelidir. Yüzey pürüzlülüğünde lineer normalizasyonda küçük değer alan noktalar normalizasyonda "1" e yakın değerler alır. Büyük değerler alan noktalar ise "0" 'a yakın değerler olacaktır. "Daha yüksek daha iyi" durumunda normalizasyon Eşitlik (5)'deki gibidir.

$$\text{Daha yüksek daha iyi} = x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (5)$$

$x_i^0(k)$, i serisi k. sıradaki orijinal değer, $x_i(k)$ normalizasyon sonrası i. seri k. sıradaki değer, $\min x_i^0(k)$ i serisindeki minimum değer, $\max x_i^0(k)$ i serisindeki maksimum değerdir.

"Daha düşük daha iyi" için Eşitlik (6)'deki gibidir;

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (6)$$

"İdeal değer daha iyi" için Eşitlik (7)'deki gibidir ;

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (7)$$

Burada x^0 istenilen ideal değeri göstermektedir.

Adım 3: x_i serisi ile karşılaştırılacak m tane seri Eşitlik (8)'da tanımlanmış olsun.

$$x_i = (x^i(1), x^i(2), x^i(3), \dots, x^i(n)) \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Adım 4: k, n uzunluğundaki serideki k. sıraya gösterebilir. $\varepsilon(x_0(k), x_i(k))$, k. noktadaki gri ilişkisel katsayısı eşitlik (9), (10), (11) ve (12)'e göre hesaplanır.

$$\varepsilon(x_0(k), x_j(k)) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (9)$$

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (10)$$

$$\Delta_{min} = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (11)$$

$$\Delta_{max} = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (12)$$

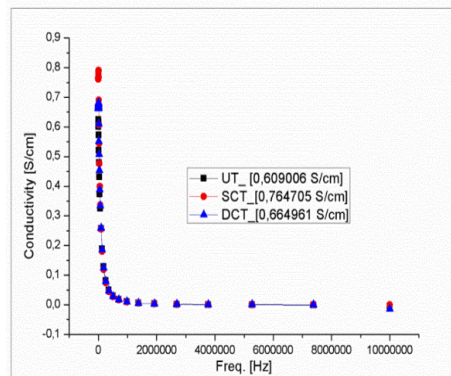
Ve $\xi \in (0,1)$ arasındaki bir katsayıdır. $j=1, 2, \dots, m$; $k=1, 2, \dots, n$. ξ işlevi, Δ_{oi} ile Δ_{max} arasındaki farkı ayarlamaktır. Çalışmalar ξ değerinin gri ilişkisel derece sonrası oluşacak sıralamayı etkilemediğini göstermektedir.

Adım 5: Gri ilişkisel derece ise Eşitlik (13) ile hesaplanır.

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_j(k)) \quad (13)$$

$\gamma(x_0, x_i)$ gri bir sistemdeki x_i serisi ile x_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür. Gri ilişkisel derecesinin büyüklüğü x_i ile x_0 arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu gösterir. Eğer karşılaştırılan iki seri aynı ise gri ilişkisel derecesi 1 olarak bulunur. Gri ilişkisel derece iki serinin benzerliğini test eder. Kriterin gri ilişki katsayısı ile kriterin önem derecesini gösteren ağırlık değeri çarpılarak gri ilişki derecesi bulunabilir. Gri ilişki derecesi Eşitlik (14)'e göre hesaplanır [19].

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_j(k), (w_i(k))) \quad (14)$$



Şekil 1. İşlemsiz, sığ ve derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin elektrik iletkenliği.

Gri ilişkisel derecesi kriterleri yakalama seviyesinin bir göstergesi seçilen karar verme kriterlerine bağlıdır. Eğer gri ilişkisel derecesi “en yüksek en iyi” kriteri seçildiyse en yüksek olan faktör serisi (alternatif) karar verme probleminde en iyi karar verme alternatifini gösterecektir [18].

3. BULGULAR

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınma Kaybı

Kriyojenik işlemin numunelerin sertlik değişimlerini tespit etmek için sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik ölçümleri Tablo 5’te gösterilmektedir.

Tablo 5. Numunelerin sertlik değerleri

Numuneler	Sertlik	Birim
UT	36	
SCT	38	HRC
DCT	39	

Numunelere uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlem Numunelerin sertliğini az miktarda arttırmıştır. Derin kriyojenik işleme sertliğin artması kristalografik ve mikro yapı değişiklikleri ile mikro karbürlerin ince dağılımına bağlanabilir [20]. Uygulanan kriyojenik işlemlerle numunelerin elektrik iletkenliğinde meydana gelen değişimi incelemek için numunelerin elektrik iletkenlikleri ölçülmüştür. Ölçülen elektrik iletkenliği grafik olarak Şekil 1’de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek elektrik iletkenlik değerinin sırası ile sığ kriyojenik, derin kriyojenik ve işlem görmemiş numunelerde olduğu görülmektedir. Metal malzemelerin soğutulması ile atomların termal titreşimlerinin çok zayıf olacağını, bundan dolayı da elektriksel direnç azalacak ve elektriksel iletkenlik artacağı söylenmektedir [21]. Numunelerin yapısında meydana gelen değişimlerin elektrik iletkenliğine etki ettiği sonucuna varılabilir.

