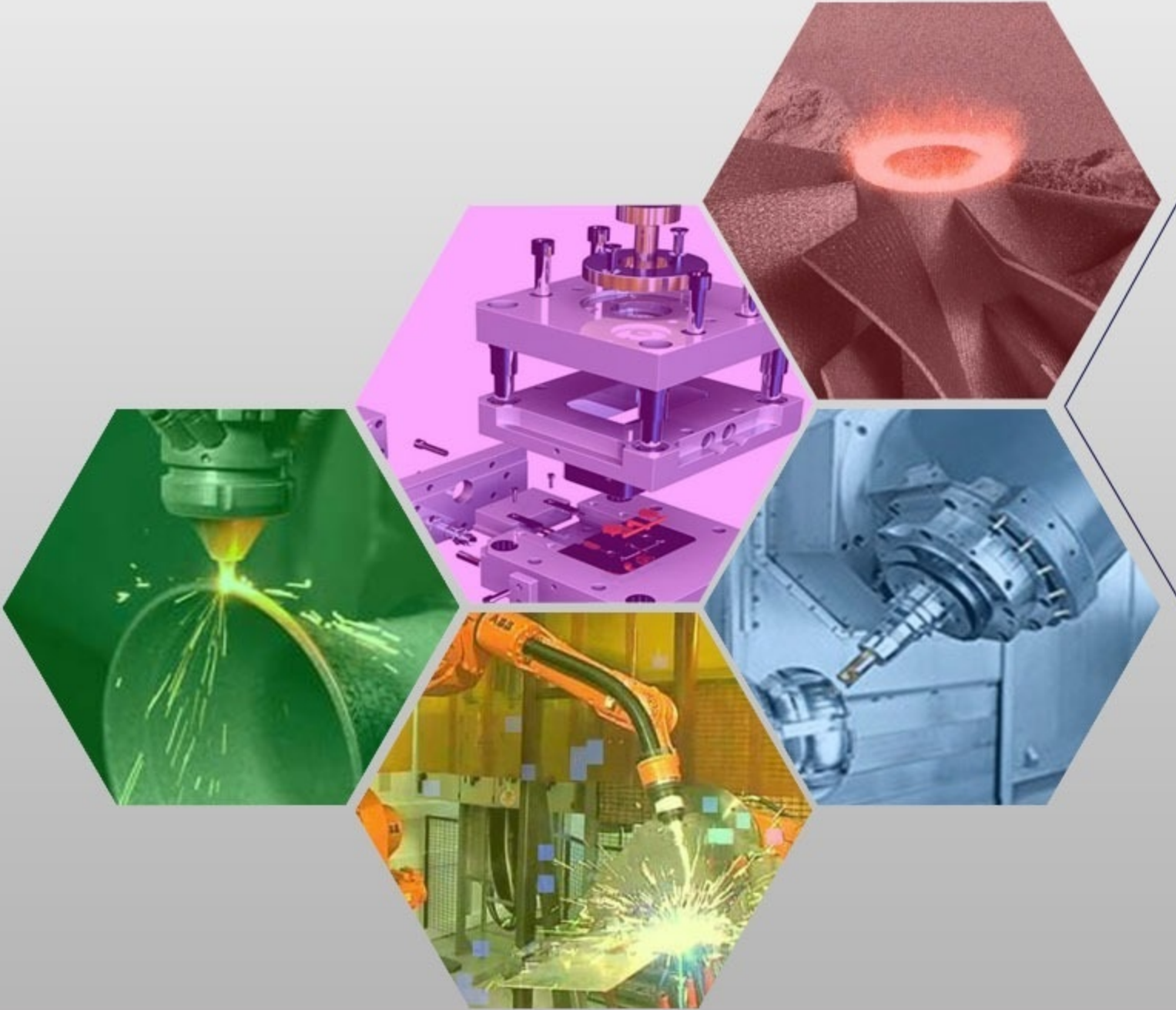




# İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:2 SAYI:1 YIL: 2021

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:2 ISSUE:1 YEAR: 2021



Cilt (Volume) : 2

Sayı (Issue) : 1

Yıl (Year) : 2021

e-ISSN: 2717-7475

# İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>

## Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

## Baş Editor (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

## Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin KAÇAL, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

## Alan Editörleri (Field Editors)

Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi

Doç. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Azmi Erdoğan, Bartın Üniversitesi

## Teknik Editörler (Technical Editors)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi

## Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuzhan Yılmaz, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Üniversitesi

Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis

Doç. Dr. Okan Ünal, Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi

Dr. Mozammel Mia, Imperial College London

Dr. Nafiz Yaşar, Karabük Üniversitesi

Dr. Munish Kumar Gupta, Shandong University

Dr. Ferhat Yıldırım, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde

Dr. Danil Yu. Pimenov, South Ural State University

Dr. Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi



Cilt (Volume) : 2  
Sayı (Issue) : 1  
Yıl (Year) : 2021  
e-ISSN: 2717-7475

**Yayıncı (Publisher)**  
Mustafa GÜNAY

**Web Sayfası (Web Page)**  
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

**Yayın Tarihi (Publication Date)**  
Nisan 2021 (April 2021)

**Yayın Dili (Publication Language)**  
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

**Yayın Aralığı (Publication Frequency)**  
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

**Yayın Türü (Publication Type)**  
Sürekli yayın (Periodical)

**Kapak Tasarımı (Cover Design)**  
Ozan YETKİN

### **İletişim**

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)  
Telefon: +90 370 4187400  
E-posta: [matecajournal@gmail.com](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto:mgunay@karabuk.edu.tr)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

### **Contact**

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)  
Phone: +90 370 4187400

E-mail: [matecajournal@gmail.com](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto:mgunay@karabuk.edu.tr)

Instructions for authors and all articles in this journal can be reached at  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca>

## İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

### Araştırma Makalesi (Research Article)

### Sayfa (Page)

- Namlularda Değişken Yiv-Set Eğrisinin Kararlılık Faktörü ve Set Torkuna Etkisi** (*The Effect of Variable Groove-Set Curve on Stability Factor and Set Torque in Barrels*)  
Çağrı ŞAHİN, Ahmet ÖZDEMİR 1-13
- Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozit Malzemeye Uygulanan Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Etkileri** (*Effects of Cutting Parameters in Drilling Process Applied to Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composite Material*)  
Faik OKAY, Serkan ISLAK 14-22
- Al 1050-H14 Alaşımının Delinmesi Sürecinde Yüzey Pürüzlülüğü, Çapak Oluşumu, Takım Aşınması, Çaptan ve Silindiriklikten Sapmanın Modellenmesi ve Tahmini** (*Modeling and Estimation of Surface Roughness, Burr Height, Adhesion, Deviation from Diameter and Cylindrical in the Drilling Process of Al 1050-H14 Alloy*)  
Hüseyin GÖKÇE 23-40
- Toz Metalurjisi Yöntemi ile WC Takviyeli CuNiSi Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu** (*Production and Characterization of WC Reinforced CuNiSi Composites by Powder Metallurgy Method*)  
Mehmet AKKAŞ, Khalid Fouzi Ihmeda BOUSHIHA, Tarek Mousa K. TABONAH 41-48
- Investigation of the Performance of Ecological Cooling/Lubrication Methods in the Milling of AISI 316L Stainless Steel** (*AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Frezelenmesinde Ekolojik Soğutma/Yağlama Yöntemlerinin Performansının İncelenmesi*)  
Emine ŞİRİN, Şenol ŞİRİN 75-84

### Derleme Makale (Review Article)

- Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme** (*A Review on Determination of Material Constitutive Parameters of Aluminum Alloys Produced by Additive Manufacturing Method*)  
Murat AKTÜRK, Mehmet Erdi KORKMAZ 49-60
- Sivil Havacılıkta Bakım, Onarım ve Yenileme (BOY) Faaliyetleri, Havacılık 4.0 ve Yeni Trendler** (*Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Activities in Civil Aviation, Industry 4.0 and New Trends*)  
Abdullah Cahit KARAOĞLANLI 61-74

## Namlularda Değişken Yiv-Set Eğrisinin Kararlılık Faktörü ve Set Torkuna Etkisi

Çağrı ŞAHİN<sup>1\*</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TR Mekatronik Sistemler Sanayi ve Ticaret A.Ş., Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 04.01.2021

**Kabul:** 01.02.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Yiv Set Tasarımı

Artan Hatveli (Dönümlü) Yiv

Set Eğrisi

Mermilerde Statik

Kararlılık

Setlere Etkiyen Tork

### ÖZET

Ateşli silah namluları, ateşledikleri merminin türüne göre yivli ve yivsiz olmak üzere iki ana grup altında sınıflandırılabilir. Namlu tasarımında; merminin namludan çıktığı andaki açısız hızı, jiroskopik kararlılığı ve setlere etkiyen tork doğrudan yiv set eğrisine bağlıdır. Namlularda kullanılan yiv set eğrileri sabit hatveli ya da artan hatveli olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında 20x102 mm M56 HEI mühimmatı için; namlu içerisindeki basınç, hız ve zaman değişimi Vallier-Heydenreich metoduna göre hesaplanmış, belirlenen bir namlu çıkış eğimi için farklı yiv set eğrileri oluşturulmuş ve bu eğriler için merminin açısız hızındaki değişim elde edilmiştir. Yiv set eğrisini tanımlayan “n” üssünün 1.67 değeri için, setlere etkiyen en yüksek torkun yaklaşık yüzde %50 oranında azaldığı görülmüştür. Namlu boyundan ve namlu çıkış hızından ödün verilmesi halinde tork ve statik kararlılık faktörlerindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki hesaplama adımları Python ortamında oluşturularak bilgisayar destekli modül haline dönüştürülerek namlu tasarımının alternatif değerlerle yeniden oluşturulması için gerekli olan uzun hesap sürecinden zaman tasarrufu sağlanmıştır.

## The Effect of Variable Rifling Curve on Stability Factor and Set Torque in Barrels

### ARTICLE INFO

**Received:** 04.01.2021

**Accepted:** 01.02.2021

#### Keywords:

Rifling Design

Increased Pitch (Twist)

Rifling Curve

Static Stability in Bullets

Torque on Lands

### ABSTRACT

Firearm barrels can be classified under two main groups, rifled and smoothbore, according to the type of bullet they fire. In barrel design, the angular velocity, gyroscopic stability of the bullet at the moment it leaves the barrel and the torque acting on the lands are directly dependent on the rifling curve. The rifling curves used in the barrels can be fixed pitch or incremental pitch. Within the scope of this study, for 20x102 mm M56 HEI ammunition; The pressure, velocity and time changes in the barrel were calculated according to the Vallier-Heydenreich method. In line with the results obtained, it was seen that the maximum torque acting on the lands decreased by 50% for the value of 1.67 of the “n” power defining the rifling curve. Changes in torque and static stability factors were compared by shortening the barrel and compromising muzzle velocity. The calculation steps in the study were created in the Python environment and converted into computer-aided modules, saving time from the lengthy calculation process required to recreate the barrel design with alternative values.

## 1. GİRİŞ(INTRODUCTION)

Namlu ateşli silahların en önemli ana elemanıdır. Silah sisteminin namlusu belirli bir hedefe yöneltilecek merminin istenilen doğrultuda hareket etmesini ve hedefi vurmasını sağlar[1]. Başka bir tanım olarak ise namlu; mühimmatın hedefe belirli bir namlu çıkış hızıyla gönderilmesini sağlayan, kalın cidarlı bir silindir [2]. Bir silah sisteminin etkinliği hedefi vurabilme kabiliyetiyle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca mühimmata bağlı olarak namlu tasarımının yapıldığı namlu parametreleri; namlu kalibre ölçüsü (set üstü çapı), yiv profili (derinliği ve genişliği) yiv eğrisinin formu (helis açısı) ve yanma odası boyutlarıdır [8].

\* Sorumlu yazar, e-posta: cagri\_-sahin@hotmail.com



Ateşli silah namluları, ateşledikleri merminin türüne göre yivli ve yivsiz olmak üzere iki ana grup altında sınıflandırılabilir. Yivsiz namlulardan ateşlenen mermiler ok şeklindeki kanatçıklı yapıları ile kendilerini uçarken dengeleyebilirler [23, 24]. Yivli namlularda ise, mermi uzun eksenini etrafından döndürülerek açısal momentumun korunmasından faydalanılarak dengelenirler. Namlulara açılan yiv ve set burada devreye girerek mermiye uzun eksenini etrafında dönü kazandırarak uçuş sırasında jiroskopik kararlılığa sahip olmasını sağlar. Yivlerin genişlik ve derinlikleri namlu boyunca sabittir. Sarım açısı veya yiv set hatvesi de çoğu zaman sabittir [10]. Sabit hatveli yiv sete sahip namlularda karşılaşılan önemli bir sorun; setlere etkileyen torkun yiv set başlangıcında oldukça yüksek miktarda olması ve namlu boyunca azalan şekilde değişmesidir. Artan hatveli yiv set eğrisi ile namlu setlerine etki eden torkun azaltılırken, merminin sahip olduğu kararlılık faktöründe korunması mümkündür.

İç balistik analizi için ana araç, basınç ve mermi hızı eğrisidir. Heydenreich, bir silahta; mermi kütlesi, namlu çapı, namlu boyu, ilk hız, barut kütlesi ve piezometrik verimin bilinmesi durumunda, gaz basıncının en yüksek olduğu andaki mermi hızını, zamanı ve basıncı hesaplamak üzere, piezometrik verime ( $\eta_p$ ) bağlı olarak bazı deneysel esaslı formüller geliştirmiştir [2, 4, 6, 9, 16, 17, 20, 21]. Bu yöntem ile elde edilen basınç değerlerinden faydalanarak, namlu cidarına etkileyen gerilmeler birçok çalışmada elde edilmiştir [9, 11, 16, 19, 21].

Namlulardaki iç balistik hesaplamaları literatürde fazlasıyla yer alırken, namlu tasarımı için büyük öneme sahip olan yiv set eğrisinin oluşturulması ve bu eğrinin etki ettiği; kararlılık faktörü ve setlere etkileyen tork değerleri literatürde yeteri miktarda bulunmamaktadır. Bu çalışmada 20 mm silah sistemine ait bir namlu için artan hatveli yiv set eğrisi oluşturulmuş, oluşturulan yiv set eğrileri için merminin sahip olduğu kararlılık faktörü ve setlere etkileyen tork değerleri incelenmiştir. Namlu içerisindeki basınç değişimi ve mermi hızını bulmak için ise Vallier – Heydenreich iç balistik metodu kullanılmıştır. Ayrıca namlu uzunluğunun kısaltılmasının kararlılık faktörüne etkileri incelenmiş, namlu tasarımının en önemli unsuru olan değişken adımlı yiv set helisel kanallarının değişiminin merminin namlu içerisindeki hız değişimini, namlu içerisindeki basınç değişimini, girdi parametrelerine göre yiv set eğrisini oluşturan ve setlere etkileyen tork değerlerini hesaplayabilen bilgisayar modülü geliştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. İç Balistik Hesaplamalar (Internal Ballistic Calculations)

20 mm HEI mühimmatı ve namlu parametrelerine göre iç balistik değerleri, Heydenreich tarafından hazırlanan deneysel veri tablolarına dayalı olan Vallier-Heydenreich yöntemi kullanılarak elde edilmiştir [17].

Mermi ve namlu bilgilerinden faydalanarak Eşitlik 1 yardımıyla namlu içerisindeki ortalama basınç ( $P_0$ ) bulunabilir.

$$P_0 = \left[ \frac{m_m + 0,5m_B}{2X_e A_n} \right] V_0^2 \quad (1)$$

Tablo 1. Mermi ve Namlu Parametreleri (Bullet and Barrel Parameters)

Namlu uzunluğu ( $X_e$ , mm)	1415
En yüksek basınç ( $P_m$ , MPa)	417
Mermi ilk hızı ( $V_0$ , m/s)	1049
Barut kütlesi ( $m_B$ , g)	39
Mermi kütlesi ( $m_m$ , g)	100
Namlu kesit alanı ( $A_n$ , m <sup>2</sup> )	$3,1138 \times 10^{-4}$

Eşitlik 1’de basınç oranı ( $\eta$ ) gösterilmiştir,  $P_0$  ateşleme sırasında namlu içerisinde oluşan ortalama basıncı ve  $P_m$  ise namlu içerisindeki en yüksek basıncı ifade etmektedir.

$$\eta_p = \frac{P_0}{P_m} \quad (2)$$

Eşitlik 3, 4 ve 5’te verilen gaz basıncının en yüksek olduğu andaki mermi yolu ( $X_1$ ), zamanı ( $t_1$ ) ve hızı ( $V_1$ ); Şekil 1’deki basınç oranına bağlı balistik fonksiyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 1’deki  $\Sigma$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\pi$ ,  $T$  fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 8, 9, 10, 11 ve 12’den [20] elde edilmiştir.

$$X_1 = X_e \Sigma(\eta_p) \quad (3)$$

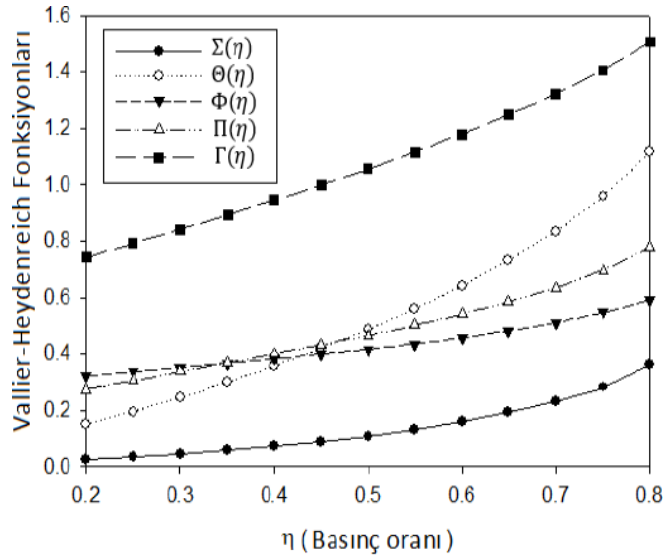
$$t_1 = \frac{2X_e}{V_0} \theta(\eta_p) \quad (4)$$

$$V_1 = V_0 \phi(\eta_p) \quad (5)$$

Merminin namlu içerisinde geçirdiği süre ( $t_e$ ) ve namlu ağzındaki gaz basıncı ( $P_e$ ); Eşitlik 6 ve 7’deki deneysel balistik faktörleri  $\pi(\eta_p)$  ve  $T(\eta_p)$  değerlerine göre hesaplanır.

$$P_e = P_m \pi(\eta_p) \quad (6)$$

$$t_e = \frac{2X_e}{V_0} T(\eta_p) \quad (7)$$



Şekil 1.  $\Sigma(\eta)$ ,  $\Theta(\eta)$ ,  $\Phi(\eta)$ ,  $\Pi(\eta)$  ve  $T(\eta)$ 'nin  $\eta$  ile değişimi (Change of  $\Sigma(\eta)$ ,  $\Theta(\eta)$ ,  $\Phi(\eta)$ ,  $\Pi(\eta)$  and  $T(\eta)$  with  $\eta$ ) [20]

$$\Sigma(\eta_p) = 2,4732\eta_p^3 - 1,6831\eta_p^2 + 0,7830\eta_p - 0,08 \quad (R^2 = 0,9988) \quad (8)$$

$$\theta(\eta_p) = 1,7277\eta_p^3 - 2,1198\eta_p^2 + 1,645\eta_p - 0,1188 \quad (R^2 = 0,9997) \quad (9)$$

$$\phi(\eta_p) = 1,0117\eta_p^3 - 1,0707\eta_p^2 + 0,6696\eta_p + 0,2215 \quad (R^2 = 0,9998) \quad (10)$$

$$\pi(\eta_p) = 1,8042\eta_p^3 - 2,0408\eta_p^2 + 1,3633\eta_p + 0,0659 \quad (R^2 = 0,9997) \quad (11)$$

$$T(\eta_p) = 1,3124\eta_p^3 - 1,2161\eta_p^2 + 1,3828\eta_p + 0,5033 \quad (R^2 = 0,9999) \quad (12)$$

En yüksek basınç anındaki mermi pozisyonu belirlendikten sonra merminin herhangi bir andaki konumuna bağlı olan  $\lambda$  parametresi Eşitlik 13'ten elde edilir.

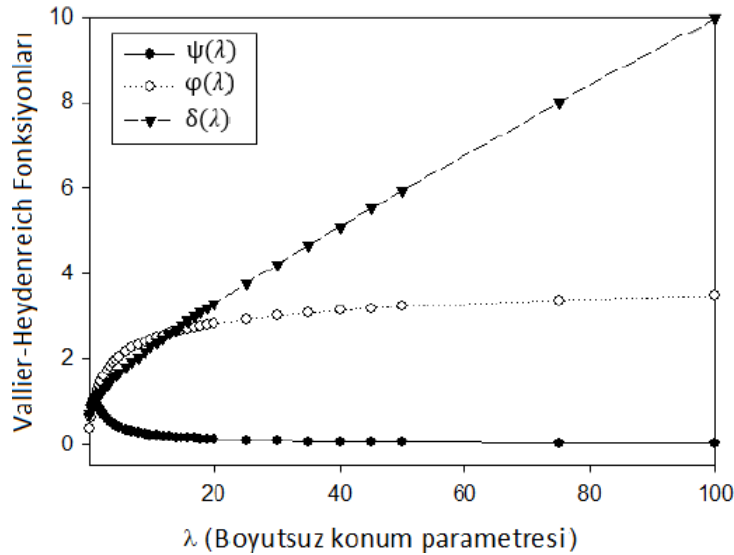
$$\lambda = \frac{x_e}{x_1} \quad (13)$$

Vallier–Heydenreich yönteminin Şekil 2'deki  $\lambda$  parametresine bağlı  $\psi(\lambda)$ ,  $\phi(\lambda)$  ve  $\delta(\lambda)$  değişkenleri yardımıyla Eşitlik 14,15 ve 16 ile namlu içerisindeki herhangi bir konumdaki basınç, hız ve zaman belirlenebilir. Şekil 2'deki  $\psi$ ,  $\phi$  ve  $\delta$  fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 17, 18 ve 19'den [20] elde edilmiştir.

$$P = P_m \psi(\lambda) \quad (14)$$

$$V = V_1 \phi(\lambda) \quad (15)$$

$$t = t_1 \delta(\lambda) \quad (16)$$



Şekil 2.  $\psi(\lambda)$ ,  $\phi(\lambda)$  ve  $\delta(\lambda)$ 'nin  $\lambda$  ile değişimi (Change of  $\psi(\lambda)$ ,  $\phi(\lambda)$  and  $\delta(\lambda)$  with  $\lambda$ ) [20]

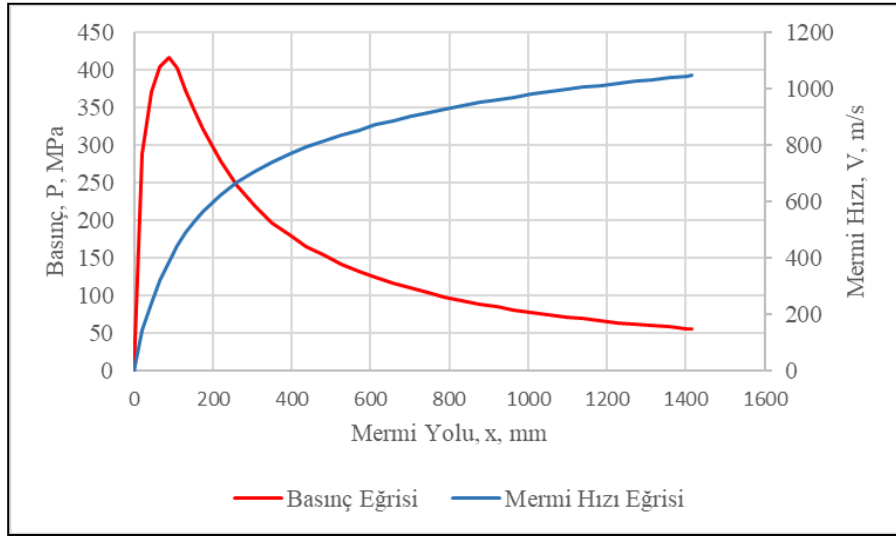
$$\psi(\lambda) = \frac{2,16}{\lambda} e^{-0,5 \left( \frac{\ln\left(\frac{\lambda}{6,5696}\right)}{1,4651} \right)^2} \quad (R^2=0,9932) \quad (17)$$

$$\phi(\lambda) = 1,5339(1 - e^{-0,0449\lambda}) + 1,6893(1 - e^{-0,5368\lambda}) + 0,201 \quad (R^2=0,9987) \quad (18)$$

$$\delta(\lambda) = 0,6165(1 - e^{-0,3327\lambda}) + 31,5218(1 - e^{-0,0032\lambda}) + 0,6953 \quad (R^2=0,9999) \quad (19)$$

Tablo 1'deki değerlere göre namlu içerisindeki basınç değişimi ve mermi hızı değerleri literatürdeki çalışmalarda da gözlemlendiği [1,2, 4 , 6, 9, 16, 17, 20, 21] haliyle elde edilmiştir (Şekil 1).





Şekil 3. Mermi yoluna göre namlu içerisindeki basınç ve mermi hızındaki değişim (Changes in pressure and projectile velocity in the barrel according to projectile path)

## 2.2. Yiv Set Eğrisinin Oluşturulması (Creating the Rifling Curve)

Sabit hatveli yiv set eğrisi silindir etrafına sarılmış bir doğrudan ibarettir. Bu doğruyu tanımlamak için, doğrunun eğimi kullanılır [25].

$$\tan\phi = \frac{\pi d}{nd} = \frac{\pi}{n} \quad (20)$$

$\phi$  : Yiv set eğrisinin eğimi, derece  
 $d$  : Namlu çapı (setten sete), m  
 $n$  : Merminin dönüşü, kalibre

Merminin yiv set eğimine bağlı olarak açısal hızındaki değişim ise [25];

$$\omega = \frac{2V\tan\phi}{d} \quad (21)$$

$$N = \frac{60V}{\pi d} \tan\phi \quad (22)$$

$V$  : Doğrusal mermi hızı, m/s

şeklinde hesaplanabilir.

Artan hatveli namlularda ise yiv set eğrisi doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Yiv set açısının değişimi yani  $\tan\phi$  'nin değişimi, parabolün eğiminin hesaplanmasıyla çıkarılabilir.

Artan hatveli yiv set için eğrinin genel eşitliği [25],

$$y = px^n \quad (23)$$

formatında olacaktır. “y” yiv set eğrisi silindir şeklinden iki boyutlu olarak açıldığında dikey eksenindeki değerdir, silindir şeklindeki namlu için namluya sarılmış çevresel mesafe olmaktadır.

“p” sabitini bulmak için Eşitlik 23'ün türevi alınır.

$$\frac{dy}{dx} = pnx^{n-1} = \tan\alpha \quad (24)$$

- p : Çıkış açısına göre tanımlanan sabit, birimsiz.  
n : Yiv – set eğrisini tanımlayan üs, birimsiz  
x : Mermi yolu, mm  
 $x_E$  : Toplam mermi yolu, mm  
 $\alpha$  : Yiv – set eğimi, derece  
 $\alpha_E$  : Namlu çıkışındaki yiv – set eğimi, derece  
y : Namlu içerisindeki yiv setin çevresel mesafesi, mm

“tan  $\alpha$ ” yiv set eğrisinin eğimidir. Sabit hatveli yiv set için n üssü “1” ve p sabiti ise “tan  $\alpha$ ” ifadesine eşittir. Artan hatveli yiv setin sonunda “ $\alpha$ ” çıkış açısının eğimi olur [24]. Namlu çıkışında;

$$pnx_E^{n-1} = \tan\alpha_E \quad (25)$$

$$p = \frac{\tan\alpha_E}{nx_E^{n-1}} \quad (26)$$

$$pnx_E^{n-1} = \tan\alpha_E \quad (27)$$

Sonuç olarak Eşitlik;

$$y = \frac{\tan\alpha_E}{nx_E^{n-1}} x^n \quad (28)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 28’in türevi alınır,

$$\frac{dy}{dx} = \tan\alpha = \frac{\tan\alpha_E}{x_E^{n-1}} x^{n-1} \quad (29)$$

eğimin değişimi;

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d\tan\alpha}{dx} = \frac{(n-1)\tan\alpha_E}{x_E} x^{n-2} \quad (30)$$

elde edilir. Namlu ucunda istenen yiv-set eğimi tur başına dönü türünden ifade edilebilir [24].

$$\tan\alpha_E = \frac{\pi}{n_c} \quad (31)$$

$$\tan\alpha = \frac{\pi}{n_c x_E^{n-1}} x^{n-1} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dx} \tan\alpha = \frac{\pi(n-1)}{n_c x_E^{n-1}} x^{n-2} \quad (33)$$

### 2.3 Statik (Jiroskopik) Kararlılık Faktörü (Static (Gyroscopic) Stability Factor)

Dönmekte olan her nesnenin jiroskopik özellikleri vardır. Dönü kararlı mermilerde, hava kaynaklı kuvvetlerin etki ettiği nokta olan basınç merkezi, ağırlık merkezinin arkasına konumlandırılır. Böylece mermi ağırlık merkezi etrafında dönerek burnunun mermi yörüngesini takip etmesi sağlanır.

Klasik dış balistiğe göre jiroskopik kararlılık faktörü [8];

$$S_g = \frac{I_x^2 \omega^2}{2\rho I_y S d V^2 C_{MA}} \quad (34)$$

$C_{MA}$	: Yunuslama momenti katsayısı, birimsiz
$I_x$	: Merminin aksel atalet momenti, $\text{kgm}^2$
$I_y$	: Merminin enine atalet momenti, $\text{kgm}^2$
$S$	: Mermi referans alanı, $\text{m}^2$
$\rho$	: Atmosfer yoğunluğu, $\text{kg/m}^3$
$\omega$	: Merminin açısal hızı, $\text{rad/s}$
$d$	: Mermi çapı, $\text{m}$
$V$	: Mermi hızı, $\text{m/s}$

Kararlılık faktörü merminin geometrik teknik karakteristiği olan dört özelliğine bağlıdır. Bunlar; şekil faktörü, dönü hızının karesinin aksel hızın karesine oranı, aerodinamik magnus efekti değişimi ve atmosferik modelin yoğunluğudur. Dolayısıyla jiraskopik kararlılık faktörü Eşitlik 35'teki gibi tekrar yazılabilir [8].

$$S_g = \left( \frac{2I_x^2}{I_y \pi d^3} \right) \left( \frac{\omega^2}{V^2} \right) \left( \frac{1}{C_{MA}} \right) \left( \frac{1}{\rho} \right) \quad (35)$$

#### 2.4 Setlere Etkiyen Tork (Torque Acting on Riflings)

Setlere gelen tork; mermi arkasındaki basınca, namlu çapına, namlu alanına, namludaki yiv-set eğrisine, merminin çizgisel hızına, merminin ağırlığına ve merminin jiroskopik yarıçapına bağlıdır. Setlere gelen tork [24];

$$T = I_x \ddot{\theta} \quad (36)$$

$$I_x = M_m i^2 \quad (37)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{r} \left( a_1 \tan \alpha + V^2 \frac{d}{dx} \tan \alpha \right) \quad (38)$$

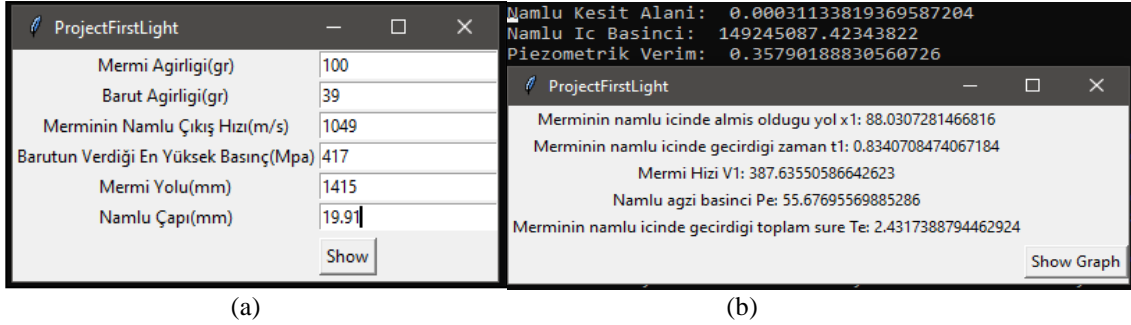
$$T = M_m \frac{i^2}{R} \left( \frac{A_n P}{M_m} \tan \alpha + V^2 \frac{d}{dx} \tan \alpha \right) \quad (39)$$

olarak ifade edilebilir.

$I_x$	: Merminin aksel atalet momenti, $\text{kgm}^2$
$\ddot{\theta}$	: Merminin açısal ivmesi, $\text{rad/s}^2$
$a_1$	: Merminin çizgisel ivmesi, $\text{m/s}^2$
$R$	: Mermi yarıçapı, $\text{m}$
$\alpha$	: Yiv set eğrisinin eğimi, derece
$M_m$	: Mermi kütlesi, $\text{kg}$
$A_n$	: Namlu kesit alanı, $\text{m}^2$
$P$	: Namlu içindeki anlık basınç, $\text{Pa}$
$V$	: Namlu içerisindeki anlık mermi hızı, $\text{m/s}$
$i$	: Mermi jirasyon yarıçapı, $\text{m}$
$\frac{d}{dx} \tan \alpha$	: $\tan \alpha$ 'nın türevi, $1/\text{m}$

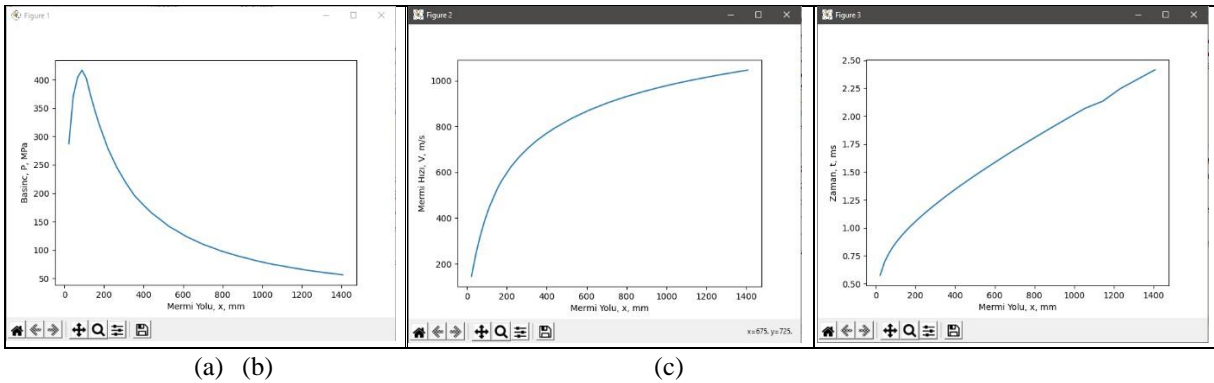
### 3. İÇ BALİSTİK, YİV SET EĞRİSİ VE SET TORQU HESAPLAYABİLEN PROGRAM: PROJECTFIRSTLIGHT (PROGRAM THAT CALCULATE INTERNAL BALLISTIC, RIFLING CURVE AND SET TORQUE: PROJECTFIRSTLIGHT)

Namlu içerisindeki basıncın mermi yoluna göre değişimini, mermi hızının mermi yoluna göre değişimini, zamanın mermi yoluna göre değişimini, yiv set eğrisi ve setlere etkiyen tork değerlerini hesaplayabilen ve sonuçları grafik olarak ekrana getirebilen bir program Python ortamında oluşturulmuştur.



Şekil 4. İç balistik hesaplamaları için girdi ekranı (a), ara çıktı ekranı (b) (Input screen (a), intermediate Output screen (b) for internal ballistics calculations) [1]

Programın gerekli hesaplamaları yapabilmesi için Şekil 4'teki (a) parametrelerin programa girilmesi gereklidir. Girdiler sonucunda hesaplamaları yapan program sonuç grafiklerini ekrana verebilmektedir (Şekil 5).



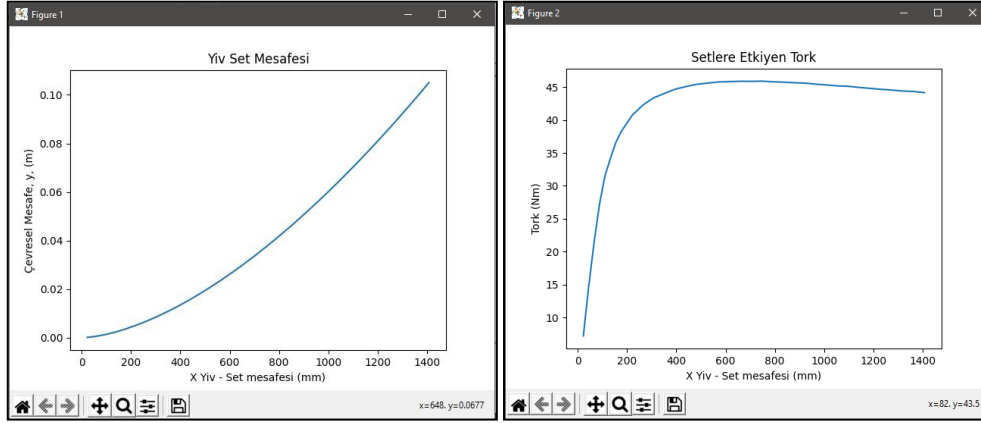
Şekil 5. İç balistik hesaplamaları sonuç ekranları; namlu içi basıncın mermi yoluna göre değişimi (a), mermi hızının mermi yoluna göre değişimi (b), zamanın mermi yoluna göre değişimi (c) (Internal ballistic calculation results screens; variation of in-barrel pressure according to projectile path (left), change of bullet speed according to projectile path (middle), change of time according to projectile path (right)) [1]

Programın ikinci kabiliyeti ise yiv set eğrisini oluşturma ve setlere etkiyen tork değerlerini hesaplayabilmedir. Hesaplamaların yapılabilmesi için gerekli olan parametrelerin programa girilmesi gerekmektedir (Şekil 6).



