

The Application of Taguchi Method in Drilling Process for Optimization of Multi Response Problem

Funda Kahraman (Corresponding author)
Department of Mechatronics Engineering,
Tarsus University, Mersin/Turkey
E-mail: fkahraman@tarsus.edu.tr

Gokhan Basar
Department of Industrial Engineering,
Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye/Turkey
E-mail: gokhanbasar@osmaniye.edu.tr

Abstract

In this study, the effect of cutting parameters on the various performance characteristics in the drilling process (hole enlargement) of AA 5754 Aluminium alloy were experimentally investigated. Rotational speed, feed and depth of cut were considered as control factors, arithmetic average roughness, material removal rate and machining time were considered as response factors. Experiments were designed according to Taguchi L₉ orthogonal array. Multi-response signal to noise ratio was calculated for the response variables simultaneously. Analysis of variance was performed to find out the effective cutting parameters on the surface roughness, material removal rate and machining time. Furthermore, confirmation test was conducted for the obtained optimum combination level of factors. The obtained results indicate that the rotational speed was found to be the dominant factor among controllable factors, followed by the feed and the depth of cut. Optimal performance parameters were obtained 2000 rpm rotational speed, 0.10 mm/rev feed and 0.75 mm depth of cut by using multi-objective Taguchi approach.

Keywords: Drilling, Material removal rate, Machining time, Optimization, Surface roughness, Taguchi

Delme İşleminde Taguchi Yönteminin Çok Yanıtlı Problemin Eniyilemesinde Uygulanması

Özet

Bu çalışmada, AA 5754 Alüminyum alaşımının delme işleminde (delik büyütme), kesme parametrelerinin çeşitli performans karakteristiklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Kontrol faktörleri olarak dönme hızı, ilerleme ve kesme derinliği, tepki faktörleri olarak ise aritmetik ortalama pürüzlülük değeri, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi seçilmiştir. Deneysel, Taguchi L₉ ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır. Çoklu kalite karakteristikleri için çok yanıtlı sinyal/gürültü oranı hesaplanmıştır. Varyans analizi ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülük, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi üzerindeki etki seviyeleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kontrol edilebilen faktörler arasında dönme hızının dominant faktör olduğu ve bunun ardından ilerleme ve kesme derinliğinin etkili olduğunu göstermiştir. Çok yanıtlı Taguchi yaklaşımı kullanılarak, minimum yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi ve aynı zamanda maksimum talaş kaldırma oranı değerlerinin; 2000 dev/dak dönme hızı, 0.10 mm/dev ilerleme ve 0.75 mm kesme derinliği koşullarında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Delme, Talaş kaldırma oranı, İşleme süresi, Optimizasyon, Yüzey pürüzlülüğü, Taguchi