EEİ işleme testlerinde 3 farklı vuruş (Time on), ham ve üç farklı numune (UT, SCT ve DCT), sabit amper, sabit bekleme süresi (Toff) ve sabit talaş derinliği kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve MAK sonuçları değerlendirilmiştir. MAK ve aşınan yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 6’da gösterilmektedir.

Tablo 6. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve deney sonuçları.

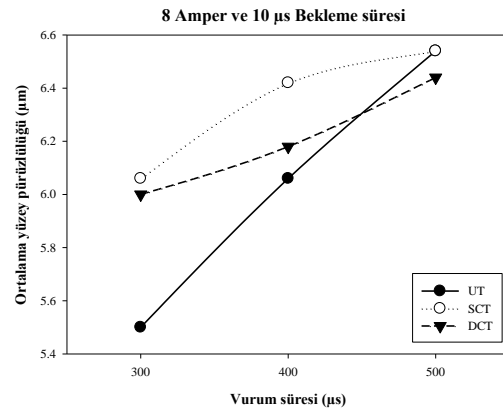
Sıra	Numuneler (A)	Derinlik (mm)	Amper	Toff (μs)	Time on (μs) (B)	İşleme süresi (dak)	Ra (μm)	MAK (g)
1	UT				300	30	5,50	2,231
2	UT				400	27	6,06	1,988
3	UT				500	29	6,54	2,158
4	SCT				300	27	6,06	2,073
5	SCT	1	8	10	400	28	6,42	2,165
6	SCT				500	27	6,53	2,024
7	DCT				300	25	6,00	1,902
8	DCT				400	30	6,18	2,233
9	DCT				500	29	6,44	2,102

En düşük yüzey pürüzlülük değerinin A_1B_1 faktör ve seviyesinde UT numunelerde 5,50 μm olarak ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değerinin ise A_1B_3 UT 6,54 μm olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre kriyojenik işlemin numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüklerine belirgin etkisinin olmadığı görülmüştür. Vurum süresinin artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Fakat yüksek vurum süresinde DCT numunelerin yüzey pürüzlülüğü daha iyi (Şekil 2) elde edilmiştir. Bu da yüzey pürüzlülüğünde yüksek vurum sürelerinde derin kriyojenik işlemin olumlu etkisine işaret etmektedir. Malzemenin kaldırılan talaş miktarlarını incelediğimizde ise en yüksek talaş kaldırma miktarı A_3B_2 faktör ve seviyelerinde 2,233 g olarak elde edilmiştir.

En düşük talaş kaldırma miktarının ise A_3B_1 faktör ve seviyelerinde 1,902 g olduğu bulunmuştur. Derin kriyojenik işlem görmüş numunede en yüksek MAK miktarının gözlemlenmesi kriyojenik işlem ile daha fazla talaş miktarı kaldırıldığını göstermektedir. 400 μs vurum süresinde elde edilen MAK miktarları karşılaştırıldığında bu durum net bir şekilde görülmektedir.

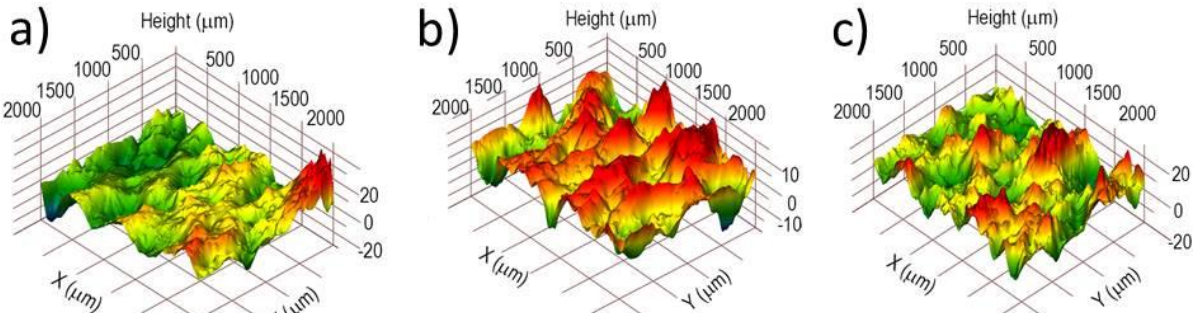
Bu duruma derin kriyojenik işlemin, numunelerin elektrik iletkenliğine etkisinin sebep olduğu söylenebilir. Daha iyi elektrik iletkenliği ile EEİ daha fazla talaş kaldırmıştır denilebilir. Süre olarak incelediğimizde ise en yüksek işleme

süresi A_1B_1 faktör ve seviyelerinde 30 dakika ile en yüksek işleme süresinde, en düşük işleme süresi A_3B_1 faktör ve seviyelerinde 25 dakika işleme süresi içinde gerçekleşmiştir. UT, SCT ve DCT numunelerin 8 A değerindeki yüzey pürüzlülük değişimleri Şekil 2' de gösterilmektedir.

**Şekil 2.**

Numunelerin 8 Amper değerindeki yüzey pürüzlülük ölçümü grafikleri.

