



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Al 6061-T6 alaşımasının delinmesinde proses parametrelerinin ve matkap geometrisinin performans analizi

Performance analysis of process parameters and drill geometry in drilling AA 6061-T6 alloy

Yazar(lar) (Author(s)): Cihat ÖZDEMİR¹, Barış ÖZLÜ², Halil DEMİR³

ORCID¹: 0000-0002-0083-0165

ORCID²: 0000-0002-8594-1234

ORCID³: 0000-0002-9802-083X

To cite to this article: Özdemir C., Özlü B. ve Demir H., “Al 6061-T6 alaşımasının delinmesinde proses parametrelerinin ve matkap geometrisinin performans analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(5): 2043-2059, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Özdemir C., Özlü B. ve Demir H., “Al 6061-T6 alaşımasının delinmesinde proses parametrelerinin ve matkap geometrisinin performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 27(5): 2043-2059, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1535204

Al 6061-T6 Alaşımının Delinmesinde Proses Parametrelerinin ve Matkap Geometrisinin Performans Analizi

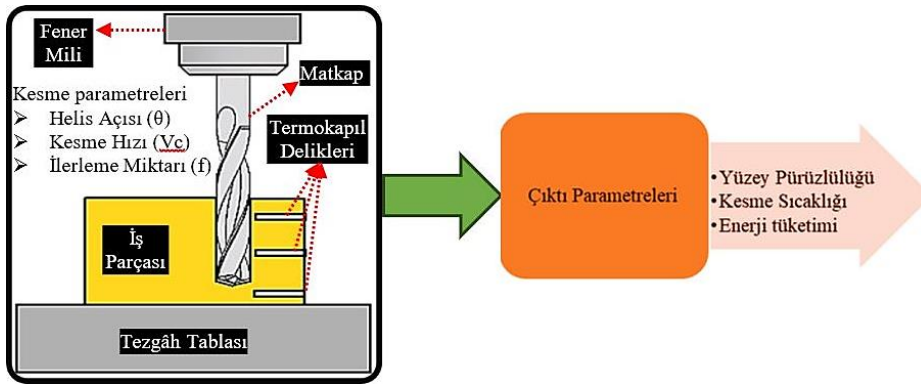
Performance Analysis of Process Parameters and Drill Geometry in Drilling AA 6061-T6 Alloy

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Al 6061-T6 Alaşımının Delinmesi / Drilling of Al 6061-T6 Alloy
- ❖ ANOVA ile en etkin parametrenin belirlenmesi / Determining the most effective parameter with ANOVA
- ❖ Kesme parametrelerinin optimizasyonu / Optimization of cutting parameters

Grafik Özet (Graphical Abstract)

AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve helis açılarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi üzerine etkisi araştırılmıştır. / The drilling of AA 6061-T6 alloy investigated the effect of cutting parameters and helix angles on surface roughness, cutting temperature, and energy consumption.



Şekil. Çalışma için oluşturulan deney düzeneği./Figure. Experimental setup created for the study.

Amaç (Aim)

Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde çıktı parametreleri için optimum kesme parametrelerinin deneysel ve istatistiksel olarak belirlenmesidir. / The experimental and statistical determination of optimal cutting parameters for output parameters in the drilling of Al 6061-T6 alloy.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Deney sonuçları sinyal/gürültü oranı (S/N), varyans ve regresyon analizi kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirildi. Ayrıca Ra, T ve ET değişkenleri Gri İlişkisel Analiz (GRA) kullanılarak optimize edildi. / The experimental results were statistically evaluated using signal-to-noise ratio (S/N), variance, and regression analysis. Additionally, the variables Ra, T, and SEC were optimized using Grey Relational Analysis (GRA).

Özgünlük (Originality)

Farklı optimizasyon yöntemleri ile helis açıları ve kesme parametrelerinin performanslarının karşılaştırılması. / Comparison of the performances of helix angles and cutting parameters with different optimization methods.

Bulgular (Findings)

Matkap helis açılarının ve kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkileri değerlendirildi. / The effects of drill helix angles and cutting parameters on output parameters were evaluated.

Sonuç (Conclusion)

Geliştirilen matematiksel modeller ile tahmin edilen sonuçlar yüksek doğruluktadır. Ayrıca matkap uçlarında BUE ve talaş yapışmalarının olduğu görülmüştür. / The results predicted with the developed mathematical models are highly accurate. It has also been observed that BUE and chip adhesion occur in the drill bits.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Al 6061-T6 Alaşımının Delinmesinde Proses Parametrelerinin ve Matkap Geometrisinin Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Cihat ÖZDEMİR¹, Barış ÖZLÜ^{2*}, Halil DEMİR³

¹Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

²Aksaray Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojisi Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Aksaray

³Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017 ; Erken Görünüm/Early View : 07.10.2024)

ÖZ

Yapılan çalışmada, AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametresinin ve matkap helis açısının yüzey pürüzlülüğüne (Ra), kesme sıcaklığına (T) ve enerji tüketimine (ET) etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Delme deney tasarımı Taguchi L27 ortogonal dizilimi kullanılarak hazırlanmıştır. Kesme parametreleri ve matkap helis açıları Ra, T ve ET değerleri kullanılarak optimize edilmiştir. Deney sonuçları ilk olarak üç boyutlu grafikler ile değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler sinyal/gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA), regresyon analizi ve doğrulama testleri yapılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bunlara ek olarak, Gri İlişkisel Analiz (GRA) kullanılarak Ra, T ve ET değişkenleri birlikte optimize edildi. Bu çalışmanın sonucunda, optimum Ra, T ve ET değerlerine sırası ile A3B3C1, A1B1C1 ve A1B3C3 deney kombinasyonlarında ulaşılmıştır. Ra, T ve ET üzerine en etkin parametre sırası ile 54.93% f, 52.02% kesme hızı (Vc) ve 68.12% ilerleme miktarı (f) olduğu görülmüştür. GRA analizi sonucu Ra, T ve ET için optimum deney kombinasyonu A1B1C1 olmuştur. Analizler sonucu geliştirilen matematiksel modeller ile tahmin edilen sonuçlar yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca matkap uçlarında genel olarak BUE ve talaş yapışmalarının oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Al 6061-T6 Alaşımı, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı, Enerji Tüketimi, Taguchi Yöntemi ve Grey İlişkisel Analizi.

Performance Analysis of Process Parameters and Drill Geometry in Drilling AA 6061-T6 Alloy

ABSTRACT

In the study conducted aims to investigate the effects of cutting parameters and drill helix angle on surface roughness (Ra), cutting temperature (T) and energy consumption (SEC) in drilling AA 6061-T6 alloy experimentally and statistically. Drilling experimental design was prepared using Taguchi L27 orthogonal array. Cutting parameters and drill helix angles were optimized using Ra, T and ET values. Experimental results were first evaluated with three-dimensional graphics. Obtained data were statistically analysed by performing signal/noise ratio (S/N), analysis of variance (ANOVA), regression analysis and verification tests. In addition, Ra, T and ET variables were optimized together using Grey Relational Analysis (GRA). As a result of this study, optimum Ra, T and ET values were reached in A3B3C1, A1B1C1 and A1B3C3 experimental combinations, respectively. The most effective parameters on Ra, T and ET were found to be 54.93% f, 52.02% cutting speed (Vc) and 68.12% feed rate (f) respectively. The optimum experimental combination for Ra, T and ET was A1B1C1 as a result of GRA analysis. The results predicted with the mathematical models developed as a result of the analyses were found to yield high-accuracy results. In addition, it was observed that BUE and chip adhesion generally occurred in the drill bits.

Keywords: Al 6061-T6 Alloy, Surface Roughness, Cutting Temperature, Energy Consumption, Taguchi Method and Gray Relational Analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda gelişen ürün yelpazesinde kullanılacak malzemelerde daha güçlü, daha hafif ve uygun maliyet gibi özelliklere olan talep artmaktadır. Özellikle üretim endüstrisinin lokomotif alanlarından olan otomotiv, uçak ve havacılık endüstrilerinde, ulaşım ve inşaat sektörlerinde mükemmel korozyona direnci, yüksek özgül dayanım, düşük maliyet ve geri dönüşüm kabiliyetleri nedeniyle Alüminyum alaşımlar en çok

aranan malzemeler arasına girmiştir. Özellikle ısıl işlem prosesleri sonucu çökeltme ile mekanik özellikleri iyileştirilen Al 6061-T6 alaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır [1-4].

Üretim sektöründe parçaların işlenmesinde tormalama, frezeleme ve taşlama gibi talaşlı imalat operasyonlara göre delme operasyonu daha yaygın kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde Al 6061-T6 alaşımının kullanılarak araçlar için gerekli olan imalatında ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : barisozlu@aksaray.edu.tr

parçaların montajında perçin ve civata bağlantıları için milyonlarca delik gerektiğinden matkapla delme işlemi 40% ile en önemli talaşlı imalat süreçlerinden biri olmuştur [5-8]. Delme işlemi sırasında kesme parametrelerine, matkap geometrisine, takım ve iş parçasına malzemesinin neden olduğu sürtünme yüzey pürüzlülüğünün, kesme kuvvetinin ve kesme sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu sonuçlar işlenen yüzeylerin çevresinde yorulma arızasının artmasına ve stres yoğunlaşmasına neden olarak üretilen parçaların servis ömrünün azalmasına neden olur [9-11]. Ayrıca delme işlemi sırasında kesme parametrelerinin ve matkap geometrisinin optimum değerlerinin bulunması üretim maliyetini düşürür ve üretilen parçanın kalitesinin artmasına neden olur. Bunlarla birlikte küresel ısınmanın ana nedenlerinden birinin de üretim sektörünün olduğu ifade edilmiştir. İmalat sektöründe tüketilen elektrik enerjisi üzerine yapılan araştırmalarda, üretim sırasında kullanılan makinelerin tükettiği elektrik enerjisi 54% karşılık gelmektedir [12,13]. Özellikle talaşlı imalat sektöründe kullanılan makinaların kesme parametrelerine bağlı tüketilen elektrik enerjisinin azaltılmasına yönelik son yıllarda yapılan çalışmalar artmıştır [14-16].

Literatürde alüminyum alaşımların delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap geometrisinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, enerji tüketimi ve boyutsal hatalar gibi çıktı parametrelerine etkilerinin değerlendirildiği farklı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerine ve soğutma yöntemlerinin güç tüketimine, çapak oluşumuna, çap ve dairesellikteki hataya, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Soğutma yöntemlerinin, kesme hızının ve ilerleme miktarının güç tüketimi üzerine etkisinin çok az olduğunu bildirmişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan parametrelerin boyutsal hatalar üzerinde net bir etkisinin olduğu görülmemiştir. Soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş kalınlığı üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kesme hızının ve ilerleme miktarının artırılması yüzey pürüzlülüğünü artırdığını, kesme hızının artırılması ve ilerleme miktarının azaltılması ile talaş kalınlığının artma eğilimi gösterdiğini ifade etmişlerdir [17]. Al 2024-T351 alaşımının yağlamaya ihtiyaç duymadan delinmesi için optimize edilmiş takım geometrisinin ve kesme parametrelerinin geliştirilmesi için hem deneysel hem de nümerik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada, matkabın helis açısının, uç açısının artırılması ve boşluk açısını 6° ile 8° arasında sabitlemenin optimum matkap geometrisini verdiği ifade edilmiştir. Kesme hızının artırılması ve ilerleme miktarının azaltılması ile yüzey kalitesinin ve deliklerin boyutsal doğruluğunun arttığı sonucuna varmışlardır. Matkap kaplama malzemesi olarak elmasın kullanılması takım ömrünü artırdığını rapor etmişlerdir [18]. AA (6351)-B4C kompozit malzemesinin delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap uç açısının itme kuvvetine, yüzey pürüzlülüğüne

ve kesme sıcaklığına etkisini analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, düşük devir sayılarında, ilerleme miktarlarında ve matkap uç açılarında minimum kesme sıcaklıklarının elde edilebileceğini, fakat devir sayısının ile matkap uç açısının artırılması ve ilerleme miktarının azaltılması ile pürüzlülük kalitesinin artacağı ifade edilmiştir [19]. AA-6063 alaşımının delinmesinde kesme hızının ve bitkisel bazlı minimum miktarda yağlamanın (MQL) itme kuvvetine ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, bitkisel bazlı MQL ile pürüzlülük kalitesinin arttığı, eksenel ve itme kuvvetinin ise azalmasına neden olduğunu bildirmişlerdir [20]. Al6061-T651 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve kesici takım kaplamasının yüzey kalitesi, form ve delinmiş deliklerin boyutsal toleransları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. TiN kaplı takımların kullanıldığı deneylerde maksimum yüzey pürüzlülüğü, daha düşük delik dairesellik ve daha yüksek silindiriklik sağladığını ifade etmişlerdir [21]. Al2024-T3 havacılık alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kesme parametrelerinin delik kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük ilerleme miktarı ile yüksek kesme hızlarında pürüzlülük kalitesinin minimum, delik sapmasının, dairesellik hatasının ve çapak oluşumunun nominal değerde olduğunu rapor etmişlerdir [22]. AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde ilerleme miktarının ve matkap uç açısının ilerleme kuvvetine, yüzey pürüzlülüğüne ve kesme sıcaklığına etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, Yüzey pürüzlülüğünün ve itme kuvvetinin ilerleme miktarının ve matkap uç açısının artması ile arttığını bilmişlerdir. Kesme sıcaklığı ilerleme miktarının ve matkap uç açısının artması ile arttığını gözlemlemişlerdir [23].