1. Giriş

Delme işlemi, en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir. Delik delme, iş parçasından talaş kaldıran bir takım ile silindirik delik açma metodlarının tamamına verilen bir addır. Delme terimi kısa veya derin delik delme işlemleri için kullanıldığı gibi, bunların ardından yapılan broşlama, raybalama, havşa yuvası açma, parlatma ve delik büyütme gibi çeşitli son işlemler için de kullanılır. Bütün bu işlemlerin ortak noktası, ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle birlikte yapılmasıdır (Aydın ve ark., 2012; Yurdakul ve Tansel, 2016). Delme işleminde; kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı, soğutma sıvısı gibi parametreler kontrol edilebilir faktörler iken; titreşim, takım aşınması, malzeme kusurları gibi parametreler ise kontrol edilemeyen faktörlerdir (Meral ve ark., 2011). Endüstriyel uygulamalarda, istenilen kalitede, maksimum verimlilikte üretim yapmak için kesme parametrelerin uygun bir şekilde seçilmelidir. Delme sonucu elde edilen yüzey kalitesi, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi üretim maliyetlerini ve ürünün teknolojik kalitesini büyük ölçüde etkileyen önemli faktörlerdendir. Talaşlı imalat ile üretilen ürünlerin kesme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi tekniği, gri ilişki, bulanık mantık yaklaşımı, tepki yüzeyi metodolojisi, yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi çeşitli metodlar kullanılmaktadır (Singarvel ve ark., 2014; Jayaramana ve Kumar, 2014; Jayaramana ve ark., 2015; Muhammad ve ark., 2012; Mia ve ark., 2016; İç ve ark., 2016; Çaydaş ve Hasçalık, 2008; Gaitonde ve ark., 2008; Kovac ve ark., 2013; Khamel ve ark., 2012; Yadav, 2017). Taguchi deneysel tasarım metodu deneysel tasarıma dayalı olarak geliştirilmiş optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça başarılı bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Taguchi metodu, en iyi sonuçları minimum sayıda deney ile elde etmek için istatistiki olarak tasarlanmış ortogonal dizinleri kullanır. Bu sayede deney sayısı azaltılarak zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanmış olunur (Kıvak ve ark., 2012). Ancak Taguchinin geliştirdiği sinyal/gürültü (S/N) tabanlı yaklaşım tek çıktının olması durumunda kullanılabilir. Çok yanıtın bulunması durumunda Tong ve arkadaşlarının geliştirdiği çok yanıtlı sinyal gürültü (ÇYSG) tabanlı Taguchi yaklaşımı kullanılmaktadır. Geleneksel Taguchi yöntemi tek yanıtlı problemlerin optimizasyonunda başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen, çok yanıtlı problemlerin çözümünde kullanılmamaktadır. Tong ve arkadaşları tarafından önerilen ÇYSG tabanlı Taguchi yönteminin uygulanmasında en iyileme prosedürü dört aşamadan oluşmaktadır. Bu dört aşama aşağıda verilmiş olup sırasıyla açıklanmıştır (Ferah, 2003; Muhammad ve ark., 2012; Mohamed ve ark., 2015; Tong ve ark., 1997).

Aşama I: Kalite kaybını hesaplamak

Aşama II: Çok yanıtlı sinyal gürültü oranını (ÇYSG) belirleme

Aşama III: En iyi faktör/seviye kombinasyonunu belirlemek

Aşama IV: Doğrulama deneylerinin yapılması

Aşama I: Kalite Kaybının Hesaplanması

Bu aşamada, Taguchi'ye göre her bir performans yanıtı için kalite kaybı aşağıdaki üç formül kullanılarak hesaplanır.

i) En büyük en iyi durumu için eşitlik (1),

$$L_{ij} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{1}{y_{ijk}^2} \quad (1)$$

ii) En küçük en iyi durumu için eşitlik (2),

$$L_{ij} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk}^2 \quad (2)$$

iii) Nominal en iyi (Hedef değer en iyi) durumu için eşitlik (3)-(5) kullanılır.

$$L_{ij} = \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk} \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ijk} - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Burada,

L_{ij} = j. denemede i. yanıtın kalite kaybı

y_{ijk} = k. tekrar ve j. denemede i. yanıt için gözlenen veri

n_i = i. yanıtın tekrar sayısı

S^2 = varyansdır.

Aşama II: Çok Yanıtlı Sinyal Gürültü (ÇYSG) Oranının Belirlenmesi

Adım 1: Her denemede her bir performans yanıtının kalite kaybı için eşitlik (6) kullanılarak normalleştirme işlemi yapılır.

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*}, \quad L_i^* = \max\{L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ij}\} \quad (6)$$

Adım 2: Her deneme için eşitlik (7) kullanılarak Toplam Normalize edilmiş Kalite Kaybı (TNKK) hesaplanır.

$$TNKK_j = \sum_{i=1}^m w_i C_{ij} \quad (7)$$

w_i = i. kalite karakteristiği için ağırlık faktörünü göstermektedir.