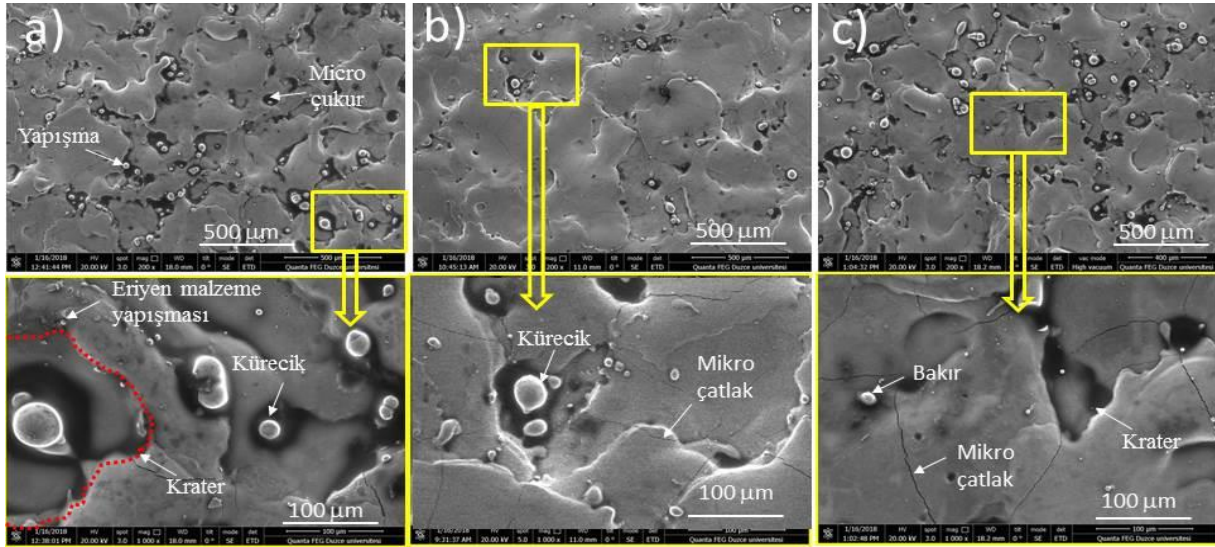
UT, SCT ve DCT numuneler 300μs vurum süresi ve 8A akımda, elektro erozyon işleminden oluşan yüzeylerin analiz edilebilmesi için 3 boyutlu profilometre görüntüsü Şekil 3' te verilmiştir.

**Şekil 3.** Numunelere ait yüzey görüntüleri, a) UT, b) SCT, c) DCT

Vurum süresi ve akım sabit tutularak kriyojenik işlemin numunenin yüzeyine etkisi araştırılmıştır. EEİ işleminden sonra elde edilen yüzeylerde (Şekil 3) SCT numunelerin yüzeylerinde kırmızı alanların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Bu da yüzeyin daha pürüzlü olduğunu göstermektedir. UT numunede yüzeylerin sarı ve yeşil tonlarda olduğu görülüyor. Bu da daha düzgün yüzeyin oluştuğunu göstermektedir. UT, SCT ve DCT numunelerde 300µs vurum süresi ve 8A akımda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri sırasıyla 4,90µm - 6,06µm ve 6,00µm ölçülmüştür.

3.2. Mikro Yapı Analizi

EEİ işleme esnasında meydana gelen yüksek enerji nedeniyle numunenin ısınarak bir kısmının buharlaşmasına neden olur. İşleme esnasında oluşan kıvılcıklar ve ısıdan dolayı numunenin yüzeyinde mikro çatlaklar, kraterler ve eriyen parçaların numuneye yapışmasıyla küçük kürecikler oluşmaktadır. Oluşan şekiller iş parçasının yüzey kalitesini belirlemektedir [22]. İş parçasının yüzey kalitesi EEİ işleme parametrelerine ve iş parçasının özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

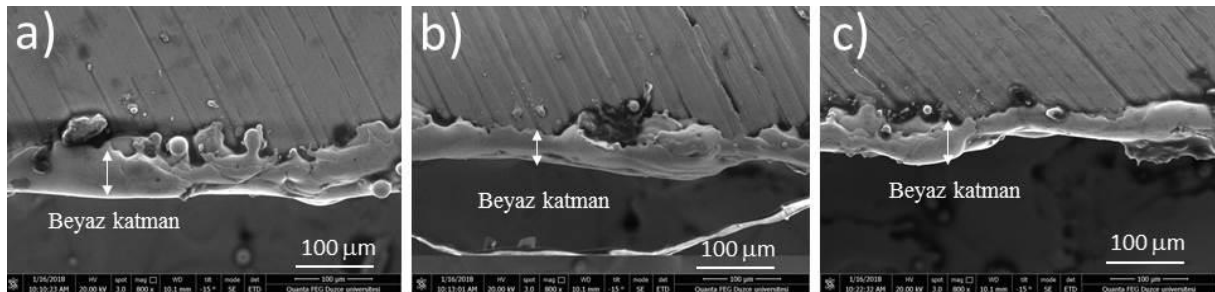


Şekil 4. Numunelere ait SEM görüntüleri, a) UT, b) SCT, c) DCT

İş parçalarının yüzey kalitesini belirlemek için öncelikli kriyojenik işlemin iş parçasının yüzey kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. UT, SCT ve DCT numunelerin 300µs vurum süresi ve 8A akımda gerçekleştiği deneylerin SEM görüntüleri Şekil 4' de gösterilmektedir.

