



ARAŞTIRMA MAKALASI / RESEARCH ARTICLE

Alüminyum 2024 T351 Malzemeye Delik Delinmesi İşleminde Kesme Parametrelerinin İtme Kuvveti ve İşlem Süresine Göre Optimizasyonu

Optimization of Cutting Parameters According to Thrust Force and Processing Time in Aluminum 2024 T351 Hole Drilling Process

Yunus Zübeyir Turgut ¹, Murat Özsoy ^{2*}

¹ Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce, TÜRKİYE

² Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ozsoy@sakarya.edu.tr

Öz

Delik delmenin imalat sektörü içerisindeki yaygınlığı göz önünde bulundurulduğunda, delik delinen proseslerde takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek amaçlanır. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür. Bu çalışma kapsamında havacılık ve uzay endüstrisinde oldukça fazla tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) ele alınmıştır. Deneyler Taguchi L16(4²) deney tasarımına göre 8 mm çaplı üç takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir delik için işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvetler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu maksimum itme kuvvetleri kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla Taguchi optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonları da gerçekleştirilmiştir. Üç takım türü için de maksimum itme kuvvetleri açısından parametrelerin optimum seviyeleri; kesme hızı için 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak çoklu yanıt optimizasyonu ile tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum 2024 T351, Delik delme, İtme Kuvveti, İşlem Süresi, Optimizasyon

Abstract

Considering the prevalence of hole drilling in the manufacturing sector, it is aimed to reduce the cost by minimizing tool wear, energy consumption and time in hole drilling processes. This is possible by optimizing the parameters that affect the drilling. In this study, hole drilling experiments were carried out using Al 2024 T351 alloy, which is highly preferred in the aerospace industry and therefore subjected to thousands of hole drilling processes. Cutting speed (50, 70, 90 and 110 m/min) and feed rate (0.06/0.08/0.1 and 0.12 mm/tooth) were considered as cutting parameters. Experiments were performed separately for three tool types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN coated) with 8 mm diameter according to Taguchi L16(4²) experimental design. The maximum forces in the machining direction (z-axis) were determined for each hole. Taguchi optimizations were carried out with the help of Minitab 19 software by using these determined maximum thrust forces. Also, multiple response optimizations (response surface method) of cutting parameters, which minimize the maximum thrust force and processing time, were carried out. Optimum levels of parameters in terms of maximum cutting force for all three tool types were determined by Taguchi optimization as 50 m/min for cutting speed and 0,06 mm/tooth for feed rate. Optimum levels of cutting parameters that minimize the maximum cutting force and processing time together were determined by multiple response optimization as 110 m/min for cutting speed and 0.06 mm/tooth for feed rate.

Keywords: Aluminum 2024 T351, Drilling, Thrust Force, Processing Time, Optimization

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Machining removes unwanted parts, called chips, from the workpiece using various machines and tools to achieve the desired geometry. The most important advantages of machining

are that it provides good surface quality and dimensional accuracy.

Hole drilling is removing metal to create a cylindrical space on the workpiece by making both progressive and rotational

DOI:10.21205/deufmd.2024267718

Atıf şekli / How to cite:

Turgut, Y.Z., Özsoy, M. (2024). Alüminyum 2024 T351 Malzemeye Delik Delinmesi İşleminde Kesme Parametrelerinin İtme Kuvveti ve İşlem Süresine Göre Optimizasyonu. DEUFMD, 26(77), 333-340.

Geliş Tarihi / Received: 14.12.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 04.12.2023

movements of the cutting tool (drill). It also includes methods such as broaching, reaming, countersinking, and hole enlargement. It constitutes 33% of all machining operations and 25% of the energy spent in all machining processes. Therefore, it is one of the most important material removal methods. For this reason, reducing the cost by minimizing tool wear, energy consumed, and time in hole drilling operations is important. This is possible by optimizing the parameters affecting drilling.

When the literature is examined, we see that many studies have been carried out to conduct hole drilling operations under optimum conditions.

Within the scope of this study, hole-drilling experiments were carried out using Al 2024 T351 alloy, which is preferred in the aviation and space industry and has been subjected to thousands of hole-drilling processes. The liquid cooling method was used while drilling the holes. Cutting speed (50, 70, 90, and 110 m/min) and feed per tooth (0.06/0.08/0.1 and 0.12 mm/tooth) were considered cutting parameters. The experiments were carried out separately for three tool types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 with TiAlN coating) with 8 mm diameter according to the Taguchi L16(4²) experimental design. The maximum force (thrust force) in the machining direction (z-axis) was determined in each experiment. Minimizing the thrust forces during drilling reduces costs by minimizing tool wear and energy consumed. However, it was observed that the manufacturing time increased only when the maximum thrust force was tried to be minimized. Since the increase in manufacturing time will negatively affect operating costs, multiple response optimizations (response surface method) of cutting parameters that minimize maximum thrust force and processing time have also been carried out.