Yapılan çalışmayla ilgili literatür taraması değerlendirildiğinde, farklı malzemelerin delinmesinde farklı kesme parametrelerinin, soğutma/yağlama yöntemlerinin, matkap çapının, uç açısının, helis açısının, kaplama malzemesinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme sıcaklığı, enerji tüketimine ve deliklerin boyutsal doğruluğunu inceleyen farklı çalışmaların olduğu görülmüştür. Ancak Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap helis açılarının Ra, T ve ET'ne etkilerini inceleyen araştırmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu nedenle Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve helis açılarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi değişimine etkileri istatistiksel ve deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. İş Parçası, Kesici Takım, Takım Tezgâhi (Workpiece, Cutting Tool, Machine Tool)

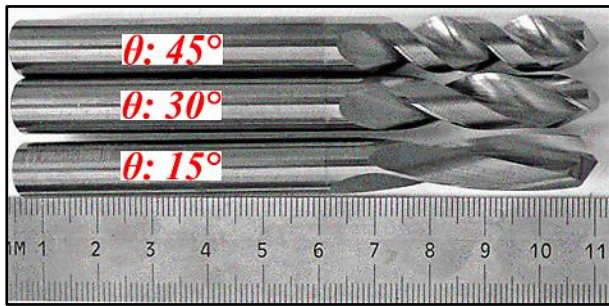
Deneylerde iş parçası olarak savunma sanayisinde ve havacılık endüstrisinde parça üretiminde artan sıklıkta tercih edilen 80x30x130 mm ölçülerinde AA 6061-T6

alaşımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan AA 6061-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. İş parçası olarak kullanılan AA 6061-T6'nın kimyasal bileşimleri. (Chemical compositions (% wt) of Al 6061-T6 used as workpiece.)

Elementler							
Mg	Si	Cr	Mn	Ti	Cu	Zn	Fe
0,86	0,55	0,19	0,07	0,04	0,32	0,08	0,44

Deneylerde kullanılmak üzere kaplamasız karbür çubuklardan 10 mm çapında 120° uç açısında ve üç farklı helis açısına sahip matkaplar özel olarak üretilmiştir. Delme işlemlerinde her bir deney kombinasyonu için yeni kesici takım kullanılmıştır. Deneyler için özel olarak üretilen matkapların görseli Şekil 1'de sunulmuştur. Delme deneyleri 18.5 kW güce sahip Hanssa YH 1600-A marka CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan matkaplar. (Drills used in the experiments.)

2.2. Çıktı Parametrelerinin Ölçümü (Measurement of Output Parameters)

Tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenen parçalarda kaliteyi belirleyen en önemli çıktı parametrelerden biri yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğünün kesici takım geometrisi, kesme parametreleri, kesici takım tipi ve kaplaması, soğutma ortamı gibi birçok parametre etkilemektedir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek ve maliyeti düşürmek için bu parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir [24,25]. Yapılan çalışmada delik yüzeylerinin pürüzlülük ölçümünde Mitutoyo firması tarafından üretilen SurfTest SJ-210 model taşınabilir ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numuneler delik eksenine dik olacak şekilde kesilerek her numune üzerinden dört ölçüm yapılmıştır. Ortalama Ra değeri dört ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir. Delme işlemi sırasında iş parçasının fiziksel özellikleri, kesici takım geometrisi ve kaplaması, kesme parametreleri ve talaş derinliği gibi parametreler kesme bölgesindeki sıcaklığın değişimini etkilemektedir. Delme işlemi esnasında kesme bölgesinde oluşan ısının kontrol edilmesinde -200/1200 °C ısı ölçebilen 2 mm çapındaki K tipi termokapıl tercih edilmiştir. Termokapıllar delik eksenine dik olacak şekilde delik yüzeyine 0,2 mm kalana kadar delinen deliklere yerleştirilmiştir. Pico marka 8 kanallı Data

Logger ısı verilerinin toplanmasında kullanılmıştır. Veriler diz üstü bilgisayara aktarılarak değerlendirilip grafiklere dönüştürülmüştür. Şekil 2-b'de ısı ölçümü sırasında kullanılan veri okuma sürecinde kullanılan akış şeması verilmiştir. Delme işlemi sırasında her deney kombinasyonunda tezgâhın şebekeden çektiği enerjinin ölçümünde Lutron marka DW-6095-3 model faz güç analizörü kullanılmıştır. Üç faz akım probu (CP-1201) CNC freze tezgahının enerji girişindeki üç faza bağlanarak tezgâhın boşta kullandığı enerji tüketimi ölçülmüştür. Her bir deneyde yapılan delme işlemi sırasında CNC freze tezgahının harcadığı enerji ölçülmüştür. Kesme parametrelerinin enerji tüketimine etkilerini belirlemek için tezgâhın boşta harcadığı enerji değerini delme sırasında harcanan enerji değerlerinden çıkarılmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan matkapların aşınma görüntüleri ve delme sırasında oluşan talaşların görüntüleri 1600x1200 çözünürlüğe sahip Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır. Çalışmada oluşturulan deney düzeneği Şekil 2-a'da verilmiştir.

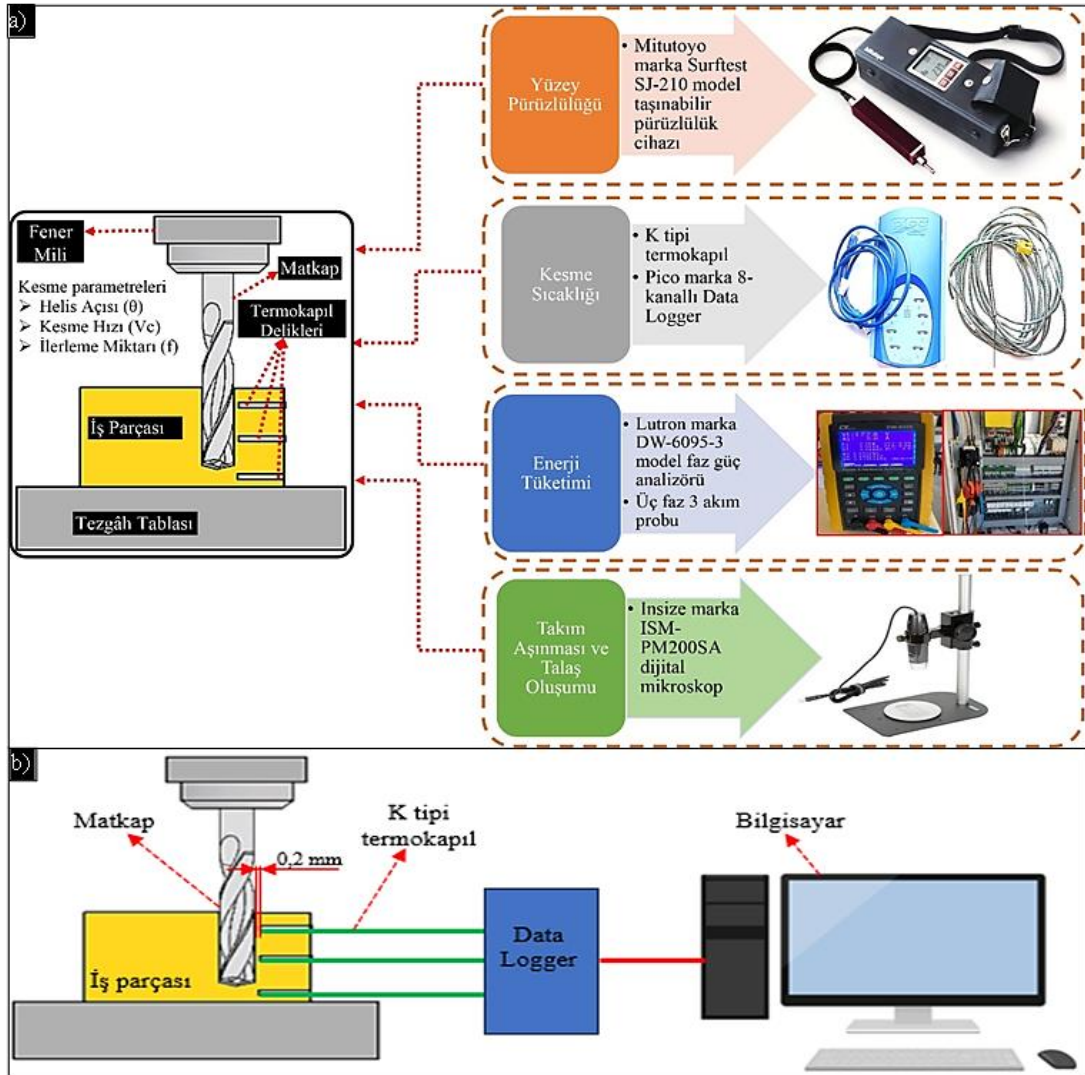
2.3. Deney Tasarımı (Experimental Design)

Taguchi yöntemi, deney sayısını ve maliyeti düşürerek ürün kalitesini artırmak için uygulanan, deney tasarımı ve verilerin analiz ilişkisini sistematik olarak ortaya koyan güçlü istatistiksel yöntemlerinden biridir [26,27]. Bu nedenle yapılan çalışmanın deney tasarımında Taguchi yönteminin L27 (3³) ortogonal dizilimi (OA) kullanıldı. Kesme parametresi olarak θ , Vc ve f dikkate alınırken, çıktı parametresi olarak Ra, T ve ET dikkate alınmıştır. Tablo 2'de deneyler için seçilen kesme parametreleri ve seviyeleri görülmektedir.