Numunelerin sem görüntülerine göre SCT numunenin yüzey görüntülerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen krater ve mikro çukurların daha az olduğu görülmektedir. Bu da yüzey pürüzlülüğü ve 3 boyutlu yüzey görüntüleriyle

örtüşmektedir. Numunelere uygulanan sığ kriyojenik işlem numunelerde işleme esnasında oluşan kürecik, krater ve mikro çatlakları azalttığı sonucuna varılabilir. Bu nedenlerle SCT numunenin yüzey pürüzlülüğü diğerlerine göre daha iyi elde edilmiştir. UT numunelerde belirgin şekilde numune yüzeyine yapışan küreciklerin yoğun olduğu görülmektedir. Bu da numunenin yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. UT, SCT ve DCT numunelerin kesitlerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. Numuneleri kesitlerinden alınan SEM görüntüleri, a) UT, b) SCT, c) DCT

Beyaz katman ısıdan etkilenen numunenin dış kısmında oluşan katmandır. Bu katman erimiş malzemenin numunenin yüzeyinde katılaşmasıyla oluşan katmanlardan oluşur. Numuneye akım esnasında eriyen malzemelerin bir kısmı dielektrik sıvı ile malzemeden uzaklaştırılırken bir kısmı

numunelerin yüzeyinde birikir. Bu yapışma işlemi akım kesildiğinde (Time off) meydana gelmektedir [23, 24]. Kesit görüşlerde (Şekil 5) numunenin dış yüzeyinde oluşmuş beyaz katmanlar görülmektedir. Bu katmanlar numunelere göre farklılıklar göstermektedir. UT numunede katman daha

derin şekilde oluşmuştur. Ayrıca UT numunede (Şekil 5a) küre şeklindeki parçacıkların daha yoğun olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü daha iyi olan SCT numunede (Şekil 5b) beyaz katman daha az oluşmuştur. Ayrıca yapışan parçacıklarında daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu da sıg kriyojenik işlemin beyaz katman oluşumunu azalttığını göstermektedir.

3.3. Sinyal – Gürültü Analizi (S/N)

DeneySEL çalışmadan elde edilen MAK ve Ra sonuçlarının kontrol faktörleri (Numuneler ve Vurum süreleri) ile etkileşimleri deneySEL tasarım gerçekleştirilerek ölçülür.

Kontrol faktörlerinin optimizasyonunda Signal/Noise oranları kullanılır. Tablo 7’de elde edilen verilerin ve bu verilerden elde edilen Ra, MAK, tahmini Ra ve tahmini MAK için S/N oranları gösterilmektedir. Normalde malzemelerin aşındırılmasında hem malzeme aşınma kaybı hem de elektrot aşınma kaybı konularak zamana göre aşınma miktarları hesaplanır. Yaptığımız bu çalışmada ise deneyler sonrasında elektrot ağırlıklarının ölçüldüğünde, elektrotun ağırlıklarının arttığı, bu ağırlık artışında malzeme yüzeyinden ergitilen talaş parçacıklarının elektrotun yüzeyine yapıştığı ve ince bir film tabaka oluşturduğu tespit edilmiştir. Elektrotun yüzeyine yapışan bu malzemelerin elektrot ağırlığını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 7. L_9 ortogonal tasarıma göre gerçekleştirilen deneylerin girdi ve çıktı parametreleri.

No	Amper	Malzeme	Vurum süresin (μ s)	Ra (μ m)	Ra için S/N	MAK (g/dak)	MAK için S/N
Faktörler			Çıktı parametreleri				
1		UT	300	5,50	-14,8073	0,0737	22,6507
2		UT	400	6,06	-15,6495	0,0732	22,7098
3		UT	500	6,54	-16,3116	0,0744	22,5685
4		SCT	300	6,06	-15,6495	0,0768	22,2928
5	8	SCT	400	6,42	-16,1507	0,0773	22,2364
6		SCT	500	6,53	-16,3116	0,0761	22,3723
7		DCT	300	6,00	-15,5630	0,0763	22,3495
8		DCT	400	6,18	-15,8198	0,0744	22,5685
9		DCT	500	6,44	-16,1777	0,0735	22,6743

İşleme süresi açısından en etkili parametreler UT, SCT ve DCT için en etkili parametreler sırası ile 500 μ s, 400 μ s ve 300 μ s vurum süresi olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Taguchi istatistiksel inceleme metodu ile analiz