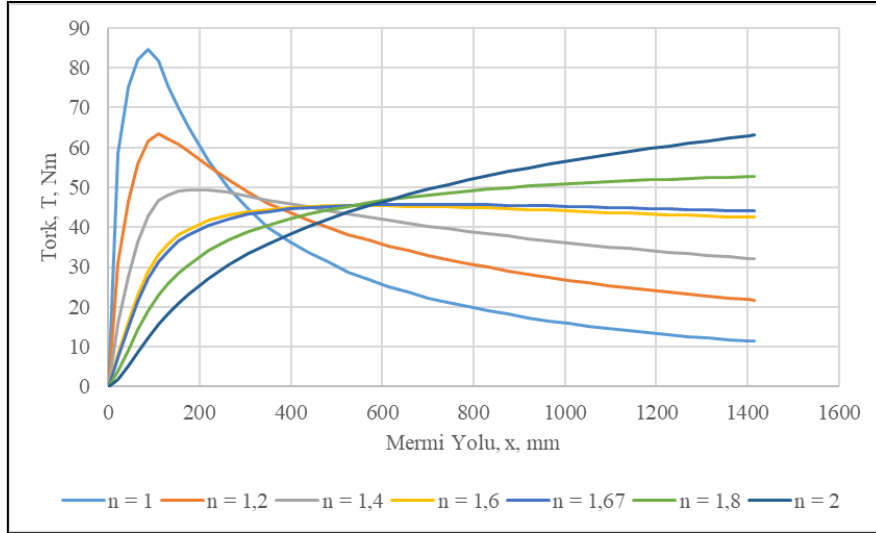
Şekil 6. Artan hatveli yiv set ve set torku hesaplamaları için girdi ekranı (Input screen for progressive rifling and set torque calculations) [1]

İkinci aşama için gerekli parametrelerin programa girilmesiyle, iv set eğrisi ve setlere etkiyen tork grafikleri verilebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Artan hatveli yiv set eğrisi çıktı ekranı (sol), setlere etkiyen tork çıktı ekranı (sağ) (Progressive rifling curve output screen (left), torque acting on sets output screen (right)) [1]

#### 4. TEORİK BULGULAR VE TARTIŞMA (THEORETICAL RESULTS AND DISCUSSION)



Şekil 8: Farklı n üsleri için setlere etkiyen torklardaki değişim (Change in torques acting on lands for different n exponents) [1]

Farklı “n” üslerine sahip yiv set eğrileri için setlere etkiyen tork Eşitlik 39’dan elde edilmiş ve Şekil 8’de grafik olarak sunulmuştur.

Eşitlikteki değerler;

$M_m$  : 0,1; mermi ağırlığı, kg

$r$  : 0,009955; mermi yarıçapı, m

$A_n$  : 0,000303705; namlu referans alanı,  $m^2$

$i$  : 0,00741; merminin jirasyon yarıçapı, m

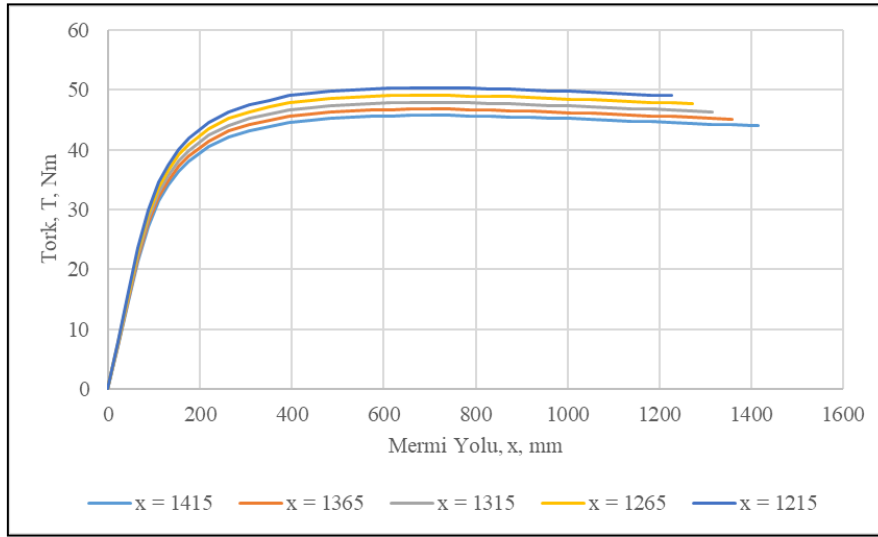
$I_x$  : 0,000005486; merminin aksenal atalet momenti,  $kgm^2$

olarak kabul edilmiştir [22]. Ayrıca;  $P$ ,  $V$ ,  $\tan \alpha$  ve  $d \tan \alpha / dx$  değerleri yerine daha önce farklı n üsleri için bulunan değerler eşitlikte yerine konularak setlere etkiyen tork değerleri hesaplanabilir. Hesaplama sonucunda setlere etkiyen toplam tork bulunur, set başına etki eden tork için bulunan değerler set sayısına bölünmelidir. Toplam tork değerinden hareketle yiv–set imalat parametrelerine (set sayısı, yiv derinliği, set genişliği vb.) geçiş yapılmaktadır.

Setlere etkiyen tork değerleri incelendiğinde, sabit hatveli yiv sete sahip namluda tork değerinin set başlangıcında yaklaşık 85 Nm'ye ulaştığı, namlu boyunca setlere etki eden torkun giderek azaldığı görülmektedir. Bu durum, set profilinin iyileştirilmesini zorlaştıracaktır. Set başlangıcında yüksek torka maruz kalacak setlerin bu tork değerine dayanması için öncelikle geometrilerinin daha büyük olması gerekmektedir. Fakat namlu ucuna doğru tork azalacağından, oluşturulan set kesiti set başlangıcında beklenen dayanımdan çok daha fazlasına dayanabilecek geometrik değerlerde olacaktır. İyileştirme açısından bu istenmeyen bir durumdur. Artan hatveli yiv set eğrilerinde ise setlere etkiyen tork değerinin ciddi miktarda azaldığı görülmektedir. Ayrıca,  $n = 1,67$  değerinde tork eğrisi yaklaşık ilk 400 mm'den sonra yatay bir yönelim alarak namlu boyunca setlere etkiyen torkun 45 Nm kaldığı görülmektedir. Setlere etkiyen torkun en az değişim gösterdiği bu değer, set geometrisinin iyileştirilmesi açısından en uygun değer olduğuna karar verilmiştir.

#### 4.1. Mermi Yolunun Kısaltılması ve Yiv Set Eğiminin Değiştirilmesiyle Setlere Etkiyen Torktaki Değişim (Change in Torque Acting on Lands by Shortening the Projectile Path and Changing the Rifling Curve)

Setlere etkiyen tork değerinin belirli bir namlu boyu ve çıkış eğimine göre değişimi belirlenmişti. Burada, namlu boyunun kısaltılması ve namlu çıkışındaki yiv-set eğiminin değiştirilmesiyle setlere etkiyen torktaki değişim de incelenmiştir. Yiv-set eğrileri  $n = 1,67$  üssüne göre oluşturulacak şekilde; birinci grup yiv set eğrilerinde, namlu çıkışındaki yiv set eğimi  $6,916^\circ$  olarak sabit tutulmuştur. Diğer taraftan namlu boyu toplamda 20 cm olmak üzere 5'er cm kısaltılmış ve kısa namlu boylarındaki setlere etkiyen torklardaki değişim incelenmiştir (Şekil 9).

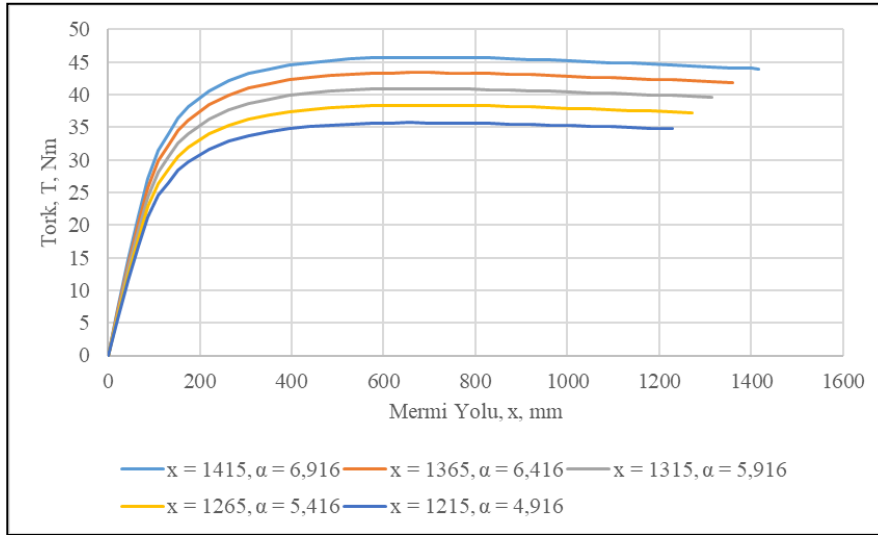


Şekil 9. Namlu boyunun kısaltılması, namlu çıkışındaki yiv set eğiminin sabit tutulmasıyla setlere etkiyen torklardaki değişim (Shortening of barrel length, change in torques acting on the sets by keeping the slope of rifling at the barrel exit constant) [1]

Şekil 9, namlu çıkışındaki yiv set eğimi sabit tutulup namlu boyunun kısaltılması durumunda setlere etkiyen en yüksek torkun artacağı görülmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur. Yiv set eğrisi daha kısa bir uzunlukta aynı çıkış eğimini yakalamaya çalışmasından dolayı, yani sarma miktarı arttığından setlere etkiyen tork değerinin yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlar; namlu tasarımı yapıldığında, durumda set profilinin yeni tork değerlerine dayanabilecek bir geometride olması için set genişliklerinin artırılmasını gerektirecektir.

Yiv set eğrileri  $n = 1,67$  üssüne göre oluşturulacak şekilde bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen ikinci grup yiv set eğrilerinde ise, namlu boyunun kısaltılmasının yanında yiv set eğrisinin namlu çıkış eğimi namlunun 5'er cm kısaltılmayla  $0,5$  derece azaltılmıştır (Şekil 4).





Şekil 10. Namlunun kısaltılması ve namlu çıkışındaki yiv set eğiminin azaltılmasıyla setlere etkileyen torklardaki değişim (Change in torques affecting the sets by shortening the barrel and decreasing the rifling slope at the exit)[1]

Şekil 10’da görüldüğü üzere namlu boyunun kısaltılmasıyla birlikte namlu çıkışındaki yiv set eğiminin de azaltılmasıyla setlere etkileyen tork değerlerinin de azalacağını göstermektedir. Yiv set eğrisi daha kısa bir uzunlukta daha küçük bir çıkış eğimini yakalamaya çalışacağından, yani sarma miktarı azaldığından; setlere etkileyen tork değerinin de azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar; namlu tasarımı yapıldığında, set profilinin yeni tork değerlerine fazlasıyla dayanabilecek bir geometriden dolayı set genişliklerinin azaltılmasını gerektirebilecektir.

Farklı namlu boyu ve çıkış eğimine sahip namlu tasarımları için statik kararlılık faktörü Eşitlik 35’ten elde edilmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

M56 HEI mühimmatına ve atmosfere ait değerler;

$I_x$  : 0,000005486, merminin aksenal atalet momenti,  $\text{kgm}^2$

$I_y$  : 0,0000409, merminin enine atalet momenti,  $\text{kgm}^2$

$\rho$  : 1,225, atmosfer yoğunluğu,  $\text{kg/m}^3$

$C_{MA}$ : 1,87, merminin yunuslama moment katsayısı, birimsiz

$S$  : 0,00031134, mermi referans alanı,  $\text{m}^2$

$d$  : 0,01991, mermi referans çapı, m

Tablo 2’de iki gruptaki namlular için mermilerin statik kararlılık faktörleri incelendiğinde, kararlılık faktörünün namlu boyuna değil yiv set eğimine bağlı olduğu görülmektedir. Yüksek eğime sahip yiv set eğrileri, mermilerde daha yüksek jirasyon etkisi doğurduğundan mermilerin statik kararlılık faktörü artış göstermektedir.

Tablo 2. Farklı namlu boyu ve yiv set eğimleri için statik kararlılık faktöründeki değişim (Change in static stability factor for different barrel length and rifling slopes) [1]

Mermi Yolu, mm	Namlu Çıkışındaki Yiv Set Eğimi, derece				
	6,916	6,416	5,916	5,416	4,916
1215	3,847	3,306	2,807	2,350	1,934
1265	3,847	3,306	2,807	2,350	1,934
1315	3,847	3,306	2,807	2,350	1,934
1365	3,847	3,306	2,807	2,350	1,934
1415	3,847	3,306	2,807	2,350	1,934

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1. Artan hatveli yiv set eğrisinin en büyük getirisi setlere etkiyen torkun ciddi miktarda azalmasıdır. Dolayısıyla setlerin aşınmasının azalmasına ve namlu ömrünün artmasına olanak sağlamaktadır. 6,916 derecelik namlu çıkış eğiminde, farklı n üslerine göre oluşturulan eğrilerden elde edilen sonuçlara göre setlere etkiyen tork değerinin en uygun formda olması için “n” katsayısının 1,67 olması gerektiği tespit edilmiştir. 20 mm M56 HEI mühimmatı için 6,916 derecelik namlu çıkış eğiminde  $n = 1,67$  alınarak oluşturulan yiv set eğrisi namlu sonuna doğru yatay bir eğilim göstermiş ve en yüksek tork değerinin 46 Nm civarında kaldığı hesaplanmıştır.
2. Numune namlu için yapılan çalışmalar sonucunda yiv set eğrisinin oluşturulması için kullanılan hesaplama prosedürü metrik sistem için de doğrulanmış ve ülkemizde üretilecek orta ve yüksek kalibre silah namlularının tasarımı için büyük bir kazanım elde edilmiştir.
3. Namlu boyunun kısaltılmasıyla birlikte, yiv set eğrisinin namlu çıkışındaki eğimin sabit tutulması veya azaltılmasının setlere etkiyen torku arttırdığı görülmüştür.
4. Statik kararlılık faktörünün namlu boyuyla ilgili olmadığı, doğrudan yiv set eğrisinin eğimine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ç. Şahin, Namlularda değişken yiv-set eğrisinin kararlılık faktörü ve set torkuna etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2020.
2. M. Akçay, Balistik, 1. Baskı, Kazmaz Matbaacılık, Ankara, 2010.
3. D. Baran, Namlularda kendi kendine ateşleme süresinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2018.
4. D.E. Carlucci, S.S. Jacobson, Ballistics theory and design of guns and ammunition, 2nd ed., CRC Press, New York, 2014.
5. M.W. Courtney, A stability formula for plastic-tipped bullets part 1: motivation and development of new formula, USAF Academy, Colorado, 2012.
6. P.O. Cronemberger, E.P. Lima Júnior, J.A.M. Gois, A.B. Caldeira, Theoretical and experimental study of the interior ballistics of a rifle 7.62, Thermal Engineering, 13(2): 20-27, 2014.
7. General Dynamics, 25 mm APFSDS Ammo Fact Sheet, <https://www.gd-otscanada.com/product/25mm-x-137-ammunition/>, 14.03.2019.
8. D.N. Gkritzapis, E.E. Panagiotopoulos, D.P. Margaritis, D.G. Papanikas, Computational atmospheric trajectory simulation analysis of spin-stabilised projectiles and small bullets, Int. J. Computing Science and Mathematics, 2(1-2): 53-72, 2008.
9. O. Gündüzer, Namlu cidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2011.
10. F. Iğın, 7,62 NATO mermisinin iç dinamiğinin hedef doğruluğu üzerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2019
11. B. Zhang, G. Liu, Y. Wei, Y. Li, Analysis of contact between barrel and projectile of a rifle based on finite element method, International Conference on Innovative Material Science and Technology, 19.08.2016, Shenzhen.
12. R.L. McCoy, Modern exterior ballistics the launch and flight dynamics of symmetric projectiles, 1st ed., Schiffer Publishing Ltd., China, 2012.
13. Stanag 3585, NATO Stanag 3585 v4, North Atlantic Treaty Organization, 1999.
14. Stanag 3585, NATO Stanag 3585 v6, North Atlantic Treaty Organization, 2008.
15. Nortrop Grumman, 20x102 M56 HEI Ammo Fact Sheet, <https://www.northropgrumman.com/>, 14.03.2019.
16. B. Özcan, Kısa namlulu ateşli silahlarda iç balistiğe bağlı mukavemet analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2019.
17. B. Özcan, A. Kurt, U. Şeker, M. Seyis, Tabanca namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile iç balistiğe bağlı mukavemet analizi, 3'rd International Symposium On Industrial Design & Engineering, 22-23 Kasım 2018, Antalya.
18. Ö. Özyılmaz, Hafif silah tasarımının balistik açıdan incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2010.
19. A.K. Stiffler, (1982). Projectile sliding forces in a rifled barrel, International Journal of Mechanical Sciences, 25(2): 105-119, 1983.

20. Ç. Susantez, Vallier-Heydenreich metodu ile silahların namlu iç balistiğinin incelenmesi, Savunma Bilimleri Dergisi, 19(1): 73-94, 2020.
21. A. Şentürk, Namlu iç balistiği ve termo-mekanik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitü, Ankara, Türkiye, 2015.
22. M.J. Piddington, Comparative evaluation of the 20 mm developmental ammunition exterior ballistics, U.S. Army Aberdeen Research and Development Center, Maryland, 1972.
23. W.E. Rafert, A.W. Jank, C.M. Jaco, J.M. Cragin, G.K. Patterson, Research and development of materiel engineering design handbook, elements of armament engineering part three weapon systems and components, 1st ed., U.S. Army Materiel Command, Washington D.C., 1963.
24. U.S. Army Materiel Command, Research and development of materiel engineering design handbook guns series gun tubes, 1st ed., U.S. Army Materiel Command, Washington D.C., 1964.
25. U.S. Materiel Command, Research and development of materiel engineering design handbook elements of armament engineering part two ballistics, 1st ed., U.S. Army Materiel Command, Washington D.C., 1963.

## Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozit Malzemeye Uygulanan Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Etkileri

Faik OKAY<sup>1,\*</sup> , Serkan ISLAK<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu Meslek Yüksekokulu, Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 08.03.2021

**Kabul:** 02.04.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Delme

İlerleme kuvveti

Yüzey Pürüzlülüğü

Toz metalurjisi

### ÖZET

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyum matrisli bor karbür (B<sub>4</sub>C) malzemeye delik delme işlemindeki kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney parametreleri olarak; 5 mm çaplı HSS matkapla 20-30-40-50 m/dak kesme hızı ve 0.1-0.2-0.3-0.4 mm/dev ilerleme miktarı kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, B<sub>4</sub>C takviyesiyle ilerleme kuvveti ve moment değerlerinin düştüğü görülmüştür. İlerleme miktarının artmasıyla kuvvet ve moment değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. En düşük ilerleme kuvveti değeri 20 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme miktarında 180 N olarak takviyeli numunede ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değerleri, ilerleme miktarının artmasıyla artmış, kesme hızının artmasıyla birlikte azalmıştır. B<sub>4</sub>C takviyesi yüzey kalitesini artırmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri çalışmada kullanılan en yüksek kesme hızı ve en düşük ilerleme miktarında, takviyeli numunede, 2.448 µm olarak ölçülmüştür.

## Effects of Cutting Parameters in Drilling Process Applied to Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composite Material

### ARTICLE INFO

**Received:** 08.03.2021

**Accepted:** 02.04.2021

#### Keywords:

Drilling

Thrust force

Surface roughness

Powder metallurgy

### ABSTRACT

In this study, the effects of cutting parameters on the surface roughness and thrust force were investigated during the drilling process on aluminum matrix boron carbide (B<sub>4</sub>C) material produced by powder metallurgy method. As experiment parameters; cutting speed of 20-30-40-50 m/min and a feed rate of 0.1-0.2-0.3-0.4 mm/rev were used with 5 mm diameter HSS drill. As a result of the experiments, it was seen that the thrust force and moment values decreased with B<sub>4</sub>C reinforcement. It has been determined that the force and moment values increase as the amount of feed increases. The lowest thrust force value was measured at 20 m/min cutting speed, 180 N at 0.1 mm/rev feed rate, measured on the reinforced sample. The surface roughness values increased with the increase of the feed rate and decreased with the increase of the cutting speed. B<sub>4</sub>C reinforcement increased the surface quality. The lowest surface roughness value was measured as 2.448 µm in the reinforced sample at the highest cutting speed and the lowest feed rate used in the study.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi devrimi ile beraber makineleşme çağına başlaması ve bunu sonucunda insan gücü ile yapılan birçok işin makineler yardımıyla yapılması, insanoğlunu yeni araştırma alanlarına yöneltmiştir. Teknolojideki hızlı gelişmeler sonucunda araştırmalar ürünlerini vermeye başlamış ve geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretilmiştir [1]. Yeni geliştirilen malzemelerden birisi de kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler, sürekli faz ve takviye fazı olmak üzere iki fazdan oluşur ve matris fazından daha üstün özelliklere sahiptir. Ayrıca sertlik, mukavemet ve aşınma direnci gibi mükemmel özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda büyük ilgi görmektedir [2]. Alüminyum hafif olmasının yanında yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri sayesinde tercih edilir [3]. Bununla birlikte tokluğunun ve korozyon direncinin iyi olması, takviye malzemesi ile bağ kuvvetinin iyi olması nedeniyle matris malzemesi olarak yaygın

\* Sorumlu yazar, e-posta: fokay@kastamonu.edu.tr

bir şekilde kullanılır [4]. Savunma sanayi, havacılık, otomotiv, gemi yapımı, elektronik ve daha pek çok sektörde uygulama alanı bulmaktadır [5-8]. Alüminyum matrisli kompozitlerde birçok takviye elemanı kullanılmaktadır. Bunların başında bor karbür ( $B_4C$ ) gelmektedir. Düşük yoğunluğu ( $2.52 \text{ gr/cm}^3$ ) ve çok iyi mekanik ve kimyasal özellikler göstermesi nedeniyle tercih edilmektedir [9]. Bu kompozitler birçok farklı yöntemle üretilebilmektedir [10]. Bu yöntemlerin başında Toz metalurjisi (TM) yöntemi gelmektedir. Bu yöntem, metal tozlarının karıştırılıp belirli sıcaklık değerlerinde, üretilecek parçanın boyutlarına sahip bir kalıp içinde preslenmesi ve ardından uygun bir sıcaklıkta sinterleme işlemi ile gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir [11]. TM yönteminin tercih edilmesinin en önemli sebebi parçacıkların homojen dağılımıdır. Bu yöntemde, metal tozları karıştırılarak istenilen parça şekli ve ebadına göre kalıpta preslenerek başarıyla üretilmektedir [12].

İmalat sektöründeki en önemli hedef, dünyadaki rekabetin hızla artmasından dolayı kaliteli ürünün düşük maliyetlerle üretilmesidir. Sektör çalışanları maliyetleri düşürme konusuna yoğunlaşmışlardır. Hammaddeyi israf etmemek için kesme parametrelerinin ve koşullarının çok iyi belirlenmesi gerekir. Aynı zamanda kesici takım ömrünün artırılması ve ürün kalitesinin yükseltilmesi ihmal edilmemelidir. Ancak uygun işleme koşulları maliyeti yükseltebilir. Ürünlerin istenilen toleransta ve yüzey kalitesinde işlenebilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda işlenebilirliğe etki eden birçok etken belirlenmiştir. Bunların başında, tezgah, takım, iş parçası malzemesi, kullanılan yöntem, kesme hızı, talaş kesiti ve ilerleme miktarı gelmektedir [13, 14]. Kesme işlemi gerçekleştirilirken oluşan kuvvetler hem takımın hem de parça üzerinde etkili olduklarından işleme kalitesi bu durumdan olumsuz etkilenebilir [15]. Kesme kuvvetleri talaş kaldırma işleminde son derece önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda kesme hızı ve derinliği, ilerleme miktarı, kesicinin uç geometrisi ile iş parçası malzemesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir [16]. Delik açma işlemi en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerindedir. Delik açma işlemi, kılavuz çekme, delik büyütme, raybalama vb. operasyonlardan önce gerçekleştirilmek zorundadır. Ayrıca makine montaj ekipmanı olarak kullanılan cıvata, perçin, pim vb. bağlantı elemanlarının kullanımı için de delik açma operasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu durumlar delik açma işleminin kullanımını artırmakla beraber önemini de yükseltmiştir. Delme işleminin parça içerisinde kapalı bir bölgede gerçekleşmesi, talaşın helis kanalları aracılığı ile takım üzerinden tahliye edilmesi, talaş sıkışmasına bağlı olarak takım kırılmaları ve kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar bu operasyonu karmaşık ve zorlu bir hale getirmektedir [17, 18]. Yaşanan bu zorluklar delik delme işlemi üzerinde yapılan çalışmaları daha değerli ve anlamlı kılmaktadır [19].

Literatürde alüminyum matrisli kompozitlere delik delme işlemiyle ilgili birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir.

Javdani ve Sorkhabi  $B_4C$  takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir.  $B_4C$  takviyesinin %10'u geçmesiyle çekme dayanımının azaldığı ve mekanik özelliklerin bozulduğunu belirtmişlerdir [20]. Motorcu ve Ekici, toz metalurjisi-sıcak presleme yöntemi ile üretilen  $B_4C$  takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. İlerleme miktarının artmasıyla eksenel kuvvetin arttığını kesme hızının artmasıyla da azaldığını belirtmişlerdir. Delme işleminde en etkin parametrenin %96 ile  $B_4C$  takviyesi olduğunu kaplamalı kesici takımların delme parametreleri üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. En düşük eksenel kuvvet ve tork değerlerinin sertlik değeri en düşük olan %5  $B_4C$  numunede ölçüldüğünü belirtmişlerdir [21]. Karabulut ve arkadaşları,  $B_4C$  takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada yüzey pürüzlülüğünün,  $B_4C$  oranı ve kesme hızı arttıkça azaldığını, ilerleme hızı ve kesme derinliği arttıkça da yükseldiğini ifade etmişlerdir. Yüzey kalitesi için en önemli parametrenin kesme hızı (%63) olduğunu daha sonra sırasıyla ilerleme hızı ve kesme derinliğinin geldiğini vurgulamışlardır [22]. Hayjehneh ve arkadaşları, alüminyum matrisli hibrit kompozitlere delik delme işleminde devir sayısı ve ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvveti ve moment değerlerinin de arttığını belirtmişlerdir [23]. Aynı şekilde Ramulu ve arkadaşları da alüminyum matrisli kompozitlere delik delme işleminde kesme hızı ve ilerleme miktarı arttıkça moment ve kesme kuvveti değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir [24]. Palanikumar ve Muniaraj, alüminyum matrisli hibrit kompozitlere delik

delme işleminde en önemli parametrelerin kesme kuvveti ve ilerleme miktarı olduğunu belirtmişlerdir [25]. Samy ve arkadaşları, alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin, delik delme işleminde düşük kesme hızında ve düşük ilerleme miktarlarında yüzey kalitesinin bozuk olduğunu saptamışlardır [26]. Ahamed ve arkadaşları, alüminyum matrisli kompozitlerin işlenmesinde yüksek ilerleme miktarlarında oluşan ısının difüzyon hızına bağlı olarak kesici takıma yapışan parçacıklarla birlikte yüzey kalitesini bozduğunu ifade etmişlerdir [27]. Shabo ve arkadaşları, alüminyum matrisli kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında sünek matrisin içerisine sert parçacıkların eklenmesiyle malzemenin deformasyon davranışının değiştiğini belirtmişlerdir. Düşük takviye oranlı malzemenin işlenmesinde yığıntı talaş oluşumu gözlemlenmiştir [28]. Tinga, alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin işlenebilirliği incelemiş, düşük takviye oranlarındaki malzemelerin delinmesinde kesici takımın maruz kaldığı sıvanmanın yüzey kalitesini bozduğunu belirtmiştir. Ayrıca takviyeli numunelerin yüzey kalitesinin daha yüksek olduğunu saptamıştır [29].

Literatürdeki diğer çalışmalar değerlendirildiğinde alüminyum matrise farklı takviye elemanları katıldığı B<sub>4</sub>C ile yapılan çalışmaların sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca diğer çalışmalarda alüminyum matrisli kompozitlerin döküm veya soğuk presleme tekniği ile üretildiği görülmektedir. Bu çalışmada sıcak presleme tekniği başarıyla uygulanmış ve TM yöntemiyle üretilen alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemeye delik delme işleminde kesme parametrelerine bağlı ilerleme kuvveti, moment ve yüzey pürüzlülüğü değerleri araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada, matris malzemesi olarak 15-30 µm tane boyutlarında alüminyum, takviye olarak ortalama 10 µm tane büyüklüğünde B<sub>4</sub>C tozları kullanılmıştır. Tozlar 200 dev/dak dönüş hızında 1 saat süreyle mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırılan tozlar Tablo 1'deki hacim oranına göre 550°C sıcaklığında ve 35 MPa basınçta sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numunelerin boyutları 24x24x8 mm'dir.

Tablo 1. Deney numunelerinin hacimce oranları (Volume rates of the test samples)

Numune	Hacimce oran (%)	
	Al	B <sub>4</sub> C
N1	100	0
N2	92	8

Çalışmada, mikroyapı incelemeleri için FEI QUANTA 250 FEG marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca numunelerin sertliği Brinell sertlik ölçme cihazıyla ölçülmüştür.

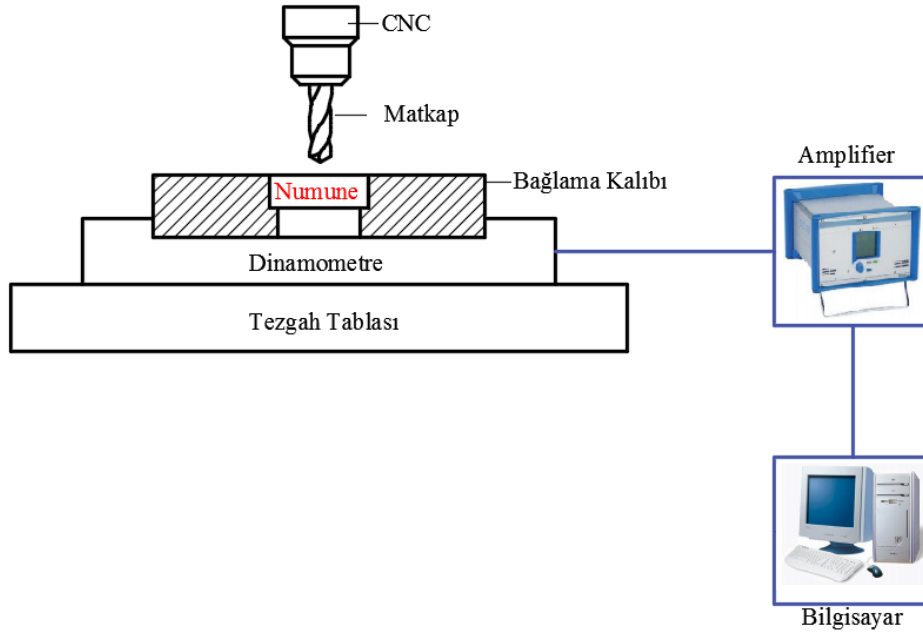
İşlenebilirlik deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliğinde bulunan JOHNFORD VMC-550 işleme merkezinde yapılmıştır. Deneylerde 5 mm çaplı HSS matkaplar ve Tablo 2'de verilen parametreler kullanılmıştır. Deneylerde, ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü gibi temel işlenebilirlik göstergeleri araştırmak amacıyla tüm deney kombinasyonları hesaplanıp 32 adet deney yapılmıştır.

Tablo 2. İşleme parametreleri (Machining parameters)

Uç açısı	°	118
Kesme hızı	m/dak	20 - 30 - 40 - 50
İlerleme miktarı	mm/dev	0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4

İşlenebilirlik deneylerinde, ilerleme kuvveti ve moment ölçümü için Kistler 9272 tipi dinamometre kullanılmıştır. Dinamometreden elde edilen sinyaller Kistler 5070-A Amplifier kullanılarak veriye dönüştürülmüştür. Verilerin işlenmesi için Dynoware yazılımı kullanılmıştır. Delinecek numuneler bağlama kalıbı ile birlikte dinamometreye bağlanarak tezgâh tablasına sabitlenmiştir (Şekil 1).



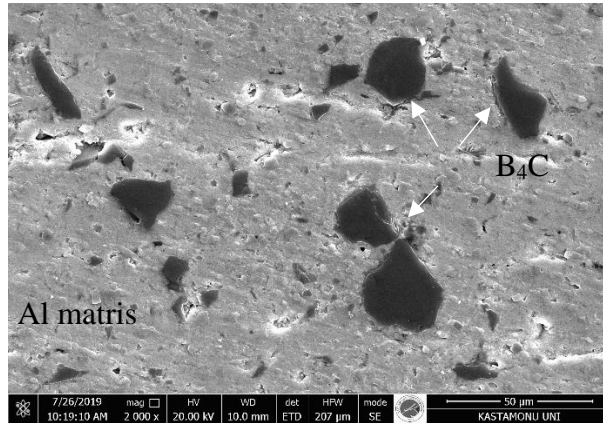


Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Mikroyapı ve Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Microstructure and Hardness Results)

Çalışmada kullanılan kompozit malzemenin yüzey görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, alüminyum matris içerisinde keskin köşeli B<sub>4</sub>C’lerin gömülü olarak konumlandığı görülmektedir. Ayrıca B<sub>4</sub>C tanelerinin alüminyum matris içerisinde homojen dağıldığı söylenebiliriz.

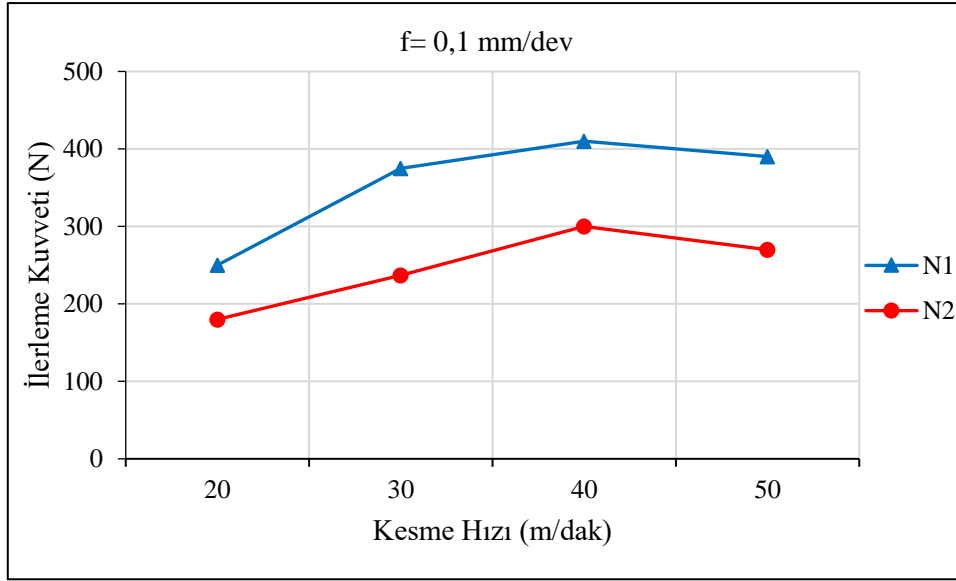


Şekil 2. Numune yüzeyinin SEM görüntüsü (SEM image of the sample surface)

Numunelerin sertliği Brinell sertlik ölçme cihazıyla 60 kg yük ve 1/8" çaplı bilye kullanılarak ölçülmüştür. Katkısız 1 numaralı numunenin sertliği 75 HB, takviyeli numunenin sertliği 80 HB olarak ölçülmüştür. Takviye elemanının sertliği matrisin sertliğinde yüksek olduğu için takviyeli numunenin sertliği artmıştır [30].

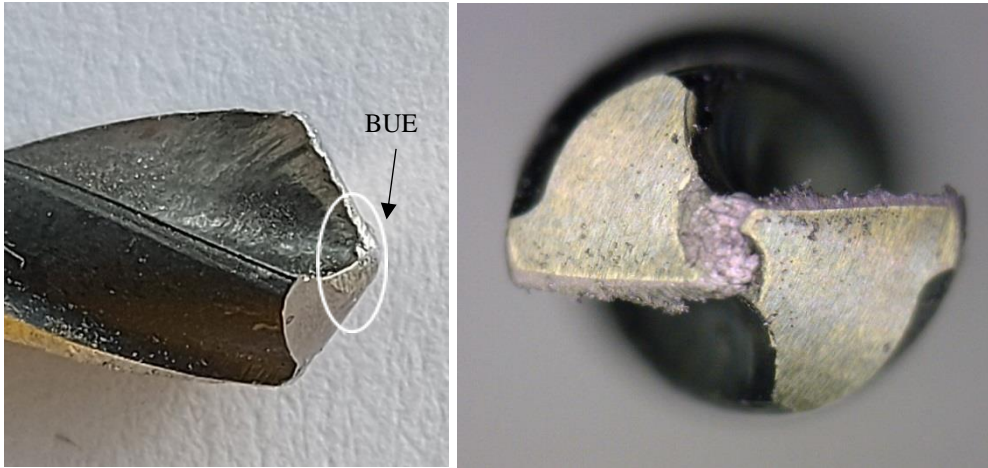
#### 3.2. İlerleme Kuvveti ve Momentin Değerlendirilmesi (Evaluation of Thrust Forces and Moment)

Kesme hızına bağlı ilerleme kuvvetinin değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Her bir ilerleme miktarında yapılan deneylerde aynı eğilim mevcuttur. Şekil 3’de 0.1 mm/dev ilerleme miktarında kesme hızına bağlı ilerleme kuvvetinin değişimi verilmiştir.



