



Araştırma Makalesi / Research Paper

Bakır Malzemenin Delinme Performansının Kesme Kuvveti ve Takım Sıcaklığı Açısından İncelenmesi

Hüseyin GÖKÇE ^{a*}

Çankırı Karatekin Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü. 18100 Çankırı, Türkiye

^a huseyingokce@karatekin.edu.tr

Received/Geliş: 02.05.2020

Accepted/Kabul: 22.06.2020

Öz: Bakır, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik değerlerine sahip olması nedeniyle birçok sektörde aranan ve talep gören malzemelerden biridir. Gümüş ve altından sonra en yüksek ısı ve elektrik iletim katsayısına sahip bakır, ekonomikliği ile özellikle elektrik ve elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek teknolojiye sahip yeni imalat yöntemleri gelişse de matkapla delik delme en yaygın talaşlı imalat yöntemlerinden biri olarak güncelliğini devam ettirmektedir. Ticari saflıktaki bakırın yüksek sünekliği delinmesini güçleştirmek ve delik kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Bu çalışmada ticari saflıktaki bakırın delinmesi sürecinde bağımsız değişkenlerin (matkap geometrisi, kaplaması ve kesme parametreleri) bağımlı değişkenler (kesme kuvvetleri ve kesici takıma etkileyen sıcaklıklar) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel Taguchi L16 dikey dizisi kullanılarak tasarlanmıştır. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini anlayabilmemiz için bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Optimum delme koşulları belirlenmiş ve varyans analizi ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri hangi oranda etkiledikleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar ışığında elde edilen veriler bir dizi deney ile test edilmiş ve sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Deneysel sonucunda kesme kuvveti üzerinde etkili olan bağımsız değişkenlerin sırasıyla ilerleme miktarı, uç açısı, kesme hızı ve kaplama durumu olduğu, kesici takım sıcaklığı üzerinde ise kesme hızı, uç açısı, ilerleme miktarı ve kaplama durumu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bakır; delme; regresyon analizi; Taguchi metodu; kesme parametreleri.

Investigation of Drilling Performance of Copper Material in terms of Cutting Force and Tool Temperature

Abstract: Copper is one of the materials requested and sought in many sectors due to its high electrical and thermal conductivity values. Copper, which have the highest heat and electricity transmission coefficient after gold and silver, are widely used especially in the electrical and electronic industries with their economy. Although new high-tech manufacturing methods have developed, drilling remains current as one of the most common machining methods. Its high ductility makes it difficult to drilling of commercial purity copper and has a negative effect on the hole quality. In this study, the effect of independent variables (drill bit geometry, coating and cutting parameters) on dependent variables (cutting forces and temperatures affecting the cutting tool) during the drilling of commercial purity copper was investigated. Experiments were designed using the Taguchi L16 orthogonal array. A regression model has been developed in order to understand the effect of independent variables on dependent variables. Optimum drilling conditions were determined and by the variance analysis, the rate at which independent variables affect the dependent variables was calculated. The data obtained in the light of calculations were tested by a series of experiments and the results were found to be consistent with each other. As a result of the experiments, it has been observed that the independent variables that have an effect on the cutting force are feed rate, drill bit angle, cutting speed and coating state respectively, also for the cutting tool temperature, cutting speed, drill bit angle, feed rate and coating state.

Keywords: Copper; drilling; regression analysis; Taguchi method; cutting parameters.

Bu makaleye atıf yapmak için

Gökçe, H., "Ticari Saflıktaki Bakır Malzemenin Delinme Performansının İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(3); 1039-1053.

How to cite this article

Gökçe, H., "Investigation of Drilling Performance of Commercial Purity Copper Material" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(3); 1039-1053.

ORCID: ^a 0000-0002-2113-1611

1. Giriş

Bakır, geçmişte yumuşaklığından ve kolay işlenebilir olmasından ötürü birçok alanda kullanılmış olsa da günümüzde yeni bilinen özellikleri ile yeni uygulama alanları bulmuştur. Özellikle gümüş ve altından sonra en yüksek ısı ve elektrik iletme özelliği sayesinde elektrik ve elektronik alanında yoğun olarak kullanılmaktadır [1-4]. Saf bakır yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olmasına karşın, çekme, sürtünme ve sertlik gibi mekanik özellikleri düşüktür [3,5]. Bakır ve alaşımlar iyi korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, kendi kendini yağlayabilme (toz metalürjisi yöntemiyle) ve iyi aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı uzun zamandan beri yatak malzemesi olarak da kullanılmaktadırlar [6,7].

Üretim metotlarındaki gelişmelere rağmen klasik talaş kaldırarak şekillendirme halan güncelliğini devam ettirmektedir. Matkapla delik delme basit yapısı ve düşük üretim maliyetleri ile halen yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [8]. Talaş kaldırarak işleme bir plastik deformasyon (kesme) olayıdır ve kesmenin gerçekleşebilmesi için kesici takımın iş parçası çekme dayanımını aşması gerekmektedir. Kesmenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan bu kuvvet “kesme kuvveti” olarak tanımlanır ve işlenebilirliği gösteren önemli parametrelerden biridir [9-12]. İşleme verimliliği kesme hızlarının artırılması ile yükselecektir. Artan hız değerleri sürtünmenin artmasına ve dolayısıyla kesme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerini de yükselmesine neden olacaktır. Artan ısı ile beraber kesici takımın hızla aşınması, üretim kalitesinin düşmesi ve maliyetlerin yükselmesi kaçınılmaz olacaktır [12-15]. Bu nedenle ısı kontrolünün sağlanması ve oluşan ısının hızla uzaklaştırılması oldukça önemlidir. Kesme bölgesinde oluşan ısının büyük bir kısmı talaşa geçer. Bu nedenle kesme bölgesinden talaşın hızlı ve kolay bir şekilde tahliye edilmesi gerekmektedir [14-16].

2. Literatür Özeti

Bakır malzemelerin talaş kaldırılarak şekillendirilmesi üzerine yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen matkapla delinmesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde nadir olarak bulunmaktadır. Lin ve Ting, bakır alaşımlı malzemenin HSS matkaplarla delinmesi sürecinde oluşan kesme kuvvetlerine bağlı sinyaller yardımıyla takım aşınmasını araştırmışlardır. İlerleme miktarı, kesme derinliği ve takım aşınmasının kesme kuvvetleri üzerinde etkili olduğunu, ilerleme kuvveti ve momentin artması ile takım aşınmasının arttığını ifade etmişlerdir. [17]. Yang vd. bakır içerikli baskı devre kartlarını iki farklı matkap geometrisi ile delme deneylerine tabi tutmuşlardır. Farklı kesme parametrelerinde kesme kuvveti, torku ve talaş morfolojisini incelemişlerdir. Kesme kuvvetinin, artan ilerleme hızı ile arttığını ve artan kesme hızı ile azaldığını ifade etmişlerdir. Matkap geometrisinin itme kuvvetini önemli ölçüde azalttığını ve talaş tahliyesini kolaylaştırdığını belirtmişlerdir. [18]. Vergara vd. bakır ve pirinç malzemeleri sürtünmeli delik delme yöntemi ile bir dizi deneye tabi tutmuşlardır. Delik kalitelerini sac kalınlığı, iş mili hızı, ilerleme miktarı, takım geometrisi ile incelemişlerdir. Yeterli kalitede delikler üretilmesi için yüksek iş mili hızlarının ve düşük ilerleme miktarlarının diğer parametrelere nazaran daha etkili olduğunu açıklamışlardır. [19]. Tang vd., yüksek oranda bakır muhteva eden elektronik devre kartlarının yüksek hızlarda delinmesini sonlu elemanlar yardımıyla kesme kuvveti, kesme torku ve takım sıcaklığı açılarından analiz ederek sonuçları deneysel çalışmalar ile mukayese etmişlerdir. Analiz ve deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçların birbirine oldukça yakın ve tutarlı bulunduğunu ifade etmişlerdir. [20]. Moriwaki vd. elmas kesici takımlarla bakır malzemenin tornalama sürecinde kesici takım ve iş parçası üzerinde meydana gelen deformasyonları deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının tutarlı olduğunu ayrıca elmas kesici takımlarla mikro hassas işlemede sıcaklık etkisinin ihmal edilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. [21]. Zhang ve zhang çeşitli ısı işlem süreçlerinden geçirilmiş yüksek iletkenliğe sahip bakır malzemenin tornalanmasında yüzey kalitesini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Yeniden kristalleştirme tavına tabi tutulan numunelerden en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Ek olarak, kristal yapının homojenliği ve işlem sırasının, bitmiş yüzeyin