Materials and Methods

Aluminum 2024 T351 alloy is frequently used in the aviation and space industry due to its lightness and good fatigue resistance. Therefore, many holes are drilled on this material. The drilling operations that will be applied in large numbers must be carried out with maximum efficiency and quality.

Within the scope of this study, lower-cost HSS (high-speed tool steel) drills were preferred compared to carbide drills. Ruko

brand 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills were used.

The experiments were conducted in the Taksan TMC-700 V CNC vertical machining center with FANUC (O-M Series) control panel at Sakarya University Faculty of Engineering Mechanical Engineering Laboratory. Force data was collected using ESİT AX3 load cell, NI 9237 module of NI cDAQ-9188 data acquisition unit, and Flexlogger software.

Results and Discussion

Optimum levels of cutting parameters were determined by Taguchi optimization. For all three drill types, the cutting speed parameter's optimum level was 50 m/min, and the optimum level of the feed rate per tooth was 0.06 mm/tooth.

Response Surface optimization was performed separately for three drill types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 with TiAlN coating). The results were the same for all three drill types. The optimum levels of the cutting parameters, which minimize the maximum thrust force and processing time together, were determined as 110 m/min for the cutting speed and 0.06 mm/tooth for the feed rate per tooth. Desirability function values of response surface optimization findings It was found to be 0.8804 for the HSS drill, 0.8513 for the HSSE-Co5 drill, and 0.8750 for the HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill. When the results obtained were examined, it was concluded that the multiple response optimization was statistically significant.

During the experiments, force measurements were made in all three axes (FX, FY, FZ). In all experiments, it was determined that the forces measured in the x and y axes were significantly lower than those measured in the z axes. For this reason, within the scope of this study, the forces in the z-axis were evaluated as thrust forces and statistical analyses were made based on their maximum values.

These results obtained from the drilling process of Al 2024 T351 alloy with 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, and HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills can be used in future academic studies and industrial applications.

1. Giriş

Talaşlı imalat, istenen geometrinin sağlanması için çeşitli tezgâh ve çeşitli takımlar aracılığıyla iş parçası üzerinden talaş adı verilen istenmeyen kısımların uzaklaştırılması işlemidir. Talaşlı imalatın iyi bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti sağlaması en önemli avantajlarındandır.

Delik delme, kesici takımın (matkap) hem ilerleme hem dönme hareketi yaparak iş parçası üzerinde silindirik boşluk oluşturmak için talaş kaldırması işlemidir. Broşlama, raybalama, havşa açma, delik büyütme gibi yöntemleri de kapsamaktadır [1]. Tüm talaş kaldırma operasyonlarının %33'ünü ve tüm talaş kaldırma proseslerinde harcanan enerjini %25'ini oluşturmaktadır [2]. Dolayısıyla en önemli talaş kaldırma yöntemlerinden biridir. Bu sebeple delik delme operasyonlarında takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek önem arz etmektedir. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür.

Literatür incelendiğinde delik delme operasyonlarının optimum şartlarda gerçekleştirilmesi için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Zhu ve arkadaşları [3], Al 2024 T351 alaşımına üç farklı soğutma koşulunda (kuru, hava ve minimum miktarda

yağlama) delikler delmişlerdir. Bu üç soğutma koşulunu sıcaklık ve itme kuvveti açısından kıyaslamışlardır. Kesme hızı seviyelerini 60, 80, 100, 120 m/dk olarak, dış başı ilerleme seviyelerini ise 0,2/0,3/0,4/0,5 mm/dış olarak belirlemişlerdir. Sıcaklığının, kesme hızına kıyasla dış başı ilerleme miktarından daha çok etkilendiğini saptamışlardır. Minimum miktarda yağlama (MMY) soğutma tekniğinin kullanıldığı deneylerde, kuru ve hava soğutmaya kıyasla matkap üzerindeki sıcaklık farklarının daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Fakat itme kuvveti ve sıcaklık açısından en iyi takım performansını hava soğutma tekniğinde elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Bonhin ve arkadaşları [4], cam elyaf takviyeli Al 2024-T3 malzeme üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (4000 ve 8000 dev/dk) ve dış başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,2 mm/dış) parametrelerinin itme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyleri 4,8 mm çaplı TiAlN kaplamalı karbür matkapla gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar sonucunda itme kuvvetinin ve talaş kalınlığının, devir sayısına kıyasla dış başı ilerleme miktarından daha fazla etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Landon ve arkadaşları [5], Al 2024-T351 malzemenin delinmesi işleminde yüzey durumunu ve yorulma mukavemetini

araştırmışlardır. Delikleri eksenel ve yörüngesel olarak iki farklı şekilde delmişlerdir. Yüzey durumunu; yüzey pürüzlülük ölçümleri, mikro yapı, sertleşme analizi ve artık gerilme değerlendirilmesi kapsamında incelemişlerdir. Düşük pürüzlülük değerlerinde, delik pürüzlülüğünün yorulma mukavemetine etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Geleneksel eksenel delmenin, yörüngesel delmeye kıyasla artık gerilme oluşturabileceğini ifade etmişlerdir.