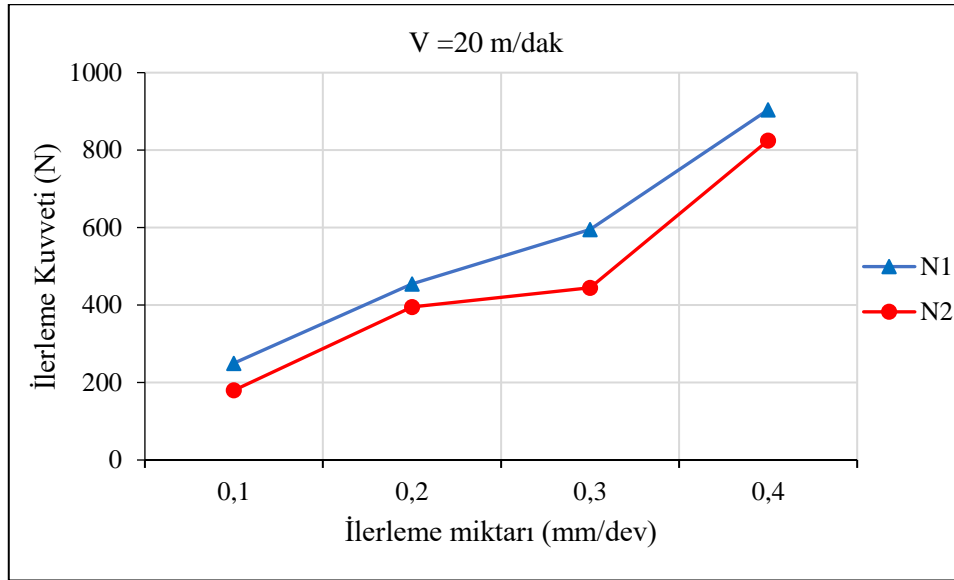
Şekil 3. Kesme hızına bağlı ilerleme kuvveti değerleri (Thrust force values depending on the cutting speed)

Kesme hızının 20m/dak'dan 40 m/dak'ya artmasıyla her iki numune de ilerleme kuvvetleri artmıştır (Şekil 3). Kesme hızının 40m/dak'dan 50 m/dak'ya çıkmasıyla da ölçülen ilerleme kuvveti değerleri azalmıştır. Kesme hızındaki artışla ölçülen ilerleme kuvvetini azalmasını, kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasıyla daha kolay deformasyon olmasına atfedebiliriz [31]. En yüksek ilerleme kuvveti değeri 40 m/dak kesme hızında 410 N olarak katkısız numune de ölçülmüştür. B<sub>4</sub>C takviyesinin etkisiyle ilerleme kuvveti değerleri azalmıştır. N1 kodlu numune katkısız alüminyum olduğu için matkaba sıvanma eğilimi mevcuttur. Sıvanmanın etkisiyle ölçülen ilerleme kuvveti değerleri de artmıştır [32]. Şekil 4'de matkapta oluşan talaş sıvanması açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Matkapta oluşan talaş sıvanması (Built up edge formed in the drill)

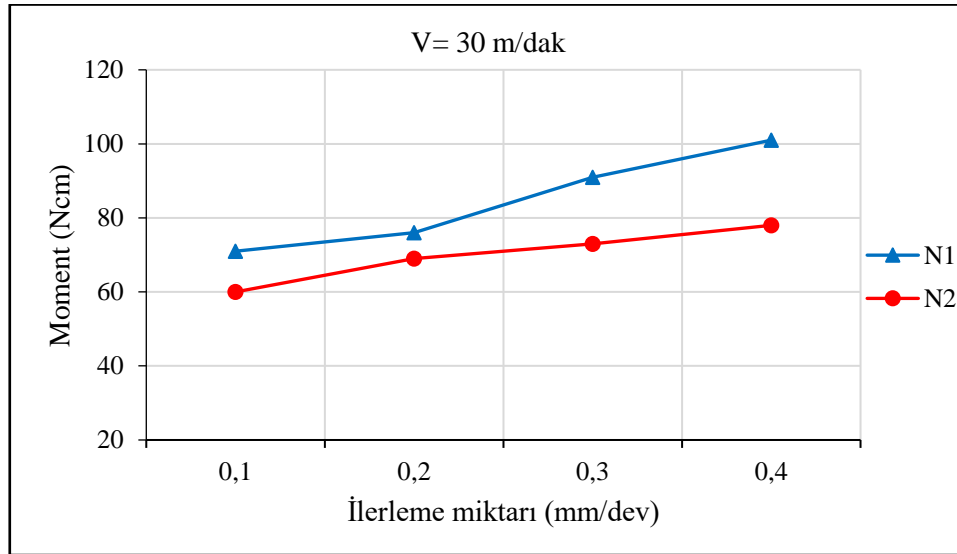
İlerleme miktarına bağlı ilerleme kuvvetinin değişimi Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. İlerleme miktarına bağlı ilerleme kuvveti değerleri (Thrust force values depending on the feed rate)

Şekil 5'deki grafik incelendiğinde ilerleme miktarının artmasıyla her iki numunede de ölçülen ilerleme kuvveti değerleri artmıştır. Bu artışın nedeni olarak ilerleme hızının artmasıyla kaldırılan talaş hacminin artması şeklinde açıklayabiliriz [13]. Grafik incelendiğinde 20 m/dak kesme hızındaki deneylerde ölçülen en yüksek ilerleme kuvveti değerinin 0.4 mm/dev ilerlemede 904 N olduğu görülmektedir. Yapılan diğer kesme hızlarındaki deneylerde de aynı eğilim mevcuttur.

Çalışmada yapılan deneyler sonucunda tüketilen güç hakkında fikir vermesi açısından ilerleme miktarına bağlı moment değerlerinin değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

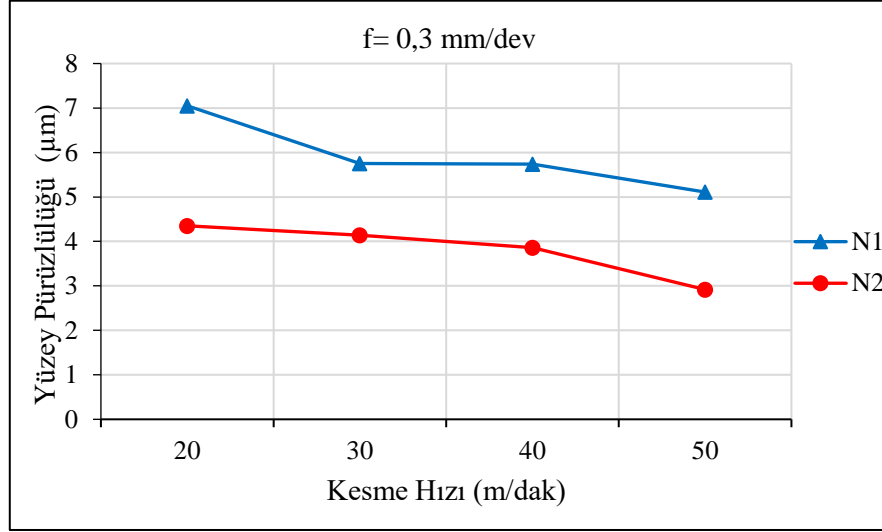


Şekil 6. İlerleme miktarına bağlı moment değerleri (Moment values depending on the feed rate)

Şekil 6.'daki grafik incelendiğinde kuvvet grafiklerinde olduğu gibi ilerleme miktarı arttıkça moment değerleri de artmıştır. Aynı şekilde bu artışı da talaş kesitinin artması ile ilişkilendirebiliriz [33]. 30 m/dak kesme hızında yapılan deneyde en yüksek momentin 0.4 mm/dev ilerlemede katkısız numunede 101 Ncm olarak ölçülmüştür.

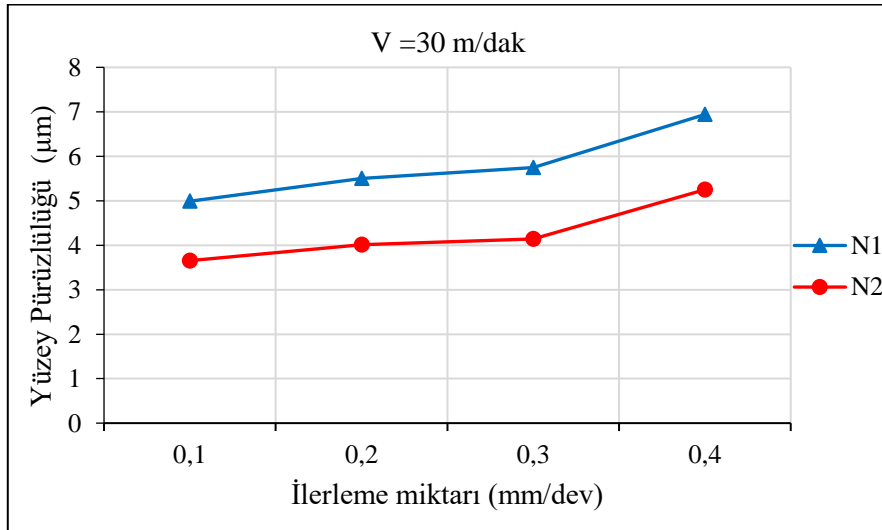
### 3.3. Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughnesses)

Kesme hızına bağlı numunelerdeki yüzey pürüzlülüğünün değişimi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülüğü değerleri (Surface roughness values depending on the cutting speed)

Şekil 7’deki grafik incelendiğinde kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedenini olarak, kesme hızının artmasıyla ile yükselen enerji tüketimin kesme esnasında ısı enerjisine dönüşmesi ile ortaya çıkan sıcaklığın plastik deformasyonu ve talaş akışını kolaylaştırdığı, buna bağlı olarak da yüzey kalitesinde bir iyileşme olduğu şeklinde açıklanabilir [34]. B<sub>4</sub>C takviyesiyle numunedeki sıvanma eğilimi azaldığından takviyeli numunenin (N2) yüzey pürüzlülüğü değerleri daha düşük çıkmıştır. Tinga yaptığı çalışmada takviye miktarındaki artışın yüzey kalitesini iyileştirdiğini ifade etmiştir [29]. 0,3 mm/dev ilerleme miktarında yapılan deneylerde en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri en yüksek kesme hızın olan 50 m/dak kesme hızında N2 kodlu numunede 2.918 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 8’de ilerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülüğün değişimi verilmiştir.



Şekil 8. İlerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülüğü değerleri (Surface roughness values depending on the feed rate)

Çalışmada kullanılan tüm kesme hızlarında (20-30-40-50 m/dak) ilerleme miktarı arttıkça ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmıştır. Artan kesme hızlarıyla kesme kuvvetleri de artacaktır. Takım üzerinde artan bu yükler de yüzey kalitesini olumsuz şekilde etkileyecektir [35]. 30 m/dak kesme hızında yapılan deneylerde en büyük yüzey pürüzlülüğü değeri 0.4 mm/dev ilerlemede N1 kodlu numunede 6.941 µm olarak ölçülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemenin HSS matkapla delinmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı kesme hızlarında ve farklı ilerleme miktarında yapılan deneylerle ilerleme kuvveti, moment ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Alüminyum matrise B<sub>4</sub>C takviyesi sertlik değerini artırırken ölçülen kuvvet ve moment değerlerini ise düşürmüştür. Yapılan takviyenin işlenebilirlik özelliklerini artırdığını söyleyebiliriz.
- İlerleme kuvveti kesme hızına göre değerlendirildiğinde, her iki numunede de 40 m/dak'da en yüksek kuvvet ve moment değerleri ölçülmüştür.
- En düşük ilerleme kuvveti değeri 20 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme miktarında 180 N olarak takviyeli numunede ölçülmüştür.
- Yüksek kesme hızı ve ilerleme miktarlarında yapılan deneylerde talaşın tahliyesinin zor olduğundan dolayı kuvvet ve moment değerlerinin yüksek çıktığı değerlendirilmektedir.
- N1 kodlu katkısız numunenin delinmesinde karşılaşılan matkaba sivanma eğilimi yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Tüm kesme parametrelerinde B<sub>4</sub>C takviyeli numenelerin yüzey kalitesi daha iyi çıkmıştır.
- Çalışmada kullanılan bütün kesme hızı değerlerinde, ilerleme miktarının artmasıyla ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri sürekli olarak artmıştır.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri çalışmada kullanılan en yüksek kesme hızı olan 50 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme miktarında, takviyeli numunede, 2.448 µm olarak ölçülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. N. Chawla, K. K. Chawla, Metal matrix composites, Springer Science Business Media, Inc., Boston, 5-101, 2006.
2. K.L. Narayana, M. M. Benal, H. K. Shivanand, Effect of graphite on aluminium matrix composites fabricated by stir casting route—A review, Materials Today: Proceedings, 2020.
3. H. Liao, W. Zhang, C. Chen, B. Chen, G. Xue, H. Zhu, Hybrid reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting, Intermetallics, 131:107080, 2021.
4. B. S. Yigezu, M. M. Mahapatra, P. K. Jha, Influence of reinforcement type on microstructure, hardness, and tensile properties of an aluminum alloy metal matrix composite, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1 (4): 124-130, 2013.
5. J. H. Shin, H. J. Choi, D. H. Bae, The structure and properties of 2024 aluminum composites reinforced with TiO<sub>2</sub> nanoparticles, Materials Science and Engineering: A, 607: 605-610, 2014.
6. V. Chak, H. Chattopadhyay, T. L. Dora, A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites, Journal of Manufacturing Processes, 56:1059-1074, 2020.
7. H. Gökmeşe, U. Taşçı, B. Bostan, Investigation of microstructure and hardness properties of aged AA 7075 matrix B<sub>4</sub>C/SiC reinforced composite-hybrid materials, Journal of Boron, 5(2):73-82, 2020.
8. N. V. Babu, T. V. Moorthy, Synthesis and characterization of Al7075/SiC composite by stir casting. In Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Ltd, 592: 760-764, 2014.
9. H. Guo, Z. Zhang, Processing and strengthening mechanisms of boron-carbide-reinforced aluminum matrix composites, Metal Powder Report, 73(2): 62-67, 2018.
10. M. Pul, Alüminyum 7075 Matrisli kompozitlerde SiC, B<sub>4</sub>C Ve TiB<sub>2</sub> takviye elemanlarının mekanik özelliklere etkilerinin karşılaştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7 (1): 180-193, 2019.
11. A. Orhan, A.K. Gür, U. Çalgılı, Al matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, c. (4): 8-13, 2007.
12. A. Ekşi, D. A. Bircan, Mechanical properties of cold and warm compacted aluminum alloys (Al7XXX). In Proceedings of 11th International Materials Symposium, 19-21 April 2006, Denizli.
13. F. Memiş, Y. Turgut, AISI 2205 Dupleks paslanmaz çeliğin CNC torna tezgâhında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 1 (1): 22-33, 2020.

14. M. Ay, A. Kalyon, CNC torna tezgâhında 17-4 PH paslanmaz çeliğin işleme parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi, 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
15. Y. Işık, M.C. Çakır, Hız çeliği takımlar için kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, Teknoloji, 1-2: 111-118, 2001.
16. B. Özlü, H. Demir, E. Nas, CNC tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etki eden parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 3(2): 75-86, 2014.
17. Ş. Bayraktar, Y. Sıyambaş, Y. Turgut, Delik delme prosesi: bir araştırma, SAÜ Fen Bilim Enstitüsü Dergisi, 21: 124-124, 2017.
18. A. Çakır, AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Soğutma Yöntemlerinin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
19. B. Yılmaz, G. Uzun, A. Güllü, Ti6Al4V malzemeye uygulanan delme işleminde kesme parametrelerinin itme kuvveti, kesme momenti ve kesme sıcaklığına etkileri, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 1 (3): 1-8, 2020.
20. A. Javdani, A.H. Daei-Sorkhabi, Microstructural and mechanical behavior of blended powder semisolid formed Al7075/B4C composites under different experimental conditions, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 28(7): 1298-1310, 2018.
21. A. R. Motorcu, E. Ekici, Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin karbür matkaplarla delinmesinin değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(4): 259-266, 2016.
22. Ş. Karabulut, H. Karakoc, R. Çıtak, Influence of B<sub>4</sub>C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B4C composites, Composites Part B: Engineering, 101: 87-98, 2016.
23. M. T. Hayajneh, A. M. Hassan, A. T. Mayyas, Artificial neural network modeling of the drilling process of self-lubricated aluminum/alumina/graphite hybrid composites synthesized by powder metallurgy technique, Journal of Alloys and Compounds, 478(1-2): 559-565, 2009.
24. M. Ramulu, P. N. Rao, H. Kao, Drilling of (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) p/6061 metal matrix composites, Journal of materials processing technology, 124(1-2): 244-254, 2002.
25. K. Palanikumar, A. Muniaraj, Experimental investigation and analysis of thrust force in drilling cast hybrid metal matrix (Al-15% SiC-4% graphite) composites, Measurement, 53: 240-250, 2014.
26. G. S. Samy, S. T. Kumaran, Measurement and analysis of temperature, thrust force and surface roughness in drilling of AA (6351)-B<sub>4</sub>C composite, Measurement, 103: 1-9, 2017.
27. A. R. Ahamed, P. Asokan, S. Aravindan, M. K. Prakash, Drilling of hybrid Al-5% SiCp-5% B<sub>4</sub>Cp metal matrix composites, The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 49(9-12): 871-77, 2010.
28. C. Shoba, N. Ramanaiah, D. N. Rao, Effect of reinforcement on the cutting forces while machining metal matrix composites—an experimental approach, Engineering Science and Technology, an International Journal, 18(4): 658-663, 2015.
29. S. Tinga, AA6061 matrisli B<sub>4</sub>C ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
30. H. S. Kim, On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites, Materials Science and Engineering: A, 289(1-2): 30-33, 2000.
31. İ. Çiftçi, Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(2): 205-209, 2005.
32. C. Rubenstein, The torque and thrust force in twist drilling—II. Comparison of experimental observations with deductions from theory, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 31(4): 491-504, 1991.
33. L-P. Wang, L-J. Wang, Y-H. He, Z-J. Yang, Prediction and computer simulation of dynamic thrust and torque in vibration drilling, Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf, 212(6): 489-497, 1998.
34. M. Günay, Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Si/SiCp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
35. G. Meral, AISI 1050 Malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.



## Al 1050-H14 Alaşımının Delinmesi Sürecinde Yüzey Pürüzlülüğü, Çapak Oluşumu, Takım Aşınması, Çaptan ve Silindiriklikten Sapmanın Modellenmesi ve Tahmini

Hüseyin Gökçe<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çankırı, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 09.03.2021

**Kabul:** 15.04.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Alüminyum

Delme parametreleri

Regresyon analizi

Taguchi metodu

### ÖZET

Bu çalışmada, 1050-H14 alüminyum alaşımı kesme sıvısı kullanılmaksızın yüksek hız çeliği matkaplarla delme deneylerine tabi tutulmuştur. Değişen delme koşulları (kesme hızı, ilerleme, matkap uç açısı, kaplama durumu) sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü, çapak yüksekliği, kesici takıma yapışma, çaptan ve silindiriklikten sapma değerleri ölçülmüş, sonuçlar regresyon analizi ile modellenmiştir. Regresyon analizi sonucunda; yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarı ve kaplama durumu, çaptan sapma üzerinde ilerleme miktarı ve kaplama durumu, silindiriklikten sapma üzerinde kesme hızı, matkap uç açısı ve kaplama durumu, çapak yüksekliği üzerinde kesme hızı ve kaplama durumu, yapışma değeri üzerinde ise kesme hızı istatistiksel olarak anlamlıdır ( $P < 0.05$ ). Ayrıca Taguchi metodu ile optimum delme koşulları belirlenmeye çalışılmış ve doğrulama deneyleri ile yapılan optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir. Taguchi metodu ile yapılan optimizasyona göre kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; yüzey pürüzlülüğü için 20 m/dk - 0,025 mm/dev - 105° uç açısı - kaplamalı matkap, çaptan sapma için 30 m/dk - 0,025 mm/dev - 118° uç açısı - kaplamalı matkap, silindiriklikten sapma için 10 m/dk - 0,050 mm/dev - 90° uç açısı - kaplamalı matkap, çapak yüksekliği için 40 m/dk - 0,050 mm/dev - 105° uç açısı - kaplamalı matkap, yapışma değeri için 40 m/dk - 0,075 mm/dev - 90° uç açısı - kaplamalı matkap olarak belirlenmiştir. 0.05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyonun uygun olduğu görülmüştür.

## Modeling and Estimation of Surface Roughness, Burr Height, Adhesion, Deviation from Diameter and Cylindrical in the Drilling Process of Al 1050-H14 Alloy

### ARTICLE INFO

**Received:** 09.03.2021

**Accepted:** 15.04.2021

#### Keywords:

Aluminum

Drilling parameters

Regression analysis

Taguchi method

### ABSTRACT

In this study, drilling tests were applied on 1050-H14Al alloy without coolant. Regression analysis was used modelling of surface roughness, burr height, adhesion, deviation from cylindrical and diameter with different drilling conditions (cutting speed, feed, drill bit angle and coating condition). As a result of the regression analysis feed rate and coating showed significant impact on the surface roughness. Moreover, feed rate and coating condition also affect on the deviation from diameter and cutting speed affect on the deviation from cylindrical, significantly. On the other hands, cutting speed, drill bit angle and coating condition influence on the burr height and, coating condition and cutting speed on the adhesion were found significantly different ( $P < 0.05$ ). In addition, these conditions were optimized with the Taguchi method and the validity of the optimization was tested with verification experiments. According to the optimization, the optimum levels of control factors; 20 m/min - 0.025 mm/rev - 105° drill bit angle - coating drill for surface roughness, 30 m/min - 0.025 mm/rev - 118° drill bit angle - coating drill for deviation from diameter, 10 m/min - 0.050 mm/rev - 90° drill bit angle - coating drill for deviation from cylindrical, 40 m/min - 0.050 mm/rev - 105° drill bit angle - coating drill for burr height and 40 m/min - 0.075 mm/rev - 90° drill bit angle - coating drill for adhesion. Optimization was found to be appropriate for 0.05 significance level.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Saf alüminyum düşük yoğunluğa, düşük erime sıcaklığına ve düşük mukavemet değerlerine sahiptir. Buna karşın saf alüminyuma alaşım elementlerinin ilave edilmesiyle zayıf tarafları güçlendirilerek üstün özellikler kazandırılabilir. Alüminyum alaşımları yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliklerinin yanında rahat şekillendirilebilmeleri gibi özelliklerinden dolayı neredeyse tüm sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2].

Alüminyum içerikli malzemelerin şekillendirilebilmesi için birçok yöntem bulunmasına karşın talaş kaldırmak suretiyle şekillendirme en yaygın yöntemlerden biridir. Modern talaşlı üretim yöntemlerinin gelişmesine karşın ekonomikliği ve basitliğinden dolayı matkapla delme işlemleri halen güncelliğini korumakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Alüminyum ve alaşımlarının süneklilik değerlerinin yüksek olması talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirmede çeşitli problemlerle karşılaşılmasına sebep olur (düşük yüzey kalitesi, talaşın uzaklaştırılması ve kesici takıma yapışma gibi).

Bayraktar, Al-5083 alaşımının kaplamasız ve Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı yüksek hız çeliği (High speed steel-HSS) matkaplar ile delinmesinde, kesme parametrelerinin eksenel kuvvet ve çapak yüksekliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler sonucunda, devir sayısının artması ile çapak yüksekliğinin arttığını, eksenel kuvvetin ise azaldığını belirtmiştir. Ayrıca ilerleme miktarının artması ile eksenel kuvvetin ve çapak yüksekliğinin arttığını tespit etmiştir. Kaplamasız HSS matkaplarda, TiN kaplamalı matkaplara göre eksenel kuvvetlerin ve çapak yüksekliğinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Varyans analizi ile bağımsız değişkenler arasında ilerleme miktarının, eksenel kuvvet ve çapak yüksekliği üzerinde en etkili faktör olduğu ve bunu sırasıyla devir sayısı ve matkap uç açısının takip ettiği belirtmiştir [4]. Çaydaş ve Çelik, AA 7075-T6 alaşımını kuru delme koşullarında K20 karbür takımlarla delme deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneyler sabit kesme hızında değişken ilerleme miktarları ve matkap uç açıları ile yapmışlardır. Değişkenlerin yüzey pürüzlülüğü, ilerleme kuvveti ve matkap uç sıcaklığı üzerindeki etkilerini incelemiştir [5]. Dheeraj vd., alüminyum ve alaşımlarının delinmesi için yeni nesil bir matkap geliştirmişlerdir. Matkabın zırh ve oluk yüzey geometrisini değiştirerek kesme sıvısını daha verimli kullanmaya ve ayrıca talaşın daha rahat uzaklaştırılmasını sağlamaya çalışmışlardır. Yeni geliştirilen ve klasik geometriye sahip matkaplarla delinen delikleri silindiriklik hatası, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirmişler, geliştirilen yeni nesil matkaplarla tatminkâr sonuçlar elde etmişlerdir [6]. Song vd., karbon fiber takviyeli plastik (CFRP)/alüminyum kompozitlerin delinmesinde teorik bir çapak yüksekliği modeli önermişlerdir. Modelde itme kuvvetini, bağımsız faktörleri (malzemenin mekanik özellikleri, kesilmemiş talaş kalınlığı ve takım geometrik boyutları) ve bağımlı faktörleri (sistemin kararlılığı ve kesme sıcaklığı) dikkate almışlardır. Bundan sonra, itme kuvveti modeline ve iş parçasında oluşan sapmaları inceleyerek çapak yüksekliği modeli oluşturmuşlardır. Son olarak, teorik modelin doğrulaması için pilot deneyler yapmışlardır. Sonuçların, çapak yüksekliği eğilimlerinin analitik modelle uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir [7]. Kimmelman vd., özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan CFRP/alüminyum kompozitlerin delinmesi sürecinde oluşabilecek çapağın öngörülebilmesi ve delme esnasında azaltılabilmesi için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Delme sürecinde oluşan ses spektrumunu analiz ederek oluşan sinyallerle çapak oluşumunun delme işlemi devam ederken kontrol altına alınabileceğini belirtmişlerdir [8]. Zhu vd., Al 2024-T351 alüminyum alaşımı ve Ti6Al4V titanyum alaşımı üzerinde üç farklı matkap geometrisi kullanarak kuru şartlarda bir dizi delme deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda, iki farklı uç açısına sahip matkap geometrisinin kesme kuvveti ve çapak oluşumunu azaltarak delik kalitesini ve dolayısıyla verimliliği artırdığını ayrıca talaş tahliyesini kolaylaştıracağını ifade etmişlerdir [9]. Ilyuschenko vd., alüminyum alaşımı üzerinde kaplamasız ve Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition-PVD) yöntemi ile kaplanmış matkaplarla (nano elmas ve nano molibden disulfid) deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarında kaplamasız matkaplarda büyük çapakların oluştuğunu, kaplamalı matkaplarda ise çapak oluşumunun olmadığını ve/veya oldukça küçük boyutta olduklarını gözlemlenmiştir. Kaplamalı matkabın takım ömrünün, kaplamasız matkaba kıyasla yaklaşık 2.5 kat daha uzun bulunduğunu belirtmişlerdir [10]. Chatha vd., 6063 alüminyum alaşımının delinme performansını kesme kuvveti,

takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açılarından incelemişlerdir. HSS kesici takımlarla yaptıkları çalışmada, farklı yağlama koşullarını (kuru, ıslak, minimum miktar yağlama (Minimum Quantity Lubrication-MQL) ve nano partiküllü MQL (nanofluid MQL-NFMQL)) mukayese etmişlerdir. Deneyler sonucunda NFMQL ile delinen delik sayısında önemli artış olduğunu, tork ve kesme kuvvetlerinin ise azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca NFMQL'nin talaş tahliyesini kolaylaştırıp çapak oluşumunu azalttığını, deliklerin yüzey kalitesini artırdığını ve kesici takım aşınmasını azaltarak takım ömrünü uzattığını ifade etmişlerdir [11].

Al 1050-H14 alüminyum alaşımı talaşlı imalata uygun ve en yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarından biridir. Yapılan literatür araştırmasına göre ilgili malzeme için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak çaptan sapma, silindiriklikten sapma ve çapak oluşumunun delme parametreleri, matkap uç açısı ve kaplama ile etkileşimi çok yönlü olarak incelenmemiştir. Bu çalışmada, 1050-H14 alüminyum alaşımı, HSS kesici takımlarla 4 farklı kesme hızı ( $V_c$ ), 4 farklı ilerleme ( $f$ ), 4 farklı matkap uç açısı ( $\beta$ ) ve 2 farklı kaplama durumu (KD) dikkate alınarak yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ), çaptan sapma ( $\text{ÇS}$ ), silindiriklikten sapma ( $SS$ ), kesici takıma yapışma değeri ( $YD$ ) ve çapak yüksekliği ( $\text{ÇY}$ ) üzerindeki etkileri incelenmiş ayrıca istatistiksel yöntemlerle optimum delme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme (Material)

Alüminyum 1050-H14 iş parçası,  $\text{Ø}60$  mm çapında silindirik malzemeden 17 mm kalınlığında kesilerek elde edilmiştir. Daha sonra toplam kalınlık delik delme deney standartları (plaka kalınlığı  $\geq$  matkap çapı  $\times$  3) için 15 mm kalınlığa düşürülerek tesviye yapılmıştır. İş parçasının kimyasal bileşimi ve bazı mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Al 1050-H14 alaşımının bazı özellikleri (Some properties of Al 1050-H14 alloy) [12]

Özellik	Birim	Al 1050-H14
Yoğunluk (20°C)	( $g/cm^3$ )	2.705
Erime sıcaklığı	(°C)	646-657
Brinel sertlik değeri	(HB)	30
Akma gerilmesi	(MPa)	103
Çekme gerilmesi	(MPa)	110
Elastikiyet modülü	(GPa)	73
Poisson oranı	-	0.33
Isı transfer katsayısı (20°C)	[W/(mK)]	227
Kimyasal bileşim	%	>99.50 Al
		$\leq$ 0.05 Cu
		$\leq$ 0.40 Fe
		kalan diğer

### 2.2. Delme Deneyleri (Drilling Tests)

Alüminyum 1050-H14 malzemeye yüksek hız çeliği (HSS) matkaplarla farklı kesme parametreleri kullanılarak boydan boya (15 mm) delik delme işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar  $R_a$ ,  $\text{ÇS}$ ,  $SS$ ,  $YD$  ve  $\text{ÇY}$  açılarından incelenmiştir. Deneyler, L16 dikey dizisi yardımıyla tasarlanmış ve deneylerde kullanılan değişkenler Tablo 2'de verilmiştir. İlgili malzeme için değişkenler ve seviyeleri kesici takım kataloglarında önerilen ve literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınmıştır. Kataloglarda ve literatürde önerilen kesme parametreleri değerlerinin en yüksek seviyelerinde ön deneyler yapılmıştır.

Tablo 2. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and their levels)

Kontrol faktörleri	Vc	f	$\beta$	KD
Birim	m/dk	mm/dev	°	-
Kod	A	B	C	D
Seviyeler	10	0.025	90	Kaplamasız
	20	0.050	105	
	30	0.075	118	Kaplamalı
	40	0.100	140	

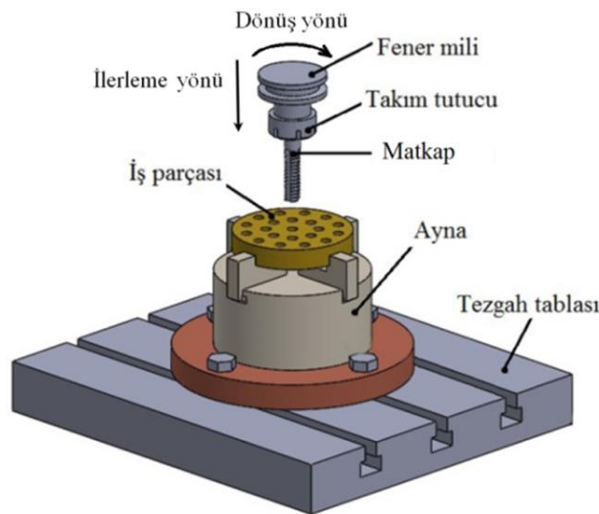
### 2.3. Takım Tezgâhı, Kesici Takımlar ve Ölçüm Cihazları (Machine Tools, Cutting Tools and Measuring Devices)

Kesici takım seçiminde üretici firma tavsiyeleri ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Kesici takım Şekil 1’de gösterilmiştir. Deneylerde  $\varnothing 5$  mm çapında,  $90^\circ - 105^\circ - 118^\circ - 140^\circ$  uç açılarında, kaplamasız ve kaplamalı (CVD - AlTiN - kaplama kalınlığı:  $5 \mu\text{m}$ ) HSS kesici takımlar kullanılmıştır. AlTiN kaplamalar yüksek sertlik, oksidasyon direnci ve sıcak sertlik değerlerine sahiptirler. Kaplamasız olarak tedarik edilen  $118^\circ$  uç açılına sahip matkapların deneyler için gerekli olan uç açıları Tokiwa/PP-30 marka/model matkap bileme tezgâhında bilenmiş ve kaplanması gereken matkap uçları kaplama işlemine tabi tutulmuştur (Kaplama firmasından hizmet alınmıştır). Deneylerde kullanılan kesici takımlar,  $\varnothing 5$  mm çapında kesici takımları sıkabilecek pens ile takım tutucuya bağlanmıştır.



Şekil 1. HSS matkap ucu (HSS drill bit)

Delme deneyleri, Arion IMM-600 CNC dik işleme merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Silindirik olarak hazırlanan iş parçası tezgâha 4 ayaklı bir ayna ile bağlanarak boydan boya delikler delinmiştir. Ra değerleri Mitutoyo SJ-410 marka/model profilometre kullanılarak ölçülmüştür. ÇS ve SS ölçümleri Hexagon Global Agvantage marka/model CMM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çapak ve yapışma oluşumunun gözlemlenmesi için led aydınlatmalı, 5 megapiksel  $2592 \times 1944$  çözünürlüğe sahip, parlaklığı azaltma özelliği bulunan, dijital 240 büyültme özelliği olan bir mikroskop kullanılmıştır. Şekil 2’de, kurulan deney düzeneğinin tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği (Experimental setup)

## 2.4. İstatistiksel Metotlar (Statistical Methods)

Regresyon analizi, bağımlı (kalite karakteristiği) ve bağımsız (kontrol faktörleri) değişkenleri içeren bir modeldir ve bağımlı değişkeni bağımsız değişkenlerle ifade edilebilmesine olanak verir [13]. Eşitlikler sonucunda elde edilen determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenlerle ifade edilebilme oranını verir.  $R^2$  değeri 1'e ne kadar yakın olursa regresyon modelinden o denli doğru sonuçlar elde edilebilecektir. Regresyon analizi çok bilinen ve bilim insanları tarafından da yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir araçtır.

Taguchi metodu ile kontrol faktörlerinin kalite karakteristiği üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için deneylerden elde edilen veriler istenilen sonuca uygun amaç fonksiyonu ile Sinyal/Gürültü (S/N) oranına dönüştürülür. S/N oranı, istenilmeyen rastgele gürültü değeri için istenilen sinyal oranı olarak tanımlanmakta olup, deneysel verilerin kalite karakteristiklerini gösterir [14]. S/N oranının hesaplanması için üç temel fonksiyon vardır. Bunlar “en küçük en iyi, en büyük en iyi ve hedef değer en iyi” amaç fonksiyonlarıdır. Her üç fonksiyon içinde amaç, S/N oranını maksimize etmektir [15, 16].

Deneylerde kontrol faktörlerinin uygun seviyelerini belirlemek için kalite karakteristiği değerlerinin en küçük olduğu durum belirlenmelidir. Bu amaçla S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 1'de verilen “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Burada;  $Y_i$ : kalite karakteristiğinin ölçülen değeri (kalite değişkeni) ve  $n$ : toplam deney (gözlem) sayısıdır.