pürüzlülüğünü ve artık yüzey gerilmelerini etkilediğini ifade etmişlerdir. [22]. Breton vd. talaşlı imalatla kesme koşulları ile yüzey bütünlüğüne ve buna bağlı fiziksel-kimyasal özellikler arasındaki ilişkileri açıklamaya çalışmışlardır. Saf bakır malzemenin süper bitirme ile tornalama işlemi sonunda elektrokimyasal davranışı ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. İşlenmiş malzemedeki artık gerilme, sıcaklık ve çapak oluşumu alanlarını hesaplamak için termal-mekanik, mikroyapı, yeniden kristalleşme yaklaşımlarını içeren bir model sunmuşlardır. Deneysel ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. [23] Mahajan vd. yüksek iletkenlikteki bakır malzemeyi elmas kesici takımlarla bir dizi tornalama deneylerine tabi tutmuşlardır. Bakırın yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği ve takım ucu radyüsü olmak üzere dört işlem parametresinin kantitatif etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel araştırmalardan, takım ucu radyüsünün dikkate alınan diğer parametreler arasında çok baskın bir parametre olduğunu ayrıca daha büyük takım ucu yarıçapı kullanıldıkça, daha yüksek kesme derinliği, yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarı kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. [24]. Tanaka vd. elmas kesici takımlarla bakır malzemenin tornalanması sürecinde oluşan talaşları ve termal yüklere maruz kalan kesici takımında meydana gelen aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Kesici takımında oluşan mikro çatlakların kesici takım malzemesi ve bakırın reaksiyona girmesiyle hızla oluştuğunu açıklamışlardır. [25]. Shimada vd. bakırın oksijen atmosferinde elmas kesici takım ile tornalamasında kesici takım aşınma mekanizmasını, termodinamik analizini ve aşınma sürecini simüle etmişlerdir. Çalışma sonucunda, oksijen atmosferinde yapılan tornalamanın kesici takım aşınmasını önemli derecede düşürdüğünü ve üretim verimliliğini arttırdığını belirtmişlerdir. [26]. Rahman vd. saf bakır iş parçasının frezelenmesi sırasında kırılma mekanizması ve mikro parmak frezeyi etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Farklı kesme hızları, kesme derinlikleri ve ilerleme miktarları kullanılarak yaptıkları deneylerinde iki farklı helis açısına sahip kesici takım kullanmışlardır. Çalışma sonunda oluşan talaşların geleneksel yöntemle frezeleme süresince oluşan talaşlara oldukça benzediğini (spiral ve kırık) belirtmişlerdir. Takım aşınmasının işleme süresi ile arttığını ve kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. [27].

Bakır en yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerden biri olmasına karşın oldukça sünek sünekliliği matkapla delinmesini güç hale getirmektedir. Talaş tahliyesindeki güçlükler kesme kuvvetlerini ve sürtünmeleri artırmakta ve buna bağlı olarak kesme bölgesinde oluşan ısı değerlerini yükseltmektedir. Deneylerde 4 kesme hızı değeri, 4 ilerleme miktarı, 4 matkap uç açısı ve kaplamalı/kaplamasız HSS matkaplar kullanılmıştır. Deney tasarımında L16 dikey dizisinden faydalanılmıştır. Sonuçlar regresyon analizi ile modellenmiş ve Taguchi metodu ile optimum işleme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

3. Materyal ve Metot

3.1. Materyal

Deneylerde kullanılan ticari saflıktaki bakır malzemeye ait bazı özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Ø60 mm çapında 15 mm kalınlığında hazırlanan deney parçası Arion IMM-600 CNC dik işleme tezgâhının tablasına 4 ayaklı bir ayna ile bağlanmıştır. Kesme kuvvetleri yük hücresi temeline dayanan bir kuvvetölçer ile ölçülmüştür [28]. Şekil 1’de, kurulan deney düzeneği gösterilmeye çalışılmıştır. İşleme esnasında kesici takım sıcaklık değerleri Fluke Ti200 marka/model termal kamera ile ölçülmüştür. Matkaplar Ø5 mm çapında, 30° helis açısına sahip HSS malzemenin imal edilmiştir. 90°, 105°, 118° ve 140° uç açılına sahip matkaplar Ø5-6 mm pens takımı ile takım tutucuya bağlanmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı (CVD- AlTiN- kaplama kalınlığı: 5 µm) HSS kesici takım Şekil 2’de gösterilmiştir. Deney tasarımı ve sonuçların yorumlanmasında regresyon analizi, varyans analizi ve Taguchi metodu gibi istatistiksel araçlardan faydalanılmıştır. Burada; bağımsız değişken olarak belirlediğimiz kesme hızı, ilerleme miktarı, uç açısı ve kaplama durumu için “kontrol faktörleri”, bağımlı değişken olarak değerlendirdiğimiz kesme kuvveti ve takım

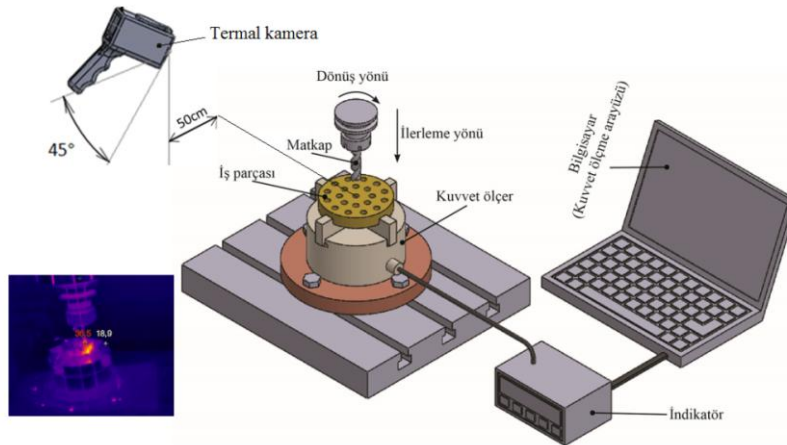
sıcaklık değerleri için ise “kalite karakteristiği” ifadeleri kullanılmıştır. Kontrol faktörleri, kontrol faktörlerinin seviyeleri ve kullanılan kısaltmalar Tablo 2’de verilmiştir. Deneyler Taguchi L16 ($4^{**}3 \ 2^{**}1$) dikey dizisi kullanılarak yapılmıştır. Çoklu doğrusal regresyon metodu ile kalite karakteristikleri için kontrol faktörlerini içeren matematiksel bir model geliştirilmiştir. Kontrol faktörleri için seviyeler, üretici firma katalogları ve literatür incelenerek belirlenmiştir.