Aamir ve arkadaşları [6], Al 2024 T3 alaşımının delinmesinde devir sayısı (1020, 2035 ve 3050 dev/dk), diş başı ilerleme miktarı (0,04/0,08 ve 0,14 mm/diş) ve matkap çapı (6 ve 10 mm) parametrelerinin; itme kuvveti, delik kalitesi, talaş morfolojisi ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırmışlardır. Deneylerde kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Varyans analizi sonuçlarına göre itme kuvvetinin diş başı ilerleme miktarı ve matkap çapından büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek devir sayılarında daha fazla yüzey pürüzlülüğü oluştuğunu ve matkap çapı arttıkça talaş kalınlığının da arttığını ifade etmişlerdir.

Saravanakumar ve arkadaşları [7], takviye ilave ettikleri Al 2219 alaşımı üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (800 ve 1600 dev/dk), ilerleme hızı (75 ve 150 mm/dk), matkap çapı (6 ve 10 mm) ve takviye türü (Grafit ve MoS2) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin optimum seviyelerini; 1600 dev/dk devir sayısı, 75 mm/dk ilerleme hızı, 6 mm matkap çapı ve Grafit takviye olarak tespit etmişlerdir. Parametreler arasında yüzey pürüzlülüğü açısından en önemli parametrenin takviye türü olduğunu ve Grafit takviyesinin MoS2 takviyesine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Dahnel ve arkadaşları [8], Al 7075 alaşımının delinmesinde kesme hızı (22, 44 ve 66 m/dk) ve soğutma türü (kuru ve sıvı soğutma) parametrelerinin takım aşınması ve talaş yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde, 6 mm çaplı matkap ve sabit diş başı ilerleme miktarı (0,15 mm/diş) kullanmışlardır. Kesme sıvısı kullanılan deneylerde kuru delmeye kıyasla daha az takım aşınması görüldüğünü ve daha küçük yapıda talaş oluştuğunu tespit etmişlerdir. Soğutma sıvısı kullanılarak 44 m/dk kesme hızı ile delinen deliklerde en az takım aşınması görüldüğünü de belirtmişlerdir.

Korkmaz ve arkadaşları [9], Al 2014 alaşımının delinmesi işleminde itme kuvvetlerini hem deneysel olarak hem de bilgisayar destekli simülasyon yardımıyla elde etmişlerdir. Deneylerde; kesme hızı için 170, 200, 230 m/dk, diş başı ilerleme için ise 0,1/0,2/0,3 mm/diş seviye değerleri kullanılmıştır. Sabit diş başı ilerleme miktarı için kesme hızının artırılmasının itme kuvvetini düşürdüğünü, sabit kesme hızı için diş başı ilerleme miktarının artırılmasının ise itme kuvvetini artırdığını tespit etmişlerdir. Deneysel ve simülasyon çıktılarının birbiri ile benzerlik gösterdiğini de belirtmişlerdir.

Navaneethakrishnan ve arkadaşları [10], alüminyum alaşımının (IS737.Gr19000) delinmesinde matkaba uygulanan kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin etkisini; talaş boyutu, itme kuvveti, tork, ovalite ve yüzey pürüzlülüğü çıktıları açısından incelemişlerdir. Deneylerde devir sayısı (1860, 2270 ve 4540 dev/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,038/0,076 ve 0,203 mm/diş) parametrelerini dikkate almışlardır. Kriyojenik işlemin; matkap aşınması, ovalite, yüzey pürüzlülüğü ve talaş boyutu üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Yaşar [11], Al 7075 alaşımının delinmesi işlemini hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar metodu yardımıyla itme kuvveti açısından araştırmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünü de incelemiştir. Deneylerde; kesme hızı (40, 80 ve

120 m/dk), diş başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,15 mm/diş), matkap uç açısı (120°, 130° ve 140°) ve kaplama türü (kaplamalı/kaplamasız) parametrelerini dikkate almıştır. Deney çıktıları açısından parametrelerin optimum seviyelerini; 40 m/dk kesme hızı, 0,05 diş başı ilerleme miktarı ve kaplamalı 140° uç açısına sahip matkap olarak tespit etmiştir.

Demir ve arkadaşları [12], 4 ve 6 mm kalınlıklarındaki ön delinmiş Al 7075 T651 iş parçalarına HSS matkaplarla 8 ve 10 mm çaplı delikler delmişlerdir. Ön delik çapının (1,5/2/2,5/3/3,5 ve 4 mm) ve derinliğinin (1, 2, 3 ve 4 mm), delik yüzey pürüzlülüğüne ve delikte oluşan kovan geometrisine etkisini araştırmışlardır. Oluşan etkileri göz önüne alarak 8 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının 2,5-3 mm, 10 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının ise 3-3,5 mm olduğunu ve ideal ön delik derinliğinin 2-3 mm arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında da havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deliklerin delinmesi sırasında sıvı soğutma metodu kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) ele alınmıştır. Deneyler, Taguchi L16(4²) deney tasarımına göre 8 mm çaplı üç takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyde işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvet (itme kuvveti) saptanmıştır. İşleme yönünde saptanan bu maksimum kuvvetler kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla Taguchi optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Delik delme sırasında oluşan itme kuvvetlerini minimize etmek takım aşınmasını ve harcanan enerjiyi de minimuma indirerek maliyetleri düşürmektedir. Fakat sadece maksimum itme kuvveti minimize edilmeye çalışıldığında imalat süresinin arttığı görülmüştür. İmalat süresindeki artış işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkileyeceğinden, maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonları (yanıt yüzey metodu) da gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Alüminyum 2024 T351 alaşımı