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

Kalite karakteristiği değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek için deney sonuçlarına %95 güven aralığında ANOVA analizi uygulanmıştır. Taguchi metodu, regresyon ve varyans analizlerinin yapılabilmesi için Minitab17 programından faydalanılmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

1050-H14 alüminyum alaşımı üzerinde 4 farklı kesme hızı, 4 farklı ilerleme, 4 farklı matkap uç açısı ve 2 farklı kaplama durumu kullanılarak gerçekleştirilen boydan boya delik delme deneylerinin tasarımı (L16 – 4×3 2×1 dikey dizisi deney tasarımı) Tablo 3'te verilmiştir. Deneyler sonucunda ölçülen Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. L16 – 4×3 2×1 dikey dizisi deney tasarımı (L16 - 4×3 2×1 orthogonal array experimental design)

Test no	Kod	Vc (m/dk.)	Kod	f (mm/dev)	Kod	$\beta$ (°)	Kod	KD
1	A1	10	B1	0.025	C1	90	D1	Kaplamasız
2	A1	10	B2	0.050	C2	105	D1	Kaplamasız
3	A1	10	B3	0.075	C3	118	D2	Kaplamalı
4	A1	10	B4	0.100	C4	140	D2	Kaplamalı
5	A2	20	B1	0.025	C2	105	D2	Kaplamalı
6	A2	20	B2	0.050	C1	90	D2	Kaplamalı
7	A2	20	B3	0.075	C4	140	D1	Kaplamasız
8	A2	20	B4	0.100	C3	118	D1	Kaplamasız
9	A3	30	B1	0.025	C3	118	D1	Kaplamasız
10	A3	30	B2	0.050	C4	140	D1	Kaplamasız
11	A3	30	B3	0.075	C1	90	D2	Kaplamalı
12	A3	30	B4	0.100	C2	105	D2	Kaplamalı
13	A4	40	B1	0.025	C4	140	D2	Kaplamalı
14	A4	40	B2	0.050	C3	118	D2	Kaplamalı
15	A4	40	B3	0.075	C2	105	D1	Kaplamasız
16	A4	40	B4	0.100	C1	90	D1	Kaplamasız

Tablo 4. Deneyle sonuçları ölçülen Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD değerleri ve S/N oranları (Ra, ÇS, SS, ÇY and YD test results and S/N ratios)

Test no	Ra ( $\eta$ m)	Ra S/N (dB)	ÇS (mm)	ÇS S/N (dB)	SS (mm)	SS S/N (dB)	ÇY (mm)	ÇY S/N (dB)	YD (mm)	YD S/N (dB)
1	5.015	-14.0054	0.047	26.5580	0.050	26.0206	2.12	-6.5267	1.255	-1.9729
2	5.684	-15.0931	0.065	23.7417	0.055	25.1927	2.58	-8.2324	1.337**	-2.5226
3	5.928	-15.4582	0.029	30.7520	0.045*	26.9357	1.93	-5.7111	0.776	2.2028
4	6.461	-16.2060	0.038	28.4043	0.050	26.0206	2.04	-6.1926	1.218	-1.7129
5	4.466*	-12.9984	0.026*	31.7005	0.055	25.1927	1.40	-2.9226	1.183	-1.4597
6	5.038	-14.0452	0.034	29.3704	0.050	26.0206	1.24	-1.8684	0.604	4.3793
7	6.851**	-16.7151	0.055	25.1927	0.073	22.7335	2.46	-7.8187	1.112	-0.9221
8	6.430	-16.1642	0.064	23.8764	0.070	23.0980	2.68**	-8.5627	0.974	0.2288
9	5.234	-14.3767	0.030	30.4576	0.075	22.4988	1.98	-5.9333	0.418	7.5765
10	5.309	-14.5003	0.035	29.1186	0.077**	22.2702	1.04	-0.3407	0.859	1.3201
11	5.919	-15.4450	0.047	26.5580	0.068	23.3498	0.96	0.3546	0.158*	16.0269
12	6.253	-15.9218	0.063	24.0132	0.072	22.8534	0.90	0.9151	0.313	10.0891
13	5.162	-14.2564	0.029	30.7520	0.075	22.4988	0.36	8.8739	0.446	7.0133
14	5.556	-14.8952	0.037	28.6360	0.070	23.0980	0.28*	11.0568	0.316	10.0063
15	6.128	-15.7464	0.049	26.1961	0.075	22.4988	0.55	5.1927	0.253	11.9376
16	6.703	-16.5254	0.067**	23.4785	0.073	22.7335	0.84	1.5144	0.316	10.0063
Average	5.759		0.045		0.065		1.46		0.721	

\* en düşük değer, \*\* en yüksek değer

Alüminyum 1050-H14 malzemenin belirlenen kontrol faktörleri ile delinmesi sonucunda elde edilen Ra ortalaması 5.759  $\eta$ m, ÇS değerinin ortalaması 0.045 mm, SS değerinin ortalaması 0.065 mm, ÇY ortalaması 1.46 mm ve YD ortalaması ise 0.721 mm'dir. Tablo 4 incelendiğinde, değişkenlerin en yüksek değerlerinin; Ra için 6.851  $\eta$ m, ÇS için 0.067 mm, SS için 0.077 mm, ÇY için 2.68 mm, YD için 1.337 mm'dir. Ayrıca en düşük ölçüm değerlerinin ise Ra için 4.466  $\eta$ m, ÇS için 0.026 mm, SS için 0.045 mm, ÇY için 0.28 mm ve YD için ise 0.158 mm olduğu görülmektedir. Bu değerler N9-N10 yüzey toleranslarında kaba yüzeye sahip delikler için kabul edilir sınırlar dâhilindedir. Ölçüm sonuçlarına göre Ra'daki değişim  $\approx$ %53, ÇS'deki değişim  $\approx$ %157, SS'deki değişim  $\approx$ %71, ÇY'deki değişim  $\approx$ %857 ve YD'deki değişim  $\approx$ %746 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar arasındaki bu farklar delme deneylerinde kullanılan değişkenlerin delinme performansını önemli derecede etkilediğinin bir göstergesidir.

Kesme parametrelerine bağlı olarak, en yüksek Ra değeri Vc: 20 m/dk - f: 0,075 mm/dev, ÇS değeri Vc: 40 m/dk - f: 0.1 mm/dev, SS değeri Vc: 30 m/dk - f: 0.05 mm/dev, ÇY değeri Vc: 20 m/dk - f: 0.1 mm/dev, YD değeri Vc: 10 m/dk - f: 0.050 mm/dev ölçülmüştür. En düşük Ra değeri Vc:20 m/dk - f: 0.025 mm/dev, ÇS değeri Vc: 20 m/dk - f: 0.025 mm/dev, SS değeri Vc: 10 m/dk - f: 0.075 mm/dev, ÇY değeri Vc: 40 m/dk - f: 0.050 mm/dev, YD değeri Vc: 30 m/dk - f: 0.075 mm/dev ölçülmüştür. Bu sonuçlar kesme hızı ve ilerlemedeki değişimlerinin sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Yüksek yüzey pürüzlülük değerleri alüminyum alaşımının yüksek sünekliliği ve ticari olarak kullanılan saflığa en yakın alüminyum alaşımlarından birisi olması ile açıklanabilir. Alüminyum, bakır ve nikel gibi ticari saflıktaki malzemelerin işlenmesinde yüksek yüzey pürüzlülük değerleri özellikle düşük kesme hızlarında sıklıkla görülür [17-19]. Normal olarak bütün talaşlı imalat işlemlerinde özellikle kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri düşer [18, 22]. Bu çalışmada kullanılan kesici takım malzemesinin HSS olması nedeniyle yüksek kesme hızları kullanılmamıştır. Dolayısıyla delinen deliklerin yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkması beklenen bir durumdur.



### 3.1. Regresyon Analizi ve Kontrol Faktörlerinin Etkileşimi (Regression Analysis and Interaction of Control Factors)

Değişken değerlerinin (Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD) hesaplanabilmesi için gerekli olan regresyon denklemleri sırasıyla Eşitlik 2, Eşitlik 3, Eşitlik 4, Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilmiştir. Delme deneylerinde değişkenlerin mümkün olan en düşük seviyelerde olması arzulanır. Bu nedenle elde edilen regresyon denklemlerinde negatif çarpan durumunda bulunan değişkenlerin yükselen değerleri kalite karakteristiği sonuçları üzerinde olumlu etkiye neden olurken, pozitif çarpan durumunda bulunan kontrol faktörlerinin yükselen değerleri ise olumsuz yönde etkili olacaktır.

$$Ra = 3.82 + 0,00328 Vc + 21.1 f + 0.00614 \beta - 0.321 KD \quad (2)$$

$$\text{ÇS} = 0.0581 + 0.000021 Vc + 0.309 f - 0.000232 \beta - 0.0136 KD \quad (3)$$

$$SS = 0.0276 + 0.00807 Vc + 0.0390 f + 0.000161 \beta - 0.00787 KD \quad (4)$$

$$\text{ÇY} = 2.51 - 0.0571 Vc + 2.56 f + 0.00477 \beta - 0.642 KD \quad (5)$$

$$YD = 1.08 - 0.0297 Vc - 2.26 f + 0.00545 \beta - 0.189 KD \quad (6)$$

Tablo 5'te regresyon denklemleri elde edildikten sonra bulunan katsayılar tablosu verilmiştir. Bu tabloda verilen; Coef: değerlerin katsayılarını, SE Coef: katsayılarıdaki standart hatayı, T: test istatistiklerinin sonucunu, P: regresyon analizinin anlamlı olup, olmadığını belirtmektedir. P değerlerinin 0,05'ten küçük olması kontrol faktörünün istatistiksel olarak anlamlı olduğunun bir kanıtı niteliğindedir.

Tablo 5'teki P değerleri incelendiğinde; Ra üzerinde f ve KD, ÇS üzerinde f ve KD, SS üzerinde Vc,  $\beta$  ve KD, ÇY üzerinde Vc ve KD, YD üzerinde ise Vc istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Regresyon denklemlerinin katsayılar tablosu (Coefficients table of regression equations)

	Tahmin unsuru	Katsayı	Vc	f	$\beta$	KD	R <sup>2</sup>
Ra	Coef	3.8201	0.03284	21.149	0.006140	-0.3214	% 87.9
	SE Coef	0.4944	0.006248	2.499	0.003807	0.1397	
	T	7.73	0.53	8.46	1.61	-2.3	
	P	0.000	0.61	0.000	0.135	0.042	
ÇS	Coef	0.05813	0.0000125	0.30900	0.0002318	-0.01325	% 71.3
	SE Coef	0.01598	0.0002020	0.08080	0.0001231	0.004517	
	T	3.64	0.06	3.82	-1.88	-3.02	
	P	0.004	0.952	0.003	0.086	0.0120	
SS	Coef	0.027632	0.0008075	0.03900	0.00016108	-0.007875	% 87.7
	SE Coef	0.008282	0.0001047	0.04186	0.00006377	0.00230	
	T	3.34	7.72	0.93	2.530	-3.37	
	P	0.007	0.000	0.372	0.028	0.006	
ÇY	Coef	2.5074	-0.057050	2.560	0.004769	-0.6425	% 87.0
	SE Coef	0.5960	0.007532	3.013	0.004589	0.1684	
	T	4.21	-7.57	0.85	1.04	-3.82	
	P	0.001	0.000	0.414	0.321	0.003	
YD	Coef	1.0832	-0.029725	-2.260	0.005445	-0.1887	% 82.8
	SE Coef	0.3549	0.004484	1.794	0.002732	0.1003	
	T	3.05	-6.63	-1.26	1.99	-1.88	
	P	0.011	0.000	0.234	0.072	0.086	

Tablo 5'teki determinasyon katsayıları (R<sup>2</sup>) incelendiğinde elde edilen regresyon denklemlerinin deney sonuçlarını Ra için 87.9%, ÇS için 71.3%, SS için 87.7%, ÇY için 87.0% ve YD için ise

82.8% oranlarında açıklayabildiğini görürüz. Başka bir ifade ile değişkenler arasında kuvvetli bir ilişkiden söz edilebilir. Ayrıca Tablo 6'da elde ettiğimiz çoklu doğrusal regresyon denklemine ait varyans analizleri verilmiştir. Bu tabloya göre P değerleri 0.05'ten küçüktür ve dolayısıyla istatistiksel olarak anlamlı regresyon denklemlerimiz vardır denilebilir.

Tablo 6. Regresyon denklemlerine ait varyans analizi (Analysis of variance of regression equations)

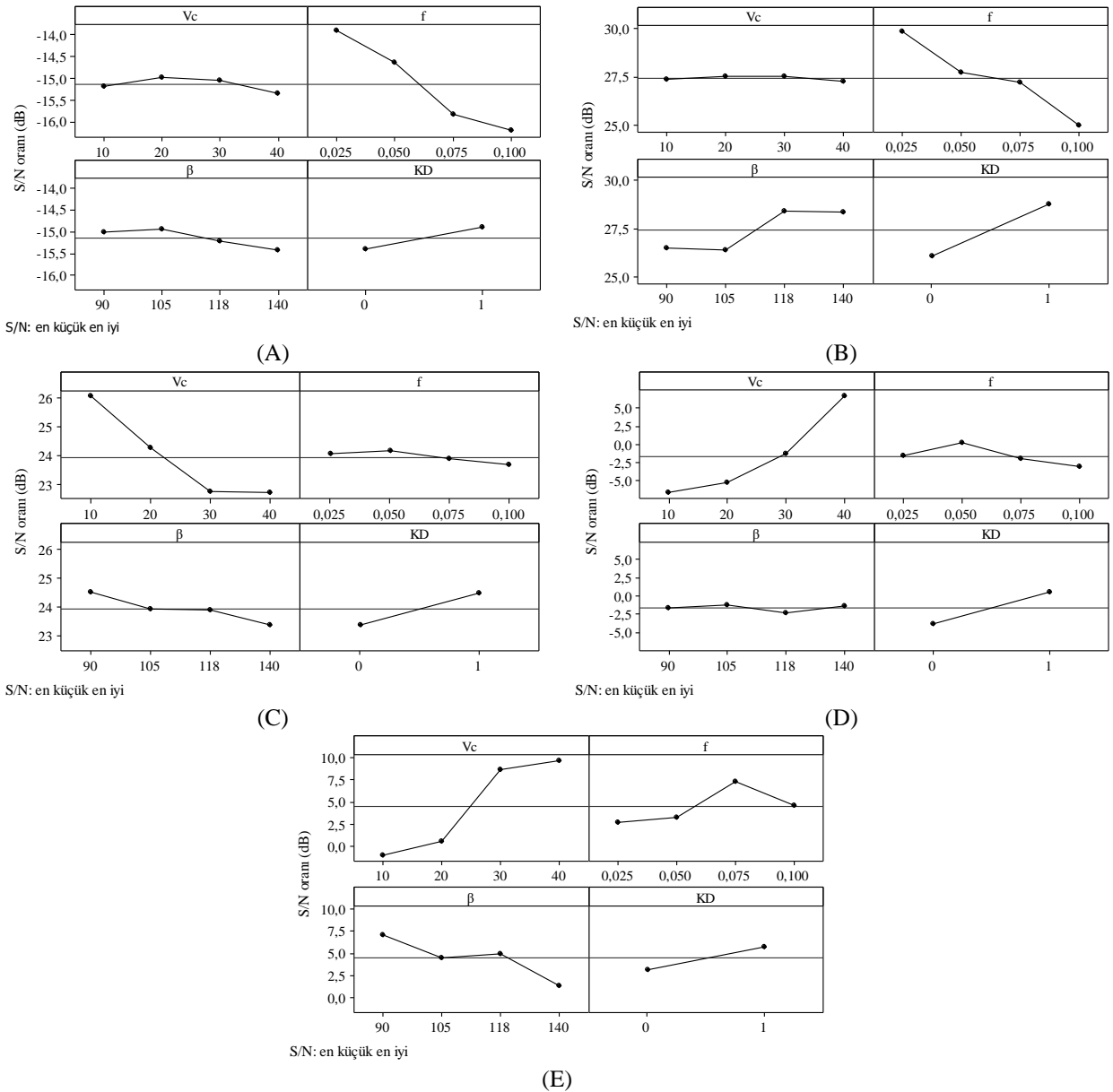
	Kaynak	SD	KT	KO	F	P
<b>Ra</b>	Regresyon	4	6.2287	1.5572	19.94	0.000
	Ölçüm hatası	11	0.8589	0.0781		
	Toplam	15	7.0876			
	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
<b>ÇS</b>	Regresyon	4	0.00222586	0.00055646	6.82	0.005
	Ölçüm hatası	11	0.00089758	0.00008160		
	Toplam	15	0.00312344			
	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
<b>SS</b>	Regresyon	4	0.00171097	0.00042774	19.53	0.000
	Ölçüm hatası	11	0.00024097	0.00002191		
	Toplam	15	0.00195194			
	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
<b>ÇY</b>	Regresyon	4	8.3651	2.0913	18.43	0.000
	Ölçüm hatası	11	1.2479	0.1134		
	Toplam	15	9.6130			
	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
<b>YD</b>	Regresyon	4	2.13323	0.53331	13.26	0.000
	Ölçüm hatası	11	0.44242	0.04022		
	Toplam	15	2.57565			

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, F: Test istatistiği, P: Anlamlılık düzeyi

### 3.2. Taguchi Metodu ve Optimizasyon (Taguchi Method and Optimization)

Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD değerleri için hesaplanan S/N oranlarına göre ana etki grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 7'de S/N oranlarının kontrol faktörlerine göre dağılımları ve önem sıralaması verilmiştir.

Şekil 3'teki ana etki grafikleri ve Tablo 7'deki S/N oranlarının en yüksek ve en düşük noktaları incelendiğinde, kalite karakteristikleri üzerinde etkili olan en önemli kontrol faktörlerinin; Ra ve ÇS için f, SS, ÇY ve YD için ise de Vc olduğu görülmektedir. Ayrıca, Tablo 7'de kontrol faktörlerinin önem sıralaması incelendiğinde, Ra için f-KD-β-Vc, ÇS için f-KD-β-Vc, SS için Vc-β-KD-f, ÇY için Vc-KD-f-β ve YD için ise Vc-β-f-KD olduğu görülmektedir.



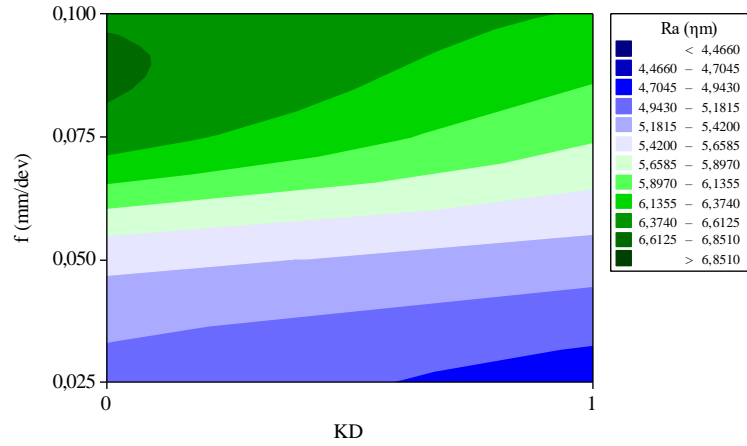
Şekil 3. S/N oranları için ana etki grafikleri; A: Ra, B: ÇS, C: SS, D: ÇY, E: YD (Main effect plot for the S/N ratios; A: Ra, B: ÇS, C: SS, D: ÇY, E: YD)

Şekil 4'te Ra üzerinde f ve KD, Şekil 5'te ÇS üzerinde f ve KD, Şekil 6'da SS üzerinde Vc ve beta, Şekil 7'de ÇY üzerinde Vc ve KD, Şekil 8'de YD üzerinde Vc ve beta etkileşimi gösterilmeye çalışılmıştır. Grafikler kalite karakteristiklerinin en fazla etkilendiği iki kontrol faktörleri baz alınarak düzenlenmiştir (Tablo 7). Grafikteki dalgalanmalar kalite karakteristikleri üzerinde diğer kontrol faktörlerinden de etkilendiğini göstermektedir ve bu sonuçlar istatistiksel sonuçlarında doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

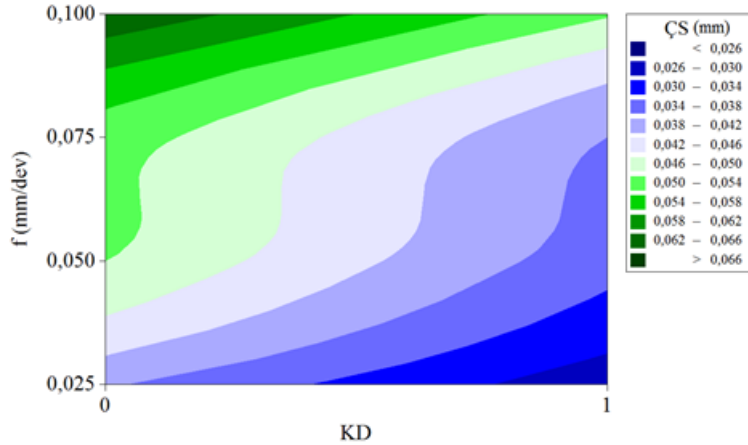
Şekil 4 ve Şekil 5'te f değerinin artması ile Ra ve ÇS'nin arttığı ve ayrıca kaplamalı matkapların (1) kaplamasız matkaplara (0) nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Düşük f değerlerinde ve kaplamalı matkaplarla daha iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi beklenen bir durumdur.

Tablo 7. S/N oranlarına bağlı önem sırası (Order of importance based on S / N ratios)

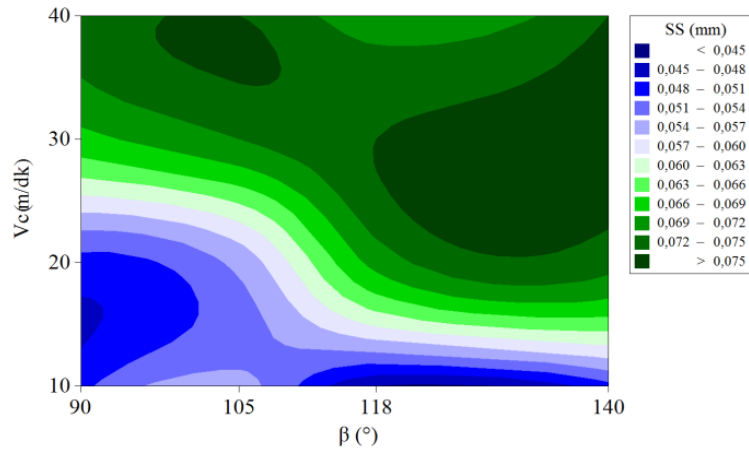
Seviyeler		Vc	f	$\beta$	KD	Seviyeler		Vc	f	$\beta$	KD	
		(dB)						(dB)				
Ra	1	-15.19	-13.91	-15.01	-15.39	ÇS	1	27.36	29.87	26.49	26.08	
	2	-14.98	-14.63	-14.94	-14.90		2	27.54	27.72	26.41	28.77	
	3	-15.06	-15.84	-15.22			3	27.54	27.17	28.43		
	4	-15.36	-16.20	-15.42			4	27.27	24.94	28.37		
	Fark	0.38	2.30	0.48	0.49		Fark	0.27	4.92	2.02	2.70	
	Sıra	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>		Sıra	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	
SS	1	26.04	24.05	24.53	23.38	ÇY	1	-6.6657	-1.6272	-1.6315	-3.8384	
	2	24.26	24.15	23.93	24.50		2	-5.2931	0.1538	-1.2618	0.5632	
	3	22.74	23.88	23.91			3	-1.2511	-1.9956	-2.2876		
	4	22.71	23.68	23.38			4	6.6595	-3.0814	-1.3695		
	Fark	3.34	0.47	1.15	1.12		Fark	13.3252	3.2353	1.0258	4.4016	
	Sıra	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>		Sıra	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	
YD	1	-1.0014	2.7893	7.1099	3.2065							
	2	0.5566	3.2958	4.5111	5.8181							
	3	8.7531	7.3113	5.0036								
	4	9.7409	4.6528	1.4246								
	Fark	10.7423	4.5220	5.6853	2.6117							
	Sıra	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>							



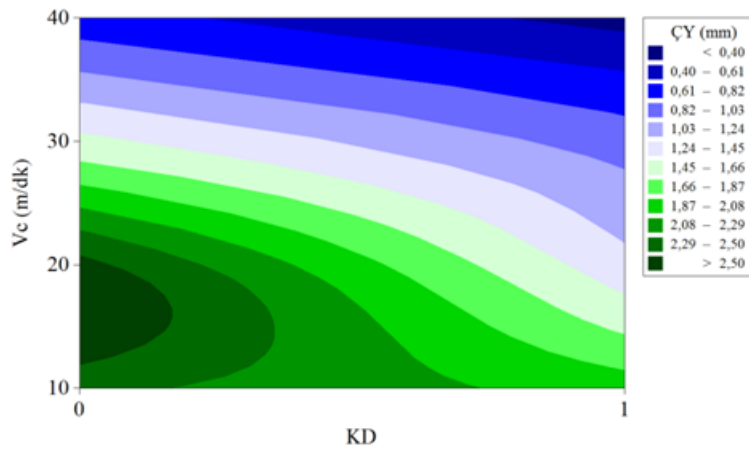
Şekil 4. İlerleme ve kaplama durumunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileşimi (The interaction of the feed rate and the coating condition on the surface roughness)



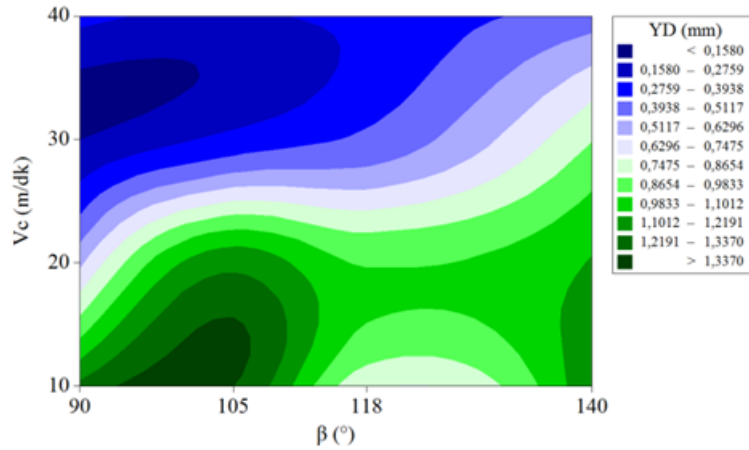
Şekil 5. İlerleme ve kaplama durumunun çaptan sapma üzerindeki etkileşimi (The interaction of the feed rate and the coating condition on the diameter deviation)



Şekil 6. Kesme hızı ve uç açısının silindirikten sapma üzerindeki etkileşimi (The interaction of the cutting speed and drill bit angle on the cylindrical deviation)



Şekil 7. Kesme hızı ve kaplama durumunun çapak yüksekliği üzerindeki etkileşimi (The Interaction of the cutting speed and the coating condition on burr height)



Şekil 8. Kesme hızı ve uç açısının yapışma üzerindeki etkileşimi (The interaction of the cutting speed and drill bit angle on the adhesion)

Kesme hızının artması ile silindiriklikten sapmanın arttığı, 10-20 m/dk kesme hızlarında matkap uç açısına da bağlı olarak silindirikten sapma değerlerinin dikkate değer şekilde azaldığı Şekil 6'de görülmektedir. Özellikle 90° uç açısına sahip matkaplarla nispeten daha iyi sonuçlar alındığı da görülmektedir. Şekil 7'de kaplamalı matkaplarla yüksek hızda delmede delik sonlarında oluşan çapakların azaldığı özellikle kaplamalı matkaplar ile 40 m/dk kesme hızında delinen deliklerde çapak oluşumunun oldukça düşük değerlerde (<0.40) olduğu söylenebilir. Şekil 8'de ise düşük kesme hızlarında iş parçası malzemesinin matkap kesici kenarlarına yapışma eğiliminin arttığı,

kesme hızının artması ile de dikkate değer şekilde azaldığı görülmektedir. Bununla beraber özellikle matkap uç açısının düşük değerlerinde yapışma eğilimi azalmaktadır.

Varyans analizi (ANOVA) ile Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD'nin kontrol faktörlerinden etkilenme oranları belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Tabloda; SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, F: Test istatistiği, P: Anlamlılık düzeyi, % katkı: Etki oranı ve R<sup>2</sup>: Determinasyon katsayısını ifade etmektedir.

Regresyon analizinde olduğu gibi ANOVA sonuçlarına göre de P değerinin 0.05'den küçük olması kontrol faktörlerinin kalite karakteristikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Tablo 8 incelendiğinde, Ra için f, SS için Vc ve KD, ÇY için Vc ve KD, YD için ise Vc,  $\beta$  ve KD'nin istatistiksel olarak etkili olduğu söylenebilir (P değeri<0.05). Ayrıca Tablo 8'deki F oranlarının, ilgili F testi tablosundaki ( $\alpha=0.05$  F dağılım tablosu) değeri mukayese edildiğinde F oranlarının,  $\alpha=0.05$  F dağılımı tablo değerinden oldukça büyük oldukları görülmektedir (F oranları > 6.61). Bu sonuçlar da varyans analizinin doğruluğunu destekler.

Tablo 8. Ra, ÇS, SS, ÇY ve YD'nin S/N oranları için ANOVA (ANOVA for S/N ratios of Ra, ÇS, SS, ÇY and YD)

Kontrol faktörleri		SD	KT	KO	F	P	% katkı
Ra	Vc	3	0,3223	0,1074	0,43	0,738	1,93
	f	3	13,5828	4,5276	18,30	0,004	<b>81,50*</b>
	$\beta$	3	0,5723	0,1908	0,77	0,558	3,43
	KD	1	0,9508	0,9508	3,84	0,107	5,71
	Hata	5	1,2370	0,2474			7,42
	Toplam	15	16,6652				100,00
	R <sup>2</sup>						92,58%
ÇS	Vc	3	0,215	0,072	0,01	0,998	0,18
	f	3	49,084	16,361	3,09	0,128	<b>40,88*</b>
	$\beta$	3	15,178	5,059	0,95	0,482	12,64
	KD	1	29,071	29,071	5,48	0,066	24,21
	Hata	5	26,516	5,303			22,08
	Toplam	15	120,064				100,00
	R <sup>2</sup>						77,91%
SS	Vc	3	29,9028	9,9676	25,78	0,002	<b>74,80*</b>
	f	3	0,5122	0,1707	0,44	0,733	1,28
	$\beta$	3	2,6530	0,8843	2,29	0,196	6,64
	KD	1	4,9768	4,9768	12,87	0,016	12,45
	Hata	5	1,9329	0,3866			4,83
	Toplam	15	39,9776				100,00
	R <sup>2</sup>						95,17%
ÇY	Vc	3	430,543	143,514	37,41	0,001	<b>78,07*</b>
	f	3	21,689	7,230	1,88	0,250	3,93
	$\beta$	3	2,543	0,848	0,22	0,878	0,46
	KD	1	77,498	77,498	20,20	0,006	14,05
	Hata	5	19,183	3,837			3,48
	Toplam	15	551,455				100,00
	R <sup>2</sup>						96,52%
YD	Vc	3	365,486	121,829	37,72	0,001	<b>69,72*</b>
	f	3	49,211	16,404	5,08	0,056	9,39
	$\beta$	3	66,091	22,030	6,82	0,032	12,61
	KD	1	27,283	27,283	8,45	0,034	5,20
	Hata	5	16,150	3,230			3,08
	Toplam	15	524,221				100,00
	R <sup>2</sup>						96,92%

\* En yüksek etki oranı

Kalite karakteristiklerinin kontrol faktörlerinden etkilenme oranları sırasıyla; Ra için Vc: %1.93 - f: %81.50 -  $\beta$ : %3.43 - KD: %5.71, ÇS için Vc: %0.18 - f: %40.88 -  $\beta$ : %12.64 - KD: %24.21, SS için Vc: %74.80 - f: %1.28 -  $\beta$ : %6.64 - KD: %12.45, ÇY için Vc: %78.07 - f: %3.93 -  $\beta$ : %0.46 -

KD: %14.05, YD için Vc: %69.72 - f: %9.39 -  $\beta$ : %12.61 - KD: %5.20 seviyelerinde olduğu ilgili tabloda (Tablo 8) görülmektedir.

Taguchi metodu ile optimizasyon yapılarak, belirlenen kalite karakteristikleri üzerinde kontrol faktörlerinin en uygun seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan optimizasyona göre kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri; Ra için A2-B1-C2-D2 (Vc: 20 m/dk - f: 0.025 mm/dev -  $\beta$ : 105° - kaplamalı matkap), ÇS için A3-B1-C3-D2 (Vc: 30 m/dk - f: 0.025 mm/dev -  $\beta$ : 118° - kaplamalı matkap), SS için A1-B2-C1-D2 (Vc: 10 m/dk - f: 0.050 mm/dev -  $\beta$ : 90° - kaplamalı matkap), ÇY için A4-B2-C2-D2 (Vc: 40 m/dk - f: 0.050 mm/dev -  $\beta$ : 105° - kaplamalı matkap) ve YD için A4-B3-C1-D2 (Vc: 40 m/dk - f: 0.075 mm/dev -  $\beta$ : 90° - kaplamalı matkap) olarak tespit edilmiştir (Şekil 3).