Tablo 1. Ticari saflıktaki bakırın bazı özellikleri. [29].

Özellik	Birim	Bakır
Yoğunluk (20°C’de)	g/cm ³	7,764
Ergime noktası	°C	1083,2-1083,6
Vickers sertliği	HV	50
Akma gerilmesi	MPa	33,3
Çekme gerilmesi	MPa	210
Elastikyet modülü	GPa	110
Poison oranı	-	0,343
Isı iletim katsayısı (20°C’de)	[W/(mK)]	385

Tablo 2. Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Kontrol faktörleri	Birim	Kod	Seviyeler			
			1	2	3	4
Kesme hızı (Vc)	m/dak	A	10	20	30	40
İlerleme miktarı (f)	mm/dev	B	0,025	0,050	0,075	0,100
Uç açısı (β)	°	C	90	105	118	140
Kaplama durumu (KD)	-	D	Kaplamasız ve kaplamalı			



Şekil 1. Deney düzeneği



Şekil 2. HSS kesici takım

3.2. Metot

3.2.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımsız değişkenler (kontrol faktörleri) yardımıyla bağımlı değişkenlerin (kalite karakteristiği) tahmin edilebilmesini sağlayan istatistiksel bir araçtır. Analiz sonucunda regresyon denklemi denilen bir matematiksel model elde edilir [30]. Model yardımıyla elde edilen determinasyon katsayısı (R^2) modelin doğru sonucu bulmasındaki başarısını verecektir. R^2 değeri ne kadar 1’e yakınsa regresyon denklemi o denli tutarlı sonuçlar verecektir.

Bu analiz metodu araştırmacılar tarafından yaygın kullanılan ve bilinen bir analiz metodudur. Karaca regresyon metodu ile kompozit malzemelerin delinmesinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve matkap uç açısı gibi delme parametrelerinin etkisi incelemiştir [31]. Bayraktar ve Turgut kompozit malzemelerin delinmesi sonucu oluşan çapakları, kesme parametreleri ve kesici takım geometrisi açısından Taguchi, varyans analizi, yapay sinir ağları ve regresyon analizi gibi yöntemler kullanılarak yorumlanmaya çalışılmışlardır [32]. Meral vd. Ç1050 malzemenin delinmesinde matkap türü, matkap çapı, ilerleme miktarı ve kesme hızının etkilerini lineer regresyon, ikinci dereceden regresyon ve üstel regresyon metotları ile modellemişlerdir [33]. Yılmaz vd. X10CrAlSi24 malzemeyi elektro erezyon ile delik delme deneylerine tabi tutmuşlar ve çoklu regresyon analizi ile boşaltım akımı, elektrot devri ve elektrot çeşidinin etkilerini modellemişlerdir [34]. Başak ve Baday orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini regresyon analizi ile modellemişlerdir [35].

3.2.2. Taguchi Metodu

Kontrol faktörlerinin (bağımsız değişkenler) kalite karakteristikleri (bağımlı değişkenler) üzerindeki etkileri, deney sonuçları için uygun amaç fonksiyonu ile hesaplanan Sinyal/Gürültü (S/N) oranı yardımıyla bulunur [36]. En temel üç amaç fonksiyonu vardır. Bunlar; “en küçük en iyi, en büyük en iyi ve hedef değer en iyi” fonksiyonlarıdır. Kullanılacak amaç fonksiyonu deney sonucunun niteliğine göre değişmektedir ve her durumda da S/N oranının en yüksek değere sahip olması beklenir [37-38].

Tam faktöriyel deney tasarımımda bütün koşullar (her kontrol faktörü ve seviyeleri) için deney yapmak gerekirken Taguchi metodu ile deney sayısı belirli kombinasyonlar için yapılarak ekonomik ve zaman kazancı sağlanır. Bu nedenlerden ötürü metot, ticari kaygıları olan firmalar ve doğru sonuca hızla ulaşmak isteyen bilim insanları tarafından tercih sebebi olmaktadır. Ghani vd. AISI H13 çeliğinin frezelenmesi sürecinde değişen işleme parametrelerini L27 ortogonal dizisi ile Taguchi metodu kullanarak optimize etmeye çalışmışlardır [39]. Günay, AISI 316L çeliğinin tornalanmasında kesici takım uç yarıçapı ve kesme parametrelerinin optimizasyonunu Taguchi L9 dikey dizini kullanarak yapmıştır [40]. Çiftçi vd. molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerini Taguchi L16 deney tasarımı ile optimize etmişlerdir. [38]. Canel vd. Taguchi metodu ile Al 6082-T6 alaşımının lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinde incelemişlerdir [41]. Terzioğlu termoelektrik jeneratör üzerindeki etki faktörlerini yine Taguchi metodu kullanarak analiz etmiştir [42]. Pınar vd. Ranque–Hilsch vorteks tüpünün performansını incelerken Taguchi metodunu kullanmışlardır [43]. Maiyar vd. Inconel 718 süper alaşımının frezelemesi işleminde kesme parametrelerini Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz ile optimize etmişlerdir [44]. Gökçe vd. ticari saflıktaki molibdenin frezelenmesi sürecini Taguchi L16 deney tasarımı kullanarak kesme parametreleri açısından değerlendirmişlerdir [45].

Deneyisel çalışma sonuçları elde edilen verilerin yüksek değerde, düşük değerde veya belirli bir aralık değerinde olması beklenir. Bu çalışma için kesme kuvvetlerinin ve kesici takım sıcaklıklarının en düşük değerlerde olması istenmektedir. Bu nedenle S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 1’de verilen “en küçük en iyi” fonksiyonu kullanılmıştır. Burada; X_i : kalite karakteristiğinin ölçülen değeri ve n : toplam deney sayısıdır. Kalite karakteristiği değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek için deney sonuçlarına %95 güven aralığında ANOVA analizi uygulanmıştır. Taguchi metodu ve ANOVA analizi Minitab17 programı ile yapılmıştır.

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

4. Deneysel Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ticari safılıktaki bakır malzeme üzerinde 4 farklı kesme hızı, ilerleme miktarı, matkap uç açısı ve 2 farklı kaplama durumu (kaplamasız ve kaplamalı) kullanılarak gerçekleştirilen delik delme deneyleri sonucu ölçülen kesme kuvvetleri, kesici takım sıcaklıkları ve S/N oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde ölçülen kesme kuvvetleri, takım sıcaklıkları ve hesaplanan S/N oranları