Alüminyum alaşımları, kompozitlerin ve yeni hafif malzemelerin geliştirilmesine rağmen başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere otomotiv, inşaat, denizcilik endüstrileri gibi birçok sektörde tercih edilmektedir. Bu sebeple alüminyum alaşımlarının pazar payı her sene daha da artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının havacılık ve uzay endüstrisinde ön plana çıkması, birçok perçinli ve civatalı bağlantıların gerçekleştirilmesi için binlerce delik delme işlemini beraberinde getirir [13].

Alüminyum 2024 T351 alaşımı hafiflik ve iyi yorulma direnci sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisinde uzun süredir kullanılmaktadır [14]. Dolayısıyla bu malzeme üzerinde çok sayıda delik delme işlemi gerçekleştirilir. Binlerce kez uygulanacak delik delme işlemlerinin, maksimum verimde ve kalitede gerçekleşmesi önem arz etmektedir.

2.2. Kesici takımlar (Matkaplar)

Bu çalışma kapsamında karbür matkaplara göre daha düşük maliyetli HSS (yüksek hız takım çeliği) matkaplar tercih edilmiştir. Ruko markasına ait 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar kullanılmıştır. Matkaplara ait teknik bilgiler Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan kesici takımların teknik özellikleri**Table 2.** Technical specifications of the cutting tools

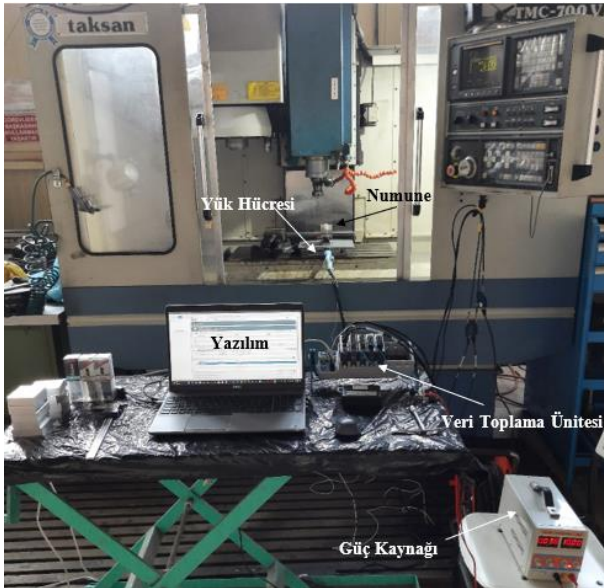
Kesici takım	Toplam uzunluk (mm)	Kanal uzunluğu (mm)	Tepe açısı	Helis açısı
HSS	117	75	118°	25-30°
HSSE-Co5 (Kaplamasız)	117	75	130°	36°
HSSE-Co5 (Kaplama)	117	75	130°	36°

Şekil 1.'de yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Kesici takımlar**Figure 2.** Cutting tools

2.3. Deney düzeneği

Şekil 2.'de deney düzeneği gösterilmiştir. Deneyler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki FANUC (O-M Serisi) kontrol paneline sahip Taksan TMC-700 V CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet verileri; ESİT AX3 yük hücresi, NI cDAQ-9188 veri toplama ünitesinin NI 9237 modülü ve Flexlogger yazılımı kullanılarak toplanmıştır.

**Şekil 3.** Deney düzeneği**Figure 4.** The experimental setup

2.4. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi deney tasarımı, en az zaman kaybı ve maliyetle deneylerin planlanmasını amaçlar. Bu çalışma kapsamında ele alınan deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 2'de ifade edilmiştir.

Tablo 3. Deney parametreleri ve seviyeleri**Table 4.** Experimental parameters and levels

Deney Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
---------------------	----------	----------	----------	----------

Kesme Hızı (m/dk)	50	70	90	110
Diş başı ilerleme (mm/diş)	0,06	0,08	0,1	0,12

Tablo 2'de belirtilen 2 parametre ve 4 seviye göz önüne alınarak L16(4²) ortogonal dizisi seçilmiştir. Seçilen bu ortogonal diziyeye göre planlanmış deney tasarımı Tablo 3.'te ifade edilmiştir.