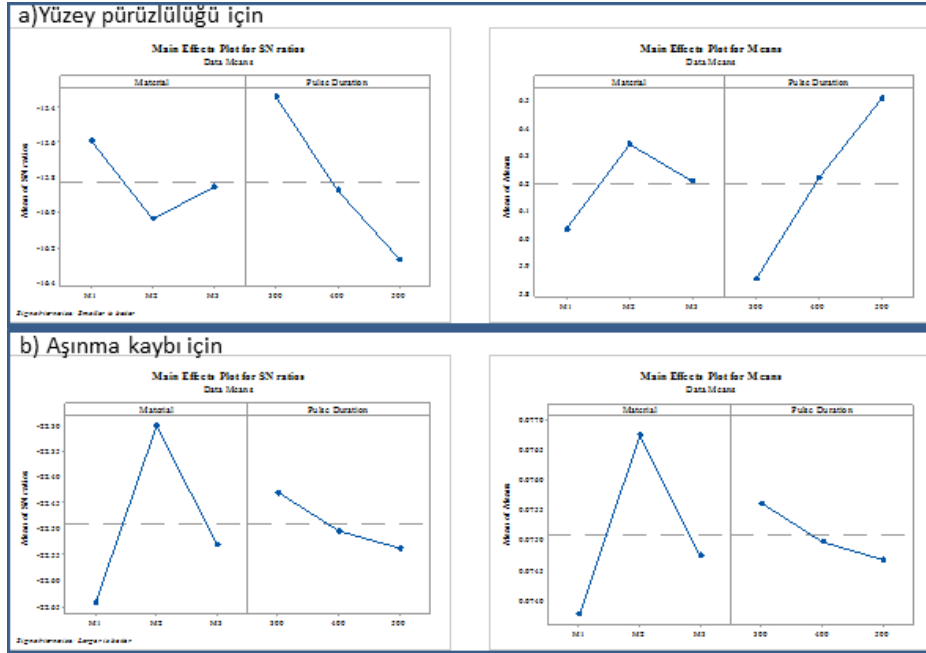
edildiğinde kontrol faktörlerinin etkileri görülmektedir. MAK ve yüzey pürüzlülüğü için S/N ve anlamlılıkları için yanıt tablosu Tablo 8’ de gösterilmektedir.

Tablo 8. Yüzey pürüzlülüğü ve MAK için S/N ve anlamlılık için yanıt tablosu.

Yüzey pürüzlülüğü (S/N)			Yüzey pürüzlülüğü anlamlılığı için yanıt tablosu		
Seviye	Malzeme	Vurum Süresi	Seviye	Malzeme	Vurum Süresi
1	-15,59	-15,34	1	6,033	5,853
2	-16,04	-15,87	2	6,340	6,220
3	-15,85	-16,27	3	6,207	6,507
Delta	0,45	0,93	Delta	0,307	0,653
Sıralama	2	1	Sıralama	2	1
Malzeme Aşınma Oranı (S/N)			Aşınma Kaybı anlamlılığı için yanıt tablosu		
Seviye	Malzeme	Vurum Süresi	Seviye	Malzeme	Vurum Süresi
1	-22,64	-22,43	1	0,07377	0,07560
2	-22,30	-22,50	2	0,07673	0,07497
3	-22,53	-22,54	3	0,07473	0,07467
Delta	0,34	0,11	Delta	0,00297	0,00093
Sıralama	1	2	Sıralama	1	2

Tablo 8’ de gösterilen yanıt tablosu incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri için en etkili parametrenin malzeme ve vurum süresi için sırası ile A_1B_1 , MAK için ise A_2B_1 olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve MAK için ana etkiler grafikleri Şekil 6’ da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde dikeye en yakın olan değer en etkili parametredir. Yüzey pürüzlülük değeri için en ideal değerler A_1B_1 faktör ve

seviyelerinde elde edilmiştir. MAK için en ideal değerleri A_2B_1 faktör ve seviyelerinde elde edilmiştir. Anlamlılık grafikleri olarak verilirse ise tam tersi olur. Dikeyde düşeye yakın olan değer en etkili parametre olarak seçilmektedir. S/N grafiğindeki dikey nokta ile anlamlılıktaki düşey nokta aynı değeri vermektedir.



Şekil 6. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için ana etkiler ve anlamlılık grafiği

3.4. ANOVA

ANOVA deneysel çalışmada kullanılan kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimlerini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir metottur. Bu çalışmada deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerine bir birleri ile etkileşimlerini incelemek için ANOVA kullanılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için ANOVA sonuçları Tablo 9’ da gösterilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz %95 güven ve %5 anlamlılık seviyesinde gerçekleştirilmiştir. ANOVA da kontrol faktörlerinin önemi her kontrol faktörünün F değeri ile belirlenir.

Tablo 9. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için ANOVA sonuçları.

Yüzey pürüzlülüğü							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Malzeme	2	0,1419	15,65	0,1419	0,07093	2,34	0,212
Vurum süresi	2	0,6435	70,99	0,6435	0,32173	10,63	0,025
Hata	4	0,1211	13,36	0,1211	0,03027		
Toplam	8	0,9064	100,00				
R-sq				86,64%			
Malzeme aşınma kaybı							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Malzeme	2	0,000014	71,26	0,000014	0,000007	6,58	0,054
Vurum süresi	2	0,000001	7,07	0,000001	0,000001	0,65	0,569
Hata	4	0,000004	21,67	0,000004	0,000001		
Toplam	8	0,000019	100,00				
R-sq				78,33%			

3.5. Regresyon Analizi

Regresyon analizleri, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiye sahip çeşitli değişkenlerin modellenmesi ve analizi için gerçekleştirilir [25-27]. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve malzeme

aşınma kaybı için tahmini eşitlikler regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Tahmini eşitlikler lineer olarak hesaplanarak Tablo 10' da gösterilmektedir.