Test no	Kod	Vc (m/dak)	Kod	f (mm/dev)	Kod	β (°)	Kod	KD	Fc (N)	T (°C)	Fc S/N (dB)	T S/N (dB)
1	A1	10	B1	0,025	C1	90	D1	Kaplamasız	949,23*	42,0*	-59,5474	-32,4650
2	A1	10	B2	0,050	C2	105	D1	Kaplamasız	1173,54	57,0	-61,3900	-35,1175
3	A1	10	B3	0,075	C3	118	D2	Kaplamalı	1431,48	60,2	-63,1157	-35,5919
4	A1	10	B4	0,100	C4	140	D2	Kaplamalı	1611,02**	72,0	-64,1420	-37,1466
5	A2	20	B1	0,025	C2	105	D2	Kaplamalı	1022,47	54,5	-60,1930	-34,7279
6	A2	20	B2	0,050	C1	90	D2	Kaplamalı	1149,52	45,2	-61,2103	-33,1028
7	A2	20	B3	0,075	C4	140	D1	Kaplamasız	1507,82	81,2	-63,5670	-38,1911
8	A2	20	B4	0,100	C3	118	D1	Kaplamasız	1580,15	68,5	-63,9740	-36,7138
9	A3	30	B1	0,025	C3	118	D1	Kaplamasız	1217,19	77,3	-61,7072	-37,7636
10	A3	30	B2	0,050	C4	140	D1	Kaplamasız	1408,84	79,2	-62,9772	-37,9745
11	A3	30	B3	0,075	C1	90	D2	Kaplamalı	1343,67	55,4	-62,5659	-34,8702
12	A3	30	B4	0,100	C2	105	D2	Kaplamalı	1532,72	65,8	-63,7093	-36,3645
13	A4	40	B1	0,025	C4	140	D2	Kaplamalı	1114,08	86,7	-60,9383	-38,7604
14	A4	40	B2	0,050	C3	118	D2	Kaplamalı	1371,30	80,2	-62,7426	-38,0835
15	A4	40	B3	0,075	C2	105	D1	Kaplamasız	1443,82	89,0**	-63,1903	-38,9878
16	A4	40	B4	0,100	C1	90	D1	Kaplamasız	1497,98	82,0	-63,5101	-38,2763
Ortalama									1334,68	68,5		

* En küçük değer, ** En büyük değer

Deneylerden elde edilen kesme kuvvetlerinin ortalaması 1334,68 N ve kesici takım sıcaklık ortalaması ise 68,5°C'dir. Ayrıca kesme kuvveti için en yüksek 1611,02 N, en düşük 949,23 N, kesici takım sıcaklığı için ise en yüksek 89,0°C, en düşük 42,0°C değerlerindedir (Tablo 3). Deney sonuçları arasındaki bu farklılaşma kalite karakteristikleri üzerinde kontrol faktörlerinin oldukça yüksek etkiye sahip oldukları göstermektedir.

4.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi Sonuçları

Eşitlik 2'de kesme kuvveti için Eşitlik 3'te ise kesici takım sıcaklık değeri için regresyon denklemleri verilmiştir. Burada; A: Kesme hızını, B: İlerleme miktarını, C: Uç açısını ve D: Kaplama durumunu temsil etmektedir (Tablo 2 ve Tablo 3).

$$F_c = 751 + 25,7 A + 160 B + 63,3 C - 25,3 D \quad (2)$$

$$T = 31,6 + 8,71 A + 2,69 B + 7,59 C - 7,02 D \quad (3)$$

Tablo 4'te regresyon denklemlerine ait katsayılar tablosu ve determinasyon katsayıları verilmiştir. Bu tabloda; Coef: değerlerin katsayılarını, SE Coef: katsayılarıdaki standart hatayı, T: test istatistiklerinin sonucunu, P: regresyon analizinin anlamlı olup, olmadığını belirtmektedir. P değerlerinin 0,05'ten küçük olması kontrol faktörünün istatistiksel olarak anlamlı olduğunun bir göstergesidir.

Eşitlik 2'deki regresyon denkleminde (kesme kuvveti için) en yüksek katsayı ilerleme miktarına aittir. İlerleme miktarının artması talaş kesit alanını arttıracak ve kesme olayının gerçekleşebilmesi için daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duyulacaktır. [46, 47]. Kesme kuvvetlerinin ikinci olarak etkilendiği kontrol faktörü uç açısıdır. Denklem göre uç açısının daralması kesme kuvvetlerini düşürecektir. Kesme hızı ve kaplama durumuna ait katsayılar birbirine oldukça yakındır. Kaplama

durumunda kodlama kaplamasız-1 ve kaplamalı-2 olarak yapılmıştır. Buna göre kaplamalı (2) kodlu kesici takımların negatif çarpan katsayısı ile kesme kuvvetlerinin azalmasına sebep olacaktır. Kaplamalı kesici takımların kaplamasız takımlara nazaran kesme kuvvetlerini düşürdüğü bilinmektedir. [48]. Kesici takım sıcaklığının da en çok etkilendiği kontrol faktörünün kesme hızı olduğu Eşitlik 3 ve Tablo 4'te görülmektedir. Kesme bölgesinde oluşan ısı, kesme hızından oldukça etkilenir. Kesme hızının artması sürtünmenin de etkisiyle takım talaş ara yüzeyinde sıcaklık artışına sebep olmaktadır. [12, 19, 21, 23].

Tablo 4. Regresyon denklemlerinin katsayılar tablosu

Tahmin unsuru	Kesme kuvveti				Kesici takım sıcaklığı			
	Coef	SE Coef	T	P	Coef	SE Coef	T	P
Katsayı	751,35	59,25	12,68	0,000	31,588	5,926	5,33	0,000
Kesme hızı	25,70	10,60	2,43	0,034	8,710	1,060	8,22	0,000
İlerleme miktarı	159,51	10,60	15,05	0,000	2,690	1,060	2,54	0,028
Uç açısı	63,29	10,60	5,97	0,000	7,585	1,060	7,16	0,000
Kaplama durumu	-25,29	23,70	-1,07	0,309	-7,025	2,370	-2,96	0,013
R-Sq (R^2)	%96,1				%92,4			
R-Sq(adj) (R^2_{adj})	%94,6				%89,7			

Tablo 4'teki incelendiğinde kontrol faktörlerinin (kesme kuvveti için kaplama durumu hariç) istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenebilir ($P > 0,05$). R^2 ve düzeltilmiş R^2 (R^2_{adj}) değerleri incelendiğinde denklemlerinin; kesme kuvveti için %96,1 ve kesici takım sıcaklığı için %92,4 oranlarında deneyleri açıklayabildiğini ve kalite karakteristikleri ile kontrol faktörleri arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğunu söyleyebiliriz. R^2 ve R^2_{adj} oranlarının da birbirine oldukça yakın olması bu sonucu kanıtlar niteliktedir. Ayrıca Tablo 5'de elde ettiğimiz çoklu doğrusal regresyon denkleminde ait varyans analizi verilmiştir. Burada da P değerleri 0,05'ten küçüktür ($P=0,000$), dolayısıyla istatistiksel olarak anlamlı bir regresyon denklemimiz vardır.

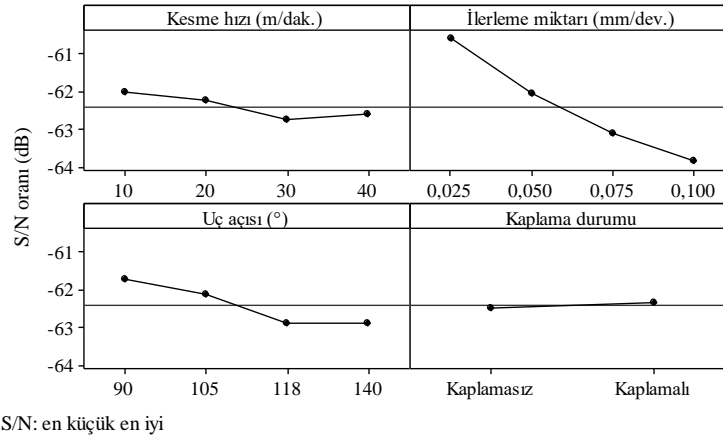
Tablo 5. Regresyon denklemlerine ait varyans analizi

Kaynak	Kesme kuvveti				
	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	4	604740	151185	67,30	0,000
Ölçüm hatası	11	24713	2247		
Toplam	15	629452			
Kaynak	Kesici takım sıcaklığı				
	DF	SS	MS	F	P
Regresyon	4	3010,05	752,51	33,48	0,000
Ölçüm hatası	11	247,23	22,48		
Toplam	15	3257,28			