Adım 3: Her deneme için eşitlik (8) kullanılarak ÇYSG oranı belirlenir.

$$\text{ÇYSG}_j = -10 \log(TNKK_j) \quad (8)$$

Aşama III: En iyi Faktör ve Seviye Kombinasyonunun Belirlenmesi

Aşama IV: Doğrulama Deneylerinin Yapılması

Bu makalenin amacı, maksimum verimlilikte, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli ürün üretmek için çok yanıtlı Taguchi yaklaşımı kullanarak minimum yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi, ve aynı zamanda maksimum talaş kaldırma oranı değerlerini elde ettiğimiz kesme koşullarını belirlemektir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, AA 5754 alüminyum alaşımının delik büyütme işleminde kesme koşullarının; yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi parametreleri üzerindeki etkileri araştırılarak optimum koşullarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir. Ø50 x 50 mm ölçülerinde hazırlanan deney numuneleri, HSS DIN 341 mors konik saplı uzun matkap ucu kullanılarak 19 mm çapında delinmiştir (Şekil 1). Deney numunelerine torna tezgahında delik büyütme işlemi esnasında ISO P20/K15C standardında, MT 3020 kalitede ve DCGT070204- HFP formülü kesici uç ve bu uca uygun bir delik kateri seçilmiştir. Her bir deneyde, kesici ucun yeni bir köşesi kullanılarak kesicinin aşınmasından kaynaklanan etkiler giderilmiştir. Deneylerde kullanılan universal torna tezgahı Trens SN 50 C marka olup motorgücü 5,5 kW’ dır. Delme işlemi sırasında yüzeyden kaldırılan talaşın yüzeye sıvanmaması için soğutma sıvısı olarak mazot kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için MITUTOYOSURFTEST SJ 201P marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Delik büyütme işlemi yapılmış yüzeylerden üç defa yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri tespit edilmiştir. TKO ve İS ise eşitlik 9, 10, 11 ve 12 kullanılarak sırasıyla hesaplanmıştır.

$$v = \frac{\pi D_c N}{1000} \quad (9)$$

Bu eşitlikte v: kesme hızı (mm/dak), D_c : delik çapı (mm), N: dönme hızı (dev/dak)'dır.

$$TKO = vfd \quad (10)$$

Bu eşitlikte TKO: talaş kaldırma oranı (mm³/dak), f: ilerleme (mm/dev), d: kesme derinliği (mm)'dir.

$$f_r = Nf \quad (11)$$

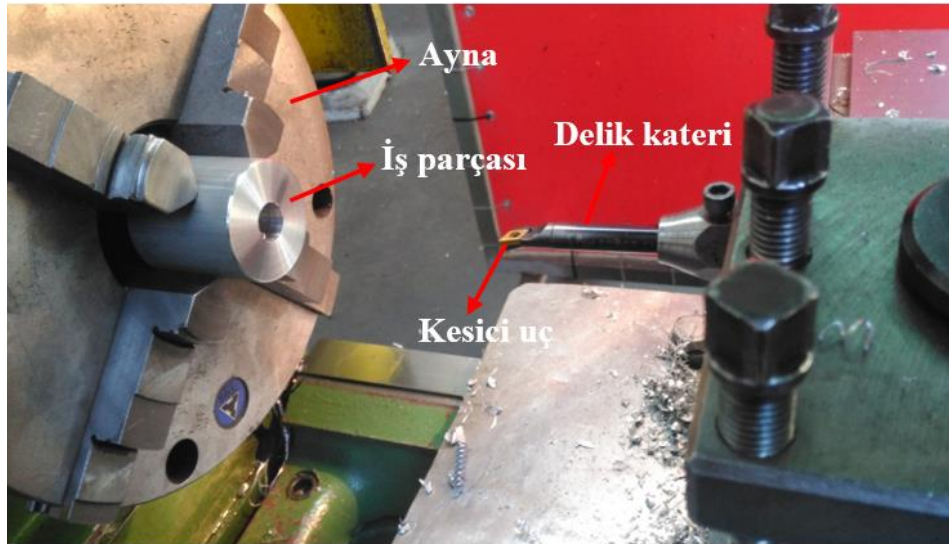
$$\dot{I}S = \frac{L}{f_r} \quad (12)$$

Bu eşitlikte İS: işlem süresi (dak), L: işleme boyu (mm), f_r : ilerleme hızı (mm/dak) dir.