Bundan sonraki aşama optimizasyonun geçerliliğinin kontrolüdür. Bu amaçla kontrol faktörlerinin en uygun seviyeleri için doğrulama deneylerinin ve tahminsel hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Yapılan doğrulama deneyi sonuçları, tahminsel hesaplamalar ve karşılaştırmaları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Yapılan doğrulama deneyi sonuçları ve tahminsel hesaplamaların karşılaştırılması (Comparison of validation test results and predictive calculations)

Kalite karakteristiği	Doğrulama deneyi		Tahminsel hesaplama		Farklar	
Ra	Ra <sub>den</sub> ( $\mu$ m)	Ra S/N <sub>den</sub> (dB)	Ra <sub>tah</sub> ( $\mu$ m)	Ra S/N <sub>tah</sub> (dB)	Ra <sub>den</sub> -Ra <sub>tah</sub>   ( $\mu$ m)	Ra S/N <sub>den</sub> -Ra S/N <sub>tah</sub>   (dB)
	4.813	-13.6483	4.620	-13.2920	0.193	0.3563
ÇS	ÇS <sub>den</sub> (mm)	ÇS S/N <sub>den</sub> (dB)	ÇS <sub>tah</sub> (mm)	ÇS S/N <sub>tah</sub> (dB)	ÇS <sub>den</sub> -ÇS <sub>tah</sub>   (mm)	ÇS S/N <sub>den</sub> -ÇS S/N <sub>tah</sub>   (dB)
	0.023	32.7654	0.021	32.3315	0.002	0.4339
SS	SS <sub>den</sub> (mm)	SS S/N <sub>den</sub> (dB)	SS <sub>tah</sub> (mm)	SS S/N <sub>tah</sub> (dB)	SS <sub>den</sub> -SS <sub>tah</sub>   (mm)	SS S/N <sub>den</sub> -SS S/N <sub>tah</sub>   (dB)
	0.044	27.1309	0.040	27.3997	0.004	0.2688
ÇY	ÇY <sub>den</sub> (mm)	ÇY S/N <sub>den</sub> (dB)	ÇY <sub>tah</sub> (mm)	ÇY S/N <sub>tah</sub> (dB)	ÇY <sub>den</sub> -ÇY <sub>tah</sub>   (mm)	ÇY S/N <sub>den</sub> -ÇY S/N <sub>tah</sub>   (dB)
	0.23	12.7654	-0.091	11.0276	0.312	1.7378
YD	YD <sub>den</sub> (mm)	YD S/N <sub>den</sub> (dB)	YD <sub>tah</sub> (mm)	YD S/N <sub>tah</sub> (dB)	YD <sub>den</sub> -YD <sub>tah</sub>   (mm)	YD S/N <sub>den</sub> -YD S/N <sub>tah</sub>   (dB)
	0.096	20.3546	-0.046	16.4433	0.142	3.9113

Yüzey pürüzlülüğünün tahminsel değerinin (Ra<sub>tah</sub>) hesaplanmasında Eşitlik 7, çaptan sapma tahminsel değerinin (ÇS<sub>tah</sub>) hesaplanmasında Eşitlik 8, silindiriklikten sapma tahminsel değerinin (SS<sub>tah</sub>) hesaplanmasında Eşitlik 9, çapak yüksekliği tahminsel değerinin (ÇY<sub>tah</sub>) hesaplanmasında Eşitlik 10 ve kesici takıma yapışmasının tahminsel değerinin (YD<sub>tah</sub>) hesaplanmasında Eşitlik 11 kullanılmıştır. Eşitliklerde tahminsel hesaplamaların yapılabilmesi için kontrol faktörlerinin optimum koşulları kullanılmaktadır. Buna göre Eşitlik 7'de verilen Ra<sub>tah</sub>, A2-B1-C2-D2 kontrol faktörlerinin optimum koşulları için Ra değerinin aritmetik ortalaması ve  $\overline{Ra}_{tah}$ , deneyler sonucunda elde edilen Ra değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Diğer eşitliklerde bu şarta bağlı olarak formülize edilmiştir.

$$Ra_{tah} = \overline{Ra}_{tah} + (\overline{A}_2 - \overline{Ra}_{tah}) + (\overline{B}_1 - \overline{Ra}_{tah}) + (\overline{C}_2 - \overline{Ra}_{tah}) + (\overline{D}_2 - \overline{Ra}_{tah}) \quad (7)$$

$$\overline{ÇS}_{tah} = \overline{ÇS}_{tah} + (\overline{A}_3 - \overline{ÇS}_{tah}) + (\overline{B}_1 - \overline{ÇS}_{tah}) + (\overline{C}_3 - \overline{ÇS}_{tah}) + (\overline{D}_2 - \overline{ÇS}_{tah}) \quad (8)$$

$$SS_{tah} = \overline{SS}_{tah} + (\overline{A}_1 - \overline{SS}_{tah}) + (\overline{B}_2 - \overline{SS}_{tah}) + (\overline{C}_1 - \overline{SS}_{tah}) + (\overline{D}_2 - \overline{SS}_{tah}) \quad (9)$$

$$\overline{ÇY}_{tah} = \overline{ÇY}_{tah} + (\overline{A}_4 - \overline{ÇY}_{tah}) + (\overline{B}_2 - \overline{ÇY}_{tah}) + (\overline{C}_2 - \overline{ÇY}_{tah}) + (\overline{D}_2 - \overline{ÇY}_{tah}) \quad (10)$$

$$YD_{tah} = \overline{YD}_{tah} + (\overline{A}_4 - \overline{YD}_{tah}) + (\overline{B}_3 - \overline{YD}_{tah}) + (\overline{C}_1 - \overline{YD}_{tah}) + (\overline{D}_2 - \overline{YD}_{tah}) \quad (11)$$



$$CI = \sqrt{F_{0,05,(1,f_e)} Ve (1/\eta_{eff} + 1/r)} \quad (12)$$

$$\eta_{eff} = N/1 + U_T \quad (13)$$

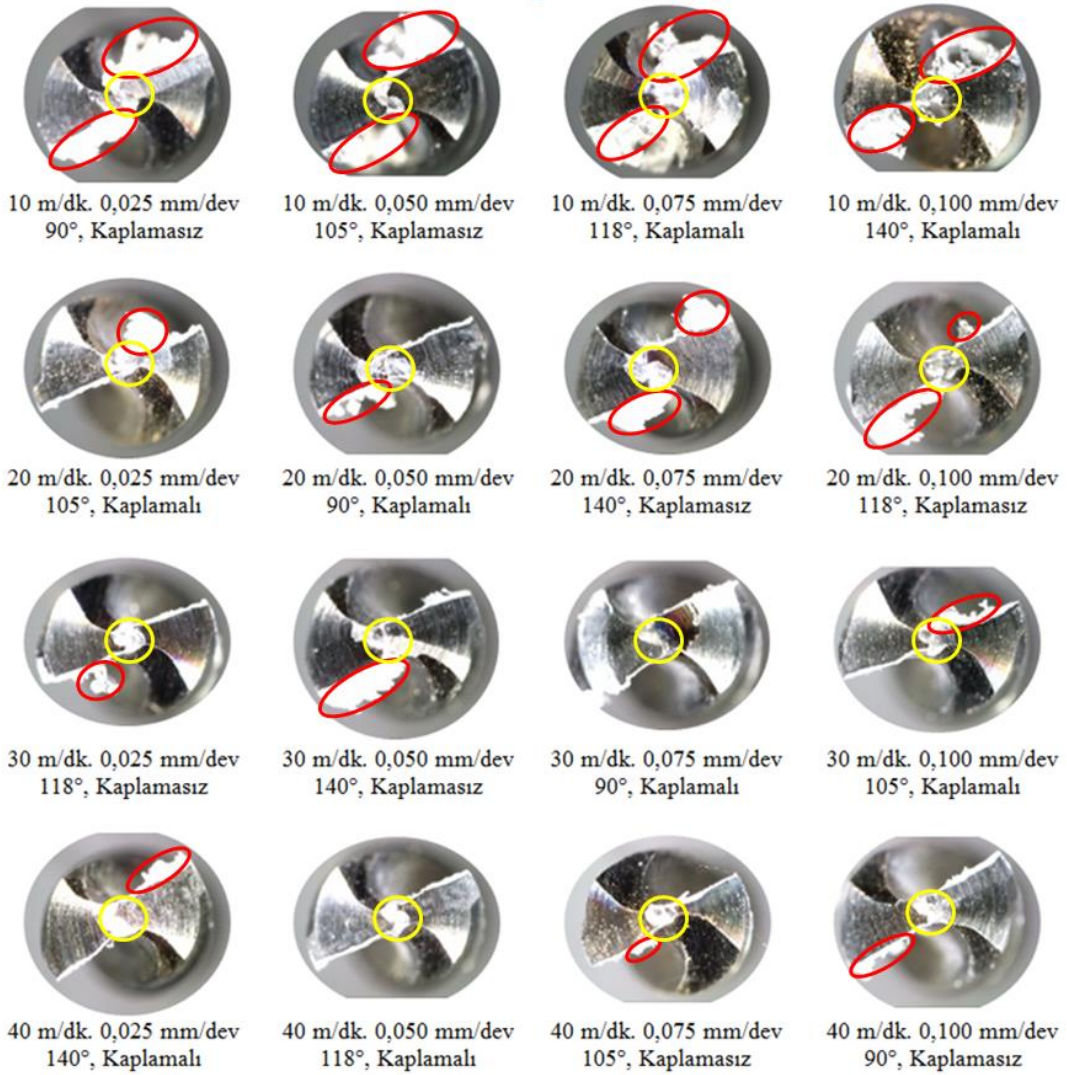
Optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyi sonuçları Eşitlik 12 yardımıyla hesaplanan güven aralığı (CI) değeri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Eşitlik 12 ve Eşitlik 13'te yer alan;  $F_{0,05,(1,f_e)}$ : F0,05 test tablosundan hata serbestlik derecesini,  $Ve$ : Hata varyansını,  $\eta_{eff}$ : gerçek tekrar sayısını,  $r$ : doğrulama deneyi tekrar sayısını,  $N$ : toplam deney sayısını ve  $U_T$ : kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamını ifade etmektedir. Buna göre; bütün kontrol faktörleri için:  $F_{0,05,(1,f_e)} = 6,61$  (F test tablosundan),  $Ve$  tablo 8'den (Ra için 0.247, ÇS için 5.303, SS için 0.3866, ÇY için 3.837 ve YD için 3.230) değerleri elde edilmiştir. Deney tekrar sayısının hesaplanması, toplam deney sayısı ve kesme kuvveti üzerinde anlamlı etkisi olan kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamı Eşitlik 13'te yerine konulduğunda gerçek tekrar sayısı ( $\eta_{eff}$ ) 1.45 olarak hesaplanmış ve doğrulama deneyi tekrar sayısı ( $r$ ) 1 olarak uygulanmıştır. İlgili değerler Eşitlik 12'de yerine konulduğunda; Ra için güven aralığı (CI) =  $\pm 1.50$ , ÇS için  $\pm 6.94$ , SS için  $\pm 1.87$ , ÇY için  $\pm 5.91$  ve YD için ise  $\pm 5.42$  olarak bulunmuş olur.

Doğrulama deneyi sonucunda elde edilen Ra değeri (Raden = 4.813  $\mu m$ ) ölçülmüş ve bu değere ait S/N oranı (Ra S/Nden = -13.6483 dB) Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır. Ayrıca Eşitlik 7 ile hesaplanan tahminsel  $Ra_{tah}$  değeri (Ratah = 4.620  $\mu m$ ) ve bu değere ait S/N oranı (Ra S/Ntah = -13.2920 dB) Eşitlik 1 yardımıyla bulunmuştur. Benzer işlemler ÇS, SS, ÇY ve YD için de tekrarlanmış ve bulunan değerler Tablo 9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre; Ra için Ra S/Nden oranı (-13.6483 dB) ile Ra S/Ntah oranı (-13.2920 dB) arasındaki mutlak fark 0.3563 dB, ÇS için 0.4339 dB, SS için 0.2688 dB, ÇY için 1.7378 ve YD için ise 3.9113 olarak hesaplanmıştır. Bütün kalite karakteristikleri için de bu farkların Eşitlik 12 ile hesaplanan güven aralığı (CI) değerlerinden küçük olduğu görülmektedir (Ra için  $0.3563 < 1.50$  - ÇS için  $0.4339 < 6.94$  - SS için  $0.2688 < 1.87$  - ÇY için  $1.7378 < 5.91$  - YD için ise  $3.9113 < 5.42$ ).

Elde edilen sonuçlara göre, Taguchi metoduyla HSS matkaplarla alüminyum 1050-H14 malzemenin delinmesinde yüzey pürüzlülüğü, çaptan sapma, silindiriklikten sapma, çapak yüksekliği ve kesici takıma yapışma açısından 0.05 anlamlılık düzeyinde yapılan optimizasyonun uygun olduğu görülmüştür.

### 3.3. Kesici Takım Aşınması (Cutting Tool Wear)

Şekil 9'te matkabın kesme işlemi yapan kısımlarında önemli ölçüde iş parçası yapışmalarının ve kopmalarının olduğu görülmektedir. Al 1050-H14 alaşımının delinmesi sonucu ölçülen Ra değerlerinin yüksek çıkması delme süresince iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışması ile açıklanabilir. Neredeyse tüm kesici takımlarda kesici kenara ve radyal ağıza iş parçası malzemesinin yapışması gözlemlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla yapışma oranında nispeten bir düşüş görülmüştür. Bununla beraber kesme hızının düşük, ilerleme miktarının yüksek olduğu kesme parametrelerinde iş parçası malzemesinin kesici takıma nispeten daha fazla yapışma eğilimine girdiği görülmüştür. Artan ilerleme miktarı ile talaş kesitinin artması talaşın daha yüksek bir yüzey alanında kesici takıma temas etmesine neden olacaktır. Bunun bir sonucu olarak iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışma eğilimi artacaktır. Kesici kenar aşınması, ilerleme miktarının ve kesme hızının artmasına paralellik göstermiştir. Bununla beraber kaplamalı kesici takımlarda kaplamasız kesici takımlara nazaran daha az yapışma görülmektedir.



Şekil 9. Deneyler sonucunda matkap uçlarında meydana gelen iş parçası yapışmaları (Workpiece adhesions in drill bits as a result of experiments)

### 3.4. Çapak Oluşumu (Burr Formation)

Talaşlı imalat sonrası işlenmiş malzeme üzerinde kalan artık iş parçası malzemeleri (çapaklar) iş parçası kalitesini ve talaşlı imalat verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Oluşan bu çapakların ikici bir operasyonla giderilmesi gerekmektedir ve bu süreç maliyetleri artırıcı olumsuz bir işlem olacaktır. Bu nedenle çapak oluşumu ya tamamen önlenmeli ya da mümkün olan en düşük seviyede tutulmaya çalışılmalıdır. Şekil 10'de delinen deliklerin çıkış kısımlarında meydana gelen çapak oluşumları gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde delinen deliklerin çıkış kısımlarında oldukça yüksek çapak ve şapka oluşumları gözlenmektedir. Bu durumun alüminyumun yüksek sünekliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çıkış kısmında oluşan çapaklanmanın kesme hızının ve ilerleme miktarının artmasına paralel olarak nispeten azaldığı görülmektedir. Özellikle 40 m/dk kesme hızında ve düşük ilerleme değerlerinde kaplamalı kesici takımlarda çapak oluşumunun önemli oranda azaldığı görülmüştür. Kaplama, kesici takım üzerinde talaşın daha rahat kaymasına ve talaşın daha kolay uzaklaştırılmasında etkin bir faktör olması ile açıklanabilir. 90° ve 118° uç açısına sahip matkaplarla delinen deliklerin çıkış kısımlarının nispeten pürüzsüz olduğu da görülmektedir.



Şekil 10. Deneyler sonucu oluşan delik çıkışlarının görüntüleri (Exit images of the holes formed as a result of the experiments)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme miktarı, matkap uç açısı ve kaplama durumu olarak 4 farklı değişken kullanılarak 1050-H14 alüminyum alaşımının HSS kesici takımlarla delinmesi sonucu ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, çaptan sapma ve silindiriklikten sapma değerleri incelenmiştir. Ayrıca deney sonucunda meydana gelen takım aşınmaları ve çapak oluşumu değişen delme parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Regresyon analizi sonucunda yüzey pürüzlülük değeri ve silindiriklikten sapma üzerinde ilerleme miktarının, çaptan sapma için ise kaplama durumunun sonuçlar üzerinde önemli derecede etkili olduğu görülmüştür
- Artan kesme hızları ve düşük ilerleme miktarlarında yüzey kalitesinin arttığı görülmüştür.
- Kaplamalı kesici takımlarla elde edilen deliklerin daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olduğu ve geometrik sapmaların daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.

- Delik girişlerinde çapak oluşumu oldukça küçük değerlerdedir ancak yüksek hızlarda kaplamalı takımlar daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Delik sonlarında yüksek ilerleme miktarı değerlerinde çapak oluşumu artarken, yüksek kesme hızlarında azaldığı görülmüştür.
- Delik sonlarında şapka oluşumu görülmüş ve çapak kalınlığının yüksek olduğu durumlarda (yüksek ilerleme değerlerinde) delik kalitesinin olumsuz yönde etkilenmiştir.
- Neredeyse tüm deneylerde iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışması gözlemlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla yapışma önemli ölçüde düşmüştür.
- İlerleme miktarının yükselen değerlerinde, iş parçası malzemesinin kesici takım üzerine yapışması artmış ve bununla beraber iş parçası kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. G. Samtaş, S. Korucu, Optimization of cutting parameters for surface roughness in milling of cryogenic treated EN AW 5754 (AlMg3) aluminum alloy, *Journal of Polytechnic*, 22(3): 665-673, 2019.
2. H. Durmuş, Optimization of multi-process parameters according to the surface quality criteria in the end milling of the AA6013 aluminum alloy, *Materials and Technology*, 46(4): 383-388, 2012.
3. M. Kurt, Y. Kaynak, B. Bakır, U. Köklü, G. Atakök, L. Kutlu, Experimental investigation and Taguchi optimization for the effect of cutting parameters on the drilling of Al 2024-t4 alloy with diamond like carbon (DLC) coated drills, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 2019, Karabük.
4. Ş. Bayraktar, Investigating of effects on thrust force and burr height of cutting parameters in dry drilling of al-5083 alloy, 16th International Materials Symposium (IMSP'2016), 64, 2016, Denizli.
5. U. Çaydaş, M. Çelik, AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması, *Journal of Polytechnic*, 20(2): 419-425, 2017.
6. N. Dheeraj, S. Sanjay, K.K. Bhargav, T. Jagadesh, Investigation into solid lubricant filled textured tools on hole geometry and surface integrity during drilling of aluminium alloy, *Materials Today: Proceedings*, 10th International Conference of Materials Processing and Characterization, 2020, Mathura, India.
7. D. Song, L. Wenhe, Z. Kan, L. Jinshan, F. Jindan, Investigation on exit burr in robotic rotary ultrasonic drilling of CFRP/aluminum stacks, *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 868-876, 2019.
8. M. Kimmelman, J. Duntschew, I. Schluchter, H.C. Möhring, Analysis of burr formation mechanisms when drilling CFRP-Aluminium stacks using acoustic emission, *Procedia Manufacturing*, 40, 64-69, 2019.
9. Z. Zhu, K. Guo, J. Sun, J. Li, Y. Liu, Y. Zheng, L. Chen, Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351 / titanium Ti6Al4V stack, *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 270-281, 2018.
10. A.P. Ilyuschenko, E.E. Feldshtein, Y.O. Lisovskaya, L.V. Markova, M.A. Andreyev, A. Lewandowski, On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, 270, 190-196, 2015.
11. S.S. Chatha, A. Pal, T. Singh, T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication, *Journal of Cleaner Production*, 137, 537-545, 2016.
12. Material Property Data: Matweb 01.05.2020  
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=b1aa69c0528a40729478403542a8c94a&n=1>.

13. G. Başar, F. Kahraman, Delik işleme prosesinde kesme parametrelerinin Taguchi metodu ve regresyon analizi kullanılarak modellenmesi ve optimizasyonu, 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017), 688-695, 2017, Adana.
14. M.E. Aydemir, Bazı optimizasyon yöntemlerinin yama anten problemlerindeki performansı, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29(3): 579-588, 2014.
15. İ. Çiftçi, H. Gökçe, Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34(1): 201-213, 2019.
16. M. Saat, Kalite denetiminde Taguchi yaklaşımı. Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3, 97-108, 2000.
17. E.M. Trent P.K. Wright, Metal Cutting 4th ed., Butterworth-Heineman, 2000, Boston.
18. H. Gökçe, M. Yavuz. İ. Çiftçi, An investigation into the performance of HSS drills when drilling commercially pure molybdenum, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38(1): 61-70, 2020.
19. İ. Çiftçi, H. Gökçe, Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi, Journal of Polytechnic, 22(3): 627-631, 2019.
20. M. Yavuz, H. Gökçe, İ. Çiftçi, H. Gökçe, Ç. Yavaş, U. Şeker, Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106, 4623–4633, 2020.
21. M. Elitaş, İ. Çiftçi, Sertleştirilmiş AISI 52100 malzemenin aşındırıcı diskle kesilmesinin araştırılması, Türk Bilim Araştırma Vakfı, 10(2): 1-10, 2017.
22. H. Yurtkuran, M.E. Korkmaz, M. Günay, Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert, Gazi University Journal of Science, 29(4): 987-995, 2016.



## Toz Metalurjisi Yöntemi ile WC Takviyeli CuNiSi Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Mehmet AKKAŞ<sup>1,\*</sup>, Khalid Fouzi Ihmeda BOUSHIHA<sup>1</sup>, Tarek Mousa K. TABONAH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 05.03.2021

**Kabul:** 18.04.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Toz metalurjisi

CuNiSi kompozit

WC takviye

Karakterizasyon

### ÖZET

Teknoloji ve endüstride artan talebe bağlı olarak daha üstün özelliklere sahip malzemelere olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Bu gereksinim ile birlikte bilim adamları yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme üretimi için çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Metal matrisli kompozitler, genel olarak toz metalurjisi yöntemi ile oldukça başarılı bir şekilde üretilmektedirler. Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemi ile CuNiSi toz karışımına, ağırlıkça farklı oranlarda WC parçacıkları takviyesi yapılarak, kompozit numuneler üretilmiştir. Hazırlanan CuNiSi ve WC toz karışımları 600 MPa basınç altında soğuk preslenerek ham numune haline getirilmiştir. Ham numune haline getirilen numuneler atmosfer kontrollü fırında 900 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen numunelerin mikroyapılarını belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), üretilen numunelerin içyapılarında oluşan fazları belirleyebilmek için X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizi ve WC parçacıklarının sertlik üzerine etkisini belirleyebilmek amacıyla mikrosertlik (HV<sub>0.05</sub>) testi yapılmıştır. Mikroyapı sonuçlarından, WC partiküllerinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Üretilen numunelerde artan WC miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olmuştur. Bunun yanı sıra, deneyler sonucunda en yüksek sertlik değeri % 10 WC ilave edilen numunede 117 HV<sub>0.05</sub> olarak ölçülmüştür.

## Production and Characterization of WC Reinforced CuNiSi Composites by Powder Metallurgy Method

### ARTICLE INFO

**Received:** 05.03.2021

**Accepted:** 18.04.2021

#### Keywords:

Powder metallurgy

CuNiSi composite

WC reinforcement

Characterization

### ABSTRACT

Due to the increasing demand in technology and industry, the need for materials with superior properties is increasing day by day. With this requirement, scientists carry out various studies for the production of new and superior materials. Metal matrix composites are generally produced very successfully by powder metallurgy method. In this study, composite samples were produced by reinforcing different proportions of WC particles by weight to the CuNiSi powder mixture by powder metallurgy (TM) method. Prepared CuNiSi and WC powder mixtures were turned into raw samples by cold pressing under 600 MPa pressure. The samples that were turned into raw samples were subjected to sintering process in an atmosphere controlled furnace at 900 °C for 1 hour. Scanning electron microscopy (SEM-EDS) to determine the microstructure of the samples produced, X-Ray Diffraction method (XRD) analysis to determine the phases formed in the internal structures of the produced samples, and the microhardness (HV<sub>0.05</sub>) test to determine the effect of WC particles on hardness. From the microstructure results, it was determined that the WC particles were homogeneously distributed in the structure. Due to the increasing amount of WC in the samples produced, there was an increase in the hardness values. Besides, as a result of the experiments, the highest hardness value was measured as 117 HV<sub>0.05</sub> in the sample added with 10% WC.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hızla gelişen teknoloji ile geleneksel malzemelerin yerini daha spesifik özelliklere sahip olan yeni malzemeler almaktadır. Bu sebepten dolayı hızla gelişen teknolojiye, endüstri sanayisinin ham

\* Sorumlu yazar, e-posta: mehmetakkas@kastamonu.edu.tr

maddesi olan malzemelerde de geliştirme yapmak zorunlu hale gelmiştir. Malzeme alanında çalışma yapan bilim adamları genellikle doğal ve alaşım maddelerinden daha üstün özelliklere sahip olan yeni malzemeleri araştırmaya yönelmişlerdir. Bu yeni malzemeler diğer geleneksel malzemelerden farklı olarak, üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre birçok avantaja sahiptir. Kompozit malzemelerin en üstün özellikleri hafif ve yüksek mukavemete sahip olmalarıdır [1,2].

Son zamanlarda uygulanan metotlar arasında toz metalurjisi (TM) ile üretilen CuNiSi alaşımları dikkate değer bulunmuştur. TM yöntemiyle alaşımın kimyasal kompozisyon kontrolü sağlanabilmektedir. Toz metalurjisi, döküm, talaşlı imalat, sıcak ve soğuk presleme gibi üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir [3]. Toz metalurjisi yöntemi ile kompozitler elde edilerek malzemelere aşınma direnci, korozyon direnci, yüzey sürtünmesi ve yüzey gerilimlerinin arttırılması gibi özellikler kazandırılabilir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzeme grupları içerisinde kompozit malzemeler vazgeçilmez bir yere sahiptir [4]. Dayanım/ağırlık oranının yükselmesiyle daha ince ve hafif kompozitlerin geliştirilmesi neticesinde üretim ve işletme giderlerinin birim maliyetinin düşürülmesi sağlanmaktadır [5]. Hafiflik ve sağlamlık oranı açısından başarılı olan CuNiSi alaşımları ile çok iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu çalışmanın amacı, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen CuNiSi alaşımına WC parçacıklarının ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırmaktır. Sabit presleme basıncında preslenen ve farklı sıcaklıklarda sinterlenen CuNiSi alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişim karşılaştırılmıştır [6,7].

Bakır ve Nikel, yüksek çözünürlüğe sahip demir, krom ve kobalt gibi çeşitli elementlerle alaşımlanabilen elementlerdir. Ni esaslı alaşımlar, gaz türbini parçaları, tıbbi uygulamalar ve nükleer sistemleri gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, aşınma direnci, korozyon ve termal yorulma problemlerini çözebilir. Bu özellikler, yeni Cu ve Ni esaslı alaşımların geliştirilmesine öncülük etmektedir. Birbiriyle temas halinde olan ve aşınmaya maruz kalan rulman, dişli ve kam gibi makine parçalarının geliştirilmesi hayati öneme sahiptir. Günümüzde, aşınma oranlarını azaltmak için yeni malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan, triboloji çalışmaları, sürtünme olayları, yağlama ve aşınmayı içeren olayları analiz ederek ve araştırarak makine parçalarının sürtünme ve aşınmasını azaltmak için farklı yollara odaklanmaktadır [8,9].

CuNiSi ve alaşımları mükemmel ısı direnci, korozyon direnci, tokluk ve mukavemet gibi sahip oldukları özelliklerinden dolayı uzay-havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda yüksek mühendislik alaşımları olarak tercih edilmektedir [10-12]. Buna ek olarak, bu malzemeler makine teçhizat ve yapı malzemeleri, medikal aygıtlar ve araçlar gibi endüstriyel ve tıbbi uygulamaların yanısıra elektronik aygıtlar uzay araçları gibi ileri düzey uygulamalarda ve süper elastik gözlük çerçeveleri telefon antenleri gibi günlük hayatı kolaylaştıran birçok üründe kullanılmaktadırlar. Son yıllarda robotik alanda yapılan uygulamalarda yaygınlaşmaktadır. Fakat CuNiSi ve alaşımlarının endüstride kullanımında mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri bakımından problemlerle karşılaşmaktadır [13]. Bu problemlerden dolayı CuNiSi alaşımının mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri düşük olduğu için toz metalurjisi yöntemi ile bu alaşıma WC parçacıkları takviye ederek üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin aşınma direnci ve mekanik özellikleri artacağından dolayı endüstride ihtiyaç olan bir açık kapatılmış olacaktır. Bu çalışmada literatür araştırmaları sonucu, WC takviyeli CuNiSi kompozit malzemelerin üretilebilirliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla, literatürdeki bu boşluğu doldurabilmek amacıyla toz metalurjisi yöntemiyle WC takviyeli CuNiSi kompozit malzemelerin üretimi çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, kullanılan Bakır (Cu), Nikel (Ni), Silisyum (Si) ve Tungsten karbür (WC) tozları Nanografi firmasından temin edilmiştir. Cu, Si ve WC tozları % 99,9 saflıkta ve ortalama 44 mikron tane büyüklüğündedir. Ni tozu % 99,95 saflıkta ve ortalama 44 mikron tane büyüklüğündedir. Temin edin bu tozlar ile CuNiSi alaşımına farklı oranlarda (ağırlıkça % 2.5, 5 ve 10) WC parçacıkları ilave



edilerek toz metalurjisi yöntemiyle üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle CuNiSi alaşımı için tozlar Tablo 1’de verilen ağırlıkça %’de kimyasal bileşimine göre tartılarak hazırlanmıştır.

Tablo 1. CuNiSi kompozit karışımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of CuNiSi composite mixture)

Elementler	Cu (ağ%)	Ni (ağ%)	Si (ağ%)
CuNiSi alaşımının hazırlanması	95	4	1

Hazırlanan CuNiSi alaşımına WC ilaveleri Tablo 2’de verilen %’de kimyasal bileşimine göre tartılarak hazırlanmıştır.

Tablo 2. Kompozit malzemelerin üretim parametreleri (Production parameters of composite materials)

Numune No	CuNiSi (ağ%)	WC (ağ%)	Sıcaklık (°C)
1	100	-	
2	97.5	2.5	900
3	95	5	
4	90	10	

Hazırlanan tozlar Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan üç boyutlu turbula ile 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında tozlar aynı laboratuvarında bulunan pres ile presleme işlemi yapılmıştır. Soğuk presleme işleminde presleme basıncı olarak 600 MPa basınç uygulanmıştır. Presleme işlemi Specac marka GS15011 modeli hidrolik ham numune presi ile yapılmıştır. Presleme işleminde kalıp olarak, 13 mm çapında silindir şeklinde bir kalıp kullanılmıştır.

Üretilen ham numunelerin sinterleme işlemi Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan atmosfer kontrollü ısıtım işlem fırını (Protherm) ile yapılmıştır.

Sinterleme işlemi toplam 240 dakikada tamamlanmıştır. Numunelerin içerisindeki yağ vb. atıkların dışarı atılması amacı ile 10 °C/dakika hızla sinterleme sıcaklığı olan 900 °C sıcaklığa 90 dakikada yükseltilmiştir. Daha sonra sinterleme sıcaklığı 900 °C’de 60 dakika sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Numunelerin soğuma işlemi 90 dakikada oda sıcaklığına kadar atmosfer kontrollü altında fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir.

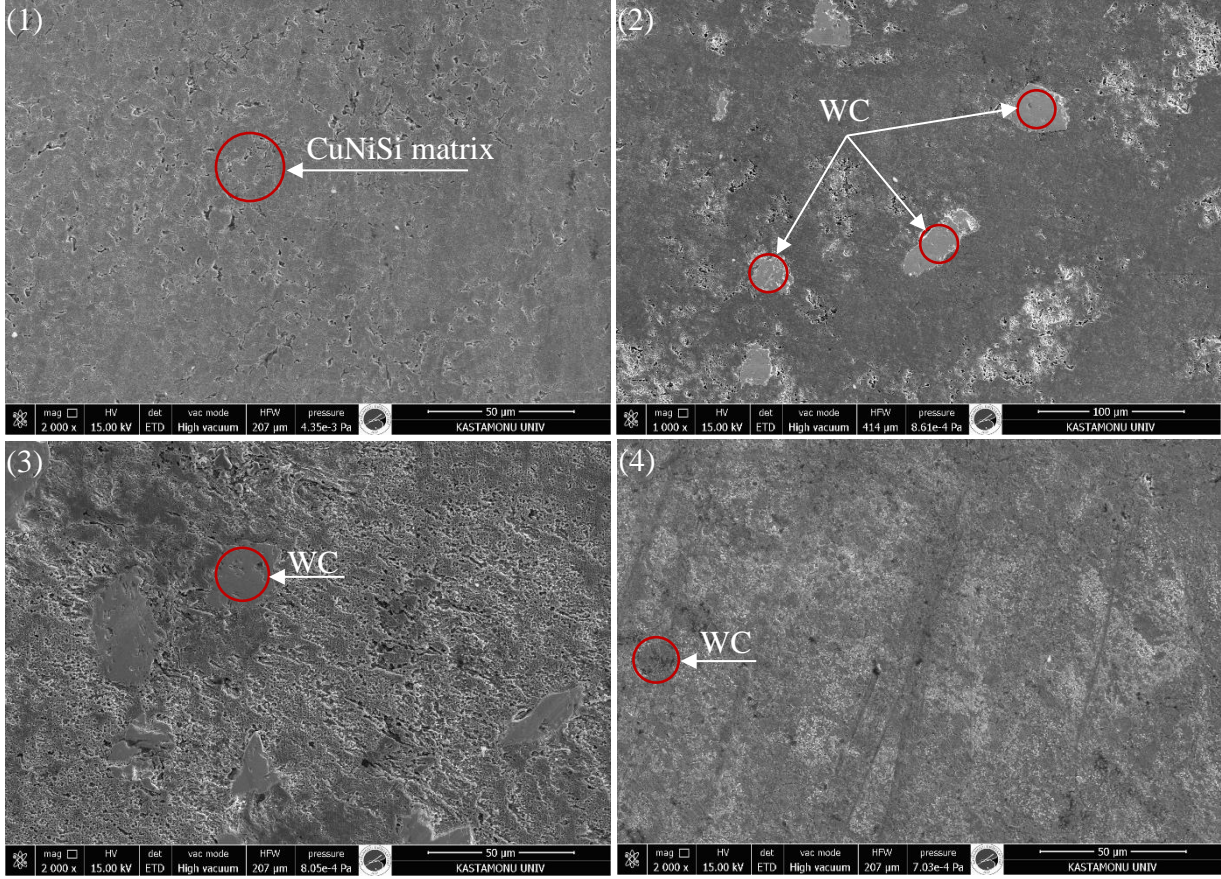
Sinterleme işlemi sonrasında numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dispersive Spektrum (EDS) analizleri için numunelere metalografik işlemler uygulanmıştır. Bu uygulanan metalografik işlemler sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama olarak yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerine 120, 200, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 3 ve 1 µ elmas süspansiyonlar ile parlatılmıştır. Son olarak ise, dağlama reaktifine daldırma yöntemi ile dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Numuneler dağlama işlemine tabi tutulduktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “FEI QUANTA 250 FEG” marka cihazdan alınmıştır. Numunelerin XRD ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında bulunan Bruker D8 Advance marka cihaz ile yapılmıştır. X-ışını difraksiyonu (XRD), kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan bir yöntemdir.

Sinterleme sonrasında, deney numunelerine metalografik işlem basamakları sırasıyla uygulandıktan sonra, bu çalışmada üretilen numuneler için artan WC miktarına bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerlerinin nasıl etkilendiği mekanik bir özellik olarak araştırılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümlerinde mikrosertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Bu ölçümler, Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU marka HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Vickers sertlik testi ile 50 gr. yük altında 16 saniye süre uygulanarak yapılmıştır. Numunelerde sertlik ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için en az 5 noktadan ölçüm alınmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerin SEM görüntüleri alınmış ve elde edilen görüntülere göre değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 1'de verilen 1 numaralı numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde CuNiSi matrix yapısı açıkça görülmektedir. Ek olarak, 2, 3 ve 4 numaralı numunelerden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde WC parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. CuNiSi ve WC 'ün iç yapıda homojen bir şekilde dağılması üç boyutlu turbula ile karıştırma ve sinterleme işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir [14,15].

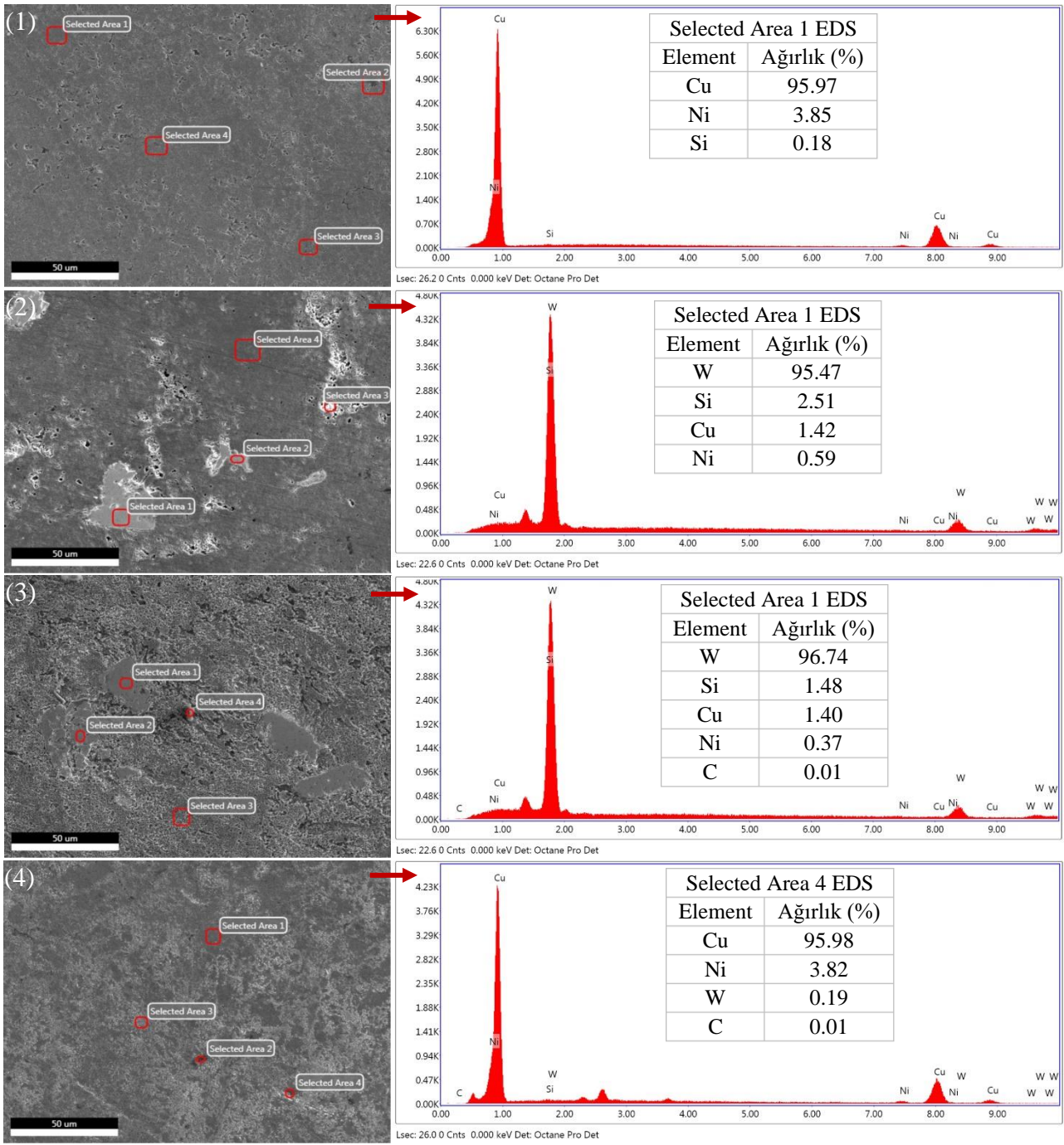


Şekil 1. Üretilen numunelerin SEM görüntüleri (SEM images of produced samples)

Üretilen numunelerin SEM-EDS analizleri Şekil 2'de verilmiştir.