Tablo 10. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için tahmini eşitlikler.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü			
Numuneler			Eşitlik
M1	Ra (µm)	=	4,727 + 0,003267 Vurum süresi
M2	Ra (µm)	=	5,033 + 0,003267 Vurum süresi
M3	Ra (µm)	=	4,900 + 0,003267 Vurum süresi
Malzeme aşınma kaybı			
M1	MAK(g/dak)	=	0,07563 - 0,000005 Vurum süresi
M2	MAK(g/dak)	=	0,07860 - 0,000005 Vurum süresi
M3	MAK(g/dak)	=	0,07660 - 0,000005 Vurum süresi

3.6. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Tahminleri

Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kayıpları tahminleri Eşitlik 15 ve Eşitlik 16'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Bu eşitlikte; S/N oranına göre yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için ideal değerler sırası ile Tablo 7' den belirlenerek A₁B₁ (5,50 µm) - A₂B₁ (0,0768 g) faktörü olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçunda elde edilen yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması (T_{Ra}) Tablo 7'deki veriler kullanılarak hesaplanmıştır [13].

$$Ra_p = T_{Ra} + (A_1 - T_{Ra}) + (B_1 - T_{Ra}) \quad (15)$$

$$Ra_p = 6,19 + (6,033 - 6,19) + (5,853 - 6,19) = 5,69 \mu m$$

$$MAK_p = T_{MAK} + (A_2 - T_{MAK}) + (B_1 - T_{MAK}) \quad (16)$$

$$MAK_p = 0,075 + (0,0767 - 0,075) + (0,0749 - 0,075) = 0,0757 \text{ g/dak}$$

A₁B₁ faktörleri ile A₂B₁ faktörleri gerçekleştirilen değerlerin tahmini değerler ile birbirine yakın hesaplandığı görülmektedir.

3.7. Gri İlişki Analizi Sonucu

Elektro erozyon ile işlemede, işlenen yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülük değerinin düşük, malzeme yüzeyinden kaldırılan talaşın çok olması istenir. Bu yöntemde referans serileri oluşturulurken yüzey pürüzlülük değerleri için en düşük en iyi, malzeme yüzeyinden kaldırılan talaş içinse en yüksek en iyi eşitliğine göre oluşturulur. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri için normalizasyon işlemi hesaplamada;

$$x_i(1) = \frac{\max x_i^0(1) - x_i^0(1)}{\max x_i^0(1) - \min x_i^0(1)} = \frac{6,54 - 5,50}{6,54 - 5,50} = 1 \quad (17)$$

Elektro erozyon ile işlemede talaş kaldırma miktarının normalizasyon işleminin hesaplanmasında;

$$x_i(1) = \frac{x_i^0(1) - \min x_i^0(1)}{\max x_i^0(1) - \min x_i^0(1)} = \frac{0,0737 - 0,0732}{0,0773 - 0,0732} = 0,122 \quad (18)$$

Normalize işlemi gerçekleştirilen sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi bulunmuş olur. Katsayı matrisinin hesaplanması için x = 0,5 orta değeri alınır. 1. deneyin yüzey pürüzlülük katsayı matrisini hesaplayacak olursak;

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| = |1 - 1| = 0 \quad (19)$$

$$\varepsilon(x_0(k), x_j(k)) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (20)$$

$$= \frac{0 + 0,5}{0 + 0,5} = 1$$

1. deneyin malzeme aşınma kaybı katsayı matrisini hesaplayacak olursak;

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (21)$$

$$= |1 - 0,122| = 0,878$$

$$\varepsilon(x_0(k), x_j(k)) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (22)$$

$$= \frac{0 + 0,5}{0,878 + 0,5} = 0,362$$

Deneysel olarak elde edilen sonuçların normalizasyonunu hesaplamada Microsoft Excel programı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için normalizasyon ve katsayı matrisi değerleri Tablo 11' de gösterilmektedir.

Tablo 11. Yüzey pürüzlülüğü ve MAK için normalizasyon ve katsayı matrisi değerleri.

Normalizasyon			Katsayı Matrisi		
Deney No	Ra	MAK	Deney No	Ra	MAK
1	1,000	0,122	1	1,000	0,363
2	0,462	0,000	2	0,481	0,333
3	0,000	0,293	3	0,333	0,414
4	0,462	0,878	4	0,481	0,804
5	0,115	1,000	5	0,361	1,000
6	0,010	0,707	6	0,335	0,631
7	0,519	0,756	7	0,510	0,672
8	0,346	0,293	8	0,433	0,414
9	0,096	0,073	9	0,356	0,350

Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma miktarının katsayı matrisleri bulunduğundan sonra bulunan değerlerin ortalaması Gri ilişkisel dereceyi verir.