Deneyler Taguchi L_9 ortogonal tasarıma göre yapılmış ve sonuçların değerlendirilmesinde çok yanıtlı sinyal/gürültü (ÇYSG) oranı esas alınmıştır. Minitab 17 yazılımı kullanılarak data analizi yapılmıştır. Son olarak doğrulama testleri yapılmıştır. Deneylerde dönme hızı, ilerleme ve kesme derinliği girdi faktörü olarak, ortalama yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi çıktı parametreleri olarak seçilmiştir. Belirlenen kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 2' de verilmiştir. Tablo 3' te ise L_9 ortogonal dizisi verilmiştir.

Tablo 1. AA 5754 alüminyum alaşımının kimyasal

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0.4	0.4	0.1	0.5	2.6-3.6	0.2	0.3	0.15	0.15	Kalan



Şekil 1. Delik büyütme deney düzeneği

Tablo 2. Kontrol faktörleri ve ortogonal dizilim matrisinde kullanılan seviyeleri

Sembol	Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Dönme hızı	dev/dak	1000	1400	2000
B	İlerleme	mm/dev	0.10	0.15	0.20
C	Kesme derinliği	mm	0.25	0.50	0.75

Tablo 3. L₉ ortogonal dizisi

Deney No	Dönme hızı (A)	İlerleme (B)	Kesme derinliği (C)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Datanın Analizi

Deney koşulları ve deney sonrası elde edilen performans kriterleri Tablo 4’ de verilmiştir. Kalite karakteristiklerinin analizinde en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal en iyi şeklinde üç kategori mevcuttur. Bu çalışmada; Ra ve İS kriterleri için en küçük en iyi, daha iyi performansı ifade etmektedir. TKO için ise en büyük en iyi, daha iyi performansı ifade etmektedir. Böylece “en küçük en iyi” eşitliği göz önüne alınarak yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi (Ra ve İS) için kalite kayıpları, “en büyük en iyi” eşitliği göz önüne alınarak talaş kaldırma oranı (TKO) için kalite kayıpları bulunmuştur. Ardından normalize edilmiş kalite kayıpları, TNKK ve ÇYSG oranı değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5’ te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme süresinin önem derecelerinin farklı olduğu kabul edilmiş ve ağırlık değerleri $w_1 = 0.50$, $w_2 = 0.25$, $w_3 = 0.25$ olarak alınmıştır.

Tablo 4. Deney koşulları ve yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi değerleri

Deney No	Dönme Hızı (dev/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Ra (μm)	TKO ($\text{m}^3 \times 10^{-3}/\text{dak}$)	İS (dak)
1	1000	0.10	0.25	2.30	1.49	0.50
2	1000	0.15	0.50	3.42	4.47	0.33
3	1000	0.20	0.75	4.31	8.95	0.25
4	1400	0.10	0.50	1.43	4.18	0.36
5	1400	0.15	0.75	2.78	9.40	0.24
6	1400	0.20	0.25	3.01	4.18	0.18
7	2000	0.10	0.75	0.91	8.95	0.25
8	2000	0.15	0.25	2.50	4.47	0.17
9	2000	0.20	0.50	3.20	11.93	0.13