Tablo 5. Deney tasarımı**Table 6.** Experimental design

Deney No.	Kesme hızı (m/dk)	Diş başı ilerleme (mm/diş)
1	50	0,06
2	50	0,08
3	50	0,1
4	50	0,12
5	70	0,06
6	70	0,08
7	70	0,1
8	70	0,12
9	90	0,06
10	90	0,08
11	90	0,1
12	90	0,12
13	110	0,06
14	110	0,08
15	110	0,1
16	110	0,12

2.5. Taguchi optimizasyonu

Taguchi optimizasyonunda, deney sonuçları değerlendirilerek en uygun parametre seviyeleri tespit edilebilmektedir. Bu değerlendirme işlemi sinyal/gürültü oranı (S/G) denilen bir oranla gerçekleştirilmektedir. Problemlerin hedefine göre sinyal/gürültü oranı hesaplamak için kullanılacak denklem değişmektedir. Bu çalışma kapsamında itme kuvvetinin düşük tutulması istendiğinden en küçük-en iyi hedefine uygun sinyal/gürültü oranı denklemi kullanılmıştır (Denklem 1). Denklem 1'deki Y kalite değişkenini, n gözlem sayısını ifade etmektedir [15]. Maksimum S/G oranını veren parametre seviyesi optimum seviyedir.

$$S/G = -10 \log \left[\sum (Y^2) / n \right] (dB) \quad (1)$$

Bu çalışma kapsamındaki S/G oranı hesapları ve Taguchi optimizasyonları Minitab 19 yazılımı yardımıyla yapılmıştır.

2.6. Yanıt yüzey metodu ile optimizasyon

Yanıt yüzey metodu, birçok bilim dalında ve çeşitli endüstriyel alanlarda kapsamlı bir şekilde uygulanan yöntemdir [16]. Yanıt ifadesi bağımlı değişkeni temsil etmektedir. Bu yöntem yanıt üzerinde etkili olan parametreleri bulmak, bir veya daha fazla yanıt için parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek, yanıt ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil eden matematiksel modelleri elde etmek gibi amaçlarla kullanılır [17]. Bu amaçlar doğrultusunda süreçlerin veya problemlerin optimize edilmesi sağlanır.

Yanıt yüzey metodu kullanılarak bir yanıt için parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesine yanıt optimizasyonu denilmektedir. Eğer yanıt sayısı birden fazla ise gerçekleştirilen optimizasyon çoklu yanıt optimizasyonudur. Çoklu yanıt veya yanıt optimizasyonlarında parametrelerin optimum seviyelerini tespit etmek için desirability fonksiyonu kullanılır (denklem 3). Desirability fonksiyonunun değeri (d_i) 0 ile 1 arasındadır. Değer 1'e yaklaştıkça optimizasyon işleminin istatistiksel olarak tutarlılığı artar. Denklem 3'teki T yanıtın hedef değerini, y_i yanıt için kabul edilebilir alt sınır değerini, U yanıt için kabul edilebilir üst sınırı ve W ağırlığı temsil etmektedir [18].

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{U - y_i}{U - T}\right)^w & y_i < T \\ T \leq y_i \leq U & T \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i > U \end{cases} \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında Minitab 19 yazılımı yardımıyla çoklu yanıt optimizasyonları gerçekleştirilerek iki yanıtı minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan yanıtlar, işlem süresi ve maksimum itme kuvvetidir. Kullanılan her bir matkap (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı çoklu yanıt optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların desirability fonksiyonu değerleri incelenmiştir.

2.7. Üstel düzeltme metodu

Üstel düzeltme metodu, veri toplama sırasında oluşan ve gürültü olarak tabir edilen sinyal sıçramalarını azaltan (yumuşatan) bir yöntemdir. Sinyal gürültüleri neticesinde oluşan verilerin yerine yeni öngörülerde bulunulur. Bu öngörüler, denklem 4 kullanılarak elde edilir.

$$Z_T = \alpha Z_{T-1} + (1 - \alpha) S_{T-1} \quad (4)$$

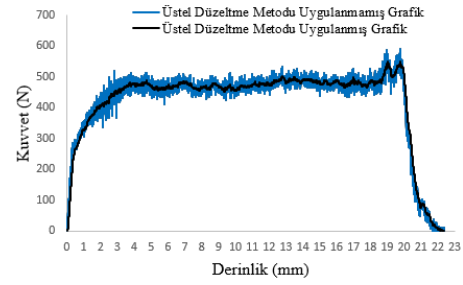
Z_T öngörülen değeri, Z_{T-1} öngörülen bir önceki değeri, S_{T-1} bir önceki gerçek değeri ve α düzeltme katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmadaki üstel düzeltme yöntemi hesaplamaları Excel yazılımında gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Bulgular

Delik delme deneyleri, 8 mm çaplı her bir takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için 60x70x20 mm uzunluklarında alüminyum 2024 T351 alaşımı numune kullanılarak Tablo 3'teki deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümü üç ekseninde (F_x , F_y ve F_z) gerçekleştirilmiştir; fakat işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvetler baz alınarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunun sebebi x ve y eksenlerinde oluşan kuvvetlerin işleme yönü olan z eksenindeki kuvvetlere (itme kuvveti) nazaran oldukça düşük değerde olmasıdır.