Tablo 2. Taguchi L27 için kesme parametreleri ve seviyeleri. (Cutting parameters and levels for Taguchi L27)

Semboller	Seviyeler	Kesme Parametreleri		
		Helis açısı θ , (°)	Kesme hızı Vc, (m/dak)	İlerleme miktarı f, (mm/dev)
A	1	15	40	0,05
B	2	30	70	0,1
C	3	45	100	0,15

Yapılan deneyler sonucunda optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi için Sinyal/Gürültü (S/N) oranı uygulanmıştır. Yapılan çalışmada Ra, T ve ET değerlerinin



Şekil 2. Çalışma için oluşturulan deney düzenekleri. a) Deney akış şeması, b) Isı ölçüm akış şeması. (Experimental setups created for the study. a) Experimental flow chart, b) Heat measurement flow chart)

olması arzu edildiğinden S/N oranlarının hesaplanmasında Eşitlik 1'de verilen "en küçük en iyi" yaklaşımı kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etki düzeylerinin belirlenmesi için Varyans (ANOVA) analizi kullanılmıştır. Ayrıca kesme parametreleri ile çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır.

$$n = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Ayrıca, Taguchi yöntemi ile her bir çıktı parametresi için ayrı ayrı optimum kesme parametrelerinin bulunmuştur. Ancak talaşlı imalatta tüm çıktı parametrelerini en iyi kesme parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bunun için tüm çıktı parametreleri için optimum kesme parametre kombinasyonlarının bulunması için Tablo 3'de verilen eşitlikler uygulanarak gri ilişki analizi (GRA) gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Gri ilişki analizinde kullanılan denklemler ve adımlar. (Equations and steps used in gray relationship analysis)

Adım	Formüller
1	"n" tane değişkenin oluşturduğu faktör serisi; $x_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n))$
2	Verilerin normalize edilmesi. En büyük en iyi: $x_i(k) = (x_i^0(k) - \min x_i^0(k)) / (\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k))$ Nominal en iyi: $x_i(k) = (x_i^0(k) - x^0) / (\max x_i^0(k) - x^0)$ En küçük en iyi: $x_i(k) = (\max x_i^0(k) - x_i^0(k)) / (\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k))$
3	x_i serisi ile karşılaştırılacak m tane seri $x_i = (x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n)), i = 1, 2, 3, \dots, m$
4	Gri ilişki katsayısının hesaplanması $\epsilon(x_0(k), x_i(k)) = (\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}) / (\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{\max})$ $\Delta_{oi}(k) = x_0(k) - x_i(k) $ $\Delta_{\min}(k) = \min_i \min_k x_0(k) - x_i(k) $ $\Delta_{\max}(k) = \max_i \max_k x_0(k) - x_i(k) $
5	Gri ilişki derecesi $\gamma(x_0, x_i) = 1/n \sum_{k=1}^n \epsilon(x_0(k), x_i(k))$ $\gamma(x_0, x_i) = 1/n \sum_{k=1}^n W_k \epsilon(x_0(k), x_i(k))$

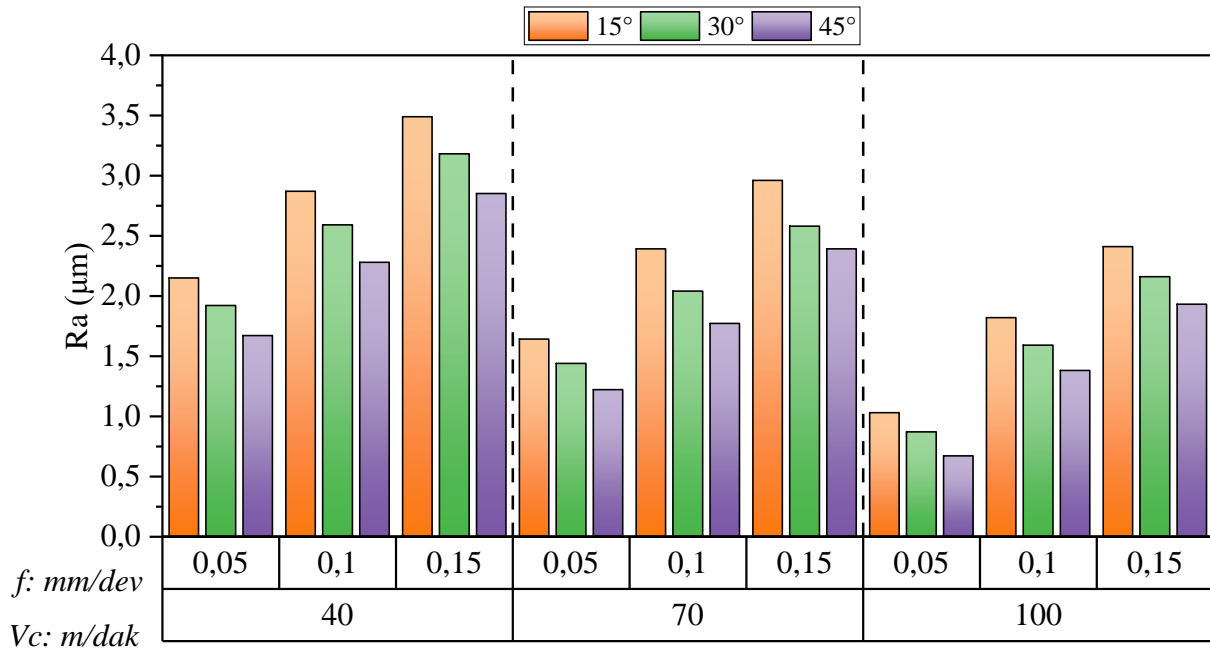
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. YüzeY Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Talaşlı imalat operasyonlarında özellikle delik delme işleminde yüzeY pürüzlülüğü, işlenen parçanın kalitesini ve kullanım ömrünü etkilediği için önemli çıktı parametrelerinden biridir. Özellikle delme operasyonlarında iş parçasının kalınlığına bağılı talaş tahliyesinin zorlaşması en önemli sorunlardan biri olarak ifade edilmiştir. Tahliyesi zorlaşan talaşın işlenen yüzeYe yapışarak yüzeY pürüzlülüğünün artmasına hatta kesici takım aşınmasını hızlandıracağı bildirilmiştir [24]. Bu nedenle AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerine ve helis açısına bağılı yüzeY pürüzlülük değerlerindeki değışim Şekil 4'de verilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde yapılan deneyler sonucu ortalama yüzeY pürüzlülük değerlerinin 0,67 μm ile 3,49 μm arasında değıştiği görülmektedir. Şekil 4'e bakıldığında en yüksek yüzeY pürüzlülük değerinin 15° helis açısında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında 3,49 μm ölçülmüştür. En düşük Ra değeri ise %80,8 azalma ile 45° helis açısında, 100 m/dak Vc'de ve 0,05 mm/dev f'de 0,67 μm olmuştur. Genel olarak Şekil 4 incelendiğinde Vc'nin 40 m/dak'dan 100 m/dak çıkarılmasıyla Ra değerinin azaldığı görülmüştür. Bu

bağlamda, artan kesme hızı ile takım-talaş ara yüzeY sıcaklığının artmasına bağılı itme kuvvetinin azalmasına bununda yüksek kesme hızlarında takım titreşiminin azalması ile açıklanabilir. Ayrıca artan sıcaklıkla takım-iş parçası ara yüzeY temas alanının azalmasına bağılı olarak sürtünmenin azalması da yüzeY kalitesinin artmasında etkili olduğu ifade edilmiştir. Bunlarla birlikte, artan kesme hızıyla sıcaklık artar ve sıcaklığın artışına bağılı olarak yığıntı talaşın boyutu ya küçülür ya da artan gerilmelere dayanamayarak kesici uçtan uzaklaşması yüzeY pürüzlülüğünün azalmasına neden olan diğeri bir etken olarak bildirilmiştir [28-30]. Yapılan çalışmada f'in 0,05 mm/dev'den sırası ile 0,10 mm/dev ve 0,15 mm/dev çıkarılmasıyla Ra değerlerinde gözle görülür derecede artış olmuştur. İlerleme miktarının artması ile birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artmaktadır. Bu durum kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetleri buna bağılı olarak titreşimlerin artmasına bununda yüzeY pürüzlülük değerlerinin artmasında etkili olduğu rapor edilmiştir [31-33]. Matkap geometrisi ise yüzeY pürüzlülüğüne etki eden diğeri bir parametredir. Matkap helis açısının 15°'den sırası ile 30° ve 45°'ye çıkarılmasıyla yüzeY pürüzlülük değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Matkaplarda talaş açısı olarak da bilinen helis açısı matkap geometrisinde önemli bir parametredir.



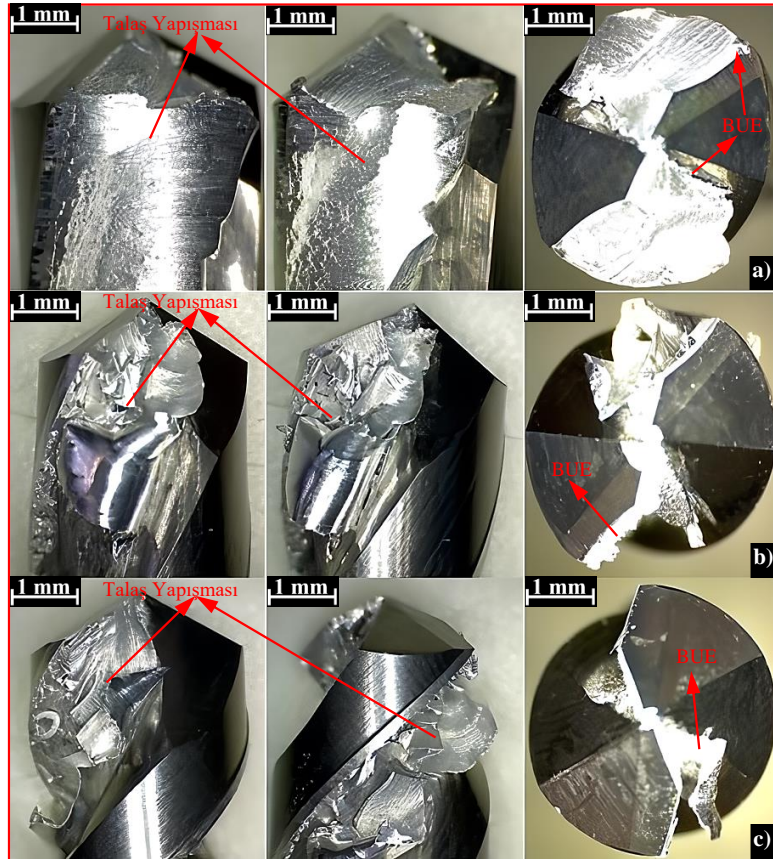
Şekil 4. Kesme parametrelerine ve matkap helis açısına bağılı yüzeY pürüzlülüğünün değışimi. (Surface roughness variation depending on cutting parameters and drill helix angle)

Matkapların kullanıldığı yere göre helis açısı genel olarak 12° ile 38° arasında değışmektedir. Ancak matkaplarda genel olarak helis açısı 30° olarak uygulanmaktadır. Ancak uç ve helis açısının artırılması hem çapak oluşumunu azaltmakta hem de talaş tahliyesini kolaylaştırırken kesici takım üzerinde

meydana gelen BUE oluşumunun engellenmesine yardımcı olacağı bildirilmiştir [34,35]. Düşük kesme parametrelerinde yüzeY pürüzlülüğünün yüksek çıkmasını Şekil 3'de verilen matkapların dijital mikroskopla çekilen makro resimleri üzerindeki BUE ve matkap tahliye oluklarına talaşın yapışması ile

açıklanabilir. Bütün matkap görüntülerinde matkap tahliye oluklarına talaşın yapışarak dolduğu görülmektedir. Ancak oluklara yapışan talaş miktarının helis açısının artması ile azaldığı görülmektedir. Ayrıca matkap kesici kenarlarında BUE oluştuğu görülmektedir. Kesme hızının ve ilerleme miktarının artırılması ile matkap kesici kenarlarında BUE ve matkap tahliye oluklarına yapışan talaş oluşumunun azalması yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de azalmasına neden olduğu

düşünülmektedir. AA 6061-T6 gibi nispeten yüksek sünekliliğe sahip malzemelerin işlenmesinde BUE oluşum eğilimini artıran süneklilik artırır. Talaşlı imalat operasyonlarında kesici kenarda oluşan BUE'nin kararsız yapısı nedeni ile yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur. Bu nedenle düşük kesme hızları büyük ve kararsız BUE oluşum eğilimini artırırken artan BUE'nde yüzey pürüzlülüğünü artıracak rapor edilmiştir [36,37].