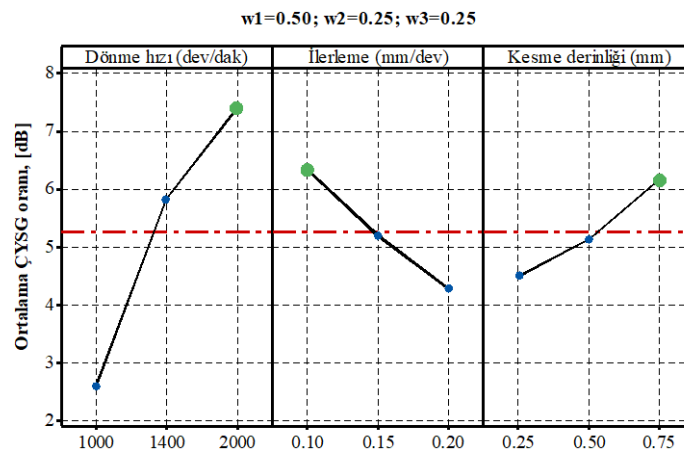
Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi için kalite kaybı, normalize edilmiş kalite kaybı, TNKK ve ÇYSG oranı değerleri

Deney No	Kalite Kaybı Değerleri (dB)			Normalize Edilmiş Kalite Kaybı Değerleri			TNKK	ÇYSG (dB)
	Ra	TKO	İS	Ra	TKO	İS		
1	5.29	0.450	0.250	0.2848	1.0000	1.0000	0.6424	1.922
2	11.70	0.050	0.111	0.6296	0.1111	0.4444	0.4537	3.432
3	18.58	0.012	0.063	1.0000	0.0278	0.2500	0.5694	2.445
4	2.04	0.057	0.128	0.1101	0.1276	0.5102	0.2145	6.686
5	7.73	0.011	0.057	0.4160	0.0252	0.2268	0.2710	5.670
6	9.06	0.057	0.032	0.4877	0.1276	0.1276	0.3076	5.120
7	0.83	0.012	0.063	0.0446	0.0278	0.2500	0.0917	10.375
8	6.25	0.050	0.028	0.3365	0.1111	0.1111	0.2238	6.502
9	10.24	0.007	0.016	0.5512	0.0156	0.0625	0.2952	5.300
Tüm deneylerin ÇYSG ortalaması								5.233

Kontrol faktörlerinin ÇYSG oranı üzerindeki ana etkileri Tablo 6' da verilmiştir. Her kontrol faktörü için ÇYSG' de en büyük değere sahip olan seviye, o faktör için en iyi seviye anlamına gelmektedir. Böylece, en iyi faktör/seviye kombinasyonu A3B1C3 olarak tespit edilmiştir. Ra, TKO ve İS için kontrol faktörlerinin ÇYSG oran grafikleri ($w_1=0.50$, $w_2=0.25$, $w_3=0.25$) Şekil 2' de görülmektedir.

Tablo 6. Faktörlerin ÇYSG oranı üzerindeki ana etkileri

Sembol	Faktörler	ÇYSG'de Ana Etkiler (dB)				Sıra
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Enb-Enk	
A	Dönme hızı	2.600	5.825	7.392*	4.793	1
B	İlerleme	6.328*	5.201	4.288	2.039	2
C	Kesme derinliği	4.515	5.139	6.163*	1.649	3



Şekil 2. Kontrol faktörlerinin ortalama ÇYSG oranı grafiği

Grafik incelendiğinde de A3B1C3 deney kombinasyonunun, ÇYSG oranına göre en iyi faktör kombinasyonu olduğu görülmektedir. Delik büyütme işleminde performans kriterleri üzerinde etkili faktörleri ve bu faktörlerin katkı paylarını hesaplamak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA sonuçları Tablo 7' den görülmektedir. ANOVA tablosundan performans üzerinde en önemli etkiye sahip faktörün dönme hızı olduğu görülmektedir. Ayrıca faktörlerin yüzde olarak etkileri incelendiğinde; dönme hızı faktörünün etkisinin % 68.47; ilerlemenin etkisinin % 11.96 ve kesme derinliğinin etkisinin % 7.94 olduğu görülmektedir. Faktörlerin önem sırası dikkate alınarak bir sıralama yapıldığında faktörler A, B ve C şeklinde sıralanırlar. Bunlardan A faktörünün yanıt üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. B ve C 'nin ise etkisinin oldukça az olduğu görülmektedir. Grafik incelendiğinde, A3B1C3 deney kombinasyonunun, ÇYSG oranına göre en iyi faktör kombinasyonu olduğu görülmektedir. A3B1C3 deney kombinasyonu, delik büyütme prosesinde en iyi yüzey pürüzlülük, talaş kaldırma oranı ve işleme süresi değerlerinin elde edildiği faktör seviyeleri olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7. ÇYSG oranı için ANOVA sonuçları