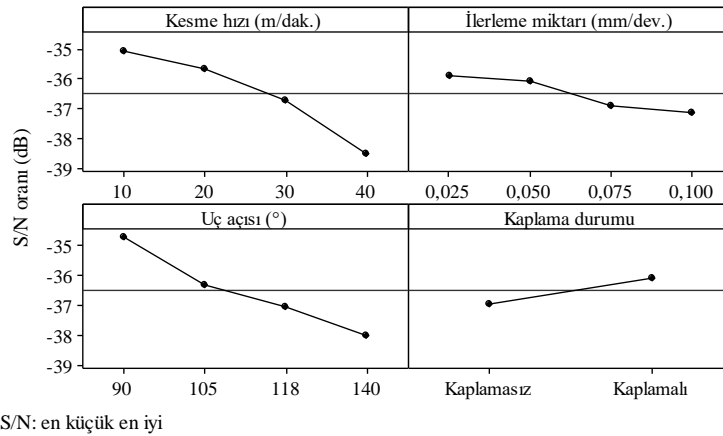
4.2. Taguchi Metodu ile Optimizasyon Sonuçları

Şekil 3'te kesme kuvveti sonuçlarının Eşitlik 1 ile hesaplanan S/N oranları için ana etki grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4'te ise benzer hesaplama yöntemi ile kesme kuvvetlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri verilmiştir. Ayrıca Tablo 6'da S/N oranlarının kontrol faktörlerine göre dağılımları ve önem sıralaması verilmiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4'teki ana etki grafikleri ile Tablo 6'daki S/N oranlarının en yüksek ve en düşük noktaları incelendiğinde; kesme kuvveti üzerinde etkili olan en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı olduğu, kesici takım sıcaklığı için ise kesme hızı olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Kesme kuvveti değerlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri



Şekil 4. Kesici takım sıcaklık değerlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri

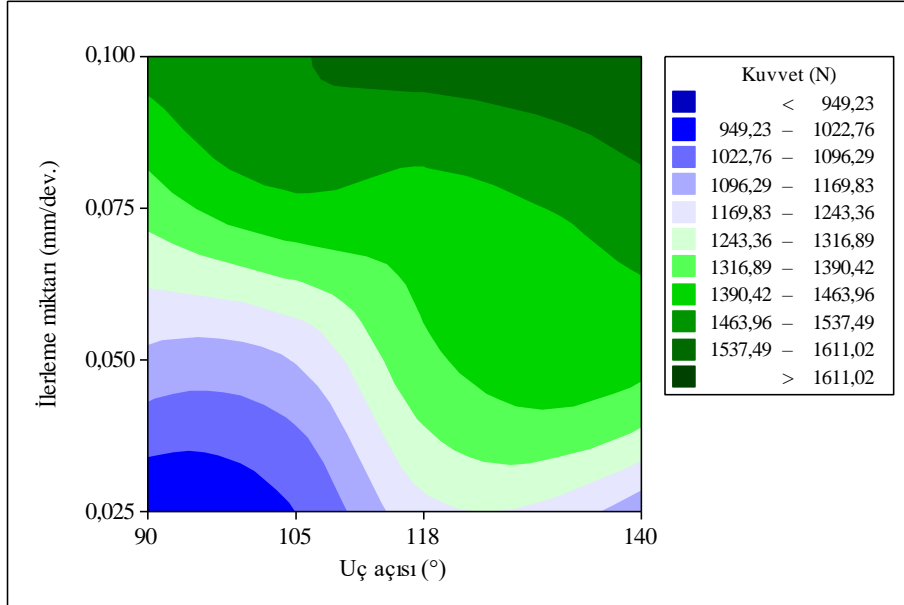
Ayrıca, kesme kuvveti üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin önem sırası; ilerleme miktarı, uç açısı, kesme hızı ve kaplama durumu olurken, kesici takım sıcaklığı için ise kesme hızı, uç açısı, ilerleme miktarı ve kaplama durumu olduğu Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Kesme kuvveti ve kesici takım sıcaklık değerlerinin ortalama S/N oranları için kontrol faktörlerinin önem sırası

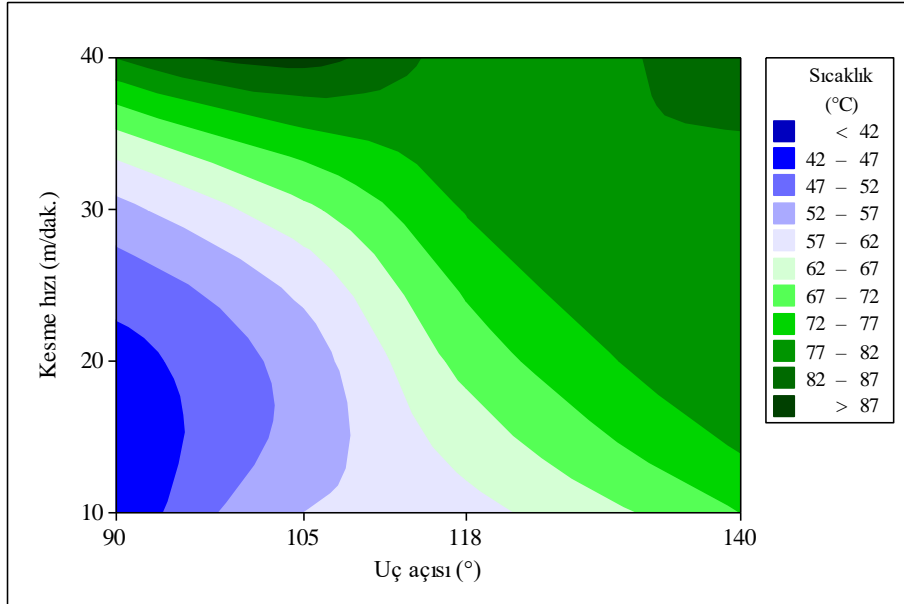
Seviye	Kesme hızı (dB)	İlerleme miktarı (dB)	Uç açısı (dB)	Kaplama durumu (dB)	
Kesme kuvveti	1	-62,05	-60,60	-61,71	-62,48
	2	-62,24	-62,08	-62,12	-62,33
	3	-62,74	-63,11	-62,88	
	4	-62,60	-63,83	-62,91	
	Fark	0,69	3,24	1,20	0,16
	Sıra	3	1	2	4
Kesici takım sıcaklığı	1	-35,08	-35,93	-34,68	-36,93
	2	-35,68	-36,06	-36,30	-36,08
	3	-36,75	-36,93	-37,04	
	4	-38,53	-37,12	-38,02	
	Fark	3,45	1,19	3,33	0,85
	Sıra	1	3	2	4

Şekil 5 ilerleme miktarı ve uç açısına bağlı kesme kuvvetlerinin değişimini, Şekil 6 ise kesme hızı ve uç açısındaki değişimlerin kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Her iki grafikte incelendiğinde grafikleri oluşturan çizgilerin eğrisel (dalgalı) olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmaların sebebinin grafikte dikkate alınmayan diğer kontrol faktörlerinin de (kesme kuvveti için; kesme hızı ve kaplama durumu, kesici takım sıcaklığı için; ilerleme miktarı ve kaplama

durumu) sonuçlar üzerinde etkili olduğunun bir kanıtı niteliğindedir ve istatistiksel verileri de doğrulamaktadır. Şekil 5 incelendiğinde ilerleme miktarının her artan değerinde kesme kuvvetlerinin yükseliş eğilimine girdiği, en düşük kesme kuvvetinin 0,025 mm/dev ilerleme miktarında, 90° uç açısına sahip matkaplarla delik delme sürecinde ölçüldüğünü görülmektedir. Kesme hızının artması ile kesici takım sıcaklık değerinde de ısı oluşumunun arttığı Şekil 6'da görülmektedir. Ayrıca kesici takım sıcaklığı üzerinde matkap uç açısındaki değişimde etkilidir. 140° uç açısına sahip matkaplarla yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçlar ısı oluşumunda yükseliş olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. İlerleme miktarı ve uç açısındaki değişimin kesme kuvveti üzerindeki etkileşimi



Şekil 6. Kesme hızı ve uç açısındaki değişimin kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkileşimi

Kesme kuvvetleri ve kesici takım sıcaklık değerlerinin kontrol faktörlerinden etkilenme oranları Varyans analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Burada; SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, F: Test istatistiği, P: Anlamlılık düzeyi, % katkı: Etki oranı ve R²: Determinasyon katsayısını ifade etmektedir.