3.1. Maksimum itme kuvvetlerinin tespiti

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Kuvvet-Derinlik grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan veri grafiklerinde sinyal gürültülerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple verilere Excel yazılımında üstel düzeltme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin sebep olduğu anlam ifade etmeyen veriler minimize edilmeye çalışılmıştır. Üstel düzeltme metodu uygulanmış veriler üzerinden de maksimum kuvvetler tespit edilmiştir (Şekil 3.).



Şekil 5. Üstel düzeltme metodunun sinyal gürültüleri üzerindeki etkisi

Figure 6. Effect of exponential smoothing method on signal noise

3.2. Deney sonuçları

Tablo 4'te HSS, Tablo 5'te HSSE-Co5 ve Tablo 6'da HSS Co5 TiAlN kaplamalı matkaplarla delinen deliklere ait maksimum itme kuvveti ($F_{z,maks}$) sonuçları ve işlem süreleri belirtilmiştir. Kesme hızı (V_c) ve diş başına ilerleme miktarı (f_z) kesme parametreleridir.

Tablo 7. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları

Table 8. Experimental results of holes drilled with HSS drill

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	Süre (s)	$F_{z,maks}$ (N)
1	50	0,06	11,29	306
2	50	0,08	8,45	351
3	50	0,1	6,75	450
4	50	0,12	5,62	498
5	70	0,06	8,05	306
6	70	0,08	6,03	402
7	70	0,1	4,82	471
8	70	0,12	4,02	525
9	90	0,06	6,25	333
10	90	0,08	4,70	498
11	90	0,1	3,75	531
12	90	0,12	3,13	567
13	110	0,06	5,11	349
14	110	0,08	3,84	451
15	110	0,1	3,07	526
16	110	0,12	2,56	633

Tablo 9. HSSE-Co5 matkap kullanılan deney sonuçları

Table 10. Experimental results using HSSE-Co5 drill

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	Süre (s)	$F_{z,maks}$ (N)
1	50	0,06	11,03	285
2	50	0,08	8,25	352
3	50	0,1	6,59	438
4	50	0,12	5,49	544
5	70	0,06	7,86	300
6	70	0,08	5,88	383
7	70	0,1	4,70	455
8	70	0,12	3,93	549
9	90	0,06	6,10	332
10	90	0,08	4,59	446
11	90	0,1	3,67	531
12	90	0,12	3,05	585
13	110	0,06	4,99	348
14	110	0,08	3,75	468
15	110	0,1	3,00	516
16	110	0,12	2,50	582

Tablo 11. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deney sonuçları**Table 12.** Experimental results using HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	Süre (s)	$F_{z,max}$ (N)
1	50	0,06	11,03	314
2	50	0,08	8,25	395
3	50	0,1	6,59	443
4	50	0,12	5,49	513
5	70	0,06	7,86	306
6	70	0,08	5,88	418
7	70	0,1	4,70	485
8	70	0,12	3,93	566
9	90	0,06	6,10	353
10	90	0,08	4,59	464
11	90	0,1	3,67	485
12	90	0,12	3,05	578
13	110	0,06	4,99	351
14	110	0,08	3,75	460
15	110	0,1	3,00	511
16	110	0,12	2,50	631

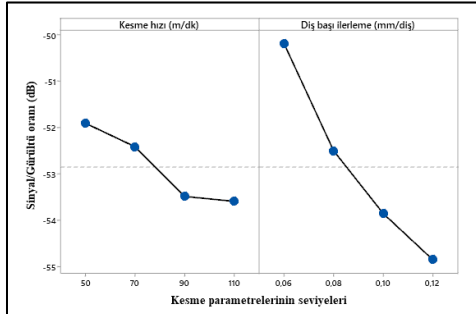
Şekil 4.'te örnek olarak HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune gösterilmiştir.

**Şekil 7.** HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune**Şekil 8.** The test sample drilled with a HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill

4. Optimizasyon

4.1. HSS matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

HSS matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları Şekil 5.'te gösterilmiştir.

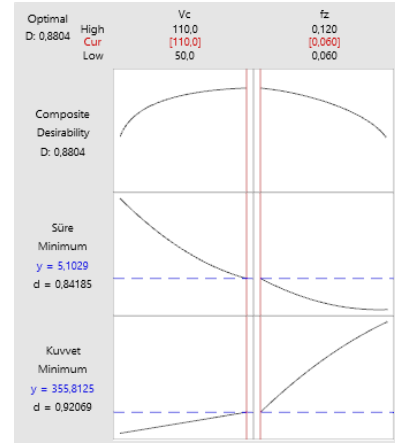
**Şekil 9.** HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri**Şekil 10.** Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS drill

HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti verilerine göre; kesme hızı (V_c) parametresinin

optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

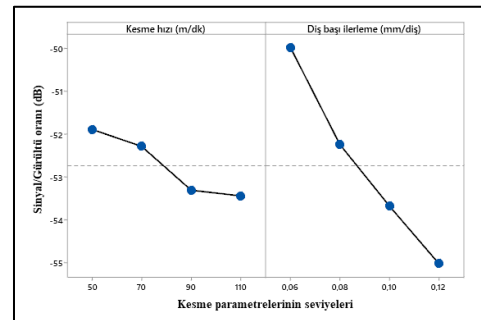
4.2. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 6.'da belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. İtme kuvveti için 355,8125 N, işlem süresi için 5,1029 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8804 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.