Faktörler	sd	KT	KO	F değeri	P değeri	Katkı (%)
Dönme hızı	2	35.830	17.915	5.89	0.145	68.47
İlerleme	2	6.261	3.131	1.03	0.493	11.96
Kesme derinliği	2	4.157	2.078	0.68	0.594	7.94
Hata	2	6.087	3.044			11.63
Toplam	8	52.335				100

sd: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması

3.2. Doğrulama Deneyleri

Optimizasyon işleminin son adımı, optimal değerleri veren koşulun öngörülen iyileşmeyi sağlayıp sağlamadığını doğrulamak için test edilmesidir. Doğrulama testi sonuçları Tablo 8' de verilmiştir. Yapılan bu çalışmada, delik büyütme işlemi sonucunda Ra, TKO ve İS için optimum sonuca mevcut deney koşullarından A3B1C3 deney şartında ulaşılmıştır. Optimum parametre seviyelerindeki tahmini ÇYSG oranı (η_{opt}) eşitlik 13 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^p (\eta_{mi} - \eta_m) \quad (13)$$

Burada, η_m tüm deneylerin ortalama ÇYSG değeri, p performansı önemli derecede etkileyen kesme parametre sayısı, η_{mi} optimum seviyelerdeki ortalama ÇYSG değeridir.

Tablo 8. Doğrulama deney sonuçları

Performans Kriterleri	Başlangıç parametresi	Optimum proses parametresi	
		Tahmin	Deney
Seviye	A1B1C1	A3B1C3	A3B1C3
Ra (μm)	2.30		0.91
TKO ($\text{m}^3 \times 10^{-3}/\text{dak}$)	1.49		8.95
İS (dak)	0.50		0.25
ÇYSG (dB)	1.922	9.339	10.375