Şekil 3. Matkapların optik mikroskopla çekilen makro resimleri, a) Vc: 40 m/dak, f: 0,05 mm/dev ve θ : 15°, b) Vc: 40 m/dak, f: 0,05 mm/dev ve θ : 30°, c) Vc: 40 m/dak, f: 0,05 mm/dev ve θ : 45° (Macro pictures of the drills taken with an optical microscope, a) Vc: 40 m/min, f: 0.05 mm/rev and θ : 15°, b) Vc: 40 m/min, f: 0.05 mm/rev and θ : 30°, c) Vc: 40 m/min, f: 0.05 mm/rev and θ : 45°)

3.2. Kesme Sıcaklığının Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Temperature)

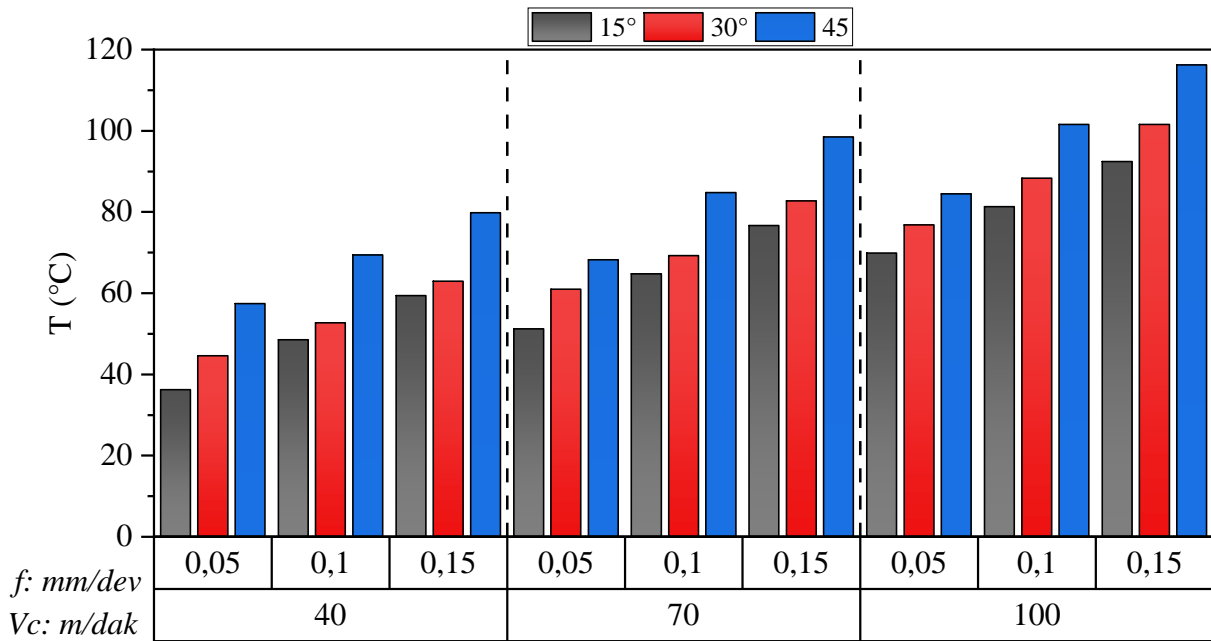
Tornalama, frezeleme ve delme gibi talaş kaldırma işleminin tamamı iş parçasının plastik deformasyonu ile gerçekleşir. Plastik deformasyonun oluşması esnasında harcanan enerjinin önemli bir miktarı ısıya dönüşür. Özellikle kesme bölgesinde oluşan bu ısı, imalat sırasında parçanın yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınma mekanizmalarını etkilemektedir. Delme işlemi gibi kapalı ortamlarda gerçekleştirilen karmaşık kesme işleminde ısı oluşumu daha da önem kazanmaktadır. Özellikle delme operasyonları sırasında çıkarılan talaşın sıkışması kesme bölgesinde oluşan ısı miktarının artmasına ve talaşın matkaba yapışmasına neden olur. Bu nedenlerden dolayı delme işlemi sırasında oluşan ısının

kontrol altında tutulması ve araştırılması imalat sektörü için oldukça önemlidir [24,38]. Bu nedenle yapılan çalışmada, Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerine ve matkap helis açısına bağlı kesme sıcaklıklarının değişimi Şekil 5'de verilmiştir.

Şekil 5'e bakıldığında Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme sıcaklığı 36,21 °C ile 116,19 °C arasında değişmiştir. En yüksek kesme sıcaklığı 45° helis açısında, 100 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında 116,19 °C ölçülmüştür. Bunun yanı sıra en düşük kesme sıcaklığı ise 15° helis açısında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarında 36,21 °C olmuştur. Genel olarak Vc'nin 40 m/dak'dan 100 m/dak kadar artırılması ile kesme sıcaklığında ortalama %61,89 oranında artmanın olduğu

gözlemlenmiştir. Artan kesme hızları ile birim zamanda oluşan deformasyonun artması, takım-talaş arasında oluşan temasın ve sürtünmelerin artması kesme sırasında oluşan sıcaklıkların artmasına neden olduğu düşünülmektedir [39,40]. İlerleme miktarının artırılması ile kesme sıcaklığı değişimine bakıldığında, f 'in 0,05 mm/dev'den 0,15 mm/dev kadar çıkarılmasıyla kesme sıcaklığında ortalama %41,85 oranında artma olmuştur. İlerleme miktarındaki artışa bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş hacmini artmaktadır. Buna bağlı olarak plastik deformasyon ve dolayısıyla takım-talaş ara yüzeydeki sürtünmenin artmasıyla kesme bölgesinde oluşan kesme sıcaklığının artmasına neden olmaktadır [41]. Son olarak matkap helis açısındaki değişime bağlı

kesme sıcaklığı değişimi değerlendirilecek olunursa, helis açısının 15° 'den 45° 'ye kadar çıkarılması ile kesme sıcaklığında ortalama %33,37 oranında artışın olduğu gözlemlenmiştir. Matkap helis açısı değeri arttıkça, aynı kesme hızlarında ve ilerleme miktarlarında matkap kanalları içerisindeki ısı taşıyıcısı olan talaşların kesme bölgesinden tahliye etme süreleri uzamaktadır. Bu nedenle helis açısı değerinin düşük olması matkapların talaşı kesme bölgesinden hızla uzaklaştırılmasına katkı sağlarken, helis açısı değerinin büyük olması matkapların talaş tahliye zamanını uzatarak talaşın bünyesinde barındırdığı ısıyı kesme bölgesinden daha geç sürede uzaklaştırmaktadır. Bununda kesme sıcaklığının artmasına neden olacağı düşünülmektedir.



Şekil 5. Kesme parametrelerine ve matkap helis açısına bağlı olarak kesme sıcaklığının değişimi. (Cutting temperature variation depending on cutting parameters and drill helix angle)

3.3. Enerji Tüketiminin Değerlendirilmesi (Evaluation of Energy Consumption)

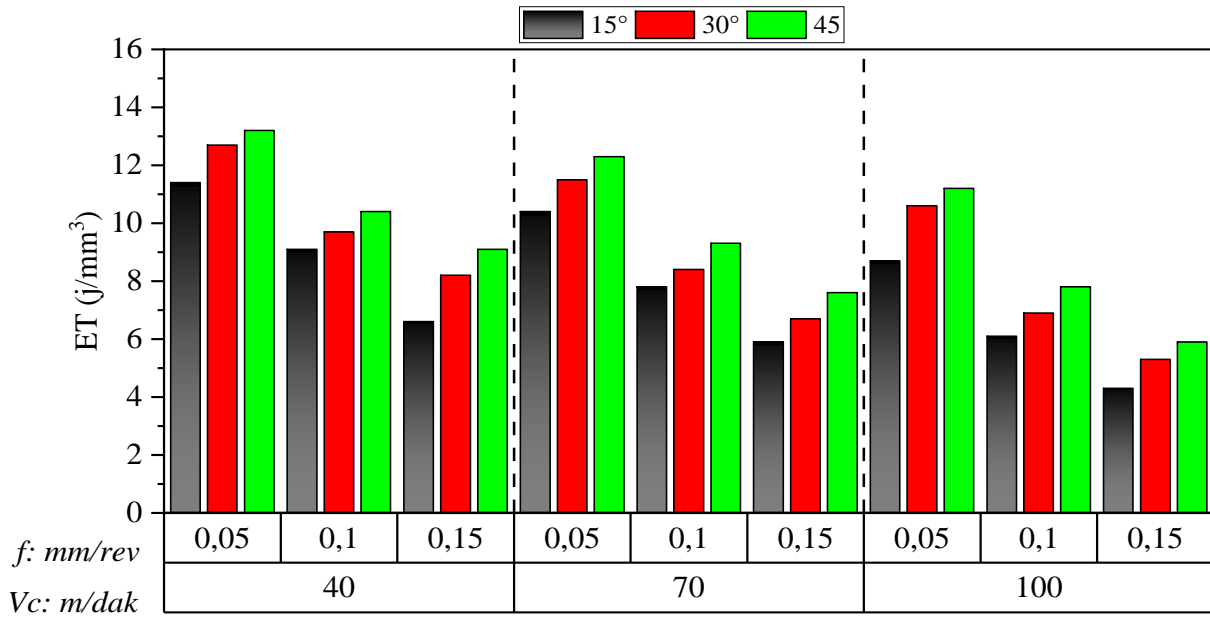
Elektrik üretim maliyetinin artması, sanayi sektöründeki üreticilerin ve müşterilerin çevre bilincine karşı duyarlılığının artması ile birlikte enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çabalar giderek önem kazanmıştır. ABD'deki sanayi endüstrisinde kullanılan takım tezgâhları enerji tüketiminde 2010 yılında %31 ile başı çekmiş ve enerji tüketimi 1990'ların başından buyana %70 artmıştır [42]. Bu nedenle en önemli imalat yöntemlerinden olan delme operasyonu uygulanan bu çalışmada delme işlemi sırasında kesme parametrelerinin ve matkap geometrisinin enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap geometrisinin enerji tüketimine etkileri Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerine ve matkap geometrisine bağlı enerji tüketimi genel olarak $4,3 \text{ j/mm}^3$

ile $13,2 \text{ j/mm}^3$ arasında değiştiği görülmektedir. Yapılan çalışmada en düşük enerji tüketimi 15° helis açısında, 100 m/dak kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında $4,3 \text{ j/mm}^3$ olmuştur. Ayrıca 45° helis açısında, 40 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarında en yüksek enerji tüketiminin $13,2 \text{ j/mm}^3$ ölçüldüğü görülmüştür. Deneysel çalışma sonucu genel olarak V_c 'nin 40 m/dak'dan 100 m/dak'e ve f 'in 0,05 mm/dev'den 0,15 mm/dev çıkarılması ile delme sırasında tüketilen enerji miktarının azaldığı görülmüştür. Kesme hızının ve ilerleme miktarının artması ile CNC işleme döngü süresi kısalmaktadır. Buna bağlı olarak kaldırılan talaş miktarı başına tüketilen enerji miktarı da önemli ölçüde azalacağı bildirilmiştir. Yüksek kesme parametrelerinde çıkarılan talaş miktarı başına tüketilen enerji miktarının önemli ölçüde azaltma potansiyeli daha da yüksektir [43]. C Camposeco-Negrete [44] göre ilerleme miktarının ve kesme hızının maksimum olduğu seviyelerde kesme enerjisinin minimum değerde

olacağını, yüksek kesme hızı ve ilerleme miktarı değerinde, talaş kaldırma miktarının artacağını buna bağlı olarak kesme süresinin kısalarak tüketilen enerji miktarının da azalacağını rapor etmiştir. Ancak yüksek kesme hızlarında durağan fener milinin istenen yüksek devirlerde çıkması sırasında daha yüksek enerji tüketimine neden olacağını bildirirken bu işlemin işleme öncesi gerçekleştiği için enerji tüketimine eklenemeyeceğini ifade etmiştir. Yapılan çalışmada kesme hızının ve

ilerleme miktarının sabit matkap helis açısının 15° 'den 45° 'ye kadar artırılması ile enerji tüketimi artmıştır. Jamil ve arkadaşları [45] helis açısının artırılması, radyal kuvvet bileşenlerinin oranını azaltacağını, böylece işleme sırasında oluşan titreşimin azalacağını ve işleme sırasında kesme işlemini daha kararlı hale getireceğini bununla işleme sırasında enerji tüketiminde bir azalmaya neden olacağı bildirilmiştir.