Tablo 7, kontrol faktörlerine ait P değerleri açısından incelendiğinde; kesme kuvvetleri açısından ilerleme miktarı ve matkap uç açısı, kesici takım sıcaklığı açısından ise kesme hızı, matkap uç açısı ve kaplama durumunun istatistiki olarak etkili olduğu söylenebilir (P değeri $<0,05$). Tabloda F oranları incelendiğinde F oranlarının ilgili F ($\alpha:0,05$) dağılımı tablo değerinden büyük oldukları görülmektedir (F oranları > 6.61). Elde edilen sonuçlar yapılan analizinin doğruluğunu destekler niteliktedir. Determinasyon katsayılarının (R^2); kesme kuvveti için %98,75 ve kesici takım sıcaklığı için %97,36 oranlarında çıkması kalite karakteristikleri ile kontrol faktörleri arasındaki bağın oldukça kuvvetli olduğunu göstermektedir.

Tablo 7’de kesme kuvvetinin ve kesici takım sıcaklık değerlerinin kontrol faktörlerinden etkilenme oranları verilmiştir. Buna göre kesme kuvvetleri için ilerleme miktarı %81,77, uç açısı %13,76, kesme hızı %2,82 ve kaplama durumu %0,41 oranında etkiliyken, kesici takım sıcaklığı için ise kesme hızı %50,15, uç açısı %35,94, ilerleme miktarı %5,22 ve kaplama durumu ise %6,06 oranlarında etkilidir.

Tablo 7. Kesme kuvvet ve kesici takım sıcaklık değerleri S/N oranları için ANOVA

Kontrol faktörleri		SD	KT	KO	F oranı	P değeri	% Katkı
Kesme kuvveti	Kesme hızı	3	17728	5909	3,76	0,094	2,82
	İlerleme miktarı	3	514700	171567	109,17	0,000	81,77*
	Uç açısı	3	86609	28870	18,37	0,004	13,76
	Kaplama durumu	1	2558	2558	1,63	0,258	0,41
	Artık hata	5	7858	1572			1,25
	Toplam	15	629452				100,00
	R^2	%98,75					
Kesici takım sıcaklığı	Kesme hızı	3	1633,47	544,49	31,71	0,001	50,15*
	İlerleme miktarı	3	169,93	56,64	3,30	0,116	5,22
	Uç açısı	3	1170,62	390,21	22,73	0,002	35,94
	Kaplama durumu	1	197,40	197,40	11,50	0,019	6,06
	Artık hata	5	85,85	17,17			2,64
	Toplam	15	3257,28				100,00
	R^2	%97,36					
* En yüksek ekti oranı							

Taguchi metodu ile kalite karakteristikleri üzerinde kontrol faktörlerinin en uygun seviyelerinin belirlenebilmesi amacıyla optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyona göre kesme kuvvetleri açısından kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri A1-B1-C1-D2 (10 m/dak kesme hızı-0,025 mm/dev ilerleme miktarı-90° uç açısı-kaplamalı kesici takım), kesici takım sıcaklık değerleri açısından ise A1-B1-C1-D2 (10 m/dak kesme hızı-0,025 mm/dev ilerleme miktarı-90° uç açısı-kaplamalı kesici takım) olarak bulunmuştur (Şekil 3 ve Şekil 4). Daha sonra yapılan optimizasyonun test edilmesi gerekmektedir ve bunun için kontrol faktörlerinin en uygun seviyeleri için doğrulama deneylerinin ve tahminsel hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonuçları, tahminsel hesaplamalar ve karşılaştırmaları Tablo 8’de verilmiştir.

Kesme kuvvetinin tahminsel değerinin ($F_{c\ tah}$) hesaplanmasında Eşitlik 4 ve kesici takım sıcaklığının tahminsel değerinin (T_{tah}) hesaplanmasında Eşitlik 5 kullanılmıştır. Optimum kesme kuvvetinin ve kesici takım sıcaklığının elde edilebileceği kontrol faktörlerinin seviyeleri aynıdır (A1-B1-C1-D2). Eşitlik 4’de; $F_{c\ tah}$: A1-B1-C1-D2 kontrol faktörlerinin optimum koşulları için Fc değerinin aritmetik ortalaması ve $\overline{F_{c\ tah}}$: deneyler sonucunda elde edilen Fc değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Eşitlik 5’de ise; T_{tah} : A1-B1-C1-D2 kontrol faktörlerinin optimum koşulları için T değerinin aritmetik ortalaması ve $\overline{T_{tah}}$: deneyler sonucunda elde edilen T değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

$$F_{c_{tah}} = \overline{F_{c_{tah}}} + (\overline{A_1} - \overline{F_{c_{tah}}}) + (\overline{B_1} - \overline{F_{c_{tah}}}) + (\overline{C_1} - \overline{F_{c_{tah}}}) + (\overline{D_2} - \overline{F_{c_{tah}}}) \quad (4)$$

$$T_{tah} = \overline{T_{tah}} + (\overline{A_1} - \overline{T_{tah}}) + (\overline{B_1} - \overline{T_{tah}}) + (\overline{C_1} - \overline{T_{tah}}) + (\overline{D_2} - \overline{T_{tah}}) \quad (5)$$

$$CI = \sqrt{F_{0,05,(1,f_e)} Ve (1/\eta_{eff} + 1/r)} \quad (6)$$

$$\eta_{eff} = N/1 + U_T \quad (7)$$

Optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyi sonuçları Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanan güven aralığı (CI) değeri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Eşitlik 6 ve Eşitlik 7’te yer alan; $F_{0,05,(1,f_e)}$: $F_{0,05}$ test tablosundan hata serbestlik derecesini, Ve : Hata varyansını, η_{eff} : gerçek tekrar sayısını, r : doğrulama deneyi tekrar sayısını, N : toplam deney sayısını ve U_T : kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamını ifade etmektedir. Buna göre; Kesme kuvveti için: $F_{0,05,(1,f_e)} = 6,61$ (F test tablosundan) ve $Ve = 1572$, kesici takım sıcaklığı için: $F_{0,05,(1,f_e)} = 6,61$ (F test tablosundan) ve $Ve = 17,17$ (Tablo 7) değerleri ilgili tablolardan elde edilmiştir.

Deney tekrar sayısının hesaplanması, toplam deney sayısı ve kesme kuvveti üzerinde anlamlı etkisi olan kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamı Eşitlik 7’de yerine konulduğunda gerçek tekrar sayısı (η_{eff}) 1,45 olarak hesaplanmış ve doğrulama deneyi tekrar sayısı (r) 1 olarak uygulanmıştır.