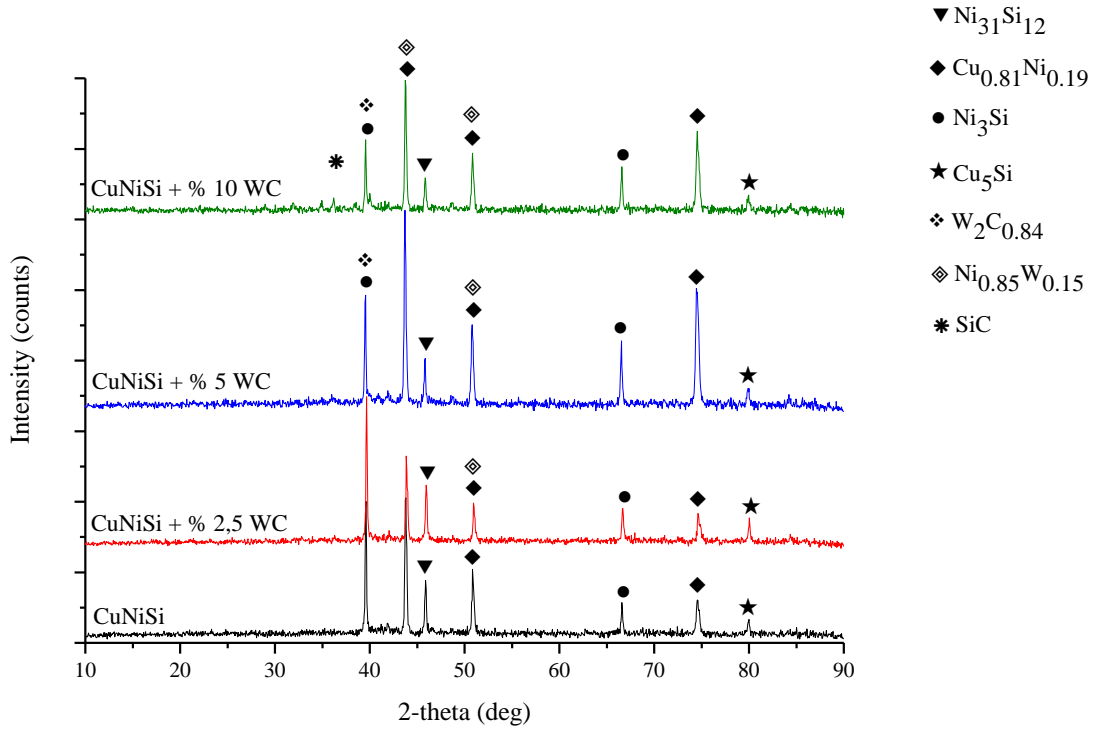
EDS analizi numune üzerinden elementel kompozisyonu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek gerçekleştirilen bir analizdir. Şekil 2'de verilen EDS analiz sonuçları, üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerini desteklemektedir. Üretilen numunelerin içyapılarında farklı oranlarda Cu, Ni, Si, W ve C olduğu tespit edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerin XRD grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Üretilen numunelerin SEM-EDS analiz sonuçları (SEM-EDS analysis results of produced samples)

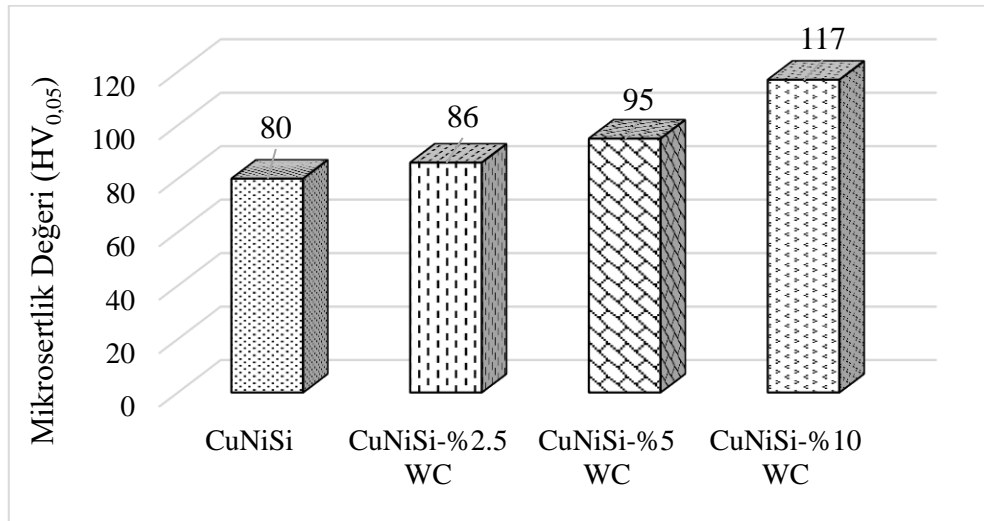




Şekil 3. Üretilen kompozitlerin XRD grafikleri (XRD graphs of manufactured composites)

Şekil 3'te verilen XRD grafikleri incelendiğinde  $Ni_{31}Si_{12}$ ,  $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$ ,  $Ni_3Si$ ,  $Cu_5Si$ ,  $W_2C_{0.84}$ ,  $Ni_{0.85}W_{0.15}$  ve  $SiC$  fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak,  $Ni_{31}Si_{12}$  fazının baskın olduğu açıkça görülmektedir. Sinterleme işlemi sırasında  $CuNiSi$  ve  $WC$  parçacıkları arasında  $W_2C_{0.84}$ ,  $Ni_{0.85}W_{0.15}$  ve  $SiC$  fazları oluşmuştur. Genel olarak, verilen XRD grafikleri incelendiğinde ilave  $WC$  miktarı arttıkça,  $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$ ,  $Ni_{0.85}W_{0.15}$  ve  $SiC$  fazlarının şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak,  $WC$  ilaveli bu numunelerin  $WC$  fazlarıyla ilişkili katı çözeltiler oluşturduğu düşünülmektedir [16,17].

Şekil 4'te üretilen numunelerin mikrosertlik grafiği verilmiştir.



Şekil 4. Üretilen kompozitlerin mikrosertlik değerleri (Microhardness values of produced composites)

Kompozitlerin mikrosertlik ölçümleri  $100 \mu m$  aralıklarla bir çizgi boyunca numune yüzeyinden alınmıştır. 1. numunenin sertliği yaklaşık  $80 HV_{0.05}$ 'dir. 2. numunenin sertlik değeri  $86 HV_{0.05}$  olarak tespit edilmiştir. 3. numunenin sertlik değeri  $95 HV_{0.05}$  olarak tespit edilmiştir. Son olarak, 4.

numunenin sertlik değeri 117 HV<sub>0.05</sub> olarak tespit edilmiştir. WC takviyeli numunelerin sertliği takviyesiz numuneden daha yüksektir. Bu artış, karbür ve oluşan sert fazların varlığı ile ilişkilidir. WC'ün eklenmesi, W<sub>2</sub>C<sub>0.84</sub>, Ni<sub>0.85</sub>W<sub>0.15</sub> ve SiC fazlarının oluşumuna neden olmuştur ve sonuç olarak sertlikteki artışa katkıda bulunmuştur [18-20].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemi ile CuNiSi ve CuNiSi-WC kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen numunelere, taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), X-ışını difraktogramı (XRD) ve mikrosertlik testleri başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Deneysel sonuçların raporu aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ✓ Numunelerden alınan SEM görüntülerinde WC parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı rapor edilmiştir.
- ✓ EDS analiz sonuçlarında, üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerini desteklenmiştir ve numunelerin içyapılarında farklı oranlarda Cu, Ni, Si, W ve C olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ XRD grafiklerinde Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub>, Cu<sub>0.81</sub>Ni<sub>0.19</sub>, Ni<sub>3</sub>Si, Cu<sub>5</sub>Si, W<sub>2</sub>C<sub>0.84</sub>, Ni<sub>0.85</sub>W<sub>0.15</sub> ve SiC pikleri tespit edilmiştir.
- ✓ Mikrosertlik testi sonucunda WC takviyeli numunelerin sertliği takviyesiz numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En iyi mikrosertlik değeri % 10 WC takviyeli numuneden alınmıştır ve sertlik değeri 117 HV<sub>0.05</sub> olarak tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Yönetken, Investigation of the production and mechanical properties of silicon carbide-reinforced composites, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(3): 1551-1558, 2019.
2. T. Çetin, M. Akkaş, Effect of WC reinforced on microstructure and mechanical properties of CuAlMn alloys produced by hot pressing method, *European Journal of Technique*, 10(1): 173-183, 2020.
3. U. Çalığülü, M. Taşkın, H. Kejanlı, Soğuk presleme yöntemiyle üretilmiş Ni-Ti-Cu kompozitlerin TLP difüzyon kaynağında sıcaklığın birleşme üzerindeki etkisinin incelenmesi, *Engineering Sciences*, 3(4): 558-570, 2008.
4. A.İ. Kaya, Kompozit malzemeler ve özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29: 38-45, 2016.
5. M.A. Erden, Presleme basıncının toz metalürjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1): 257-264, 2017.
6. X.S. Xie, S.Q. Zhao, J.X. Dong, G.D. Smith, S.J. Patel, An investigation of structure stability and its improvement on new developed Ni-Cr-Co-Mo-Nb-Ti-Al superalloys, *In Materials Science Forum*, 475: 613-618, 2005.
7. K. Wasaka, M. Yamaki, A modified dental cast investment for nickel base alloy: a preliminary study, *Journal of materials science letters*, 10: 1093-1094, 1991.
8. W.Y. Kim, H.S. Kim, T.Y. Ra, H.J. Bang, Y.G. Yoo, I.D. Yeo, High temperature mechanical properties of Ni-Al-Cr based alloys for advanced die-materials applications, *Journal of Materials Science and Technology*, 24: 305-308, 2008.
9. J.K. Tien, *Superalloys, supercomposites and superceramics*, Elsevier, 2012.
10. S. Jayachandran, K. Akash, S.M. Prabu, M. Manikandan, M. Muralidharan, A. Brolin, I.A. Palani, Investigations on performance viability of NiTi, NiTiCu, CuAlNi and CuAlNiMn shape memory alloy/Kapton composite thin film for actuator application, *Composites Part B: Engineering*, 176: 107182, 2019.
11. M. Barmouz, P. Asadi, M.B. Givi, M. Taherishargh, Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles' size and volume fraction, *Materials Science and Engineering: A*, 528: 1740-1749, 2011.
12. Y. Liang, Q. Zhao, Z. Zhang, X. Li, L. Ren, Effect of B<sub>4</sub>C particle size on the reaction behavior of self-propagation high-temperature synthesis of TiC-TiB<sub>2</sub> ceramic/Cu composites from a Cu-Ti-B<sub>4</sub>C system, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 46: 71-79, 2014.
13. C.A. Canbay, T. Polat, Thermal and structural alternations in CuAlMnNi shape memory alloy by the effect of different pressure applications, *Physica B: Condensed Matter*, 521: 331-338, 2017.

- 14.M.A. Korchagin, D.V. Dudina, B.B. Bokhonov, N.V. Bulina, A.V. Ukhina, I.S. Batraev, Synthesis of nickel boride by thermal explosion in ball-milled powder mixtures, *Journal of Materials Science*, 53: 13592-13599, 2018.
- 15.M. Akkaş, S. Islak, Microstructure, Wear and Corrosion Properties of NiB-TiC Composite Materials Produced By Powder Metallurgy Method. *Science of Sintering*, 51: 327-338, 2019.
- 16.M. Nazarian-Samani, A.R. Kamali, R. Mobarra, M. Nazarian-Samani, Phase transformations of Ni-15 wt.% B powders during mechanical alloying and annealing, *Materials Letters*, 64: 309-312, 2010.
- 17.E. Georgiza, V. Gouda, P. Vassiliou, Production and properties of composite electroless Ni-B-SiC coatings, *Surface and Coatings Technology*, 325: 46-51, 2017.
- 18.M. Akkaş, The mechanical and corrosion properties of WCCo–Al coatings formed on AA2024 using the HVOF method, *Materials Research Express*, 7(7): 076515, 2020.
- 19.C.E. Campbell, U.R. Kattner, A thermodynamic assessment of the Ni-Al-B system. *Journal of Phase Equilibria*, 20: 485, 1999.
- 20.K. Otsuka, X. Ren, Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, 50: 511-678, 2005.

## Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme

Murat AKTÜRK<sup>1</sup>, Mehmet Erdi KORKMAZ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 09.03.2021

**Kabul:** 19.04.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli İmalat  
Alüminyum alaşımı  
Malzeme yapısal  
parametreleri  
Johnson-Cook

### ÖZET

Eklemeli İmalat Teknolojileri (Eİ), seramik, plastik, metal alaşımları ve kompozitler gibi üretim alanlarında yaygın kullanılan malzemelerin yanı sıra hamur, alçı, çikolata ve beton gibi özel materyallerin de üretimde kullanılabilmesinin önünü açmaktadır. Ancak günümüz üretimlerinin büyük çoğunluğu ham madde olarak hala metalleri ve metal alaşımlarını kullanmaktadır. Alüminyum alaşımları ise metal üretim ham maddeleri içerisinde büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşımları, ucuz, termal iletkenlikleri yüksek ve hafif malzemeler oldukları için uzay, havacılık, ev aletleri ve otomotiv gibi günlük yaşantımızda sıklıkla karşılaştığımız bir malzemedir. Diğer birçok üretim materyalinde de olduğu gibi alüminyum içeren malzemeler de üretim aşamaları sırasında plastik deformasyona uğramaktadır. Malzemede oluşacak bu plastik deformasyon miktarı ve malzemeye uygulanacak etkilere karşı malzemenin göstereceği davranışların üretim öncesinde biliniyor olması üretimin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi açısından öneme sahiptir. Malzemenin plastik deformasyona uğradığı süre zarfında kullanılan işleme parametreleri, deney çalışmaları ve/veya sonlu elemanlar yöntemini baz alan bilgisayar programlarında gerçekleştirilen simülasyonlar ile optimize edilebilmektedir. Deneysel çalışmalarla kıyaslandığında simülasyonlar, düşük maliyetli ve kısa sürede gerçekleştirilebilen işlemler olması nedeniyle daha fazla avantaja sahiptir. Ancak, uygulanabilirliği yüksek tutarlı sonuçların bulunabilmesi için üretim malzemesi modeline ait parametrelerin doğru belirlenmiş olması gerekmektedir. Kullanılan parametrelerin doğruluk seviyesi simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara olan benzerliğiyle doğru orantılıdır. Bu derleme çalışmasında, Eİ uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımlarına ait malzeme yapısal parametreleriyle ilgili güncel bilgiler verilmiştir.

## A Review on Determination of Material Constitutive Parameters of Aluminum Alloys Produced by Additive Manufacturing Method

### ARTICLE INFO

**Received:** 09.03.2021

**Accepted:** 19.04.2021

#### Keywords:

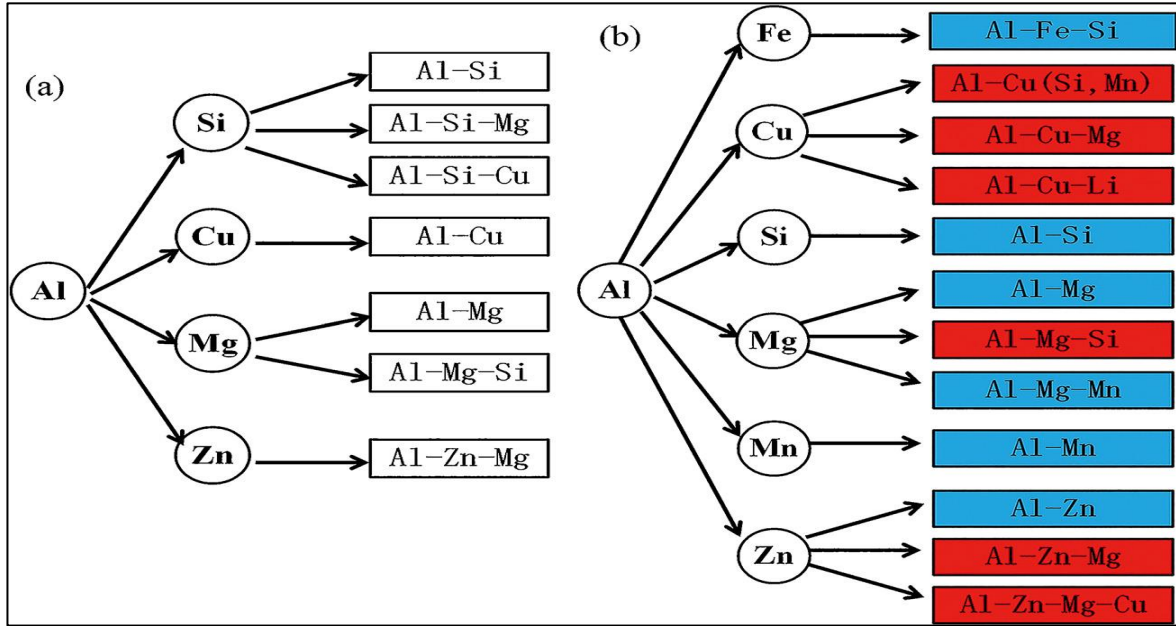
Additive Manufacturing  
Aluminum alloys  
Material constitutive  
parameters  
Johnson-Cook

### ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) Technologies give the way for the production of special materials such as dough, gypsum, chocolate and concrete as well as materials commonly used in production areas such as ceramics, plastics, metal alloys and composites. However, the majority of today's production still uses metals and metal alloys as raw materials. Aluminum alloys are of great importance in metal production raw materials. Since aluminum alloys are cheap, high thermal conductivity and light materials, they are frequently encountered in our daily lives such as space, aviation, home appliances and automotive. As with many other production materials, aluminum-containing materials also undergo plastic deformation during the production stages. Knowing the amount of plastic deformation that will occur in the material and the behavior of the material against the effects to be applied to the material before production is important for a healthy production. The processing parameters used during the period of plastic deformation of the material can be optimized by experiments and / or simulations performed in computer programs based on the finite element method. Compared to experimental studies, simulations have more advantages because they are low cost and can be performed in a short time. However, in order to find consistent results with high applicability, the parameters of the production material model must be determined correctly. The accuracy of the parameters used is directly proportional to the similarity of the simulation results to the experimental results. In this review, up-to-date information on material structural parameters of aluminum alloys used in AM applications is given.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum üretim endüstrisi 100 yıldan aşkın süredir üretimde yerini bulmaktadır ve ayrıca yüksek kaynaklanabilir özelliği ve yüksek mukavemet / ağırlık oranı nedeniyle daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. Hafiflik, dayanıklılık, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, iletkenlik ve bitirilebilirlik gibi temel avantajları onu diğer metallere göre popüler kılmaktadır. Sürekli araştırma ve geliştirme, neredeyse sonsuz uygulama yelpazesinde alüminyum kullanımına yol açmıştır. [1,2]. Alüminyum alaşımının çöktürme sertleştirilmesi ile ısıl işleme yanıt verip vermediğine göre, alüminyum alaşımları ayrıca Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları olarak da ayrılabilir [3].



Şekil 1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması: (a) döküm alaşımları. (b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları mavi, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları kırmızı renktedir (Classification of aluminum alloys: (a) casting alloys. (b) wrought alloys. Aluminum alloys that cannot be heat-treated are blue, aluminum alloys that can be heat-treated are red) [4].

Bu konu hakkında, Romanova ve ark. [5] katmanlı olarak üretilen alüminyum alaşımlarının deformasyon yanıtını simüle etmek için hesaplamalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Seçici lazer eritme ile üretilen alüminyum alaşımları için tipik olan tane geometrisine sahip üç boyutlu bir mikro yapı, adım adım paketleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Tane davranışı, kayma sistemlerinin açık bir şekilde dikkate alınmasıyla kristal plastisite açısından tanımlanmıştır. Tanecik hücresel-dendritik altyapısı, tane sınırı güçlendirmesi ve gerinim sertleşmesini hesaba katarak kritik çözülmüş kayma gerilimini açıklamak için fenomenolojik bir denklem kullanılmıştır. Mikroyapı temelli kurucu model, yarı statik gerilim simülasyonlarında kullanılmıştır. Hesaplama maliyetlerini azaltmak için, yarı statik yükleme, doğrusal olmayan problemleri çözmek için yüksek sayısal verimlilik sağlayan açık bir zaman entegrasyon şeması kullanılarak dinamikler açısından simüle edilmiştir. Mikromekanik simülasyonlardan nelerin elde edilebileceğini göstermek için, üç farklı yön boyunca gerilmeye ve kesmeye tabi tutulan ilave olarak üretilmiş alüminyum alaşımının bir polikristalin modeli için hesaplama sonuçlarını sunmuşlardır. Diğer ayrıntılı çalışmalar sonraki bölümlerde verilmiştir.

Bu çalışmada, Eİ endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi hakkında güncel bilgiler verilmiştir.



## **2. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)**

Parçaların yeniden tasarımıyla birleştirilen metal parçaların eklemeli imalatla (Eİ) üretilmesi parçaların üretim maliyetleri üzerinde tasarruf edilebilmesini sağlamaktadır. Yani Eİ yöntemleri kullanılarak üretilmeyecek bileşenler Eİ ile üretilebilecek şekilde değiştirilerek zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır [6].

1990'ların başından itibaren başlayan ve her geçen gün gelişen hızlı prototipleme tekniklerinde yaygın olarak kullanılan Eİ teknolojileri, bilgisayar destekli çizim (CAD) modellerine ait verilerin fiziksel nesneye dönüştürülmesini sağlayarak üretim adımlarını minimize etmektedir. Günümüzde polimerler, metaller, seramikler veya diğer özel kullanımlara sahip spesifik malzemeler gibi çok çeşitli malzemelerin kavramsal ve işlevsel prototiplerin imalatında kullanımları oldukça yaygındır [7]. Ayrıca malzemelerin katmanlar halinde birbirlerine eklenmesiyle gerçekleştirilen üretimler, sadece konsept tasarımların veya montaj testi uygulamalarında değil nihai yekpare metal ürünlerin üretimlerinde de kullanılmaktadır [8].

İngiliz The Economist dergisi, 2001 yılında eklemeli imalat teknolojilerinin üretim yapan şirketlerin ekonomilerinde oluşturacağı etkileri öngörerek bu yöntemlerin gelecekte işletmelerin çalışma şekilleri ve karlılıklarında derin bir etki yaratacağını belirtmiştir [9]. Ardından 2002 yılında birkaç araştırma grubu Eİ teknolojilerinin, ticari uçak endüstrisi için yedek parça üretimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmalar, parçaların Eİ ile üretilerek firmaların yedek parçaları fazla sayıda stoklamalarından ötürü oluşan maliyetleri azaltabileceklerini göstermiştir [10].

Öte yandan Eİ teknolojilerindeki gelişmelerin halihazırda kullanılmakta olan geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla ne denli rekabetçi olabileceğine dair oluşan soru işaretleri, araştırmacıları bu yönde araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Örneğin, Hızlı Prototipleme Raporu [11] Hopkinson-Dickens [12] ve Griffiths [13] yaptıkları çalışmalarda plastik parçaların Eİ ile üretiminin ekonomik faydalarını analiz ederek küçük ve orta boyutlu parçaların katmanlı imalat ile üretilmelerinin daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir. Ancak daha yüksek verim ve kar sağlanabilmesi için geleneksel üretimden Eİ'ye geçiş aşamasında parçalar yeniden tasarlanarak üretim için uygun hale getirilmelidir. Öte yandan, geometrik kısıtlamaların olmaması ve karmaşık yapıların üretilmesi, tasarım çalışmalarının parçanın işlevselliğine ve montajına yönelebilmeye imkan sağlamaktadır [6].

3D baskı olarak da bilinen eklemeli imalat (Eİ), sahip olduğu rekabetçi üretim maliyetleri ve üretim sürelerinin yanı sıra plastikten seramiğe ve metallere kadar çeşitli malzemelerin özelleştirilmiş bileşenlerinin üretilmesini sağladığı için günümüzdeki popüler üretim yöntemlerinin başında gelmektedir [14]. Özellikle metal malzemeler kullanılarak karmaşık bileşenlerin oluşturulabilmesini sağlaması nedeniyle Eİ'ye olan ilgi her geçen gün artmaktadır [15]. Lazer veya elektron ışını kullanan Eİ makineleri günümüzde yedek parça üretiminde kullanılmakta ve geleneksel dövme, frezeleme ve döküm üretim yöntemleriyle kıyaslandığında rakipsizdir. Buna en iyi örnek biyokompozit destek yapıları gösterilebilir.

Eİ teknolojileri, geniş bir yelpazede ve birbirlerinden oldukça farklı ürünlerin üretimine imkân sağlayan sistemlerdir. Bu teknolojiler imalatla kullanılan malzeme çeşidine ve işlem süreçlerine bağlı olarak birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Endüstride yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerin kısa tanımları Tablo 1'de gösterilmiştir [16].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods)

Eİ Teknolojisi	Tanımı
Binder Jetting (BJ)	Yapıştırıcı(bağlayıcı) püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital ışık işleme
Direct Metal Deposition (DMD)	Direkt metal depozisyonu
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Direkt metal lazer sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron ışını ile ergitme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Birleştirmeli yağma modellemesi
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer metal biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine nesne imalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok jetli modelleme
Plaster Based Printing (PP)	Alçı esaslı baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçici ısıtmalı sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Melting (SLM)	Seçici lazer eritme
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçici lazer sinterleme

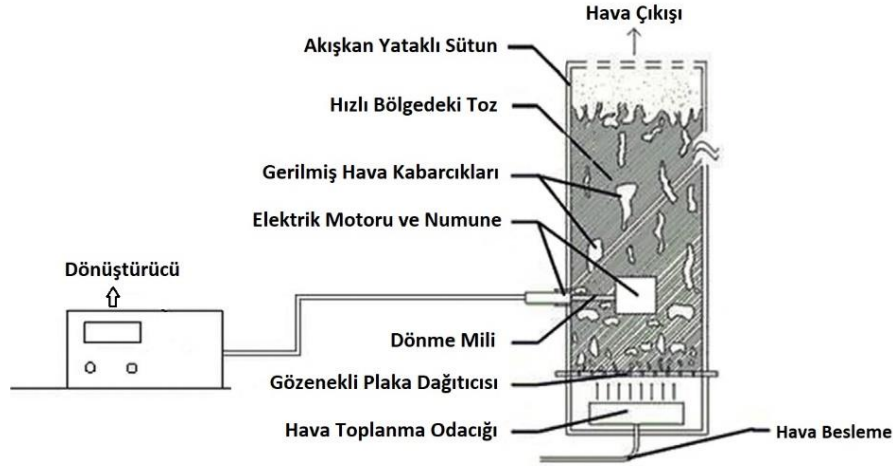
ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu), 2012 yılında eklemeli üretim yöntemlerini üretimde kullanılan malzemenin türüne ve katmanların işlem süreçlerine göre 7 kategoriye ayırmıştır [17]. Bu kategoriler, ilgili Eİ teknolojisinde kullanılabilen materyaller ve yöntemin temel prensipleri göz önüne alınarak Tablo 2’de gösterilmiştir [16].

Tablo 2. İşlem çeşidine göre eklemeli üretim teknolojileri (Additive manufacturing technologies according to the type of process)

İşlem kategorisi	Açıklama	Teknolojiler	Materyaller
Toz yatağı füzyonu	Toz yatağında seçili bölgelerin ısı ile birleştirilmesi	SLS, SLM, EBM, DMLS, SHS	Metaller ve polimerler
Doğrudan enerji biriktirme	Eriyik malzemenin ısı enerjisiyle birleştirilmesi	LMD, DMD	Metaller
Malzeme yağma	Eriyik malzemenin nozül vasıtasıyla yağın haline getirilmesi	FDM	Polimer esaslı malzemeler
Fotopolimerleşme	Likit fotopolimer ham maddenin UV ışını ile katılaştırılması	SLA, DLP	Fotopolimerik reçineler
Yapıştırıcı püskürtme	Toz yatağına yapıştırıcı püskürtülerek tozların birleştirilmesi	BJ, PP	Polimerler, metaller, alçı, kum
Malzeme jeti	Malzemenin damlacıklar şeklinde biriktirilmesi	MJM, Polyjet	Polimerler, mumlar

### 3. Eİ ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR (RESEARCHES ON ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINUM ALLOYS)

E. Atzeni vd. doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı yüzeylere bitirme işlemi (finiş) olarak aşındırıcılı akışkan yatak (AFB) yönteminin uygulanabilirliğini; yüzey ve aşındırıcılar arasındaki etkileşim, dönme hızı ve aşındırıcı tipi gibi parametrelerin işleme performansı ile ilişkilerini tespit ederek incelemiştir. Bu çalışma AFB yönteminin eklemeli imalat ile üretilmiş metal parçalar için, otomatikleştirilmesi kolay, düşük maliyetli, az zaman alan ve sürdürülebilir bir son yüzey işleme yöntemi olduğunu ortaya koymuştur [18].



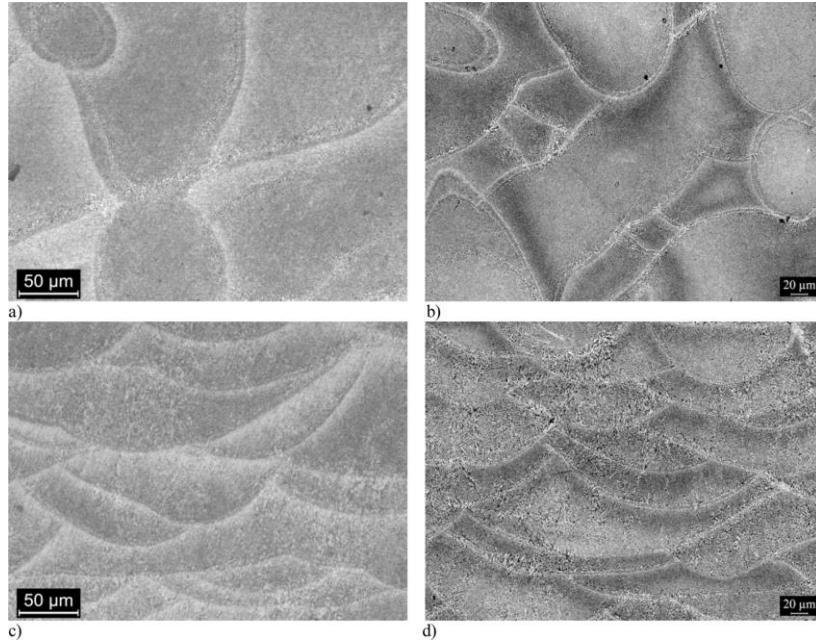
Şekil 2. AFB işlemi için gerekli ekipmanlar (Required equipment for AFB process)

Katmanlı üretim, imalat endüstrisinde devrim yapmaya başladıktan sonra araştırmacılar, metal eklemeli üretim süreçlerinin güvenilirliğini artırmak için çeşitli teknikler geliştirmeye başlamışlardır. Ancak metal matrisli kompozit bileşenlerin eklemeli imalatıyla ilgili çalışmalar yeterli olgunluğa erişememiştir. Çalışma kapsamında Al / AlN kompoziti, alüminyum tozu ve reaktif gaz olarak N<sub>2</sub> kullanılarak lazer ışını yoluyla biriktirildiği Direkt Lazer Biriktirme ekipmanı kullanılarak üretilmiştir. Lazer parametrelerinin fabrikasyon yapıların geometrisi, mikroyapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bilgiler, Doğrudan Lazer Biriktirme ile üretilen Al ve Al / AlN parçaları için bir işlem haritasının geliştirilmesine izin verdiği için büyük öneme sahiptir [19].

Butler vd. [20], bir eklemeli imalat yöntemi olan Seçici Lazer Eritme (SLE/SLM) ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımının ısı iletkenlik özellikleri üzerinde işleme parametrelerinin ve ısı ışımlarının etkilerini araştırmışlardır. Termal iletkenliğin karakterizasyonu, yeni nesil termal üretim çözümlerinde katkı maddesi üretiminden yararlanmak isteyen mühendisler için özel bir öneme sahiptir. Deneysel karakterizasyon numunelerini üretmek için bir dizi işleme parametresi ve tarama stratejisi kullanılmıştır. Üretilen parçaların gözenekliliği ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkiye sahipken, tavlama ısı ışımları sonrası numunenin sahip olduğu ısı iletkenlik gözeneklilikte ölçülebilir herhangi bir değişiklik olmaksızın % 18-41 artmıştır. Elde edilen mikro yapıların taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağıtıcı X-ışını kullanılarak gerçekleştirilen analizlerine bakıldığında, daha düşük bir etkiye sahip olan bekleme süresi ile artan ısı ışımlı sıcaklığı ile Si'nin çökeldiği ve birleştiği gözlenmiştir.

Takata vd. [21], SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının mikroyapısını ve mekanik özelliklerindeki değişiklikleri, 300 ve 530 °C'lik sıcaklıklarda ısı ışımlarını uygulayarak incelemiştir. Üretildiği şekliyle örnekler, karakteristik bir mikroyapısal morfoloji ve doku sergilemişlerdir. Yerel olarak eriyen ve hızla katılan bölgelere karşılık gelen eriyik havuzlarının,

ince ötektik Si parçacıklarıyla çevrili birkaç sütunlu  $\alpha$ -Al tanelerinden oluştuğu belirlenmiştir. Sütunlu  $\alpha$ -Al tanecikleri içinde düşük açılı sınırlardan oluşan ince bir dislokasyon alt yapısı mevcuttur. Bunun yanı sıra, uzun süreli maruziyetten sonra mikroyapısal dengeye ulaşan stabil bir intermetalik faz oluşumu meydana gelir. Üretildiği şekliyle numune, yaklaşık 480 MPa'lık yüksek bir gerilme mukavemeti göstermiştir. Bu mukavemet, çekme yönünden bağımsız olup normal olarak üretim yönüne paraleldir. Bunun tersine, gerilme sünekliğinin yöne bağlı olduğu bulunmuştur ve bu nedenle eriyik havuzu sınırında meydana gelen bir kırılmadan sorumlu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SLM tarafından üretilen AlSi10Mg alaşımlarının gerilme özelliklerinin yön bağımlılığının kontrolü hakkında yeni bilgiler sunmaktadır.



Şekil 3. Numune mikro yapılarına ait optik görüntüleri (Optical images of sample microstructures)

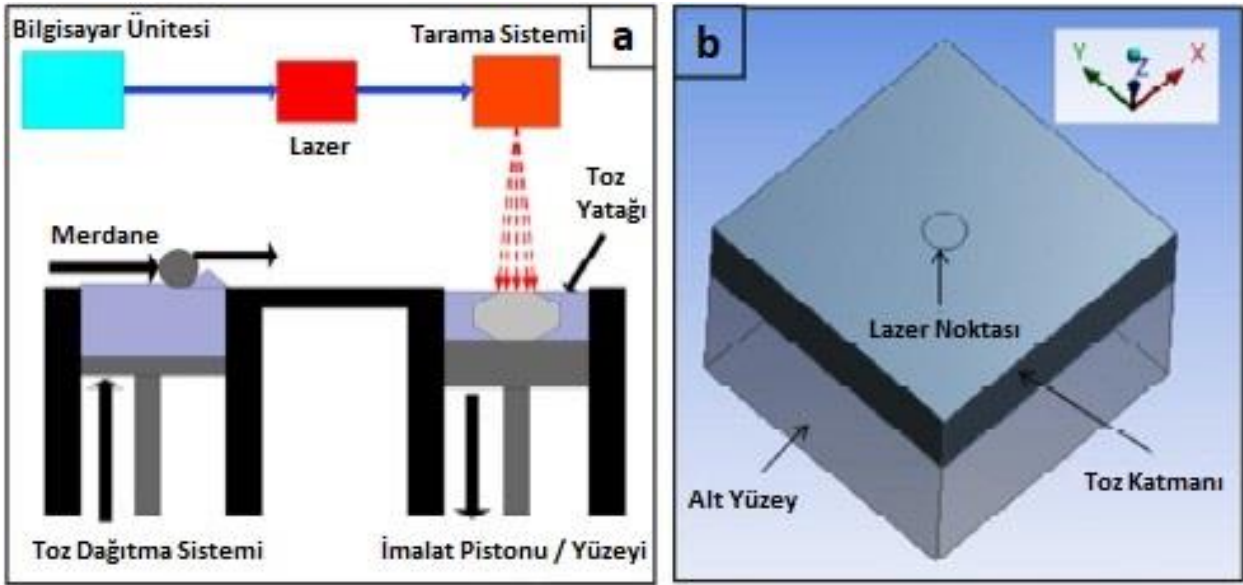
Bazı çalışmalar SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg'nin mikro yapısını ve performansını karakterize etmeye çalışırken, özellikle anizotropik etkilerle ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. T. Maconachie ve arkadaşlarının çalışması [22] literatürdeki bu eksiği gidermek için yapılmıştır. AlSi10Mg numuneler SLM yöntemiyle üç farklı üretim açısıyla üretilmiş ve malzemenin gerilme özelliklerini karakterize etmek için  $3,33 \times 10^{-2}$  ila  $2,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  arasında değişen oranlarda yarı statik ve dinamik bölünmüş Hopkinson çekme çubuğu testleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin mikro yapısı ve başarısız numunelerin kırılma yüzeyleri analiz edilmiştir. Yarı-statik ve dinamik sonuçlar, mukavemet açısından yapı yönelimleri arasında çok az fark olduğunu, ancak üretim yönüne dik olarak yüklenen bileşenlerin diğer yapı yönelimlerine göre daha esnek olduğunu göstermiştir. Yapı oryantasyonunun, dinamik olarak test edilen numunelerin kırılma yüzey morfolojisini, eriyik havuzu sınırlarını takip eden kırılma yollarından dolayı etkilediği bulunmuştur.

#### 4. EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR (STUDIES RELATED TO DETERMINING THE MATERIAL CONSTITUTIVE PARAMETERS OF ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINUM ALLOYS)

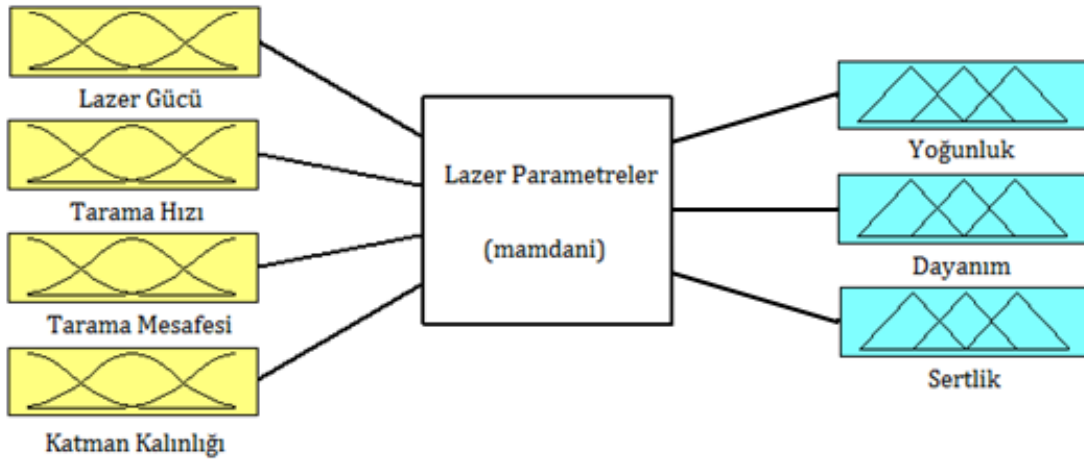
Metallerin akış tepkisini anlamak için gerilme oranı, gerilme hızı ve sıcaklığın birleşik etkilerini dikkate alarak metallerin akış davranışının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, işlemenin sayısal modellenmesi ve simülasyonu için temel bir gerekliliktir.