Bu doğrulama, başlangıç parametresi A1B1C1 yerine optimum proses parametresi kullanıldığında A3B1C3 çoklu sinyal gürültü oranında 8.453 (dB)' lik bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar yapılan çoklu optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada çok yanıtli Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı kullanılarak, AA 5754 Alüminyum alaşımına uygulanan delik büyütme işleminde etkili olan faktörlerin çoklu optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresini minimum, aynı zamanda talaş kaldırma oranını maksimum yapan kesme koşulları çok yanıtli sinyal/gürültü oranları hesaplanarak belirlenmiştir. Bununla birlikte varyans analizi ile kesme parametrelerinin performans kriterleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarına baktığımızda, performans değerleri üzerindeki en etkili parametrenin sırasıyla, dönme hızı (% 68.47), ilerleme (% 11.96) ve kesme derinliği (% 7.94) olduğu görülmüştür. ÇYSG tabanlı Taguchi yaklaşımı kullanılarak elde edilen optimum değerler incelendiğinde; dönme hızının 2000 dev/dak, ilerlemenin 0.10 mm/dev ve kesme derinliğinin 0.75 mm olması durumunda en iyi performans değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Doğrulama deneyleri sonucuna göre, AA 5754 alüminyum alaşımının delik büyütme işlemindeki optimal proses performansının belirlenmesinde çok yanıtli Taguchi optimizasyon yaklaşımının başarılı bir şekilde uygulandığı tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Aydın, M., Yaşar, M., Gavas, M., & Altunpak, Y. (2012). *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri*. Seçkin Yayınları, Ankara, 346-347.
- Çaydaş, U., & Haşçalık, A. (2008). A Study on Surface Roughness in Abrasive Waterjet Machining Process Using Artificial Neural Networks and Regression Analysis Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 574-582.
- Ferah, M. (2003). Çokyanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Metodu ve Alüminyum Sanayinde Bir Uygulama. *SAU Fen Bilimleri Dergisi*, 7, 61-69.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Achyutha, B.T., & Siddeswarappa, B. (2008). Genetic Algorithm-Based Burr Size Minimization in Drilling of AISI 316L Stainless Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 197, 225-236.
- İç, Y., Duran, H., Keçeci, B., İlik, E., & Bilgiç, B. (2016). Çok Yanıtlı TaguchiEniyilenmesine Yönelik Bir Bilgisayar Uygulamasının Geliştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 19, 311-323.
- Jayaramana, P., & Kumar, L.M. (2014). Multi-Response Optimization of Machining Parameters of Turning AA6063 T6 Aluminium Alloy Using Grey Relational Analysis in Taguchi Method. *Procedia Engineering*, 97, 197-204.
- Jayaramana, P., Kumar, L.M., & Jayaseelan, V. (2015). Multi-Response Optimization of Cutting Parameters During End-Milling of AA6101 T6 Aluminium Alloy Using Grey Relational Analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 4275-4286.
- Khamel S., Ouelaa N., & Bouacha K. (2012). Analysis and Prediction of Tool Wear, Surface Roughness and Cutting Forces in Hard Turning with CBN Tool. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (11), 3605-3616.
- Kıvık T., Samtaş G., & Çiçek A. (2012). Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills”, *Measurement*, 45, 1547-1557.
- Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, V., & Gostimirovic, M. (2013). Application of Fuzzy Logic and Regression Analysis for Modeling Surface Roughness in Face Milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24, 755-762.
- Meral, G., Sarıkaya, M., & Dilipak, H. (2011). Delme İşleminde Delme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27, 332-338.

- Mia, M., Khan, Md A., Rahman, S.S., & Dhar, N.R. 2016. Mono-Objective and Multi-Objective Optimization of Performance Parameters in High Pressure Coolant Assisted Turning of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 109-118.
- Mohamed, M.A., Manurung, Y.H.P., & Berhan, M.N. (2015). Model Development for Mechanical Properties and Weld Quality Class of Friction Stir Welding Using Multi-Objective Taguchi Method and Response Surface Methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 2323-2331.
- Muhammad, N., Manurung, Y.H.P., Hafidzi, M., Jafaar, R, Abas, S.K., Tham, G., & Haruman, E. (2012). Optimization and Modeling of Spot Welding Parameters with Simultaneous Multiple Response Consideration Using Multi-Objective Taguchi Method and RSM. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, 2365–2370.
- Muhammad, N., Manurung, Y.H.P., Jaafar, R., Abas, S.K., Tham, G., & Haruman, E. 2012. Model Development for Quality Features of Resistance Spot Welding Using Multi-Objective Taguchi Method and Response Surface Methodology. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24, 1175-1183.
- Singarvel, B., Selvaraj, T., & Jeyapaul, R. (2014). Multi-Objective Optimization in Turning of EN25 Steel Using Taguchi Based Utility Concept Coupled with Principal Component Analysis. *Procedia Engineering*, 97, 158-165.
- Tong, L. I., Su, C. T., & Wang, C. H. (1997). The Optimization of Multi-Response Problems in The Taguchi Method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 14, 367-380.
- Yadav R.N. (2017). A Hybrid Approach of Taguchi-Response Surface Methodology for Modeling and Optimization of Duplex Turning Process. *Measurement*, 100, 131-138.
- Yurdakul, M., & Tansel, Y. 2016. *Modern İmalatın Prensipleri*. Nobel Yayınları, Ankara, 501-511.