İlgili değerler Eşitlik 6’da yerine konulduğunda Güven Aralığı (CI) = $\pm 119,53$ olarak bulunmuştur. Aynı işlemler kesici takım sıcaklığı için tekrarlanacak olursa; $F_{0,05,(1,f_e)} = 6,61$, $Ve = 17,17$, $\eta_{eff} = 1,45$, $r = 1$ ve $CI = \pm 12,49$ değerleri elde edilmiş olur.

Doğrulama deneyi sonucunda elde edilen F_c değeri ($F_{c_{den}} = 926,14$ N) belirlenmiş ve bu değere ait S/N oranı ($F_{c_{den}} S/N_{den} = -59,3335$ dB) Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır. Ayrıca Eşitlik 4 ile hesaplanan tahminsel $F_{c_{tah}}$ değeri ($F_{c_{tah}} = 920,16$ N) ve bu değere ait S/N oranı ($F_{c_{tah}} S/N_{tah} = -59,4658$ dB) Eşitlik 1 yardımıyla bulunmuştur. Aynı işlemler kesici takım sıcaklığı için tekrarlanacak olursa; $T_{den} = 40,04$ °C, $T_{den} S/N_{den} = -32,0499$ dB, $T_{tah} = 38,54$ °C ve $T_{tah} S/N_{tah} = -32,2433$ dB olarak bulunur (Tablo 8).

Tablo 8. Yapılan doğrulama deneyi sonuçları ve tahminsel hesaplamaların karşılaştırılması

Kalite karakteristiği	Doğrulama deneyleri		Tahminsel hesaplamalar		Farklar	
	$F_{c_{den}}$ (N)	$F_{c_{den}} S/N_{den}$ (dB)	$F_{c_{tah}}$ (N)	$F_{c_{tah}} S/N_{tah}$ (dB)	$ F_{c_{den}} - F_{c_{tah}} $ (N)	$ F_{c_{den}} S/N_{den} - F_{c_{tah}} S/N_{tah} $ (dB)
Kesme kuvveti	926,14	-59,3335	920,16	-59,4658	5,98	0,1323
Kesici takım sıcaklığı	T_{den} (°C)	$T_{den} S/N_{den}$ (dB)	T_{tah} (°C)	$T_{tah} S/N_{tah}$ (dB)	$ T_{den} - T_{tah} $ (°C)	$ T_{den} S/N_{den} - T_{tah} S/N_{tah} $ (dB)
	40,04	-32,0499	38,54	-32,2433	1,5	0,1934

Bu sonuçlara göre: kesme kuvveti için $F_{c_{den}} S/N_{den}$ oranı (-59,3335 dB) ile $F_{c_{tah}} S/N_{tah}$ oranı -59,4658 dB) arasındaki mutlak fark 0,1323 dB, kesici takım sıcaklığı için ise $T_{den} S/N_{den}$ oranı (-32,0499 dB) ile $T_{tah} S/N_{tah}$ oranı (-32,2433 dB) arasındaki mutlak fark 0,1934 dB çıkmıştır. Her iki kalite karakteristiği için de bu farkların Eşitlik 6 ile hesaplanan güven aralığı (CI) değerlerinden küçük olduğu görülmektedir ($0,1323 < 119,53$) ve ($0,1934 < 12,49$).

Başka bir ifadeyle;

Kesme kuvveti için:

$$F_{c_{tah}} S/N_{tah} - CI < F_{c_{den}} S/N_{den} < F_{c_{tah}} S/N_{tah} + CI$$

$$-59,4658 - 119,53 < -59,3335 < -59,4658 + 119,53 \rightarrow -178,9958 < -59,3335 < 60,0642$$

Kesici takım sıcaklığı için ise:

$$T S/N_{\text{tah}} - CI < T S/N_{\text{den}} < T S/N_{\text{tah}} + CI$$

$$-32,2433 - 12,49 < -32,0499 < -32,2433 + 12,49 \rightarrow -44,7333 < -32,0499 < -19,7533 \text{ bulunmuş olur.}$$

Elde edilen bu sonuçlara göre, Taguchi metoduyla HSS matkaplarla ticari saflıktaki bakır malzemenin delinmesinde kesme kuvveti ve kesici takım sıcaklığı açısından 0.05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyonun uygun olduğu görülmüştür.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme miktarı, matkap uç açısı ve kaplama durumu olarak 4 kontrol faktörü kullanılarak ticari saflıktaki bakır malzemenin HSS kesici takımlarla delinmesi kesme kuvveti ve kesici takım sıcaklığı kalite karakteristikleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları regresyon analizi ve Taguchi metodu istatistiksel yöntemleriyle değerlendirilmiş ve doğrulama deneyleri ile yapılan optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir.

- Kesme kuvveti üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin önem sıralaması sırasıyla ilerleme miktarı, uç açısı, kesme hızı ve kaplama durumu olmuştur.
- Kesici takım sıcaklığı üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin önem sıralaması sırasıyla kesme hızı, uç açısı, ilerleme miktarı ve kaplama durumu olduğu görülmüştür.
- Kesme kuvveti açısından ilerleme miktarının %81,77, kesici takım sıcaklığı açısından ise kesme hızının %50,15 oranlarında sonuçlar üzerinde etkili olduğu hesaplanmıştır.
- Kesme kuvveti ve takım sıcaklığı üzerinde belirlenen diğer kontrol faktörleri de istatistiksel olarak anlamlıdır.
- Her matkap uç açısı için ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetleri yükseliş eğilimine girmektedir. En düşük kesme kuvvetleri düşük uç açısına sahip matkaplarla ölçülmüştür.
- Kesme hızının artması kesme bölgesinde daha yoğun bir ısı oluşumuna ne den olmuştur. Matkap uç açısının artması da kesici takıma geçen ısıyı olumsuz yönde etkilemiştir.
- Kesme kuvveti ve kesici takım sıcaklığı açısından 0,05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyonun uygun olduğu görülmüştür.
- Yapılan optimizasyona göre kesme kuvvetleri ve kesici takım sıcaklık değerleri açısından kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; 10 m/dak kesme hızı, 0,025 mm/dev ilerleme miktarı, 90° uç açısı, kaplamalı kesici takım olarak bulunmuştur.

Kaynaklar

- [1]. Kuyucak, S., Sahoo, M., A review of the machinability of copper-base alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 1996, 35(1), 1-15.
- [2]. Xiong, X., Sheng, H.C., Chen, J., Yao, P.P., Effects of sintering pressure and temperature on microstructure and tribological characteristic of Cu-based aircraft brake material, Trans. Nonferrous Met. Soc. of China., 2007, 17, 669-675.
- [3]. Ulutaş, A., Turhan, H., Çinici, H., Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ferrobör takviyeli bakır kompozitinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 2016, 18(1), 10-20.
- [4]. Tylecote, R.F., Kupfer in natur, technik, kunst und wirtschaft, Norddeutsche Affinerie Private Sendung, 28, 1966, Hamburg.
- [5]. Tjong, S.C., Lau, K.C., Tribological behaviour of SiC particle-reinforced copper matrix composites, Materials Letters, 2000, 43, 274-280.