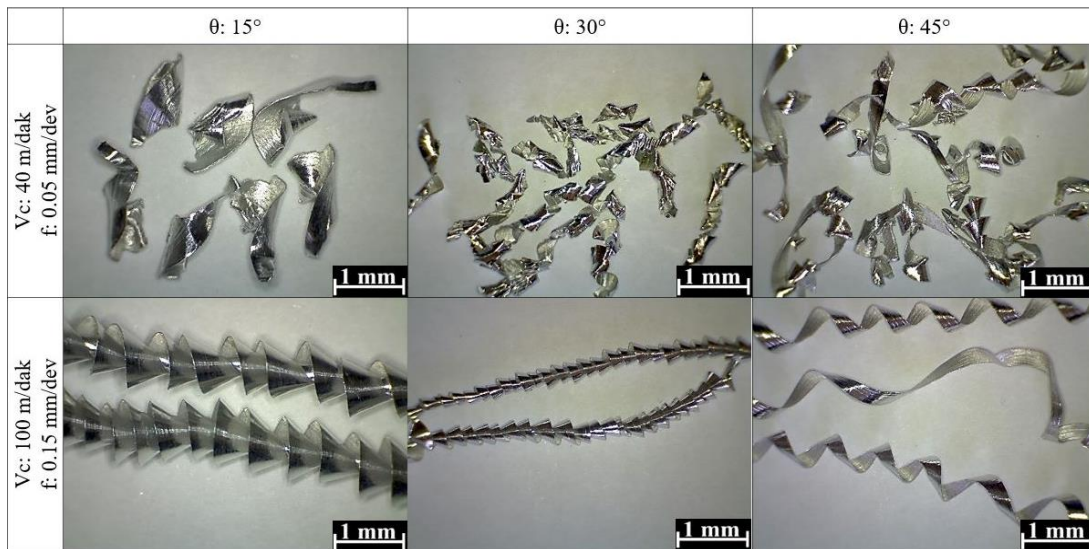


Şekil 6. Kesme parametrelerine ve matkap helis açısına bağlı enerji tüketimi değişimi. (Energy consumption variation depending on cutting parameters and drill helix angle)

3.4. Talaş Oluşumunun Değerlendirilmesi (Evaluation of Chip Formation)

Metal kesme operasyonlarında oluşan talaş şekilleri yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörlerden

birisidir [46]. Bu nedenle Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerine ve matkap helis açısına bağlı oluşan talaş şekilleri Şekil 7'de verilmiştir. Al 6061-T6 gibi nispeten yüksek süneklığe sahip alaşımların

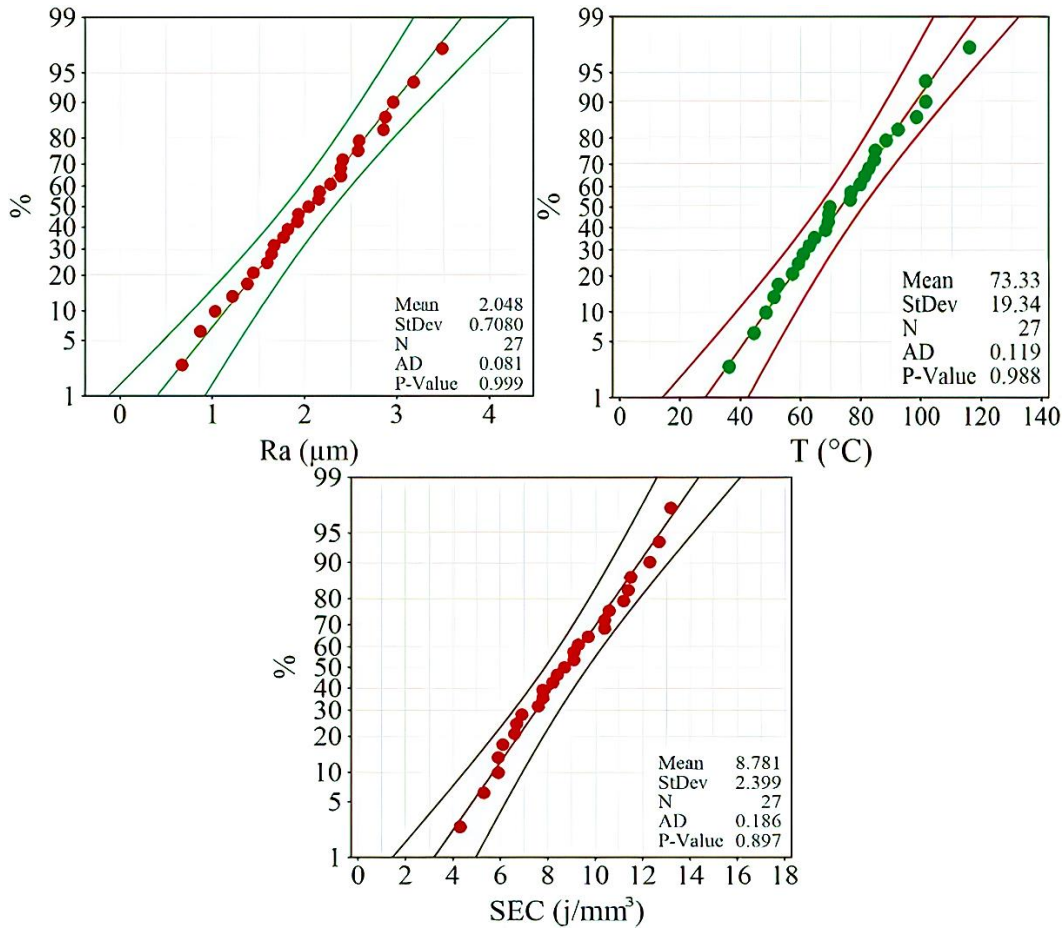


Şekil 7. Al 6061-T6 alaşımının delinmesinde talaş oluşumunun değerlendirilmesi. (Evaluation of chip formation in the drilling of Al 6061-T6 alloy.)

alaşımın delinmesinde, yüksek kaliteli deliklerin elde edilmesinde ve uzun takım ömrü için genellikle küçük ve parçalı talaşların oluşmasının istendiği rapor edilmiştir [47]. Ancak delme sırasında uzun sürekli talaşların oluşması matkap helis oluklarına dolarak talaşın tahliyesini zorlaştıracağı ifade edilmiştir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetini artıracağı bildirilmiştir [46,48]. Şekil 7 incelendiğinde düşük kesme hızında ve ilerleme miktarlarında sürekli uzun talaşların oluştuğu görülmektedir. Kesme hızının ve ilerleme miktarının artırılması ile kısa kırık talaşların oluştuğu görülmektedir. Bu bağlamda kesme hızının ve ilerleme miktarının delme işlemi sırasında talaş oluşumu üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca matkap helis açısının artırılması ile talaş kıvrılma miktarını artırdığı görülmektedir.

3.5. Normallik Testi (Test of Normality)

İstatistiksel analize başlamadan önce veri setlerinin normal dağılıma uygun olup olmadığını tespiti için normallik testinin yapılması gerekmektedir. Bunun için yapılan çalışma için normallik testleri Anderson-Darling (AD) göre yapılmıştır. Normallik testinde hipotezin kabul edilebilmesi için $p > 0,05$ olması istenir. Ra, T ve ET için elde edilen normallik test sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de verilen StDev (standart sapma), N (örnek sayısı) ve AD (Anderson-Darling) ifade etmektedir [49,50]. AD testine göre Ra, T ve ET için p değerleri sırası ile 0,999, 0,988 ve 0,897 hesaplanmıştır. Normallik testi sonucu Ra, T ve ET için hesaplanan p değerlerinin 0,05'den büyük olması nedeni ile oluşturulan deney seti AD göre uygundur.



Şekil 8. Ra, T ve ET için normallik test sonuçları. (Normality test results for Ra, T and SEC.)

3.6. S/N Oranının Analizi (Analysis of S/N Ratio)

Taguchi yöntemi ile yapılan çalışma için hazırlanan deney kombinasyonları ile deneyler yapılarak Ra, T ve ET değerleri ölçülmüştür. Elde edilen çıktı parametreleri için optimum deney kombinasyonunun belirlenmesinde sinyal-gürültü (S/N) kullanılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen Ra, T ve ET değerleri ve optimizasyon sonrası bu değerlere karşılık gelen S/N oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Deneyler sonucu elde edilen Ra, T ve ET değerlerinin ortalamaları sırası ile 2,05 μm , 73,33 $^{\circ}\text{C}$ ve 8,78 j/mm^3 olurken bunlara karşılık gelen ortalama S/N oranları ise sırası ile -5,634 dB, -36,998 dB ve -18,538 dB olarak hesaplanmıştır. Her bir kesme parametresinin Ra, T ve ET üzerine etkisini belirlemek için elde edilen S/N yanıt değerleri Tablo 4'de gösterilmektedir. Tablo 4'de S/N değerinin en yüksek olduğu seviyeler Ra, T ve ET en düşük değerleri için optimum seviyeler koyu renkle

gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 9’da Ra, T, ve ET için kesme parametreleri ve bu kesme parametrelerine ait optimum seviyeler verilmiştir. Tablo 4 ve Şekil 9 incelendiğinde, optimum Ra, T ve ET değerlerine sırası ile A3B3C1 (45°

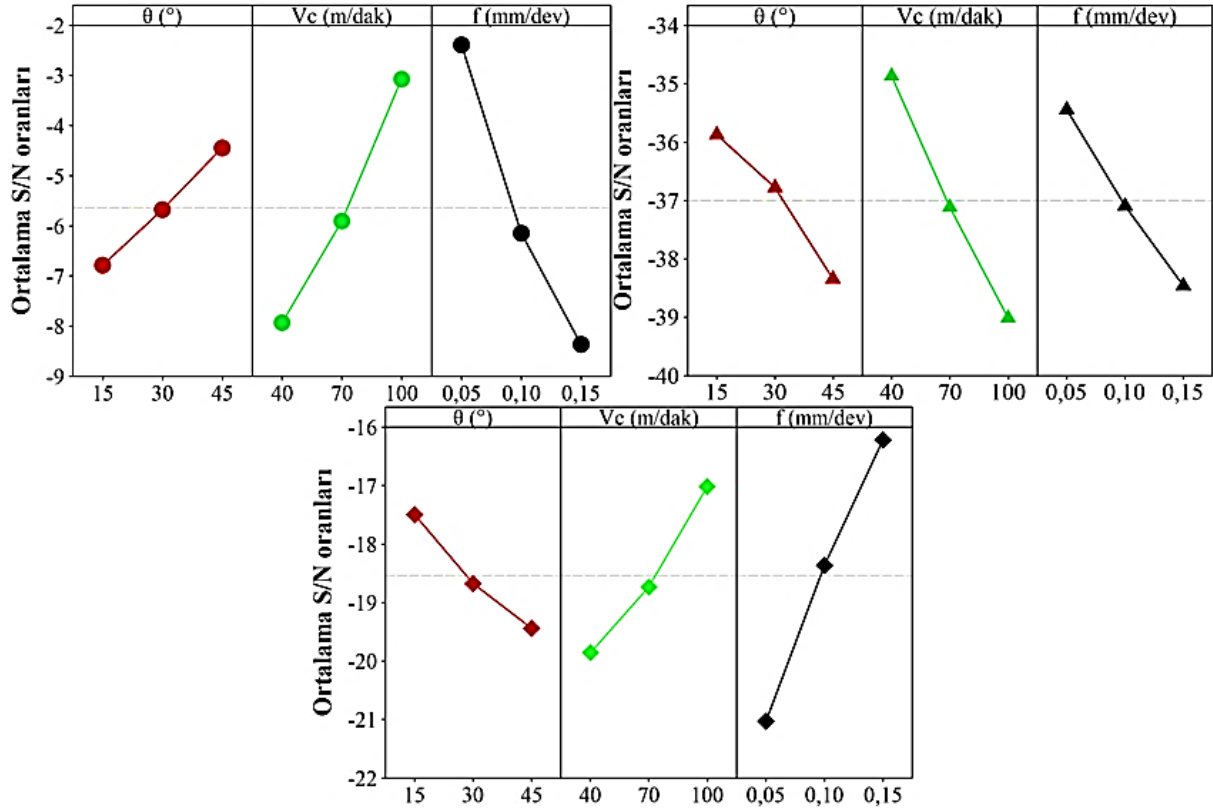
θ, 100 m/dak Vc ve 0,05 mm/dev f), A1B1C1 (15° θ, 40 m/dak Vc ve 0,05 mm/dev f) ve A1B3C3 (15° θ, 100 m/dak Vc ve 0,15 mm/dev f) deney kombinasyonlarında ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 3. Ra, T ve ET için deney sonuçları ve S/N oranları. (Test results and S/N ratios for Ra, T and SEC).