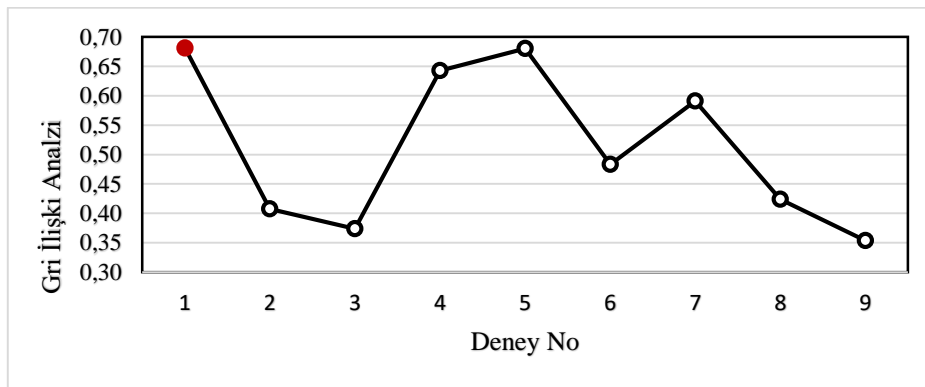
Hesaplanan derecelerdeki en yüksek değer en ideal değer olarak tanımlanır [18]. Bu çalışma için en ideal değer 7 numaralı deneyde kullanılan parametrelerde olduğu (Tablo 12) görülmektedir.

Tablo 12. Gri ilişki analizi ve sıralaması.

No	Amper	Numune	Bekleme süresi (μ s)	Vurum süresin (μ s)	Ra (μ m)	MAK (g/dak)	Gri İlişki	Sıralama
1		UT		300	5,50	0,0737	0,6814	1
2		UT		400	6,06	0,0732	0,4074	7
3		UT		500	6,54	0,0744	0,3737	8
4		SCT		300	6,06	0,0768	0,6427	3
5	8	SCT	10	400	6,42	0,0773	0,6806	2
6		SCT		500	6,53	0,0761	0,4831	5
7		DCT		300	6,00	0,0763	0,5910	4
8		DCT		400	6,18	0,0744	0,4237	6
9		DCT		500	6,44	0,0735	0,3533	9

Maksimum aşınma miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri için gri ilişkisel derece grafiği Tablo 12' de ki gri

ilişki sütunundaki değerlere göre oluşturularak Şekil 7' de gösterilmektedir.

**Şekil 7.** Gri ilişkisel derece grafiği.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada; demir klorür, bakır klorür, klorin, sıcağdan bozulmuş çözeltiler, formik, asetik asit, asetik anhidrit, karıncalanma, çatlak korozyonu, gerilim korozyonu çatlama, deniz suyu ve salamura çözeltileri gibi çok çeşitli

kimyasal ortamlara karşı çok üstün bir dirence sahip Nikel esaslı süperalaşımı dalma erozyon tezgahında farklı işleme parametreleri kullanılarak talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işlemi sonrasında malzeme aşınma miktarı ve malzeme yüzeyinde oluşan yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Belirlenen

değerler deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş olup sonuçlar maddeler halinde yazılmıştır.