- [6]. Schmidt, R.F., Schmidt, D.G., Selection and application of copper alloy castings, ASM Handbook II, 1993, 346-355.
- [7]. Ünlü, B.S., Köksal, N.S., Atik, E., Bakır esaslı bronz ve pirinç yatakların tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2003, 5(2), 103-108.
- [8]. Kurt, M., Kaynak, Y., Bakır, B., Köklü, U., Atakök, G., Kutlu, L., Experimental investigation and Taguchi optimization for the effect of cutting parameters on the drilling of Al 2024-t4 alloy with diamond like carbon (DLC) coated drills, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats'09), 2009, Karabük, Türkiye.
- [9]. Colligan, K., New tool drills both titanium and carbon composites, American Machinist, 1994, 138(10), 56-58.
- [10]. Kim, D., Ramulu, M., Cutting and drilling characteristics of hybrid titanium composite laminate (HTCL), In Proceedings of Materials and Processing Technologies for Revolutionary Applications Fall Technical Conference, 2005, Seattle, Washington, USA.
- [11]. Lambert, B.K., Prediction of force, torque and burr length in drilling titanium-composite materials, SME Technical Paper, 1979, MR79-363.
- [12]. Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., Turgut, Y., Delik delme prosesi: bir araştırma, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2017, 21(2), 120-130.
- [13]. Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M., AISI 1050 Malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisinin çoklu regresyon yöntemiyle modellenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2011, 8(1), 37-46.
- [14]. Dhar, N.R., Ahmed, N.T., Islam, S., An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47, 748-753.
- [15]. Çakır, A., Bahtiyar, O., Şeker, U., Farklı soğutma şartları ile farklı kesme parametrelerinin AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımlarında delik delme işlemlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi, 16. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 2014, İzmir, Türkiye.
- [16]. Bahçe, E., Kılıçkap, E., Özel, C., Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması, 2.Ulusal Tasarım İmalat ve Analizi Kongresi, 2012, Balıkesir, Türkiye.
- [17]. Lin, S.C., Ting, C.J., Tool wear monitoring in drilling using force signals, Wear, 1995, 180(1-2), 53-60.
- [18]. Yang, L.P., Huang, L.X., Wang, C.Y., Zheng, L.J., Ma, P., Song, Y.X., Drilling force and chip morphology in drilling of PCB supported hole, Advanced Materials Research, 2011, 188, 429-434.
- [19]. Vergara, J., Damm, S., Villanueva, J., Godoy, J.M., Tikal, F., Bush making by thermal flow drilling in copper and brass, The International Journal for Manufacturing Science & Production, 2001, 4(2), 103-111.
- [20]. Tang, H.Q., Wen, J., Wang, C.Y., Wu, L.S., Song, Y.X., Simulation of drilling on the copper of PCB with Ultra-high-speed, Advanced Materials Research, 2011, 188, 739-742.
- [21]. Moriwaki, T., Akira, H., Okuda, K., Effect of cutting heat on machining accuracy in ultra-precision diamond turning, CIRP Annals, 1990, 39(1), 81-84.
- [22]. Zhang, H., Zhang, X., Factors affecting surface quality in diamond turning of oxygen-free high-conductance copper, Applied Optics, 1994, 33(10), 2039-2042.
- [23]. Breton, S.B., Gravier, J., Vignal, V., Impact of superfinish turning on surface integrity of pure copper, Procedia Engineering, 2011, 19, 28-33.
- [24]. Mahajan, K.A., Sasalah, M., Gawande, S.H., Experimental investigations of surface roughness on OFHC copper by diamond turning machine, International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(10), 5215-5220.

- [25]. Tanaka, H., Shimada, S., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Kaneeda, T., Obata, K., Mechanism of cutting edge chipping and its suppression in diamond turning of copper, *CIRP Annals*, 2005, 54(1), 51-54.
- [26]. Shimada, S., Inamura, T., Higuchi, M., Tanaka, H., Ikawa, N., Suppression of tool wear in diamond turning of copper under reduced oxygen atmosphere, *CIRP Annals*, 2000, 49(1), 21-24.
- [27]. Rahman, M., Kumar, A.S., Prakash, J.R.S., Micro milling of pure copper, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 116(1), 39-43.
- [28]. Gökçe, H., Yavuz, M., Karayel, M., İmalat süreçlerinde kesme kuvvetlerinin belirlenmesi amaçlı dinometre tasarımı ve imalatı, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2017, 3(2): 27-32.
- [29]. Matweb material data sheet, son erişim tarihi: 01.05.2020, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aeb83845c04c1db5126fada6f76f7e>.
- [30]. Başar, G., Kahraman, F., Delik işleme prosesinde kesme parametrelerinin Taguchi metodu ve regresyon analizi kullanılarak modellenmesi ve optimizasyonu, 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017), 2017, 688-695.
- [31]. Karaca, F., Cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerde delme parametrelerinin deformasyon faktörüne etkisinin araştırılması, *Science and Eng. J of Fırat Univ.*, 2016, 28(2), 23-27.
- [32]. Bayraktar, Ş., Turgut, Y., Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi üzerine bir araştırma, 3.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 2012, Ankara, Türkiye.
- [33]. Meral, G., Dilipak, H., Sarıkaya, M., AISI 1050 malzemenin delinmesinde ilerleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün regresyon analiziyle modellenmesi, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2011, 4(1), 31-41.
- [34]. Yılmaz, V., Yılmaz, C.Y., Sarıkaya, M., Özdemir, M., Modelling of performance output in the hole drilling process with different electrodes to X10CrAlSi24 sheet material, *ISITES 2015 Valencia –Spain*, 1032-1041.
- [35]. Başak, H., Baday, Ş., In processing of a spheroidized medium carbon steel, modelling with regression analysis of cutting forces and surface roughness affected by cutting parameters, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 2016, 22(4), 253-258.
- [36]. Aydemir, M.E., Bazı optimizasyon yöntemlerinin yama anten problemlerindeki performansı, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2014, 29(3), 579-588.
- [37]. Saat, M., Kalite denetiminde Taguchi yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2000, 3, 97-108.
- [38]. Çiftçi, İ., Gökçe, H., Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2019, 34(1), 201-213.
- [39]. Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H., Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 145, 84-92.
- [40]. Günay, M., Optimization with Taguchi method of cutting parameters and tool nose radius in machining of AISI 316l steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2013, 28(3), 437-444.
- [41]. Canel, T., Zeren, M. Sınmazçelik, T., Laser parameters optimization of surface treating of Al 6082-T6 with Taguchi method, *Optic & Laser Technology*, 2019, 120, 105714.
- [42]. Terzioğlu, H., Analysis of effect factors on thermoelectric generator using Taguchi method, *Measurement*, 2020, 149, 106992.
- [43]. Pinar, A.M., Uluer, O., Kirmaci, V., Optimization of counter flow Ranque–Hilsch vortex tube performance using Taguchi method, *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(6), 1487-1494.

- [44]. Maiyar, L.M., Ramanujam, R., Venkatesan, K., Jerald, J., Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis, *Procedia Engineering*, 2013, 64, 1276-1282.
- [45]. Gökçe, H., Çiftçi, İ., Demir, H., Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure molybdenum, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40, 360.
- [46]. Korkmaz, M.E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R., Günay, M., Al2014 Alüminyum alaşımının delinmesinde itme kuvvetinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2019, 6(1), 193-199.
- [47]. Çaydaş, U., Çelik, M., AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması, *Journal of Polytechnic*, 2017, 20(2), 419-425.
- [48]. Bayraktar, Ş., Investigating of effects on thrust force and burr height of cutting parameters in dry drilling of Al-5083 alloy, *16th International Materials Symposium (Imsp'2016)*, 2016, 64.
- [49]. Elitaş, M., Çiftçi, İ., Sertleştirilmiş AISI 52100 malzemenin aşındırıcı diskle kesilmesinin araştırılması, *Türk Bilim Araştırma Vakfı*, 2017, 10(2), 1-10.
- [50]. Oezkaya, E., Büvker, M., Strodick, S., Biermann, D., A thermomechanical analysis leading to a novel flank face design providing longer tool lives for tools used in the drilling of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102, 2977-2992.