**Şekil 11.** HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları**Şekil 12.** Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS drill

4.3. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

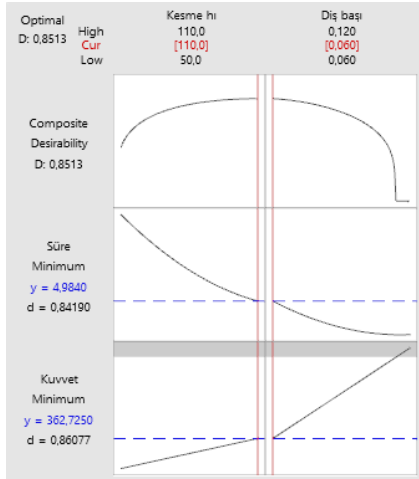
HSSE-Co5 matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları Şekil 7.'de gösterilmiştir.

**Şekil 13.** HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri**Şekil 14.** Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS-Co5 drill

HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı (V_c) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

4.4. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 8'de belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. itme kuvveti için 362,7250 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8513 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.

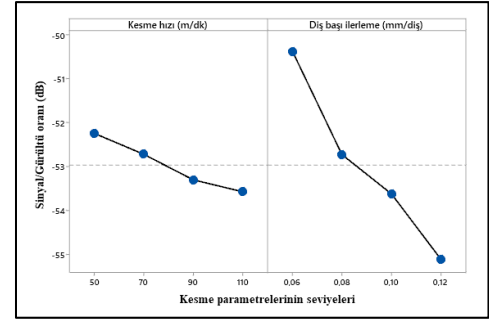


Şekil 15. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları

Şekil 16. Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS-Co5 drill

4.5. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerinin sinyal/gürültü oranları Şekil 9'da gösterilmiştir. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı (V_c) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

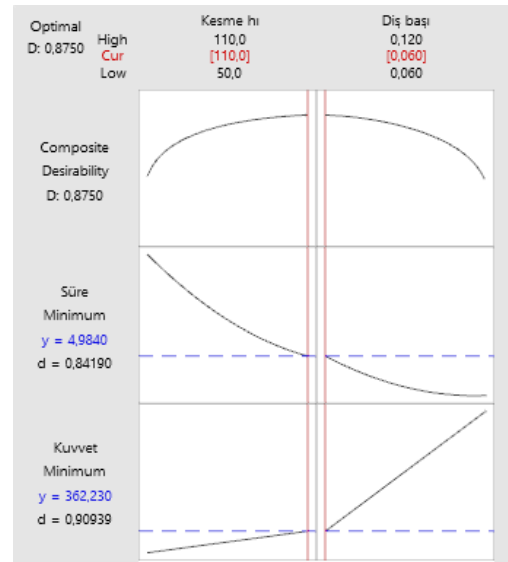


Şekil 17. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri

Şekil 18. Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS-Co5 (TiAlN coated) drill

4.6. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 10'da belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. İtme kuvveti için 362,230 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8750 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.



Şekil 19. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları

Şekil 20. Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS-Co5 (TiAlN coated) drill

5. Sonuçlar

İtme kuvvetini minimize eden kesme parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Üç matkap türü için de kesme hızı parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak bulunmuştur.

Çoklu yanıt optimizasyonu üç matkap türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üç matkap türü için de aynı bulunmuştur. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Çoklu yanıt optimizasyonu bulgularının desirability fonksiyonu değerleri; HSS matkap için 0,8804, HSSE-Co5 matkap için 0,8513 ve HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap için 0,8750 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler değerlendirildiğinde yapılan çoklu yanıt optimizasyonunun istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneyler esnasında üç eksen de kuvvet (FX, FY, FZ) ölçümü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde, x ve y ekseninde ölçülen kuvvetlerin z ekseninde ölçülen kuvvetlere göre oldukça düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında, z eksenindeki kuvvetler itme kuvveti olarak değerlendirilip maksimum değerleri baz alınarak istatistiksel analizler yapılmıştır.

Kuvvetlerin ölçümü sırasında sinyal gürültüleri neticesinde oluşan veriler tespit edilmiştir. Elde edilen tüm deney verilerine, Excel yazılımında üstel düzeltme veri çözümleme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin neden olduğu anlam ifade etmeyen veriler azaltılmaya çalışılmıştır.