- Kriyojenik işlemi deneysel çalışmada kullanılan numunelerin sertliğini az miktarda arttırdığı,
- En yüksek elektrik iletkenlik değerinin sırası ile sıg kriyojenik, derin kriyojenik ve işlem görmemiş malzemede oluştuğu,
- En düşük yüzey pürüzlülük değerinin A_1B_1 faktör ve seviyesinde UT kodlu sıg kriyojenik işlem gören malzemede $5,50 \mu m$ olarak oluştuğu,
- En büyük yüzey pürüzlülük değerinin ise A_1B_3 UT $6,54 \mu m$ olarak elde edildiği,
- Malzemeden kaldırılan talaş miktarlarını incelediğimizde ise en yüksek talaş kaldırma miktarı A_3B_2 faktör ve seviyelerinde $2,233 g$ olarak oluştuğu,
- En düşük talaş kaldırma miktarının ise A_3B_1 faktör ve seviyelerinde $1902 g$ olduğu,
- En yüksek işleme süresi A_1B_1 faktör ve seviyelerinde 30 dakika ile en yüksek işleme süresinde,
- En düşük işleme süresi A_3B_1 faktör ve seviyelerinde 25 dakika işleme süresi içinde gerçekleştiği,
- UT, SCT ve DCT numunelerin yüzeylerinde krater oluşumu, yapışmalar, mikro çukurlar ve yüzey üzerinde elektrot malzemesi olan bakır parçacıklarının oluştuğu,
- Deneyler sonrasında elektrot ağırlıklarının ölçüldüğünde, elektrot Numunelerinin ağırlıklarının arttığı bu artışında malzeme yüzeyinden ergitilen talaş parçacıklarının elektrot malzeme yüzeyine yapıştığı ve ince bir film tabaka oluşturduğu,
- İşleme süresi açısından en etkili parametreler UT, SCT ve DCT için en etkili parametreler sırası ile $500 \mu s$, $400 \mu s$ ve $300 \mu s$ vuruş süresi oluştuğu,
- Yanıt tabloları incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri için en etkili parametrenin malzeme ve vuruş süresi için sırası ile A_1B_1 , MAK için ise A_2B_1 olarak belirlendiği,
- Anova sonuçlarına göre yüzey pürüzlülük değeri için en etkili parametrenin %70,99 ile vuruş süresi olarak, malzeme aşınma kaybı için ise % 71,66 ile malzeme olarak oluştuğu,
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kayıpları tahminleri hesaplandığında değerler sırası ile $5,69 \mu m$ ve $0,0757 g/dak$ olarak hesaplandığı,
- Maksimum aşınma miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri için gri ilişkisel derecesi hesaplandığında her ikisi için ideal faktörler 1 deney ile gerçekleştirilen parametrelerde oluştuğu tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1]. S. Akıncıoğlu, H. Gökkaya and İ. Uygur, "A review of cryogenic treatment on cutting tools", Int J Adv Manuf Technol, vol. 78, no. 9, pp. 1609-1627, 2015.
- [2]. V. Firouzdor, E. Nejati and Khomamizadeh F, "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill", J. Mater. Process. Tech, vol. 206, no. 1, pp. 467-472, 2008.
- [3]. G. Akıncıoğlu et al., "Taguchi optimization of machining parameters in drilling of AISI D2 steel using cryo-treated carbide drills", Sādhanā, vol. 42, no. 2, pp. 213-222, 2017.
- [4]. Y. Arslan, and A. Özdemir, "The Effects cryogenic treatment time on wear behaviour and tool life Of AISI D3 cold work steel punches". Journal of Advanced Technology Sciences, vol 2, no. 3, pp. 87-99, 2013.
- [5]. I. Uygur et al., "The Effects of cryogenic treatment on the corrosion of AISI D3 steel", Materials Research, vol. 18, no. 3, pp. 569-574, 2015.
- [6]. Y. Arslan, and A. Özdemir, "Punch structure, punch wear and cut profiles of AISI 304 stainless steel sheet blanks manufactured using cryogenically treated AISI D3 tool steel punches", Int J Adv Manuf Technol, vol. 87, no. 1-4, pp. 587-599, 2016.
- [7]. S. Akıncıoğlu, H. Gökkaya, and İ. Uygur, "The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method". Int J Adv Manuf Technol, vol. 82, no. 1, pp. 303-314, 2016.
- [8]. J. Lee, et al., Modern manufacturing, mechanical engineering handbook. Boca Raton, 1999.
- [9]. N. Mohd Abbas, D.G. Solomon, and M. Fuad Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", Int. J. Mach. Tool Manufact., vol. 47, no. 7, pp. 1214-1228, 2007.
- [10]. Y.K. Yang, M.T. Chuang and S.S. Lin, "Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods", J. Mater. Process. Tech, vol. 209, no. 9, pp. 4395-4400, 2009.
- [11]. A. Bensely et al., "Influence of deep cryogenic treatment on alloy carbide precipitations and mechanical properties of AISI M2 high speed tool steel", Cold Facts, vol. 28, no. 2, pp. 1-28, 2012.
- [12]. C. Gogte et al., "Deep subzero processing of metals and alloys: evolution of microstructure of AISI T42 tool steel" Mater. and Manufact. Processes, vol. 24, no. 7-8, pp. 718-722, 2009.
- [13]. T. Kıvık, "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts", Measurement, vol. 50, no. pp. 19-28, 2014.
- [14]. Y. K. Yang, J.R. Shie, and C. H. Huang, "Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end-milling process" Mater. and Manufact. Processes, vol. 21, no. 8, pp. 832-837, 2006. N. Masmiaati and A. A. Sarhan, "Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress-Taguchi approach", Measurement, vol. 60, pp. 267-275, 2015.
- [15]. K. Nagaraja et al., "Effect of process parameters on delamination, thrust force and torque in drilling of carbon fiber epoxy composite", Res. J. Recent Sci., vol. 2, no. 8, pp. 47-51, 2013.

- [16]. N. Tosun, "Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis". *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 28, no. 5-6, pp. 450-455, 2006.
- [17]. E. Yılmaz, and F. Güngör, "Gri ilişkisel analiz yöntemine göre farklı sertliklerde optimum takım tutucusunun belirlenmesi", 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, pp. 1-5, 2010
- [18]. S.P. Lo, "The application of an ANFIS and grey system method in turning tool-failure detection", *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 19, no. 8, pp. 564-572, 2002.
- [19]. H.G. Nanesa, M. Jahazi, and R. Naraghi, "Martensitic transformation in AISI D2 tool steel during continuous cooling to 173 K", *Journal of materials science*", vol. 50, no. 17, pp. 5758-5768, 2015.
- [20]. X. Jiao et al. "Mechanical properties of low density alloys at cryogenic temperatures. vol. 824, no. 69, 1-11, 2006.
- [21]. A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Investigation of microstructure and element migration for rough cut surface of pure titanium after WEDM", *IJMMP*, vol. 8, no. 4-5, pp. 343-356, 2013.
- [22]. J. Soni and G. Chakraverti, "Experimental investigation on migration of material during EDM of die steel (T215 Cr12)", *J. Mater. Process. Tech*, vol. 56, no. 1-4, pp. 439-451, 1996.
- [23]. W. Weingaertner and F. Amorim, "Die-Sinking electrical discharge machining of a high-strength copper-based alloy for injection molds", *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, vol. 2, no. 137, pp. 137-142, 2004.
- [24]. M. H. Cetin et al., "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 17, pp. 2049-2056, 2011.
- [25]. E. Nas and H. Gökkaya, "Experimental and statistical study on machinability of the composite materials with metal matrix Al/B₄C/Graphite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 48, pp. 5059-5067, 2017.
- [26]. E. Nas and B. Öztürk, "Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials," *Mater Test.*, vol. 60(5), pp. 519-525, 2018.