Deney No	Kesme Parametreleri			Ra	Ra- S/N	T	T- S/N	ET	ET- S/N
	θ	Vc	f						
1	15	40	0,05	2,15	-6,649	36,21	-31,177	11,4	-21,138
2	15	40	0,10	2,87	-9,158	48,47	-33,709	9,1	-19,181
3	15	40	0,15	3,49	-10,857	59,36	-35,470	6,6	-16,391
4	15	70	0,05	1,64	-4,297	51,14	-34,175	10,4	-20,341
5	15	70	0,10	2,39	-7,568	64,72	-36,221	7,8	-17,842
6	15	70	0,15	2,96	-9,426	76,64	-37,689	5,9	-15,417
7	15	100	0,05	1,03	-0,257	69,82	-36,880	8,7	-18,790
8	15	100	0,10	1,82	-5,201	81,32	-38,204	6,1	-15,707
9	15	100	0,15	2,41	-7,640	92,44	-39,317	4,3	-12,669
10	30	40	0,05	1,92	-5,666	44,51	-32,969	12,7	-22,076
11	30	40	0,10	2,59	-8,266	52,67	-34,431	9,7	-19,735
12	30	40	0,15	3,18	-10,049	62,93	-35,977	8,2	-18,276
13	30	70	0,05	1,44	-3,167	60,91	-35,694	11,5	-21,214
14	30	70	0,10	2,04	-6,193	69,26	-36,810	8,4	-18,486
15	30	70	0,15	2,58	-8,232	82,68	-38,348	6,7	-16,521
16	30	100	0,05	0,87	1,210	76,78	-37,705	10,6	-20,506
17	30	100	0,10	1,59	-4,028	88,34	-38,923	6,9	-16,777
18	30	100	0,15	2,16	-6,689	101,52	-40,131	5,3	-14,486
19	45	40	0,05	1,67	-4,454	57,36	-35,172	13,2	-22,411
20	45	40	0,10	2,28	-7,159	69,37	-36,823	10,4	-20,341
21	45	40	0,15	2,85	-9,097	79,82	-38,042	9,1	-19,181
22	45	70	0,05	1,22	-1,727	68,22	-36,678	12,3	-21,798
23	45	70	0,10	1,77	-4,959	84,76	-38,564	9,3	-19,370
24	45	70	0,15	2,39	-7,568	98,47	-39,866	7,6	-17,616
25	45	100	0,05	0,67	3,479	84,46	-38,533	11,2	-20,984
26	45	100	0,10	1,38	-2,798	101,54	-40,133	7,8	-17,842
27	45	100	0,15	1,93	-5,711	116,19	-41,303	5,9	-15,417
T _{Ra}	2,05 µm					T _{Ra-S/N}	-5,634 dB		
T _T	73,33 °C					T _{T-S/N}	-36,998 dB		
T _{ET}	8,78 j/mm ³					T _{ET-S/N}	-18,538 dB		

Tablo 4. Ra, T ve ET değerleri için S/N tepki tablosu. (S/N response chart for Ra, T and SEC values.)

Level	Ra			T			ET		
	θ	Vc	f	θ	Vc	f	θ	Vc	f
1	-6,784	-7,928	-2,392	-35,87	-34,86	-35,44	-17,50	-19,86	-21,03
2	-5,676	-5,904	-6,148	-36,78	-37,12	-37,09	-18,68	-18,73	-18,36
3	-4,444	-3,071	-8,363	-38,35	-39,01	-38,46	-19,44	-17,02	-16,22
Delta	2,340	4,857	5,971	2,47	4,15	3,02	1,94	2,84	4,81
Rank	3	2	1	3	1	2	3	2	1



Şekil 9. Ra, T ve ET değerleri için ortalama S/N oranları grafiği. (Average S/N ratio graph for Ra, T and SEC values.)

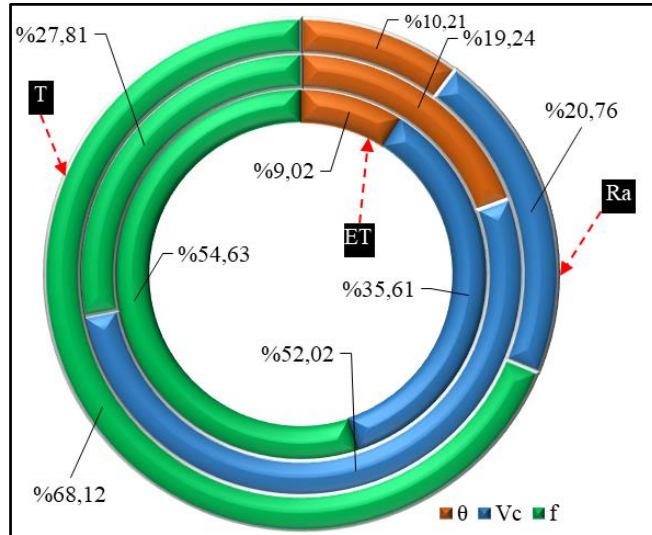
3.7. Ra, T ve ET için Varyans Analizi (Analysis of Variance for Ra, T and SEC)

Yapılan çalışmada, deneylerde kullanılan kesme parametrelerinin (θ , V_c ve f) çıktı parametreleri (Ra, T ve ET) üzerindeki etkilerini belirlemek için varyans (ANOVA) analizi kullanılmıştır. Varyans analizi % 95 güvenilirlik seviyesinde yapılmıştır [51,52]. Yapılan ANOVA analiz sonuçları Tablo 5’de sunulmuştur. Tablo 5’de verilen P anlamlılık düzeyini ve F etki düzeyini ifade etmektedir. F değeri en yüksek olan kesme parametresi çıktı parametreleri üzerine en çok etki eden

parametre olarak kabul edilir [27]. Elde edilen veriler ışığında Tablo 5 ve Şekil 10 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin kesme parametreleri sırası ile %54,93 f , %35,61 V_c ve %9,02 θ olmuştur. Bu sıralama kesme sıcaklığı için %52,02 V_c , %27,81 f ve %19,24 θ olurken, enerji tüketimi için %68,12 f , %20,76 V_c ve %10,21 θ olmuştur. Bu bilgiler sonucunda T için en etki parametresi %52,02 V_c iken Ra ve ET için sırası ile %54,93 ve %68,12 f olmuştur. Ayrıca Ra, T ve ET için toplam hata yüzdesi sırası ile %0,43, %0,92 ve %0,91 ile oldukça düşük değerlerin olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Ra, T ve ET değerleri için ANOVA sonuçları. (ANOVA results for Ra, T and SEC values.)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution (%)
Ra						
θ	2	1,1762	0,58808	207,72	0,000	9,02
V_c	2	4,6411	2,32054	819,66	0,000	35,61
f	2	7,1592	3,57960	1264,38	0,000	54,93
Error	20	0,0566	0,00283			0,43
Total	26	13,0331				100
T						
θ	2	1870,56	935,28	208,04	0,000	19,24
V_c	2	5058,84	2529,42	562,63	0,000	52,02
f	2	2704,59	1352,30	300,80	0,000	27,81
Error	20	89,91	4,50			0,92
Total	26	9723,90				100,00
ET						
θ	2	15,281	7,6404	112,67	0,000	10,21
V_c	2	31,067	15,5337	229,06	0,000	20,76
f	2	101,956	50,9781	751,73	0,000	68,12
Error	20	1,356	0,0678			0,91
Total	26	149,661				100

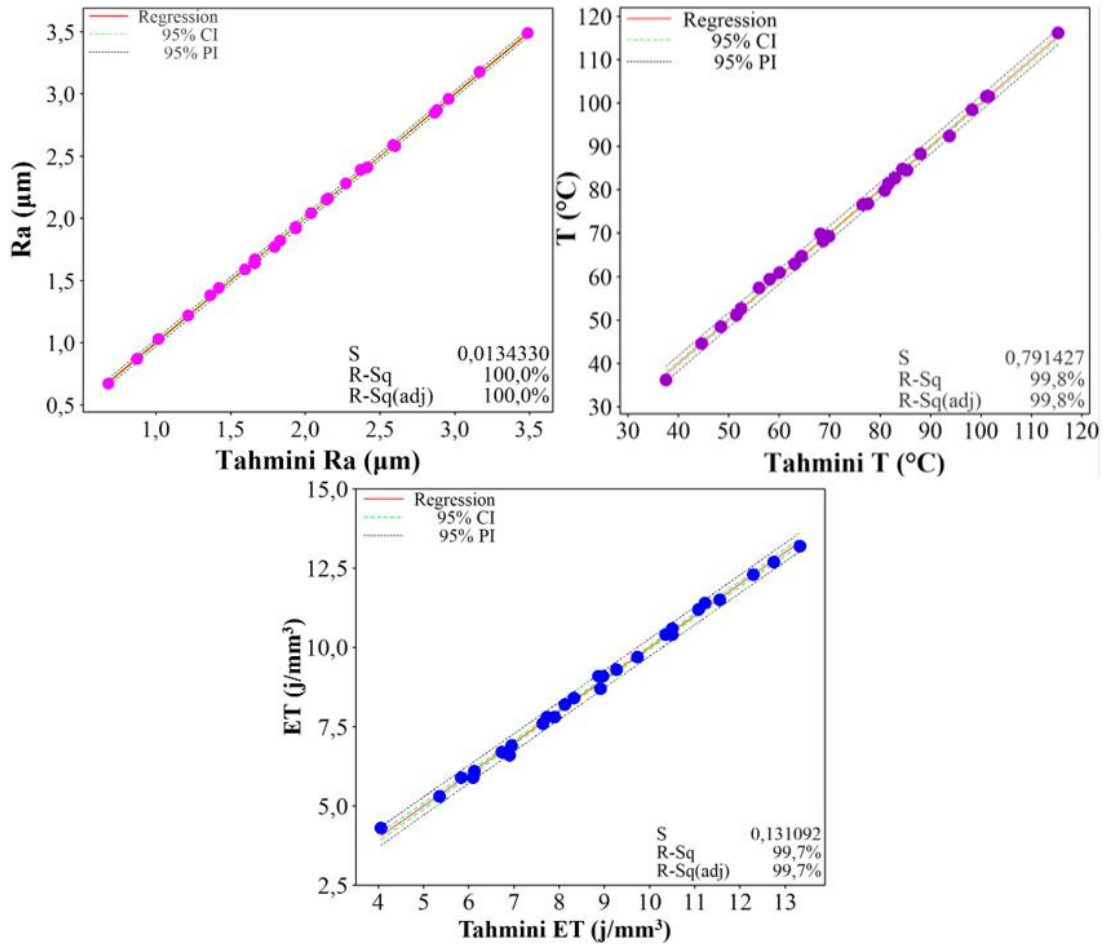


Şekil 10. Kesme parametrelerinin (θ , V_c ve f) çıkış parametreleri (R_a , T ve ET) üzerine katkı oranları. (Percent contribution ratios of cutting parameters (θ , V_c and f) on output parameters (R_a , T and SEC).)

3.8. R_a , T ve ET için Regresyon Analizi (Regression Analysis for R_a , T and SEC)

Regresyon analizleri, kesme parametreleri arasındaki korelasyonu dikkate alan en güvenilir veri tahmin

yöntemlerinden biridir. Ayrıca bağımlı değişkenle bağımsız değişkenler arasındaki ilişki için farklı değişkenlerin modellenmesi ve analizi için Regresyon analizinin kullanıldığını ifade etmişlerdir [53]. Bu nedenle



Şekil 11. R_a , T ve ET için deney sonuçları ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. (Comparison of test results and predicted values for R_a , T and SEC .)