Bir eklemeli imalat yöntemi olan Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) (Şekil 4), metal tozlarının katmanlar halinde serildikten sonra lazer ışını aracılığıyla sinterlenerek tozların

birleştirilmesi ve parça oluşumunun sağlanması mantığını temel alan bir teknolojidir. Bu yöntemde, tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı, tarama yönü ve tarama mesafesi gibi giriş parametreleri üretilecek parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Duman vd. yaptıkları çalışmada bir Bulanık Mantık Modeli (Şekil 5) oluşturarak üretilecek parçaya en uygun giriş parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu sayede malzemeye ait mekanik özellikleri tahmin etmek için gerçek denemelere ihtiyaç duymadan gerekli parametreler belirlenerek zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanabilmektedir. Çalışma sonucunda, 316L paslanmaz çeliğin DMLS ile üretimi için 350-800J/mm<sup>3</sup> hacimsel enerji yoğunluğunu sağlayacak giriş parametrelerinin belirlenmesiyle optimum çekme dayanımı ve sertlik değerlerine sahip ürünlerin oluşturulabileceği belirlenmiştir [23].



Şekil 4. (a) DMLS sürecinin şematik diyagramı; (b) hesaplama alanı (Schematic diagram of the DMLS process; (b) calculation area)



Şekil 5. İşlem parametrelerinin tahminine yönelik kurulan bulanık mantık model şematiği (Fuzzy logic model schematic for estimation of process parameters)

Zhang vd. [24], 7075-T6 alüminyum alaşımı için dinamik çekme davranışları değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli geliştirmişlerdir. Bunun için öncelikle 7075-T6 alüminyum alaşımının çeşitli gerinim oranlarındaki dinamik mekanik davranışları, elektronik universal test makinesi, yüksek hız test sistemi ve bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) kullanılarak dinamik çekme testleri ile ölçülerek farklı oranlarda gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar, 7075-T6 alüminyum

alaşımının gerilme oranının neden olduğu sertleştirme etkisinin önemli olduğunu göstermektedir. Johnson-Cook malzeme modelinde gerinim oranı sertleştirme terimi değiştirilerek, 7075-T6 alüminyum alaşımı için yeni bir Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli elde edilmiştir. Geliştirilen bu yeni model deney sonuçları ile yüksek uyum göstermektedir. J-C malzeme modeli ile 7075-T6 alüminyum alaşımı için farklı oranlarda çekme testlerinin sayısal simülasyonları yapılmıştır. 7075-T6 alüminyum alaşımının çekme yükü ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisine göre hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değiştirilmiş J-C modelinin doğruluğu pekiştirilmiştir.

## 5. MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DOĞRULANMASI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES ON VERIFICATION OF MATERIAL CONSTITUTIVE PARAMETERS USING THE FINITE ELEMENT METHOD)

Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi geleneksel imalat işlemlerine kıyasla daha kontrol edilebilir hacim fraksiyonuyla periyodik kafes yapıları oluşturmaya imkân sağlaması açısından önemlidir. Zhang vd. [25] 7055-T6I4 alüminyum alaşımının dinamik darbe özellikleri ve hasar mekanizmasına ait bilgi eksikliğini gidermek için dinamik şok performansı üzerine deneysel ve simülasyona dayalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun için öncelikle 7055 alüminyum alaşımı için temel Johnson-Cook denklemi ve hasar modeli oluşturulmuştur. Dinamik etkilerin performansı deneysel ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar şunu göstermektedir: 120 ° C'nin altında, alaşımın mikro yapısı dinamik şoktan sonra önemli ölçüde değişmiştir, şok gerilme hızı arttıkça  $\eta'$  çökelmiş fazların sayısı ve yoğunluğu önemli ölçüde azalmıştır; 220 ° C'nin altında, dinamik şokun gerilme hızı 6000 s<sup>-1</sup> olduğunda, test parçasındaki  $\eta'$  çökelmiş fazların sayısı ve yoğunluğu şoktan sonra önemli ölçüde azalmıştır; 220 ° C'nin altında, şok gerinim hızı arttıkça hemen hemen tüm  $\eta'$  çökelmiş fazlar, alüminyum matris ile tutarsız bir  $\eta$  fazına dönüşmüştür. Aynı zamanda ve hızda, dinamik şoktan sonraki stres, dinamik sıcaklık 220 ° C olduğunda en büyüktür; ortam sıcaklığı 120 ° C olduğunda, dinamik şok sonrası stres en küçüktür ve 220 ° C'de dinamik şok sonrası stres 120 ° C'deki stresin iki katıdır.

Pawar vd. [26] 7.62AP mermilerin seramik / alüminyum çift katmanlı hibrit malzemeler üzerindeki etkisini Ansy programına ait sonlu elemanlar yöntemini temel alan AUTODYN hydrocode modülünü kullanarak incelemişlerdir. Metal için Johnson – Cook malzeme modeli, seramik için ise Johnson– Holmquist modeli kullanılmıştır. Modeller, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Al 5083 ve AlN / Al 5083 çift katmanlı kompozitler üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır. AlN seramiğinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiklerine göre mermiyi yenmede üstün performansa sahip olduğu görülmüştür. Destek plakasının deformasyonu ve karşılık gelen plastik gerilme enerjileri, performans parametreleri için bu çalışmada dikkate alınmıştır. Sonuçlar, kullanılan mühimmat hızlarında 7.62AP mermilerin etkisine karşı korumaya yönelik verimli bir yapı geliştirmek için malzemelerin en uygun şekilde tasarlanmasını sağlaması açısından öneme sahiptir.

Eklemeli İmalat (Eİ) ile üretilmiş metal parçaların mikro yapısını ve mekanik özelliklerini geliştirmek için üretim sonrasında ultrasonik darbe işleme (UIT) uygulamalarını birleştiren hibrit bir yaklaşım geliştirilmiştir. Zhou vd. [27], katmanlı olarak imal edilen 304 paslanmaz çelik (Stainles Steel-SS) numuneler üzerindeki ultrasonik etkinin gerilme ve gerinim alanlarını analiz etmek için deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan numuneler Lazer Metal Biriktirme (LMB) tekniği kullanılarak üretilmiş ve daha sonrasında ultrasonik darbe işleme uygulamalarına tabi tutulmuştur. UIT işleminde metalik malzemelerin yüksek gerinim oranı etkisi dikkate alınarak 304 SS numunesinin dinamik sertleşme özellikleri bir bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) kullanılarak ölçülmüştür. SHBÇ testlerinde numunenin gerinim hızı kontrol faktörleri ve gerilme-gerinim ilişkisi teorik olarak analiz edilerek UIT'ye ait pim hızı, gerilme alanı ve plastik gerilme alanı da dahil olmak üzere ünitenin dinamik ve yüksek geçici darbe-geri tepme-darbe işlemi, üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli ile sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen mikroskop analizleri ve mikro sertlik testlerine ait deneysel sonuçlar plastik deformasyon bölgesine ait sayısal sonuçlarla iyi bir uyum içerisindedir. Yapılan bu çalışma

ultrasonik işleme uygulamalarının metal Eİ ürünlerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini sağladığını doğrulamaktadır.

Zhang vd. [28], metal Seçici Lazer Eritme (SLM) sırasında gerçekleşen ısı değişimlerini incelemek için bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Oluşturdukları yaklaşım, oluşturulan iş parçası ile erimemiş toz arasındaki ara yüzü ve gaz alanı ile ardışık toz yatağı katmanları arasındaki ara yüzü izlemek için bir seviye ayar çerçevesi kullanılarak oluşturulacak parçanın ölçeğinde gerçekleştirilir. Hesaplama verimliliğini sürdürülebilir kılmak için, toz yatağı biriktirme ve enerji girişi, her bir katmanın tamamının veya fraksiyonlarının ölçeğiyle basitleştirilir. Katman fraksiyonları, doğrudan inşa edilecek parçanın global lazer tarama planının bir tanımından tanımlanır. Her fraksiyon, lazer ışınına maruz kalma süresine karşılık gelen bir zaman aralığı boyunca ısıtılır ve daha sonra, dikkate alınan katman fraksiyonu için tarama süresine eşit bir zaman aralığında soğutulur. Hesaplama maliyetini düşürmek için, uygun bir ağ stratejisi ile bir iyileştirme ve rafine etme ağ uyarlaması gerçekleştirilir. Çalışma sonucunda önerilen modelin, karmaşık geometrinin parçaları için makro ölçekte SLM işlemi sırasında inşa edilmiş iş parçası ve erimemiş tozdaki sıcaklık dağılımını ve gelişimini tahmin edebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir. Çalışma süresince nikel bazlı bir alaşım olan IN718 için uygulamalar gerçekleştirilmiş olup oluşturulan sayısal model ve veri setleri kullanılarak diğer malzemelere uyarlanabilir.

Niu vd. [29], A356 alaşımının gerilme yumuşamasını dikkate alan değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli geliştirmişlerdir. A356 alaşımını numunelere, değişen gerilme oranlarında ve 300 ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda sıkıştırma deneyleri uygulanarak deformasyon parametrelerinin akış gerilmesinin uzama yumuşamasına etkisi araştırılmıştır. Mikroyapının gözlemlenmesi, yüksek sıcaklık ve yüksek gerilmenin dinamik yeniden kristalleşme davranışı için uygun olduğunu göstermiştir. Öngörülebilirliği geliştirmek için, gerilme yumuşatma mekanizmasını dikkate alan değiştirilmiş bir Johnson-Cook (J-C) modeli önerilmiştir. J-C modeli ve değiştirilmiş J-C modeli deneysel verilere göre hesaplanmıştır. J-C modelinin aksine, önerilen yeni model daha iyi korelasyona ve daha küçük ortalama mutlak hataya (%1,46) sahiptir. Ayrıca sabit indirgeme hızında termal sıkıştırma deneyleri ve yeni modele göre sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. Yük-yer değişim eğrisinin sahip olduğu yüksek tutarlılık, geliştirilen yeni modelin A356 alüminyum alaşımı için iyi bir tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermiştir.

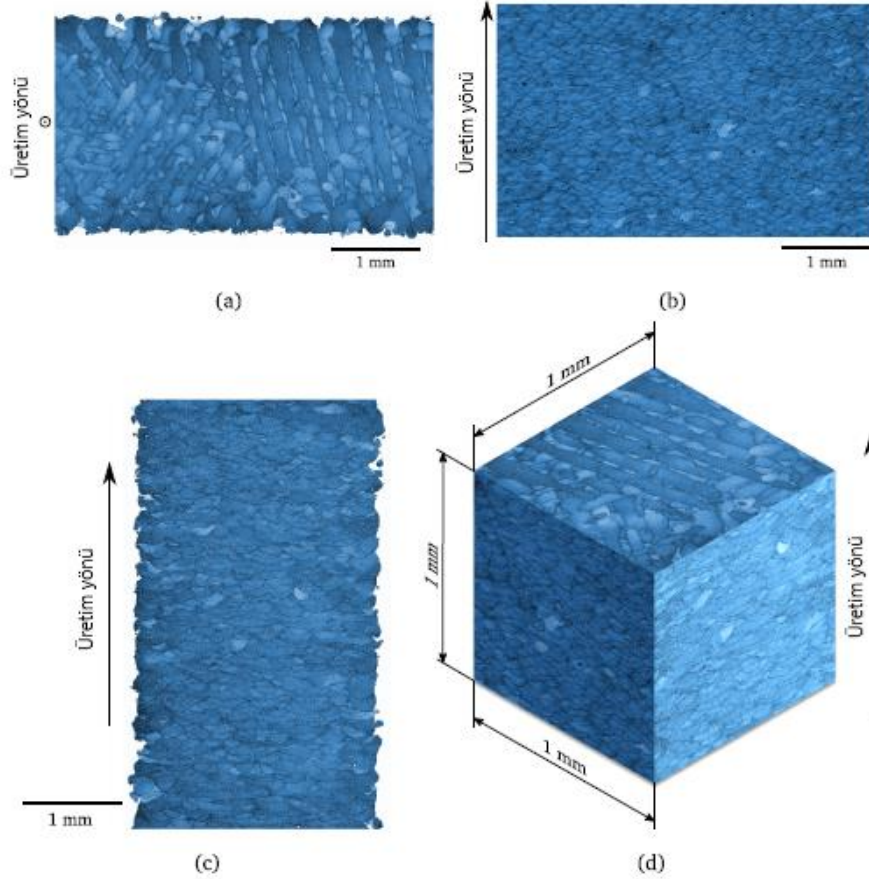
Liu vd. [30], 2519A alüminyum alaşımının akış gerilimi üzerinde gerilme hızı ve sıcaklığın etkilerini analiz etmek için öncelikle alaşıma dinamik darbe testleri ve yarı statik çekme testleri uygulayarak alaşımın dinamik mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Ardından gerilme hızı ve sıcaklığın mikroyapı gelişimi üzerindeki etkilerini optik mikroskop (OM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, 2519A alüminyum alaşımının dinamik etki altında gerilme hızına bağımlılık ve sıcaklığa duyarlılık sergilediğini göstermektedir. Johnson-Cook malzeme modeli için gerekli olan sabitler, değişken ayırma ve doğrusal olmayan uyarlanmış yöntemler kullanılarak yarı-statik testler ve SHBÇ deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda belirlenen yapısal denklemin, mekanik özellikler ve balistik performansın sayısal simülasyonu için referans sağlayan deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu belirlenmiştir.

Luo vd. [31], toz yatağı füzyonu ile üretilen eklemeli imalat ürünlerine ait işlem parametrelerini optimize ederek üretilecek parçanın mekanik performansını iyileştirmek için sonlu elemanlar modeli oluşturmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Öncelikli olarak toz yatağı füzyonu simülasyonlarına ait güncel sonlu eleman modelleri gözden geçirilmiştir. Hesaplama maliyetini düşürmek için kullanılan simülasyon teknikleri üzerinde durulmuştur. Ardından, toz yatağı füzyon proseslerinin simülasyonundaki mevcut sonlu eleman modelleri gözden geçirilmiştir. Yapılan bu çalışma malzeme tasarımı, proses içi izleme-kontrol ve proses optimizasyonu gibi diğer Eklemeli Üretim konularıyla bağlantılı olarak sonlu elemanlar yönteminin önemini ortaya koymaktadır.

Costas vd. [32], seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen AlSi10Mg kare kutuların yarı statik yüklemesi üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Amaç, ortak sonlu eleman modelleme tekniklerinin malzeme ve bileşen ölçeklerinde, büyük deformasyonlar ve kırılma altında 3B üretilmiş parçalara uygulanabilirliğini değerlendirmektir (Şekil 6). Tek eksenli çekme



numuneleri çıkarılmış ve farklı yönelimlerde test edilmiş ve Voce sertleştirme ve Cockcroft-Latham kırılma kriterine sahip hipoeplastik-plastik bir model deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Kutular, küresel bir aktüatör kullanılarak bozulana kadar yanal olarak ezilmiştir. Ele alınan malzeme ve sonlu eleman modellerinin, incelenen senaryoda eklemeli imalatla üretilen bileşenlerin yapısal tepkisinin tahmini için çok uygun olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 6. Malzemenin mikro yapısının metalografik resimleri: üstten görünüş (a), önden görünüş (b), yandan görünüş (c) ve üç boyutlu görüntü (d) (Metallographic pictures of the microstructure of the material: top view (a), front view (b), side view (c) and three dimensional view (d) [32].

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Modern üretim yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte imalat malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından beklenen performans ve yapı özellikleri de artmaktadır. Üretim malzemesine ait özelliklerin üretim öncesinde doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla kullanılan yöntemler zaman ve maliyet kaybının önüne geçmektedir. Malzemeye ait yapısal parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon ve analiz uygulamaları bu yöntemler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bilgisayar ve yazılım alanlarındaki gelişmelere paralel olarak malzeme geliştirme çalışmalarında kullanılan matematiksel modeller, deneysel testlerin yerini almaktadır.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş alüminyum alaşımlarının özelliklerine dair yapılmış çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların daha çok malzemenin dinamik özelliklerine yoğunlaşan deneysel uygulamalar olduğu görülmektedir. Ancak bu alaşımlara ait malzeme yapısal parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla yapılmış çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının dinamik özelliklerinin tahmini ve geliştirilebilmesi amacıyla yapılan uygulamalar ve malzeme yapısal parametrelerine dair yapılmış çalışmalar derlenmiştir.



Eklemeli imalat ile üretilmiş ürünler döküm üretim yöntemiyle üretilmiş muadillerine kıyasla daha homojen oldukları için daha yüksek akma ve kopma dayanımı göstermektedirler. Bu homojenliği sağlayan temel etken toz karışımının tanecik boyutu ve karışım oranıdır. Eklemeli imalatla kullanılacak malzemeye ait bileşimin doğru belirlenmesi nihai ürünü doğrudan etkilediği için büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşım tozları kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde toz karışımına eklenecek sıkıştırıcı malzeme takviyesi ile malzemede oluşacak mikro çatlakların önüne geçilebildiği yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bunun yanı sıra üretim sonrası uygulanacak ısıtma yaşlandırma işlemleri de bu çatlakların oluşumunu engelleyerek mekanik özelliklerin optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu özelliklerdeki gelişim oranları gerçekleştirilen testler ve oluşturulan malzeme modelleri ile incelenmiştir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen malzeme modellerine ait veriler deneysel verilerle büyük oranlarda benzerlik göstermektedir. Özellikle J-C malzeme modelinin geliştirilmesi ile oluşturulan modeller yüksek başarımlar göstermektedir. Bu nedenle her geçen gün kullanım alanı ve çeşitliliği artan alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda deneysel uygulamaların yerine malzeme modelleri daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yapılan bu çalışmalar henüz yeterli sayıya ulaşmamış olup sadece yaygın alüminyum alaşımlarına dair veriler literatüre kazandırılmıştır. Bu derleme çalışması ışığında yapılacak yeni çalışmalarda farklı alüminyum alaşımları kullanılarak üretilmiş malzemelere yönelik malzeme modelleri oluşturulabilir, daha önce oluşturulmuş modeller geliştirilebilir. Geliştirilecek modeller, alüminyum eklemeli imalat ürünlerinin başta havacılık-uzay ve savunma alanlarının yanı sıra hayatımızın birçok yerindeki kullanımının artmasını sağlayacaktır.

#### **TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)**

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: FYL-2020-2305).

#### **REFERENCES (KAYNAKLAR)**

1. J.C. Williams, E.A. Starke, Progress in structural materials for aerospace systems, *Acta Mater.* 51, 5775–5799, 2003.
2. A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, W.S. Miller, Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, *Mater. Sci. Eng. A.* 280, 102–107, 2000.
3. C. Kammer, C. Kammer, *Aluminium Handbook*, Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, Germany, 1999, 61–73, 1999.
4. J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, Y. Shi, A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends, *J. Mater. Sci. Technol.* 35, 270–284, 2019.
5. V. Romanova, R. Balokhonov, O. Zinovieva, E. Emelianova, E. Dymnich, M. Pisarev, A. Zinoviev, Micromechanical simulations of additively manufactured aluminum alloys, *Comput. Struct.* 244, 106412, 2021.
6. E. Atzeni, A. Salmi, Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 62, 1147–1155, 2012.
7. N. (Neil) Hopkinson, R.J.M. Hague, P.M. Dickens, *Rapid manufacturing : an industrial revolution for the digital age*, John Wiley, Chichester, England, 2006.
8. M.G. Violante, L. Iuliano, P. Minetola, Design and production of fixtures for free-form components using selective laser sintering, *Rapid Prototyp. J.* 13, 30–37, 2007.
9. Survey: the solid future of rapid prototyping. *The Economist* 358(8214):49–51, 2001.
10. M. Walter, J. Holmström, H. Yrjölä, Rapid manufacturing and its impact on supply chain management, *Proc. Logist. Res. Netw. Annu. Conf.* (2004) 12.
11. Selective laser sintered parts used directly in spacecraft production. *Rapid Prototyping Report* 9(11), 1999.
12. N. Hopkinson, P. Dickens, Rapid prototyping for direct manufacture, *Rapid Prototyp. J.* 7, 197–202, 2001.
13. A. Griffiths, Rapid manufacturing—the next industrial revolution. *Mater World* 10(12)34–35, 2002.

- 14.E. Atzeni, L. Iuliano, P. Minetola, A. Salmi, Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts, *Rapid Prototyp. J.* 16, 308–317, 2010.
- 15.D. Manfredi, F. Calignano, E.P. Ambrosio, M. Krishnan, R. Canali, S. Biamino, M. Pavese, E. Atzeni, L. Iuliano, P. Fino, C. Badini, Direct Metal Laser Sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications, *Metall. Ital.* 105, 15–24, 2013.
- 16.İ. Özgen, Endüstri 4.0’da Robotik ve Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Farklı Rekabet ve Üretim Senaryoları Altında Stratejik Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019.
- 17.K. Kellens, M. Baemers, T.G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J.R. Duflou, Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications, *J. Ind. Ecol.* 21, S49–S68, 2017.
- 18.E. Atzeni, M. Barletta, F. Calignano, L. Iuliano, G. Rubino, V. Tagliaferri, Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by Direct Metal Laser Sintering (DMLS), *Addit. Manuf.* 10, 15–23, 2016.
- 19.A. Riquelme, P. Rodrigo, M.D. Escalera-Rodriguez, J. Rams, Effect of the process parameters in the additive manufacturing of in situ Al/AlN samples, *J. Manuf. Process.* 46, 271–278, 2019.
- 20.C. Butler, S. Babu, R. Lundy, R. O’Reilly Meehan, J. Punch, N. Jeffers, Effects of processing parameters and heat treatment on thermal conductivity of additively manufactured AlSi10Mg by selective laser melting, *Mater. Charact.* 173, 110945, 2021.
- 21.N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, M. Kobashi, Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments, *Mater. Sci. Eng. A.* 704, 218–228, 2017.
- 22.T. Maconachie, M. Leary, J. Zhang, A. Medvedev, A. Sarker, D. Ruan, G. Lu, O. Faruque, M. Brandt, Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg, *Mater. Sci. Eng. A.* 788, 139445, 2020.
- 23.B. Duman, M.C. Kayacan, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme / Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini Predicting The Mechanical Properties Of The Part Produced By Direct Metal Laser Sintering / Melting Method, 2017.
- 24.D.N. Zhang, Q.Q. Shanguan, C.J. Xie, F. Liu, A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy, *J. Alloys Compd.* 619, 186–194, 2015.
- 25.P. Zhang, Y. Wang, Y. Xie, Y. Zhou, A study on the dynamic shock performance of 7055-T6I4 aluminum alloy based on experimental and simulation, *Vacuum.* 157, 306–311, 2018.
- 26.M.J. Pawar, A. Patnaik, S.K. Biswas, U. Pandel, I.K. Bhat, S. Chatterjee, A.K. Mukhopadhyay, R. Banerjee, B.P. Babu, Comparison of ballistic performances of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN ceramics, *Int. J. Impact Eng.* 98, 42–51, 2016.
- 27.C. Zhou, J. Wang, C. Guo, C. Zhao, G. Jiang, T. Dong, F. Jiang, Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts, *Int. J. Mech. Sci.* 197, 106334, 2021.
- 28.Y. Zhang, G. Guillemot, M. Bernacki, M. Bellet, Macroscopic thermal finite element modeling of additive metal manufacturing by selective laser melting process, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 331, 514–535, 2018.
- 29.L. Niu, M. Cao, Z. Liang, B. Han, Q. Zhang, A modified Johnson-Cook model considering strain softening of A356 alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 789, 139612, 2020.
- 30.W. LIU, Z. HE, Y. CHEN, S. TANG, Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2519A aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 24, 2179–2186, 2014.
- 31.Z. Luo, Y. Zhao, A survey of finite element analysis of temperature and thermal stress fields in powder bed fusion Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.* 21, 318–332, 2018.
- 32.M. Costas, D. Morin, M. de Lucio, M. Langseth, Testing and simulation of additively manufactured AlSi10Mg components under quasi-static loading, *Eur. J. Mech. A/Solids.* 81, 103966, 2020.

## Sivil Havacılıkta Bakım, Onarım ve Yenileme (BOY) Faaliyetleri, Havacılık 4.0 ve Yeni Trendler

Abdullah Cahit Karaoğlanlı<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 12.04.2021  
**Kabul:** 20.04.2021

**Anahtar Kelimeler:**  
Sivil havacılık  
Bakım-onarım ve yenileme  
(BOY) faaliyetleri  
Endüstri 4.0  
Artırılmış gerçeklik (AR)  
Eklemeli imalat (AM)

### ÖZET

Küreselleşen, nüfus oranı hızla artan, sosyal olarak gelişen ve ekonomik olarak büyüyen dünyamızda ulaştırma sektöründeki hız, emniyet, kalite ve konfor gibi faktörler havayolu taşımacılığını diğer ulaşım sistemlerine (karayolu, demiryolu, denizyolu vb.) göre ön plana çıkarmaktadır. Havayolu taşımacılığının diğer ulaşım sistemleri içerisindeki artarak büyüyen payı havacılık faaliyetlerindeki güvenli, etkin ve emniyetli uçuş koşullarının sağlanmasını da zorunlu kılmaktadır. Sivil havacılıkta yürütülen bakım, onarım ve yenileme (BOY) faaliyetleri, uçuş güvenliği açısından birincil düzeyde öneme sahiptir. BOY faaliyetleri aynı zamanda kamu/özel havayolu şirketleri için maliyet ve planlama yönüyle de hata toleransının minimum seviyede tutulması gereken bir süreçtir. BOY faaliyetlerinin şirketlerin toplam giderleri içerisindeki payı %10 ila %20 arasında değişen oranları bulurken, tüm dünyadaki havayolu şirketlerinin 2019 yılı içindeki BOY faaliyet giderleri %4'e yakın bir yıllık büyüme oranı ile 70 milyar USD'a yaklaşmıştır. Artan nüfus hızıyla birlikte küresel pazarın son derece dinamik bir yapıya kavuşması sonucunda üretim-tedarik sürelerinin hızlanması ve maliyetlerin düşürülmesi yönündeki baskı artmış, bunun sonucu olarak da imalat, tedarik ve lojistik gibi konularda son yıllarda gelişen elektronik ve dijital teknolojilerden daha fazla faydalanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, tüm dünyadaki sivil havacılık otoritelerinin yön verdiği BOY faaliyetlerine ait temel bilgiler verilerek, BOY faaliyetlerinin optimizasyon ve Endüstri 4.0 adaptasyonuna ilişkin güncel ilerlemeler değerlendirilerek, sunulmuştur.

## Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Activities in Civil Aviation, Industry 4.0 and New Trends

### ARTICLE INFO

**Received:** 12.04.2021  
**Accepted:** 20.04.2021

**Keywords:**  
Civil aviation,  
Maintenance-repair and  
overhaul (MRO) activities  
Industry 4.0  
Augmented reality(AR)  
Additive manufacturing

### ABSTRACT

In our rapidly globalizing, socializing, economically growing world with increasing population growth, factors such as time, quality and comfort have rendered airline transportation the most prominent mode of transportation when compared to the others (highway, railway, maritime etc.). The increasing share of airline transportation with every passing year brings about additional need for ensuring safe, efficient and secure flight conditions. Maintenance, repair and overhaul (MRO) activities carried out in the field of civil aviation is of primary concern in terms of airworthiness. This subject also holds critical importance for public and private airline companies as it requires minimization of error margins from the perspective of expenses and planning. The share of MRO activities within the overall expenditure of airline companies varies between 10% and 20%, whereas the overall MRO expenses of airline companies throughout the world has reached 70 billion USD by year 2019 with an annual increase of 4%. The highly dynamic nature of the global market induced by the high population growth has increased the pressure on the need for faster production-supply chains with lower logistic costs, which has led to an increased requirement for the utilization of electronics and digital technologies. In this work, fundamental information related to the MRO activities directed and audited by civil aviation authorities, as well as the recent developments regarding the optimization of MRO activities and their adaptation into Industry 4.0 have been reviewed and introduced.

## **1. GİRİŞ (INTRODUCTION)**

Ticari havacılığın dünya genelinde en güvenli ulaşım yolu olduğunu gösteren istatistiksel verilerin artış eğilimi son yıllarda da benzer şekilde devam etmektedir [1]. Bu başarıdaki en büyük etken sürekli olarak yenilenen ve temel prensipleri küçük değişikliklerle de olsa dünya genelindeki tüm devletler tarafından kabul edilen bakım, onarım ve yenileme (BOY) sistemidir [2]. Hizmete alınmadan önce tüm ticari uçakların ilgili devlete bağlı Sivil Havacılık Otoritesi (CAA) tarafından onaylanmış bir üretici bakım programı uçak bakım dökümanına sahip olması zorunludur. Havayolları, Sivil Havacılık Otoritesinin onayıyla kendi gereksinimleri doğrultusunda bu programa ilaveler veya üzerinde ek düzenlemeler yapabilmektedir. Belirli bir tip uçağın herhangi bir havayolu şirketindeki bakım programı yalnızca bu şirket tarafından uygulanabilir ve uçak başka bir şirkete satıldığında devredilemez niteliktedir [1-3].

Havacılık terminolojisinde BOY (İngilizce MRO) terimi (Bakım, Onarım ve Yenileme); muayene, hasar görmüş veya bozulmuş parçaların değiştirilmesi, iç ve dış yapının kontrolü, yapısal elemanların, hareketli parçaların ve malzeme yapısının kontrolü, korozyon ve aşınma hasarları, sızdırmazlık parçalarının değiştirilmesi, termal bariyer kaplamaların (TBCs) onarılması, lubrikantların veya gazların dolumu gibi işlemlerin tümünü kapsamaktadır [4,5]. BOY faaliyetlerinin amacı ticari bir uçağın her havalanışında Uçuşa Elverişlilik Direktiflerine uygun koşullarda olduğundan emin olunmasıdır [6]. BOY faaliyetleri güvenlik açısından kritik önem taşır ve bu yüzden ABD’de FAA (Federal Havacılık İdaresi), Kanada’da TCCA (Sivil Havacılık Otoritesi) ve Avrupa ülkelerinde EASA (Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı) tarafından sıkı biçimde denetime tabi tutulmaktadır [3]. Bakım faaliyeti yürüten tüm firmalara işletme sertifikaları FAA ve EASA tarafından verilmektedir [7]. Ülkemizde sivil havacılık sisteminde emniyet ve güvenliğe ilişkin standartlar çerçevesinde ilgili kuralların yazılması ve uygulanması ile ilgili otorite Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığına bağlı, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM)’dir.

Marx ve Graeber’in sunduğu SHELL modeline göre havacılık sistemi dünya genelinde en fazla şu dört unsurdan etkilenmektedir: Yazılım (düzenlemeler, talimatlar, bilgi, organizasyon), Donanım (uçaklar ve tesisler), Ortam (hava, sıcaklık, fiziksel-sosyal-siyasi değişkenler) ve İnsan Unsuru (pilotlar, bakım personelleri, yer ekibi, vs.) [8]. Havacılıkta meydana gelen kazalar genellikle yazılım ve donanım ile insan unsuru arasındaki ilişkinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır [9]. Endüstri tarihine bakıldığında bakım faaliyetleri endüstri ve havacılıkta gerçekleşen her devrimle doğrudan ilişkili olmuştur. İlk bakım personeli lisanslama standardı 1947’de ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) tarafından çıkarıldığında uçaklar içten yanmalı bir motordan, mekanik sistemlerden ve gövdeden oluşan basit bir mekanik sistem olarak görülmekteydi [10]. Elektronik alanındaki ilerlemeler, malzeme teknolojileri ve jet motorlarındaki devrimsel gelişmeler bakım mühendislerinin daha derin bir uzmanlığa sahip olması gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde uçak bakım mühendisliğinin gerektirdiği uzmanlık oldukça ileri düzeyde olmakla birlikte, genel amaçlı bir mühendis kompleks bakım operasyonlarını yürütecek bilgi ve tecrübeye sahip değildir [11]. Bakım mühendisliğinin artan önemine bağlı olarak Lisanslı Hava Bakım Mühendisliği (LAME) gereklilikleri EASA/FAA Uçak Bakım Personel Lisanslama işleyişinde ayrıntılı olarak verilmektedir [12]. Havacılık otoriteleri lisanslama koşulu olarak havayolu şirketlerinden Sürekli Uçuşa Elverişlilik Bakım Programı (CAMP) hazırlamalarını zorunlu kıldığından dolayı sivil havacılıkta BOY faaliyetleri kritik bir öneme sahiptir. Havayolu şirketlerinin uygulaması gereken tüm rutin denetimler detaylı bir şekilde CAMP listelerinde verilmektedir [13]. Uçakların havalanabilmesi için gerekli olan uçuş izni ancak uçağın düzenli bakımlarının yapıldığını onaylayan Uçuşa Elverişlilik Denetim Sertifikası ile alınabilmektedir. Bu yüzden tüm ticari uçaklar üreticiler tarafından uçaktaki yapısal tasarım ve sistemlere göre geliştirilen prosedürlere göre periyodik olarak bakıma alınmak zorundadır. Denetim ve muayene periyotları uçuş saatlerine göre, kalkış-iniş çevrim sayısına veya zamana göre (yaşlanma problemi; yıpranma, bozunma, yorulma, aşınma ve korozyon vb. etkilere bağlı) programlanabilmektedir [3].

## 2. UÇAKLARDAKİ KONTROL VE BAKIM TÜRLERİ İLE DİĞER BOY FAALİYETLERİ (AIRCRAFT MAINTENANCE CHECK TYPES AND OTHER MRO ACTIVITIES)

Havacılıkta gerçekleştirilen bakımlar genel olarak uçuş öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen bakımlar, günlük, süreli bakımlar ve takip/kontrol işlemleri ile daha detaylı bir biçimde gerçekleştirilen süreç ve proseslerden oluşmaktadır. Ticari/sivil havacılıkta hizmet veren tüm uçaklar A, B, C, D şeklinde dört farklı seviyede bakım kontrollerine tabidir [3].

**A tipi kontrol:** 200-300 uçuş çevriminden sonra gerçekleştirilen hafif bir kontroldür. Yolcu kabininin, iç ve dış yapının, motor bağlantı direklerinin, kontrol yüzeylerinin ve motorların kontrol ve muayenesini kapsar.

**B tipi kontrol:** 2000 uçuş saati sonrası (genellikle 6-8 aylık bir süreçten sonra) gerçekleştirilen hafif bir kontroldür. Yaklaşık 1 ila 4 gün sürer. Tüm A kontrollerine ek olarak motorların, yapısal elemanların, tüm hareketli parçaların, kanatların, kompozit malzemelerin (çatlak veya delaminasyona karşı) derinlemesine kontrolünü kapsar.

**C tipi kontrol:** 3500 uçuş saatinden (18 ila 24 ay) sonra gerçekleştirilen ağır bakım prosesidir. Bu bakım prosesi 8 ila 15 gün sürerken bu bakımda uçağın bakım için operatör şirket hangarına veya uzman bakım firmasının hangarına çekilmesi gerekir. A ve B tipi kontrollere ek olarak pek çok grup ve bileşen demonte edilerek, dikkatlice muayene edilmeleri sağlanır (özellikle motor ve motor direkleri).

**D tipi kontrol:** Uçak üzerinde gerçekleştirilen en ağır bakımdır ve yenileme (overhaul) olarak da adlandırılabilir. D tipi ağır bakım uçak 18000-26000 uçuş saatine ulaştığında başlar ve bu da yaklaşık 6-10 yıllık bir servis ömrüne tekabül eder. Uçak tüm iç ve dış yapıyı kapsayacak şekilde tamamen demonte edilir ve bakım genellikle 60 gün sürer. Her D tipi bakımdan sonra uçak 3 saatlik bir test uçuşuna tabi tutulur.

Bunların yanında sivil havacılık bakım hizmetleri her biri birbirinden farklı faaliyetlerden oluşan üç sınıfa ayrılabilir [14].

**a) Hat Bakımı:** Bu bakım uçak aprondayken, uçak indiği zaman ve tekrar uçuşa havalanmadan önce işletme durumundayken gerçekleştirilir. EASA Onaylı Bakım Kuruluşları Yönetmeliği Bölüm 145'te hat bakımı hangar dışında ve açık havada gerçekleştirilebilecek her türlü bakım şeklinde tarif edilmektedir. Hat bakımı ile ilgili görevlerin tanımı oldukça açıktır ve genellikle rutin servis içi denetimleri, günlük kontrolleri, sorun gidermeyi ve tashihleri kapsar. Hatta değiştirilebilen üniteler (LRU) şeklinde tasarlanan cihazlar bu bakım sırasında değiştirilebilmektedir. Hat bakımı genellikle yer destek ekipmanının sayısı ve kapsamı ile sınırlıdır [15].

**b) Üs Bakımı:** Hat bakımından farklı olarak üs bakımında uçak genellikle bir günden fazla bir süreyle hizmetten ayrılır ve bu süre 30 güne kadar uzayabilmektedir [3]. Bakım, uçağın servis alanından ayrıldığı bir ortamda hangar ve atölye ortamlarında gerçekleştirilir. Bakım sırasında özel alet ve ekipmanlar gerekir. Programlı kontroller bu bakım sırasında gerçekleştirirken tashih-düzeltilme faaliyetleri ve kusur tespit çalışmaları da bu bakımda yürütülen faaliyetler arasındadır. Hat bakımından daha ağır olan C ve D tipi kontroller bu bakım sırasında gerçekleşir. Üs bakımı yapısal çalışmalar, korozyon önleme, iç mekan yenileme ve önemli bileşenlerin değiştirilmesi gibi zaman alıcı bakım görevlerini içerir [3, 14].

**c) Komponent Bakımı:** Hat ve üs bakımlarında değiştirilen veya çıkarılan tüm parçalar komponent bakıma tabi tutulur. Aviyonik (havacılık elektroniği) üniteleri, çeşitli mekanik ve elektriksel uçak ve motor bileşenleri ve bazı durumlarda komple motor tertibatı demonte edildikten sonra özel bir alana alınarak bu bakıma tabi tutulurlar. Bu bakım genellikle uçak üzerinde değil, parçaların demonte edilerek götürüldüğü ayrı bir alanda gerçekleştirilir. Bir komponent bakım kılavuzu (CMM) belirli bir komponent üzerinde yürütülecek görevlerin tanımlanmasında kullanılır. Bu kılavuz bileşenin servis koşullarında çalışabilecek kondisyona getirilmesi için gerekli bilgileri içerir [16].