Al 2024 T351 alaşımının 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplarla delinmesi işleminde elde edilen bu sonuçlar daha sonra yapılacak akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar katkılarının beyanı

Yunus Zübeyir Turgut: Deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım.

Murat Özsoy: Fikir oluşturma, deney tasarımı, veri toplama, yazım.

Kaynaklar

- [1] Çakır, M. C. 2010. Delik Delme. ss 349-473. Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Dora Yayınları, 525s.
- [2] Yıldız, A. 2021. Delik Delme İşleminin Simülasyonu ve Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Mekanik Gerilmelerin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s, Ankara.
- [3] Zhu, Z., He B., Chen, J. 2020. Evaluation Of Tool Temperature Distribution In MQL Drilling Of Aluminum 2024-T351, Journal of Manufacturing Processes, Cilt. 56, s. 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.029>.
- [4] Bonhin, E. P., David-Müzel, S., Guidi, E. S., Botelho, E. C., Ribeiro, M. V. 2020. Influence Of Drilling Parameters On Thrust Force And Burr On Fiber Metal Laminate (Al 2024-T3/glass fiber reinforced epoxy), Procedia CIRP, Cilt. 101, s. 338-341. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.035>.
- [5] Landon Y., Lacombe, A., Souop, L. A. K., Daidié, A., Paredes, M., Chiról, C., Benaben, A. 2022. Impact Of The Drilling Process On The Surface Integrity And Residual Fatigue Strength Of 2024-T351 Aluminum Parts, Procedia CIRP, Cilt. 108, s. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.072>.

- [6] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Din, I. U., Hanif, M. I., Kuklu, U., Pimenov, D. Y., Ikhlak M. 2021. Effect Of Cutting Parameters And Tool Geometry On The Performance Analysis Of One-Shot Drilling Process Of AA2024-t3, Metals, Cilt. 11(6), s. 854-866. <https://doi.org/10.3390/met11060854>.
- [7] Saravanakumar, A., Sreenivas, P., Vijaya kumar, S., Pradeep kumar U., Rajeshkumar, L. 2022. Optimization Of Drilling Process Parameters For Self-Lubricants Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites, Materials Today Proceedings, Cilt. 52, s. 1461-1465. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.196>.
- [8] Dahnel, A. N., Fauzi, M. H., Raof, N. A., Mokhtar, S., Khairussaleh, N. K. M. 2022. Tool Wear And Burr Formation During Drilling Of Aluminum Alloy 7075 In Dry And With Cutting Fluid, Material Today Proceedings, Cilt. 59, s. 808-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.110>.
- [9] Korkmaz, M. E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R., Günay, M. 2019. Al2014 Alüminyum Alaşımının Delinmesinde İtme Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt. 6(1), s. 193-199. <https://doi.org/10.31202/ecjse.449701>.
- [10] Navaneethakrishnan, G., Sureshkumar, B., Palanisamy, R., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., Kamel, S. 2022. Effect Of Cryogenic Treatment On Drill Tool For Enhancing Metal Cutting Operation Of Aluminium Alloy IS737.Gr19000. Journal of Materials Research and Technology, Cilt. 18, s. 1488-1501. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.069>.
- [11] Yaşar, N. 2019. Thrust Force Modelling And Surface Roughness Optimization In Drilling of AA-7075: FEM and GRA, Journal of Mechanical Science and Technology, Cilt. 33(10), s. 4771-4781. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0918-5>.
- [12] Demir, Z., Adıyaman, O., Yakut, R. 2017. A7075-T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Ön-Delik Çap ve Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Ve Kovanın Geometrik Boyutlarına Etkisinin Araştırılması, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Cilt. 7(2), s. 228-240.
- [13] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Vafadar, A. 2020. A review: Drilling Performance And Hole Quality Of Aluminium Alloys For Aerospace Applications, Journal of Materials Research and Technology, Cilt. 9(6), s. 12484-12500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>.
- [14] Haddag, B., Atlati, S., Nouari, M., Moufki, A. 2016. Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis Of Cutting Forces, Chip Segmentation And Built-Up Edge Formation, Metals, Cilt. 6(9), s.197-210. <https://doi.org/10.3390/met6090197>.
- [15] Taylan, D. 2009. Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Isparta.
- [16] Murat D., Ensarioğlu C., Gürsakal N., Oral A., Çakır M.C. 2018. Sert Malzemelerin Tornalanmasında Takım Aşınmasının Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile İncelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt. 33(4), s. 1299-1308. <https://doi.org/10.17341/gazimmd.416427>.
- [17] Özsoy N. 2022. Prediction And Optimization Of Thrust Force During The Drilling Of AISI 2080 Steel, Materials Testing, Cilt. 64(4), s. 602-609. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2098>.
- [18] Hazir E., Özcan T. 2018. Response Surface Methodology Integrated With Desirability Function And Genetic Algorithm Approach For The Optimisation Of CNC Machining Parameters, Arabian Journal for Science and Engineering, Cilt. 44, s. 2795-2809. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3559-6>.