Tablo 6. Ra, T ve ET için geliştirilen linear ve quadratic denklemler. (Linear and quadratic equations developed for Ra, T and SEC)

Eşitlik Türü	Çıktı Parametreleri	R ² (%)
Ra		
Linear	$Ra (\mu m) = 2,4837 - 0,017037*\theta - 0,016926*Vc + 12,600*f$	99,45
Quadratic	$Ra (\mu m) = 2,433 - 0,02050*\theta - 0,02015*Vc + 17,45*f + 0,000044*\theta*\theta + 0,000000*Vc*Vc - 20,00*f*f* + 0,000080*\theta*Vc - 0,0478*\theta*f + 0,00833*Vc*f$	99,82
T		
Linear	$T (°C) = -10,30 + 0,6669*\theta + 0,5587*Vc + 245,2*f$	98,35
Quadratic	$T (°C) = 12,00 - 0,334*\theta + 0,415*Vc + 149,1*f + 0,01509*\theta*\theta + 0,000587*Vc*Vc - 32*f*f* - 0,00072*\theta*Vc + 1,463*\theta*f + 0,837*Vc*f$	99,43
ET		
Linear	$ET (j/mm^3) = 14,719 + 0,06111*\theta - 0,04370*Vc - 47,11*f$	97,52
Quadratic	$ET (j/mm^3) = 14,777 + 0,1059*\theta - 0,0135*Vc - 86,67*f - 0,000716*\theta*\theta - 0,000160*Vc*Vc + 235,6*f*f* + 0,000037*\theta*Vc - 0,0444*\theta*f - 0,0889*Vc*f$	99,25

yapılan çalışmada AA 6061-T6 alaşımının delinmesi sonucu elde edilen Ra, T ve ET değerlerinin tahmin eşitliğinin oluşturulmasında çoklu regresyon analizi kullanılmıştır. İlk olarak Tablo 6'da Ra, T ve ET için elde edilen lineer regresyon denklemleri ve bu denklemlere karşılık gelen R2 değerleri görülmektedir. Bu bağlamda lineer regresyon denklemleri ile tahmin edilen değerlerin deneysel sonuçları ile arasındaki farkın daha yüksek olduğu için kuadratik denklemin de hesaplanması gerekmektedir. Ra, T ve ET için oluşturulan kuadratik regresyon denklemleri ve denklemlere karşılık gelen R2 değerleri de Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca Ra, T ve ET için elde edilen gerçek değerler ile tahmini değerler arasındaki etkileşim Şekil 11'de görülmektedir. Şekil 11 incelendiğinde Ra, T ve ET için elde edilen gerçek değerler ile tahmin değerleri arasında yüksek bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

3.9. Gri İlişki Analizi (Grey Relational Analysis)

Çalışmamızın daha önceki bölümlerinde en düşük çıktı parametreleri (Ra, T ve ET) için farklı optimum deney kombinasyonlarının elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle çıktı parametrelerinin en düşük değerleri için kesme parametrelerinin tek bir optimum deney kombinasyonunu bulmak için Gri ilişkisel analizi (GRA) uygulanmıştır. İşlenebilirlik çalışmalarında çoklu çıktı parametrelerinin optimizasyonunda GRA yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [14,26]. Tablo 3'de verilen Eşitlikler sırası ile uygulanarak Ra, T ve ET değerlerini önce normalizasyonu daha sonra bunu sırası ile uzaklık matrisi, gri ilişkisel katsayı (GRC) ve gri ilişkisel derece (GRG) hesaplanması takip etmiştir. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Tablo 7'de sunulmuştur. Yapılan analiz sonucu ve Tablo 7'deki veriler ışığında "1"e eşit veya buna yakın bir GRG değeri, en ideal işleme

Tablo 7. Ra, T ve ET için GRA sonuçları. (GRA results for Ra, T and SEC.)

Deney No	Çıktı Parametreleri			Normalizasyon Değerleri			GRC			GRG	Sıralama
	Ra	T	ET	Ra	T	ET	Ra	T	ET		
1	2,15	36,21	11,4	0,475	1,000	0,202	0,488	1,000	0,385	0,624	1
2	2,87	48,47	9,1	0,220	0,847	0,461	0,391	0,765	0,481	0,546	12
3	3,49	59,36	6,6	0,000	0,711	0,742	0,333	0,633	0,659	0,542	14
4	1,64	51,14	10,4	0,656	0,813	0,315	0,592	0,728	0,422	0,581	6
5	2,39	64,72	7,8	0,390	0,644	0,607	0,450	0,584	0,560	0,531	18
6	2,96	76,64	5,9	0,188	0,494	0,820	0,381	0,497	0,736	0,538	15
7	1,03	69,82	8,7	0,872	0,580	0,506	0,797	0,543	0,503	0,614	4
8	1,82	81,32	6,1	0,592	0,436	0,798	0,551	0,470	0,712	0,578	7
9	2,41	92,44	4,3	0,383	0,297	1,000	0,448	0,416	1,000	0,621	2
10	1,92	44,51	12,7	0,557	0,896	0,056	0,530	0,828	0,346	0,568	8
11	2,59	52,67	9,7	0,319	0,794	0,393	0,423	0,708	0,452	0,528	19
12	3,18	62,93	8,2	0,110	0,666	0,562	0,360	0,599	0,533	0,497	23
13	1,44	60,91	11,5	0,727	0,691	0,191	0,647	0,618	0,382	0,549	11
14	2,04	69,26	8,4	0,514	0,587	0,539	0,507	0,548	0,520	0,525	20
15	2,58	82,68	6,7	0,323	0,419	0,730	0,425	0,463	0,650	0,512	22
16	0,87	76,78	10,6	0,929	0,493	0,292	0,876	0,496	0,414	0,595	5
17	1,59	88,34	6,9	0,674	0,348	0,708	0,605	0,434	0,631	0,557	10
18	2,16	101,52	5,3	0,472	0,183	0,888	0,486	0,380	0,817	0,561	9
19	1,67	57,36	13,2	0,645	0,736	0,000	0,585	0,654	0,333	0,524	21
20	2,28	69,37	10,4	0,429	0,585	0,315	0,467	0,547	0,422	0,478	25
21	2,85	79,82	9,1	0,227	0,455	0,461	0,393	0,478	0,481	0,451	27
22	1,22	68,22	12,3	0,805	0,600	0,101	0,719	0,555	0,357	0,544	13
23	1,77	84,76	9,3	0,610	0,393	0,438	0,562	0,452	0,471	0,495	24
24	2,39	98,47	7,6	0,390	0,222	0,629	0,450	0,391	0,574	0,472	26
25	0,67	84,46	11,2	1,000	0,397	0,225	1,000	0,453	0,392	0,615	3
26	1,38	101,54	7,8	0,748	0,183	0,607	0,665	0,380	0,560	0,535	16
27	1,93	116,19	5,9	0,553	0,000	0,820	0,528	0,333	0,736	0,532	17

kombinasyonunu ifade eder. Buna göre Tablo 7’de en ideal işleme kombinasyonuna (A1B1C1) karşılık gelen deney numarası 1 ve maksimum GRG değeri 0,624 olarak belirlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada Taguchi yöntemi ve gri ilişki analizi kullanılarak elde edilen optimum kesme parametreleri Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Ra, T ve ET için optimum kesme parametreleri seviyeleri. (Optimum cutting parameters levels for Ra, T and SEC.)

Çıktı Parametreleri	Analiz Yöntemi	Optimum Kesme Parametreleri
Ra	Taguchi	A3B3C1
T	Taguchi	A1B1C1
ET	Taguchi	A1B3C3
Ra, T, ET	Gri İlişki Analiz	A1B1C1

3.10. Doğrulama Testleri (Validation Tests)

Çalışmanın son aşamasında, Taguchi yöntemi ile yapılan analizler sonucu elde edilen verilerin geçerliliğini doğrulamaktır [19]. Bu nedenle optimum Ra_{opt} , T_{opt} ve ET_{opt} değerlerinin tahmininde sırası ile Eşitlik 2, 3 ve 4 kullanılmıştır.

$$Ra_{opt} = (T_{Ra} + (A3 - T_{Ra}) + (B3 - T_{Ra}) + (C1 - T_{Ra})) \quad (2)$$

$$Ra_{opt} = (0,511 + (1,796 - 0,511) + (1,540 - 0,511) + (1,401 - 0,511)) \Rightarrow Ra_{opt} = 3,715$$

$$T_{opt} = (T_T + (A1 - T_T) + (B1 - T_T) + (C1 - T_T)) \quad (3)$$

$$T_{opt} = (0,536 + (64,46 - 0,536) + (56,74 - 0,536) + (61,05 - 0,536)) \Rightarrow T_{opt} = 181,178$$

$$ET_{opt} = (T_{ET} + (A1 - T_{ET}) + (B3 - T_{ET}) + (C3 - T_{ET})) \quad (4)$$

$$ET_{opt} = (0,496 + (7,811 - 0,496) + (7,422 - 0,496) + (6,622 - 0,496)) \Rightarrow ET_{opt} = 20,863$$

Burada yüzey pürüzlülüğünün (Ra_{opt}), kesme sıcaklığının (T_{opt}) ve enerji tüketiminin (ET_{opt}) optimum ortalama değerlerini sırası ile A3B3C1, A1B1C1 ve A1B3C3 temsil eder. Tüm deneyler sonucu elde edilen Ra, T ve ET değerlerinin ortalaması ise T_{Ra} , T_T ve T_{ET} olarak gösterilmiştir. Eşitlik 2, 3 ve 4 kullanılarak $Ra_{opt} = 3,715$, $T_{opt} = 181,178$ ve $ET_{opt} = 20,863$ olarak hesaplanmıştır. Tahmini değerler hesaplandıktan sonra, Ra, T ve ET için

güven aralığının (CI) belirlenmesinde Eşitlik 5 ve 6 kullanılmıştır.

$$CI_{Ra,T,ET} = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} Ve \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (5)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (6)$$

Eşitlik 5’deki $F_{\alpha,1,fe}$ %95 güvenle F oranı, Ve hata varyansı, R doğrulama deney sayısı, n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısı ifade etmektedir. Eşitlik 6’deki N toplam deney sayısını ve T_{dof} toplam serbestlik derecesini göstermektedir [54,55]. $F_{\alpha,1,fe} = 4,3512$ (F test tablosundan), $Ve_{Ra} = 0,00283$, $Ve_T = 4,50$, $Ve_{ET} = 0,0678$, $R = 3$, $N = 27$ ve $T_{dof} = 6$ değerleri Eşitlik 5 ve Eşitlik 6’da yerlerine konarak $CI_{Ra} = 0,085$, $CI_T = 4,379$ ve $CI_{ET} = 0,415$ hesaplanmıştır. 95% güven aralığındaki tahmini ortalama optimum Ra, T ve ET:

$$[Ra_{opt} - CI_{Ra}] < Ra_{exp} < [Ra_{opt} + CI_{Ra}] \Rightarrow$$

$$3,63 < 3,715 < 3,800$$

$$[T_{opt} - CI_T] < T_{exp} < [T_{opt} + CI_T] \Rightarrow$$

$$177,799 < 181,178 < 184,557$$

$$[ET_{opt} - CI_{ET}] < ET_{exp} < [ET_{opt} + CI_{ET}] \Rightarrow$$

$$20,448 < 20,863 < 21,278$$

Yukarıdaki eşitliklerde çalışmalarda ulaşılan Ra_{exp} , T_{exp} ve ET_{exp} değerlerinin güven aralığı sınırlarda kaldığı ve Ra, T ve ET için yapılan optimizasyonun 0.05 anlamlılık düzeyinde olduğu görülmektedir. Kontrol faktörlerinin doğrulama testleri Taguchi yöntemi ve regresyon denklemleri için optimum ve rasgele seviyelerde yapılmıştır. Tablo 9’da deneyler sonucu elde edilen verilerle tahmin edilen değerler arasındaki sapmalar verilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içindedir. Literatürde güvenilir istatistiksel analiz için deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar arasındaki sapmanın 20%’den düşük olması gerektiği rapor edilmiştir [55-57]. Yapılan çalışmada da deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar arasındaki sapmanın 20%’nin altında olduğu için yapılan çalışmada uygulanan optimizasyon sürecinin başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 9. Tahmini sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Comparison of estimated results with experimental results)

Seviyeler	Linear Regresyon Denklemleri			Quadratic Regresyon Denklemleri		
	Deneysel	Tahmini	Hata (%)	Deneysel	Tahmini	Hata (%)
Ra						
A3B3C1	0.68	0.654	17.06	0.68	0.701	3.1
A2B3C1	0.87	0.91	4.6	0.87	0.875	0.58
T						
A1B1C1	36.21	34.31	5.25	36.21	37.639	3.621
A2B3C3	101.52	102.36	0.83	101.52	101.555	0.035
ET						
A1B3C3	4.3	4.2	2.33	4.3	4.177	2.86
A3B1C1	13.2	13.37	1.3	13.2	13.341	1.07

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, AA 6061-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin ve matkap helis açılarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri hem deneysel hem de istatistiksel değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İlerleme miktarının azaltılması, matkap helis açısının ve kesme hızının artırılması yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olmuştur.
- İlerleme miktarının, matkap helis açısının ve kesme hızının artırılması kesme sıcaklığı değerlerinin artmasına neden olmuştur.
- İlerleme miktarının ve kesme hızının artırılması ile enerji tüketimi değerleri azalırken, matkap helis açısının enerji tüketimi değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
- Optimum Ra, T ve ET değerlerine sırası ile A3B3C1 (45° helis açısı, 100 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarı), A1B1C1 (15° helis açısı, 40 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme miktarı) ve A1B3C3 (15° helis açısı, 100 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarı) deney kombinasyonlarında ulaşılmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi üzerine etkin kesme parametreleri sırası ile %54,93 ilerleme miktarı, %52,02 kesme hızı ve %68,12 ilerleme miktarı olmuştur.
- Regresyon analizi sonucu Ra, T ve ET için doğrusal ve ikinci dereceden matematiksel modeller elde edilmiştir. Geliştirilen matematiksel modeller arasında Ra, T ve ET için en iyi sonuçlar ikinci dereceden regresyon model denklemleri ile ulaşılmıştır. Ra, T ve ET için elde edilen doğrusal denklemin korelasyon katsayıları sırası ile %98,45, %98,35 ve %97,52 olurken, bu sıralama ikinci dereceden denklemin korelasyon katsayıları sırası ile %99,82, %99,43 ve %99,25 olmuştur.
- Ra, T ve ET için yapılan GRA analizi sonucu optimum deney kombinasyonu A1B1C1 (15° helis açısı, 40 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme miktarı) olmuştur.
- Yapılan çalışmada elde edilen deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmektedir (KBÜ-BAP-FYL-2020-2400) ve yazarlar bu destekten dolayı teşekkürlerini sunarlar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Cihat ÖZDEMİR: Deneyleri yapmış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Barış ÖZLÜ: Sonuçların analizini yapmış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Halil DEMİR: Deney ve analiz sonuçlarının kontrolünü yaparak makalenin yazım sürecini kontrol etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ogunsemi B.T., Abioye T.E., Ogedengbe T.I. and Zuhailawati H., "A review of various improvement strategies for joint quality of AA 6061-T6 friction stir weldments", *J. Mater. Res. Technol.* 11:1061-1089, (2021).
- [2] Bardel D., Fontaine M., Chaise T., Perez M., Nelias D., Bourlier F. and Garnier J., "Integrated modelling of a 6061-T6 weld joint: From microstructure to mechanical properties", *Acta Mater.* 117:81-90, (2016).
- [3] Dorbane A., Ayoub G., Mansoor B., Hamade R., Kridli G. and Imad A., "Observations of the mechanical response and evolution of damage of AA 6061-T6 under different strain rates and temperatures", *Mater. Sci. Eng., A*, 624:239-249, (2015).
- [4] Bodunrin M.O., Alaneme K.K. and Chown L.H., "Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics", *J. Mater. Res. Technol.* 4(4):434-445, (2015).
- [5] Rahman M., Seah W.K.H. and Teo T.T., "The machinability of Inconel 718", *J. Mater. Process. Technol.* 63(1-3):199-204, (1997).
- [6] Ezugwu E.O., Wang Z.M. and Machado A.R., "Wear of coated carbide tools when machining nickel (Inconel 718) and titanium base (Ti-6Al-4V) alloys", *Tribol. Trans* 43(2):263-268, (2000).
- [7] Aamir M., Tolouei-Rad M., Giasin K. and Nosrati A., "Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: A review", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 105:2289-2308, (2019).
- [8] Ulaş H.B., "AISI D2 VE AISI D3 soğuk iş takım çeliklerinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin incelenmesi", *Journal of Polytechnic*, 21(1): 251-256, (2018).
- [9] Sun D., Lemoine P., Keys D., Doyle P., Malinov S., Zhao Q., Qin X. and Jin Y., "Hole-making processes and their impacts on the microstructure and fatigue response of aircraft alloys", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94:1719-1726, (2018).
- [10] Iyer R., Koshy P. and Ng E., "Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47(2):205-210, (2007).
- [11] Gu W., Xu H., Liu J. and Yue Z., "Effect of drilling process on fatigue life of open holes", *Tsinghua Sci. Technol.* 14(S2):54-57, (2009).

- [12] Bi Z.M. and Wang L., "Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study", *J. Manuf. Syst.* 31(4):420-428, (2012).
- [13] Herrmann C., Bergmann L., Thiede S. and Zein A., "Energy labels for production machines: an approach to facilitate energy efficiency in production systems", *In 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, CIRP* 1-6, (2007).
- [14] Özlü B., "Evaluation of energy consumption, cutting force, surface roughness and vibration in machining Toolox 44 steel using taguchi-based gray relational analysis", *Surf. Rev. Lett.* 29(08):1-17, (2022)
- [15] Akgün M., Özlü B. and Kara F., "Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ coatings on cutting force, surface roughness, cutting power, and temperature in hard turning of AISI H13 steel", *J. Mater. Eng. Perform.* 32(3):1390-1401, (2023).
- [16] Franco A., Rashed C.A.A. and Romoli L., "Analysis of energy consumption in micro-drilling processes", *J. Cleaner Prod.* 137:1260-1269, (2016).
- [17] Pramanik A., Basak A.K., Prakash C., Shankar S. and Chattopadhyaya S., "Sustainability in drilling of aluminum alloy", *Cleaner Mater.* 3:100048, (2022).
- [18] Nouari M., List G., Girot F. and Coupard D., "Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys", *Wear*, 255(7-12):1359-1368, (2003).
- [19] Samy G.S. and S.T. Kumaran, "Measurement and analysis of temperature, thrust force and surface roughness in drilling of AA (6351)-B4C composite", *Measurement*, 103:1-9, (2017).
- [20] Khunt C.P., Makhesana M.A., Patel K.M. and Mawandiya B.K., "Performance assessment of vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MQL) in drilling", *Mater. Today Proc.* 44:341-345, (2021).
- [21] Al-Tameemi H.A., Al-Dulaimi T., Awe M.O., Sharma S., Pimenov D.Y., Koklu U. and Giasin K., "Evaluation of cutting-tool coating on the surface roughness and hole dimensional tolerances during drilling of Al6061-T651 alloy", *Materials*, 14(7):1783, (2021).
- [22] Giasin K., Hodzic A., Phadnis V. and Ayvar-Soberanis S., "Assessment of cutting forces and hole quality in drilling Al2024 aluminium alloy: experimental and finite element study", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 87:2041-2061, (2016).
- [23] Çaydaş U. and Çelik M., "Investigation of the effects of cutting parameters on the surface roughness, tool temperature and thrust force in drilling of AA 7075-T6 alloy", *Journal of Polytechnic*, 20(2):419-425, (2017).
- [24] Şirin E., Kivak T. and Yıldırım Ç.V., "Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X", *Tribol. Int.* 157:106894, (2021).
- [25] Işık U., Demir H. and Özlü B., "Multi-objective optimization of process parameters for surface quality and geometric tolerances of AlSi10Mg samples produced by additive manufacturing method using taguchi-based gray relational analysis", *Arab. J. Sci. Eng.*, (2024).
- [26] Özlü B., "Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy", *Surf. Rev. Lett.* 28(10):2150093, (2021).
- [27] Akgün M., Demir H. and Çiftçi İ., Mg₂Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 645-650, (2018).
- [28] Ramulu M., P.N. Rao and Kao H., "Drilling of (Al₂O₃) p/6061 metal matrix composites", *J. Mater. Process. Technol.* 124(1-2):244-254, (2002).
- [29] Günay M. and Meral T., "Modelling and multiresponse optimization for minimizing burr height, thrust force and surface roughness in drilling of ferritic stainless steel", *Sādhanā*, 45(1):273, (2020).
- [30] Meral G., Sarıkaya M., Mia M., Dilipak H., Şeker U. and Gupta M.K., "Multi-objective optimization of surface roughness, thrust force, and torque produced by novel drill geometries using Taguchi-based GRA", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101:1595-1610, (2019).
- [31] Jeevan T.P., Jayaram S.R., Afzal A., Ashrith H.S., Soudagar M.E.M. and Mujtaba M.A., "Machinability of AA6061 aluminum alloy and AISI 304L stainless steel using nonedible vegetable oils applied as minimum quantity lubrication", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43:1-18, (2021).
- [32] Gökçe H. and Biberici M.A., "Mathematical modeling and multiresponse optimization to reduce surface roughness and adhesion in Al 5083 H116 alloys used in ammunition propulsion actuators", *Multidiscip. Model. Mater. Struct.* 19(2):341-359, (2023).
- [33] Zhang P.F., Churi N.J., Pei Z.J. and Treadwell C., "Mechanical drilling processes for titanium alloys: a literature review", *Mach. Sci. Technol.* 12(4):417-444, (2008).
- [34] Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M. and Vafadar A., "A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications", *J. Mater. Res. Technol.* 9(6):12484-12500, (2020).
- [35] Nouari M., List G., Girot F. and Coupard D., "Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys", *Wear*, 255(7-12):1359-1368, (2003).
- [36] Ezugwu E.O. and Lim S.K., "The performance of cermet cutting tools when machining an Ni-Cr-Mo (En 24) steel", *Lubr. Eng.* 51(2), (1995).
- [37] Demir H. and Gündüz S., "The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy", *Mater. Des.* 30(5):1480-1483, (2009).
- [38] Le Coz G., Marinescu M., Devillez A., Dudzinski D. And Velnom L., "Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys", *Applied Thermal Engineering*, 36:434-441, (2012).
- [39] Lazoglu I., Poulachon G., Ramirez C., Akmal M., Marcon B., Rossi F., Outeiro J.C. and Krebs M., "Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling", *CIRP Annals*, 66(1):105-108, (2017).
- [40] Gupta M.K., Song Q., Liu Z., Sarıkaya M., Jamil M., Mia M., Kushvaha V., Singla A.K. and Li Z., "Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy", *Sustainable Mater. Technol.* 26:e00218, (2020).
- [41] Vas J.S., Fernandes A., D'Souza A., Rai A. And Quadros, J.D., "Analysis of temperature changes during dry

- drilling of austenitic stainless steels on twist drills having different point angles”, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 6(5A):121-125, (2016).
- [42] Behrendt T., Zein A. and Min S., “Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools”, *CIRP annals*, 61(1):43-46, (2012).
- [43] Pervaiz S. and Deiab I., “Surface roughness and energy consumption analysis of conventional and peck drilling approaches”, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.* 229(12): 2180-2195, (2015).
- [44] Camposeco-Negrete C., “Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA”, *J. Cleaner Prod.* 53:195-203, (2013).
- [45] Jamil M., Zhao W., He N., Gupta M.K., Sarikaya M., Khan A.M., Sanjay M.R., Siengchin S. and Pimenov D.Y., “Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment”, *J. Cleaner Prod.* 281:125374, (2021).
- [46] U. Koklu, H. Çoban, Effect of dipped cryogenic approach on thrust force, temperature, tool wear and chip formation in drilling of AZ31 magnesium alloy. *J. Mater. Res. Technol.* 9(3):2870-2880 (2020).
- [47] Habib N., Sharif A., Hussain A., Aamir M., Giasin K., Pimenov D.Y. and Ali U., “Analysis of hole quality and chips formation in the dry drilling process of Al7075-T6”, *Metals*, 11(6):891, (2021).
- [48] Yazman Ş., Gemü L., Uludağ M., Akdemir A., Uyaner M. and Dişpinar D., “Correlation between machinability and chip morphology of Austempered ductile iron”, *J. Test. Eval.* 46(3):1012-1021, (2017).
- [49] Wen J.L., Yang Y.K. and Jeng M.C., “Optimization of die casting conditions for wear properties of alloy AZ91D components using the Taguchi method and design of experiments analysis”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 41:430-439, (2009).
- [50] Akkuş H. and Yaka H., “Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy”, *Measurement*, 167:108465, (2021).
- [51] Yaka H. and Engin K.E., “AISI D2 soğuk iş çeliğinin delinmesinde deneysel ve sonlu elemanlar analizi yoluyla delik kalitelerinin iyileştirilmesi ve işleme parametrelerinin optimizasyonu”, *Fen Bilimleri Estitüsü Dergisi*, 13(4), 2973-2985, (2023).
- [52] Yaka H. and Atılkan R., “Nikel esaslı süper alaşımların delinmesinde işleme parametrelerinin gri ilişkisel analiz ve taguchi ile optimizasyonu”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2):363-378, (2023).
- [53] Akgün M. and Demir H., “Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy”, *Journal of Polytechnic*, 24(2):391-400, (2021).
- [54] Samtaş G. and Apay S., “Taguchi and gray relational analysis optimization of cutting parameters during face milling of cryogenic treated Aluminum 6061 alloys using cryogenic and non-cryogenic inserts”, *J. Mater. Eng. Perform.* 32:4151-4160, (2023).
- [55] Samtaş G. and Korucu S., “The effect and optimization of cutting parameters of Vanadis 4E powder metallurgical tool steel on tool wear: surface roughness in face milling”, *Sādhanā*, 47:135, (2022).
- [56] Özlü B. and Akgün M., “Evaluation of the machinability performance of PH 13-8 Mo maraging steel used in the aerospace industry”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 238(2):687-699, (2024).
- [57] Akgün M., “Measurement and optimization of cutting forces, surface roughness and temperature in turning of AZ91 Mg alloy”, *Sādhanā*, 48(2):60, (2023).