BOY faaliyetleri, montaj-demontaj prosedürlerinin açıklayıcı resimlerle detaylandırıldığı kontrol listeleri üzerinden gerçekleştirilmektedir [17]. Yedek parçalarla değiştirilecek olan ana bileşenlerin doğru biçimde tespit edilerek, bakım lojistik zinciri tarafından zaman kaybı olmadan tam zamanında teslim edilmesi büyük önem arz etmektedir. Gereksiz parçaların raflarda birikmesinin önüne geçilerek, ihtiyaç duyulan yedek parça stoklarının oluşturulması verimlilik açısından önemlidir [18].

Havacılık sektöründe bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri işleyiş, malzeme, parça ve ekipman yönüyle değerlendirildiğinde karmaşık yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bakım prosedürleri basılı prosedürler gibi geleneksel yöntemlerle yürütüldüğünde pek çok sorun ortaya çıkabilmektedir [18]. Açıklayıcı resimlerin gerçeğinden farklı olması, demontaj prosedürlerinin iki boyutlu resimlerden anlaşılacak kadar karmaşık olması, sürekli olarak uçak üreticisi tarafından teyit edilmesi gereken hususlar, bakım faaliyetlerinin yürütülmesi sırasında zayıf ergonomiden kaynaklanan aşırı iş yükü, benzer bileşenlerle dolu alanlarda belirli bir bileşenin yerinin tespit edilmesinin zor olması, uzun ve yorucu montaj/demontaj işlemleri ortaya çıkabilecek muhtemel sorunlardan yalnızca bir kısmıdır. Bundan dolayı, özellikle insan unsuru olarak nitelikli ve tecrübeli personelin etkin kullanımı sektörün verimli işleyişinin anahtar faktörlerinden birisidir [19].

Ticari uçak bakımı, uçağın teknik, operasyonel ve ekonomik açıdan optimum şartlar altında tutulması için gerekli tüm görevlerin yerine getirilmesi şeklinde de tanımlanabilmektedir. Bakım programları, ticari uçaklar gibi pahalı ve karmaşık ekipmanlar için güvenlik ve operasyonel güvenilirliğin son derece önemli olduğu, yönetmelik ve düzenlemeler ile sıkı biçimde kontrol edilen ticari havacılık sektöründe operasyonel başarı için büyük önem taşımaktadır [20].

Herhangi bir bakım programının temel amaçları önem sırasına göre şu şekilde sıralanabilir [21].

- Uçuş operasyonları ile ilgili tüm güvenlik seviyelerinin doğru bir biçimde uygulandığından emin olmak ve herhangi kaza veya vaka olasılığının minimize edilmesi,

- Sivil Havacılık Otoritesi'nin (CAA) gerekliliklerinin eksiksiz bir şekilde yerine getirildiğinin gösterilmesi, ilgili muayenelerden başarılı bir şekilde geçilmesinin sağlanması ve Uçuşa Elverişlilik Sertifikasının alınması,

- Uçağın ticari hizmet için uygun olduğu sürenin maksimum düzeyde tutulması ve bu yolla filonun potansiyel kullanım oranına katkıda bulunulması,

- Yalnızca bakımla ilgili hususların değil ilgili tüm faktörlerin dikkate alınması suretiyle havayolu işletim ekonomisinin optimize edilmesidir [22].

Yukarıda bahsedilen ilk iki amacın gerçekleştirilmesi ticari uçak işletmeciliği için zorunlu olup her bir ticari uçağın havalanabilmek için Sivil Havacılık Otoritesi'nden uçağın ulusal ve uluslararası koşulları karşıladığını tescil eden Uçuşa Elverişlilik Sertifikasını (Airworthiness Certificate-AC) almış olması gerekmektedir [23]. Bunun için de havayolu şirketinin talep edilen tüm bakım standartları ile ilgili uygulama ve prosedürlerin sürekliliğini garanti eden bir Teknik Organizasyon ile çalışması gerekir. Teknik Organizasyon (BOY Şirketi) ve prosedürleri Sivil Havacılık Otoritesi tarafından denetlenir ve onaylandıktan sonra havayolu şirketine işletme ruhsatı (Air Operator Certificate-AOC) verilir. Teknik Organizasyonun da ilgili bakım hizmetini satabilmek için Sivil Havacılık Otoritesinden ilgili uçak tipine göre Tip Sertifikası alması gerekir [23].

Havayolu işletmeciliği ekonomisinin optimizasyonu pek çok etkene bağlıdır [24]. Yatırım maliyeti açısından bakıldığında uçağın kullanım oranının en üst seviyeye çıkarılması işletme ekonomisinin geliştirilmesindeki temel etkenlerden biridir. Havayolu firmaları bu doğrultuda uçaklarını mümkün olan en fazla uçuş saati ile kullanmayı, bakım hizmetlerini mümkün olan en düşük sürelerde tutmayı ve kapasite fazlasını dışarı pazarlamayı hedeflerler [25]. Bunun için kilit faktörler uçuş rotalarının optimize edilmesi, uçuş sürekliliğinin artırılması ve uçakların kalkışa en kısa sürede hazırlanmasını sağlayacak yer hizmetlerinin sağlanmasıdır. Aynı zamanda uçağın optimum teknik kondisyona sahip olması yakıt sarfiyatını düşürecek ve bu da şirketin bütçesine olumlu yansıtacaktır [26].

İşletme sırasında uçak performansının düşmesi zorunlu ek bakım faaliyetleri ile telafi edilebilir veya engellenebilir. Çoğu zaman bu faaliyetler uçağın yerdeki süresini arttırırken toplam uçuş süresini de azaltacaktır. Maliyet ve bakım gibi birbirine zıt prosedürler arasındaki dengenin sağlanması havayolu bakım sisteminin öncelikli hedefleri arasında gelir [27]. Bu durumda departmanlar arası bir yönetim grubunun, şirketin küresel politikasını münferit havayolu birimlerinin bütçe politikalarının üzerinde tutmasını gerektirir. Örneğin aşırı yoğun onarım faaliyetleri uçağın bakım süresini arttırıp uçuş süresini azaltırken, uçuş programı üzerindeki baskıyı arttırabilir. Diğer yandan bakım faaliyetlerinin belirli bir seviyenin altına düşmesi uçuş iptal ve gecikme sayısını arttırıp firma güvenilirliğini zedelerken, motor ve sistemlerin performansının düşmesi yoluyla yakıt sarfiyatının artmasına da sebep olabilir [21].

## 2.1. Uçak Bakım ve Performans Takibi (Aircraft Maintenance and Performance Monitoring)

İşletme ömrü boyunca herhangi bir ticari uçağın enerji verimliliği, mühendislik ve bakım departmanlarının diğer ilgili parametrelerle birlikte spesifik sarfiyatı sürekli olarak gözlem altında bulundurması yoluyla takip edilebilir [28]. Spesifik sarfiyat değerlerinin analizi, bakım faaliyetleri yoluyla giderilebilecek olası teknik noksanlıkların tespit edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Havayolu işletmecileri satın alınan uçak tertibatının kontrol ayarlarını, yalıtım ve boya durumunu potansiyel bir onarım veya modifikasyon ihtiyacına karşı teslimat öncesi muayene ederek uçağın ağırlığındaki değişiklikleri tespit etmek zorundadır. Teslimat öncesi testler uçak performansına ilişkin veri tabanının oluşturulmasında yardımcı olur. Uçak tam teçhizatlı MEW (İmalatçı Boş Ağırlığı) kontrolünü ve uçağın spesifik menzilin sözleşmede garanti edilen limitler içinde olduğunu gösteren bir uçuş testine tabi tutulur [29]. Performans ile ilgili olmayan diğer testler farklı sistemlerin işlevselliği, kabin gereklilikleri, kabin içi ses gibi hususlarla ilgilidir.

Uçak hizmete alındıktan sonra performans takibi:

- Aynı tip uçakların verimlilik trendinin aynı anda takip edildiği filo düzeyinde,
- Performans takibinin uçağın kuyruk numarası üzerinden gerçekleştiği münferit uçak düzeyinde,
- Her bir motorun performans düşüşünün ayrı ayrı takip edildiği motor seri numarası düzeyinde gerçekleştirilir.

Yüksek yakıt sarfiyatından dolayı daha yüksek yük kısıtlamalarına tabi olan uzun menzilli filolarda genellikle kuyruk numarası ve motor seri numarası üzerinden takip gerçekleştirilirken, ağır yük limitlerine tabi olmayan kısa-orta menzilli filoların performans takibi filo düzeyinde veya aynı yaş ve spesifikasyona sahip uçak grupları düzeyinde gerçekleştirilebilmektedir [28,29].

## 2.2. Uçak Yakıt ve Verimliliğinin Arttırılması İçin Uygulanan BOY Faaliyetleri (MRO Activities to Reduce Fuel Consumption and Improve Efficiency)

Uçak performans takibi (APM) prosedürleri; uçuş sırasındaki mevcut spesifik yakıt sarfiyatının uçağın veya motorun teslimat anındaki durumunu gösteren referans bir performans değeri ile karşılaştırılması prensibine dayanır. Analiz edilen parametreler aşağıdaki gibidir [21].

- Yanan yakıt hacmi,
- Uçuş saati başına yakıt gibi seçilen bir parametre değerine göre hesaplanan enerji verimliliği,
- Spesifik yakıt sarfiyatındaki artış,
- Mevcut performansın tahmin edilen trende göre ayarlanmasını içermektedir.

Uçakların yakıt sarfiyatı performansları, havayolu şirketlerine teslimat öncesinde üretici firma tarafından teslimat öncesi testlerde kontrol edilmektedir. Uçakların sarfiyat performans değerleri belli aralıklarla birbirlerinden farklı olabilmekte birlikte Uçak Performans Kılavuzu'nda (APMA) üretici tarafından garanti edilen belli limit değerlerinin dışına çıkamaz [30].

İşletmeci firma performans trendine ilişkin benzer garantileri uçağın hizmet süresi için de isteyebilme hakkına sahiptir. Bu durumda, üretici uçağın hizmet-içi performansının belirtilen

performans aralığında gerçekleştirdiğini gösteren APM uygulamalarını gerçekleştirmekle yükümlü olacaktır. Garanti koşulları Uçak Satın Alma Sözleşmesinde açık bir şekilde belirtilir ve hukuki değere sahiptir. APM prosedürlerinin herhangi bir hukuki ihtilaf durumunda kullanılabilir şekilde şeffaf ve net olması gerekmektedir. Performans takip prosedürlerinin son derece karmaşık teknik yapısı hizmet-içi performans garantilerinin takibini de zorlaştırmaktadır [21,23].

APM prosesi için gerekli olan veriler uçaktaki ekipmanlar tarafından kaydedilerek Dijital Uçuş Veri Kayıt Cihazına (DFDR) gönderilir ve oradan teknik departmana iletilir. Veri transfer şekli uçak konfigürasyonuna göre fiziki çıktı veya dijital medya ortamında ya da Uçak İletişim Yönlendirme ve Raporlama (ACARS) Sistemi üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen analiz sonuçları operasyon departmanı tarafından yönlendirilerek APMA’da belirtilen yakıt sarfiyat parametrelerinin bakım departmanı tarafından düzeltilmesi sağlanır. Uzun menzilli uçaklarda her uçağa özel doğrulama katsayıları uygulanırken kısa ve orta menzilli uçaklarda aynı spesifikasyona sahip tüm uçaklar için tek bir doğrulama katsayı değeri uygulanmaktadır [21,30].

Uçak motorları, uçak gövde ve sistemlerinden ayrı olarak performans düşüş analizlerine tabi tutulmakta ve gerekli görüldüklerinde değiştirilebilmektedirler. Çoğu havayolu Motor Kondisyon Trend Takibi (ECTM) programları uygulayarak uçuş saat ve çevrimleri üzerinden farklı motor parametrelerindeki değışimleri takip ederler [31]. APM ve ECTM analiz sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla performans düşüşünün ne kadarının uçak gövde ve sistemlerinin performansına bağlı olduğu tespit edilebilmektedir. Münferit uçak performans seviyesine ilişkin bilginin doğruluğu, seyahat süresince kullanılacak yakıt miktarının tam olarak hesaplanmasını kolaylaştıracadıından güvenlik toleranslarını etkilemeden uçak yakıt rezervinin minimize edilmesine ve dolayısıyla uçuş planlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Yakıt verimliliğinin artırılması ile ilgili tipik bakım türleri genel olarak dört kategoriye ayrılabilir [21].

- Spesifik sarfiyatın iyileştirilmesi için motor yenileme alışmaları,
- Aerodinamik temizliğin sağlanması ve sürdürülmesi,
- Uçak ağırlığının azaltılması,
- Doğruluk optimizasyonu için sistem kalibrasyonu.

### **2.3. Uçak Motor Yenileme alışmaları (Aircraft Engine Renewal Studies)**

APM tüm uçağın performansı ile ilgili olsa da yakıt verimliliği bakımından en önemli bileşen sonuçların %70-75’inden sorumlu olan uçak motorudur [32]. Onarım ihtiyaçları, güncellemeler, aşırı performans kaybı veya lojistik sebeplerden dolayı uçakların hizmet süreleri boyunca motorları pek çok kez değıştirilebilmektedir. Ticari uçaklar ilk 30-60 uçuş çevriminde telafi edilemeyen büyük performans kayıplarına uğrarlar. Bunun nedeni motorun hareketli ve sabit parçaları üzerinde yapılan ayarlamalar, motorun yüksek sıcaklıklarda ilk kez çalışıyor olması ve bununla ilgili meydana gelen mekanik aksaklıklardır. Bu aşama geçildikten sonra yakıt sarfiyatındaki artış daha takip edilebilir bir trend izler. Kullanım sırasındaki performans kaybının yaklaşık %80’i büyük yenileme çalışmaları ile giderilebilmektedir. Bakım faaliyet periyotlarını belirleyen ana etken belirli bir ömür sonrası değıştirilmesi gereken parçalar (life-limited-parts-LLP) olduğundan onarım faaliyetlerinin optimum sayısını onarım masrafları ve sağlanacak yakıt tasarrufu arasında kurulacak denge belirler [33]. Motor performansının tipik göstergeleri egzoz gaz sıcaklık (EGT) marjı ve spesifik yakıt sarfiyatıdır (SFC). EGT sıcak gazların motor türbininden çıkış anındaki sıcaklığı temsil etmekte ve işletme için limit sıcaklığı belirlemektedir. Motor verimliliği zamanla azaldığından istenen itiş gücüne ulaşmak için daha fazla yakıt gerekir ve dolayısıyla egzoz gaz sıcaklığı zamanla artar [34].

Kokpit göstergelerinde EGT marjı aşıldığında uyarı veren bir kırmızı çizgi bulunur. EGT marjı ise mevcut sıcaklık ile bu kırmızı çizgi arasındaki farkı ifade eder. Marj ortadan kalktığından motor itişinin düşürülmesi veya motorun bakım ve restorasyona alınması gerekir [34]. SFC birim itiş gücü başına motor yakıt sarfiyatını ifade eder ve motor verimliliği düşükçe artar. Bu iki parametre (EGT ve SFC)



bakım faaliyet planlamaları için analiz edilen ana parametrelerdir ve motorun değiştirilmesi veya yenilenmesi için en uygun zamanın belirlenmesinde kilit rol oynarlar. Yenileme ve bakım maliyetlerinin elde edilecek EGT ve SFC iyileştirmeleri ile mali açıdan dengede tutulması gerekir. Uçak motorlarının rutin hizmet süresince motor performans kaybının en önemli sebepleri aşağıdaki gibidir [21].

- Kir birikintileri,
- Sızdırmazlık malzemelerinin aşınmasından kaynaklanan sızıntı ve kaçaklar,
- Kompresör ve türbin bıçak ucu boşluklarının artmasından kaynaklı basınç kayıpları,
- Türbin bıçaklarının aerodinamik profillerinde partikül çarpmalarından ve erozyondan kaynaklanan bozukluklardır.

#### **2.4. Aerodinamik Temizlik (Aerodynamic Cleaning)**

Ticari uçaklar birçok rijit ve hareketli parçadan oluşan kompleks mekanizmalardır. Optimum verimlilik her bir bileşen üzerinde minimum hava direnci oluşumunun sağlanması ve gövdenin düzensizliklerden arındırılması yoluyla elde edilir [35]. Tüm yüzeylerin mümkün olduğunca düzgün olması, kapı ve panellerin diğer yapılarla süreklilik içinde olması gerekir. Uçuş sırasında uçak yüzeyleri partikül darbelerine maruz kalarak erozyona uğrarlar. Bu düzensizliklerin artması hava direncini artırır ve bu durum yakıt sarfiyatının artmasına sebep olur [36]. En ağır etkiyi uçağın burun, kokpit gibi ön kısmındaki, kanatlardaki ve kuyruk kısmındaki düzensizlikler verir. Hava direncinde bu düzensizliklerden kaynaklanan artışlar %0.4'leri bulabilmektedir. Hava direncini arttıran sorunlar arasında kapı ve panellerin hizasının bozulması, düşük kaliteli onarım işlemleri, sızdırmazlık malzemelerinin aşınması, boya katmanının bozulması sayılabilir. Yıkama ve parlatma işlemleri, uçak yüzeyindeki hava direncini %0.1-0.2 gibi ciddi oranlarda azaltabilmektedir [21].

#### **2.5. Uçak Ağırlığının Azaltılması (Aircraft Weight Reduction)**

Ticari uçakların operasyonel boş ağırlıkları (OEW) 5 ila 10 yıl gibi bir zaman aralığında %1 oranında artabilmektedir ve bu sistematik olarak kontrol edilmesi gereken bir durumdur. Havayolu şirketleri uçakları sık aralıklarla tartmazken, bu çoğu durumda yenileme faaliyetleri sonrası ile sınırlı kalmaktadır. Ağırlık artışına sebep olan bazı etkenler aşağıdaki gibidir [21].

- Erişilemeyen alanlarda kirlilik ve rutubet birikmesi,
- Onarımlardan kaynaklı ilave ağırlıklar,
- Servis bültenleri ve diğer modifikasyonlar,
- Boş birim yükleme cihazları (ULD),
- Gereksiz acil durum veya bakım ekipmanları olabilmektedir.

#### **2.6. Sistem Kalibrasyonu (System Calibration)**

Uçuş sistemleri önceden belirlenmiş bir hata marjı dahilinde uçuş ile ilgili bilgi sağlarlar. Hata marjını aşan bir hata uçuş ekibinin hız, irtifa ve hatta yerçekimi bakımından optimum koşulların altına düşmelerine sebep olabilir. Bunun neticesinde havayolu şirketi uçuş planına uyulmaması sonucu ağır yaptırımlara maruz kalmaktan, yakıt sarfiyatından dolayı maddi kayba uğramaya kadar pek çok istenmeyen durumla karşı karşıya kalabilmektedir [37]. Bir Boeing 747-400 öngörülenden 0.01 Mach daha hızlı uçtuğunda yakıt tüketimi %1'den daha fazla bir oranda artmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için hava verilerini sağlayan algılayıcı sistemlerin belirli aralıklarla kalibre edilmesi gerekir [21].

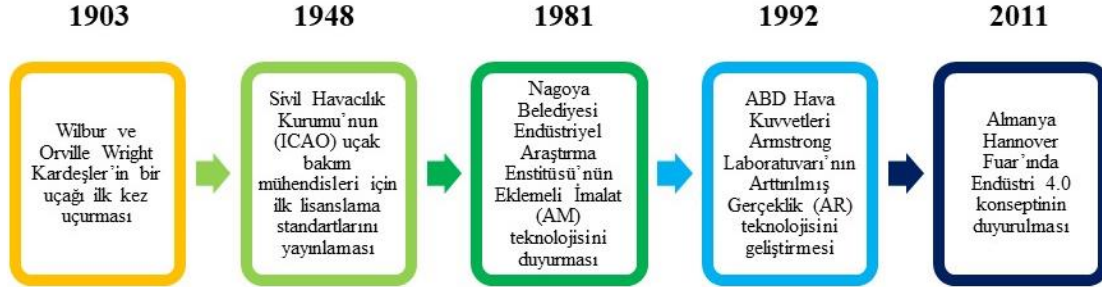
### **3. FAALİYETLERİNİN ENDÜSTRİ 4.0'A ENTEGRASYONU: ARTTIRILMIŞ GERÇEKLİK (AR) VE EKLEMELİ İMALAT (AM) UYGULAMALARI (INTEGRATION OF MRO ACTIVITIES WITH INDUSTRY 4.0: AUGMENTED REALITY (AR) AND ADDITIVE MANUFACTURING (AM) APPLICATIONS)**

Endüstri 4.0 kavramı ilk kez 2011 yılında Alman Hükümet yetkilileri ve akademisyenler tarafından imalatın dijitalleşmesine dayalı stratejik bir yaklaşım olarak Hannover Fuar'ında sunulmuştur [38]. Son yıllarda Endüstri 4.0 kavramı imalat robotları, insanlar ve makineler arasında gerçek bir etkileşime dayalı yeni bir devrim olarak pek çok alanda kendini göstermeye başlamıştır. Cozmiuc ve Petrisor'a göre dördüncü endüstriyel devrim dört temel unsur üzerinde yükselmektedir [39]. Bu temel unsurlar; birlikte çalışabilirlik, bilgi şeffaflığı, teknik destek ve merkezi olmayan karar alma unsurlarıdır. Birlikte çalışabilirlik (interoperability) kavramı; insanları, cihazları, makineleri ve robotları kapsayan bir ağın mümkün olan en yüksek düzeyde otomasyon sağlamak amacıyla Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) vasıtasıyla oluşturulması ve bu yolla "Tam Otomatik Fabrika" konseptinin hayata geçirilebilmesi ile ilgilidir. Bilgi şeffaflığı terimi Dijital İkizler (Digital Twins) konsepti üzerine kuruludur [40]. Dijital ikizler gerçek nesnelerin sanal kopyaları ve sanal verilerin gerçek sensörler vasıtasıyla zenginleştirilmesini içermektedir. Teknik destek kavramı iki temel teknoloji üzerine kuruludur: işletmecilere problemlerin kısa sürede çözülmesini sağlamak için gerektiğinde görselleştirilebilecek bilgiyi sağlamak; D3 operasyonlarını (sıkıcı, kirli, tehlikeli) yürüten insanların siber-fiziksel makineler ile değiştirilmesi [41]. Merkezi olmayan (decentralized) karar konsepti ise otomatik olarak karar veren, insan müdahalesi olmadan çelişkileri ve kompleks planlama problemlerini çözebilen akıllı makinelerin kullanılmasını ve dolayısıyla problem çözme yükünün insan üzerinden alınarak denetleme görevinin daha iyi yürütülmesinin sağlanmasını içerir [42].

Endüstri 4.0 şirketlerde Arttırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) gibi yeni teknolojilerin kullanılmasını; imalat sürelerinin kısaltılması ve akıllı yapıların kullanılabilmesi için Eklemeli İmalat (AM) teknolojisinden faydalanılmasını; şirketlere büyük miktarlarda veriyi yönetebilecek yazılım araçlarının sağlanmasını (Büyük Veri-Big Data); verilerin anlaşılır ve sezgisel biçimde toplanması için yazılım algoritmalarının geliştirilmesini ve böylelikle denetleyici insanlara yalnızca en önemli verilerin ulaşmasını; fabrikalarda insanlar, makineler ve robotlar arasında etkileşim sağlayan geniş bantlı internet altyapılarının kurulmasını kapsamaktadır [43]. Endüstri 4.0 kavramı ve yukarıda bahsedilen bileşenleri diğer pek çok alan gibi havacılık alanında da kendini göstermeye başlamıştır. Havacılık, tasarım ve bakım perspektifinden bakıldığında oldukça kompleks bir alandır [44]. Sivil havacılık, uzak alanlara kısa sürelerde yedek parçaların sağlanabilmesi için lojistik çözümler ararken yerel havayolu şirketleri için kompleks bakım faaliyetleri en önemli ihtiyaçlardan birini teşkil eder. Bakım faaliyetlerinin havayolu şirketleri için önemini destekler nitelikte Avrupa Araştırma Programı; Clean Sky 2 ADVANCE European Union H2020 projesi çatısı altında büyük yolcu uçakları için bakım stratejileri geliştirmektedir [45]. Endüstri 4.0'ın havacılık endüstrisine entegrasyonu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, French vd. Eklemeli İmalat teknolojisinin havacılık endüstrisinde kullanımının önemine vurgu yapmaktadır [46]. Literatürde yapılan araştırmalar Endüstri 4.0'ın BOY faaliyetlerinde bakım sürelerinin azaltılmasında etkin bir şekilde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Eklemeli İmalat ve Arttırılmış Gerçeklik teknolojilerinin sunduğu kolaylıklar havacılık endüstrisine etkin bir şekilde adapte edilebilir niteliktedir [47].

Uçak bakım sektörü için kilit öneme sahip olabilecek teknolojiler Endüstri 4.0 tarafından sunulmaktadır. Ağ oluşturma, büyük verilerin kullanılabilmesi, kişiselleştirilmiş ve lokal olmayan üretim kabiliyetleri, birbirine bağlı mikro-sensör ağları, uzak operasyonlarda verilerin ve bilgilerin akıllı ve sezgisel biçimde görselleştirilmesi (drone kullanımı), otomasyon gibi teknolojiler yalnızca fabrikalarda değil havacılık sektöründe de verimi ve hızı arttırarak maliyetleri düşürebilecek kilit teknolojiler arasındadır. Bu duruma bir örnek çalışma, Büyük Veri işleme kabiliyetine sahip verimli algoritmalar, Airbus ve Boeing gibi üreticilerin kompozit yapıların gerçek zamanlı ve güvenli yapı kontrolünün sağlanmasının takibinde kullanmaya başladıkları önemli bir teknolojidir [48]. Bu yaklaşım, kompozit yapıların takibi ve çatlak ilerlemesinin etkin bir şekilde tespit edilmesi için milyonlarca verinin toplanması ve analizinin gerçekleştirilmesine ve gerçek bir "hasar tolerans"

stratejisi oluşturulmasına dayalıdır [49]. Diğer tüm Endüstri 4.0 teknolojileri arasında Arttırılmış Gerçeklik ve Eklemeli İmalat teknolojilerinin havacılık sektöründe kilit oyuncular olacağı ön görülmektedir [3]. Arttırılmış gerçeklik ve eklemeli imalatı da içeren havacılık teknolojilerindeki tarihsel gelişime ait zaman çizelgesi Şekil 1’de gösterilmektedir. Teknolojideki gelişmeler ve Endüstri 4.0 kavramının yaygın hale gelmesi sivil havacılığın yanında askeri havacılıkta dahil olmak üzere tüm havacılık endüstrisinde büyük ilerlemeleri beraberinde getirecektir [3].



Şekil 1. Havacılık teknolojilerinin tarihsel gelişimi (Historical development of aviation technologies) [3].

### 3.1. Arttırılmış Gerçeklik (Augmented Reality (AR))

Arttırılmış Gerçeklik (AR) teknolojisi, Arttırılmış Bakım Kılavuzlarının ve Tasvirlendirilmiş Parça Kataloglarının oluşturulmasında büyük önem taşımaktadır [3,50]. Bu şekilde bakım personeli gerçek bir uçak üzerinde bakımı yapılacak bileşen ile ilgili her türlü bilgiye basılı kılavuzların bahsedilen kısıtlamalarına maruz kalmadan sezgisel ve hızlı bir şekilde ulaşabilir. Özellikle montaj/demontaj görevlerinin bakım personeline bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri veya manuel operasyonları temsil eden semboller vasıtasıyla sunulduğu veya hareket izleme teknolojilerinin kullanıldığı sanal panellerin kullanıldığı bakım prosesleri, arttırılmış gerçeklik teknolojisinin uçak bakımında kullanımına ilişkin örneklerden bazılarıdır [3,51]. Arttırılmış gerçeklik uygulamaları uzak bakım operasyonlarında kompleks prosedürlerin bakım merkezleri tarafından sanal animasyonlarla desteklenmesinde de kullanılabilir. Her bir bakım prosedürü için sanal animasyonların hazırlanması zaman alıcı bir süreç olup, bu durum arttırılmış gerçeklik teknolojisinin kullanımını kısıtlayıcı bir etken oluşturmaktadır. Ancak Ceruti vd.'nin de önerdiği gibi, milyonlarca parçadan oluşan bir ticari uçağın her bir parçası için gerekli bakım prosedürlerine ait animasyonlar üretici firmanın kendi çatısı altında oluşturduğu bir departmanda oluşturularak havayolu şirketlerinin kullanımına sunulduğunda arttırılmış gerçeklik teknolojisinin uçak bakım faaliyetlerinde kullanım oranı artmıştır [52]. Uçak bakım eğitimleri, arttırılmış gerçekliğin kullanılacağı diğer bir alan olup gerçekçi ve etkin eğitimler için kilit rol oynayacaktır. Sanal ve gerçek bileşenlerin arttırılmış gerçeklik teknolojisi ile bir araya getirilmesi karmaşık senaryoların eğitimlerde kullanılmasını sağlayabilmektedir [53]. Özetle, arttırılmış gerçeklik teknolojisi özellikle geleneksel basılı kılavuzlar ile açıklanamayacak kadar karmaşık olan bakım görevlerinin gerçekleştirilmesinde son derece kilit bir rol oynayacak ve verimlilik düzeyini arttıracaktır.

### 3.2. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing (AM))

Endüstri 4.0'ın Eklemeli İmalat (AM) tarafında bakım prosedürlerini kolaylaştırabilecek pek çok uygulama söz konusudur [3,54]. İmalata geçilebilmesi için sadece hedef parçanın sayısal modelinin mevcut olmasının yeterli olması eklemeli imalatın avantajlı yönünü oluşturmaktadır. En iyi sonuçlar parça üzerinde bir topolojik optimizasyon sonrası sağlanan kafes yapıları modeller ile elde edilebilmektedir [55]. Bu şekilde talaş kaldırma ve diğer geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen kompleks geometrilerin imalatı son derece kolay hale gelmektedir. Sivil havacılık sektöründe yapılacak düzenlemelerle, eklemeli imalatla üretilmiş olan metal parçalara kullanım izni verildiğinde yedek parçaların üretilebilmesi için, bir eklemeli imalat üretim hattı olacaktır. "Dijital İkiz" kavramının havacılık sektöründe kendine yer bulduğunda farklı geometriye sahip yedek parçaların orijinali ile değiştirilmesi de mümkün olabilecektir [56]. Böyle bir durumda, orijinal

parçaların toplu üretimi geleneksel yöntemlerle daha uygun maliyetlerle gerçekleştirilirken, çatlak/hasar görmüş parçaların da optimize edilmiş ve daha verimli çalışan yedek parçalar ile değiştirilebilmesi mümkün olabilecektir. Bu durumun neticesinde, orjinal ve optimize edilmiş parçaların üretim maliyetleri de birbirine yakın olacaktır. Boyutlardaki değişiklikler uçak fonksiyonelliğini etkilemediği sürece, bileşenler üzerine gelecek aynı yapısal gerilmelerle yapısal ağırlıkta düşüşler sağlanabilecektir [54,55].

Standart ve eklemeli imalatla yedek parçaların bir arada kullanılmasından dolayı her uçağın orjinal ve yedek parça envanteri farklı olacak ve bunun yönetilmesinde bir dijital ikiz oluşturulması kolaylık sağlayacaktır [57]. Eklemeli imalat parçaları yapısal olmayan parçalar için depolama giderlerini de düşürmüştür olacaktır. Eklemeli imalat teknolojisinin avantajlarından faydalanılabilmesi için uçak üreticilerinin parçaların dijital modellerini paylaşması ve FAA/EASA düzenlemelerinin metalik parçaların eklemeli imalatına izin vermesi öncelikli olarak gerekecektir. Bu yolla bakım hangarlarına kurulacak eklemeli imalat tertibatının kurulması yoluyla yedek parça tedarik zincirinin önemli ölçüde kısaltılması sağlanacaktır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin BOY uygulamalarında yer bulması için uçak üreticileri, havayolları ve bakım şirketleri arasında sıkı bir bilgi ağının oluşturulması son derece önem arz etmektedir [3,54,55].

### **3.3. Havacılık 4.0’da BOY Faaliyetleri Üzerine Yapılan Çalışmalar ve Yeni Trendler (Recent Studies on MRO Activities in Aviation 4.0 and New Trends)**

Tüm ulaşım yolları içerisinde güvenilirliği ve kullanım oranı her geçen gün artan sivil havacılık sektörü dünya üzerindeki kamu ve özel ulaştırma firmaları tarafından en çok yatırım yapılan alanlardan birisidir [58]. Nüfus artış trendi ve globalleşme göz önüne alındığında sivil havacılık faaliyetlerine olan talebin yakın gelecekte daha da fazla olacağı öngörülmektedir. Diğer tüm teknik alanlarda olduğu gibi sivil havacılık BOY faaliyetlerinin de Endüstri 4.0 çatısı altındaki uygulamalardan maksimum düzeyde faydalanması, tedarik zincirlerinin kısaltılmasında ve daha dinamik bir yapıya kavuşmasında, depolama, insan kaynağı ve BOY maliyetlerinin düşürülmesinde kritik öneme sahip olacaktır [59]. Bu kapsamda, BOY faaliyetlerinin Endüstri 4.0’a entegrasyonu ve diğer optimizasyon uygulamaları ile ilgili yapılan bazı çalışmalar bu kısımda özetlenmektedir.

Ahmadi vd. yaptıkları çalışmada, her bir yenileme döngüsündeki optimum yenileme ve muayene sayısını ve muayene-test aralıklarının optimum süresini bulmak için toplam maliyeti göz önünde bulundurarak bir matematiksel model geliştirmişlerdir [60]. Sundukları modelin bakım yöneticileri tarafından farklı yenileme verimliliği, maliyet ve yenileme döngü uzunluğu gibi parametrelerin karşılaştırılmasında kullanışlı bir araç olabileceğini belirtmektedirler. Bierer ve arkadaşlarına göre BOY verimliliğinin ve ilgili üretim sistemlerinin geliştirilmesinde, akıllı BOY sistemleri önemli bir potansiyel sunmaktadır [61]. Ancak bu sistemlerin beraberinde getirdiği ek karmaşıklık ve maliyet gibi unsurlar, bu sistemlerin finansal ve diğer açılardan ne kadar avantajlı olduğunu sorgulanmasını da gerektirmektedir. Bu durum akıllı BOY sistemlerinin uygulanmasında ve adaptasyonunda, sistematik bir kontrolün ve değerlendirmenin yapılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında akıllı BOY sistemlerinin uygulanması aynı zamanda sistematik bir bilgi yönetim sistemine olan ihtiyacı da açığa çıkarmaktadır. Araştırmacılar, bu kapsamda BOY yönetimi ile ilgili mevcut metodolojiye katkıda bulunmak için entegre bir kontrol, değerlendirme ve bilgi yönetim konsepti sunmuştur [3]. BOY yedek parça envanter yönetimindeki güçlüklerle dikkat çekerek Endüstri 4.0 teknolojilerinin envanter yönetim verimliliğinin geliştirilmesinde sağlayabileceği avantajlara değinmişlerdir. Bakım aralıklarının belirlenmesinde Büyük Veri, Makine Öğrenmesi (Machine Learning) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramlarının kullanılmasıyla birlikte bakım döngülerinin ve yedek parça taleplerinin daha iyi bir şekilde tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Eklemeli imalatın kullanım oranı düşük olan parçaların tedarik sürelerini stabilize edebileceğine ve düşüreceğine dikkat çekmişlerdir. Lojistik 4.0 ve Yeni Akıllı Mobilite (New Smart Mobility) modellerinin BOY parçalarının merkezileştirilmesinde verimli bir ulaşım ağı oluşturma potansiyeli olduğunu öne sürmüşlerdir. Araştırmacılar, otomotiv endüstrisinden elde ettikleri gerçek verileri ve Endüstri 4.0’a ilişkin bu kavram ve teknolojileri kullanarak BOY parça kullanım oranları, tedarik süreleri ve maliyet

gibi parametrelerin envanter yönetim sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır [3, 60-62].

Denkena vd. BOY faaliyetlerinin otonomlaşması üzerine yaptıkları çalışmada, yüksek basınçlı türbin kanatçıklarına ilişkin malzeme envanterinin rejenerasyonu için temel bir proses zinciri kavramı geliştirmiştir [63]. Sunulan yaklaşım bıçakların koşullara dayalı yenilenmesi için bir temel teşkil etmektedir. Bunun için ise onarıma girecek her bir bileşenin kondisyonu; aerodinamik performans ve yapısal simülasyonlar vasıtasıyla onarım öncesi kayıt altına alınmaktadır. Günümüzde kullanılan geleneksel BOY uygulamalarından farklı olarak, bu yolla bıçaklardan elde edilebilecek performans ve servis ömürleri daha kesin bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Dinis ve arkadaşları Büyük Veri analizi yoluyla BOY verilerinin değerlendirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmada Bayes Networklerini (BN) bir Büyük Veri Tahmin Analizi (BDPA) aracı olarak kullanımını araştırmışlar ve büyük ölçekli verilerin BOY faaliyetleri için değerli bilgilere dönüştürülme potansiyelini incelemişlerdir [64]. Elde edilen çalışma çıktılarına göre BN ağları olasılıksal yapıları itibariyle bakım iş yükü tahminlerinde yaşanan belirsizliklerin giderilmesinde ve karar-alma proseslerinde uygun bir teknik olarak kullanılabilir. Dinis ve arkadaşları bakım kapasite planlamalarında karşılaşılan sorunları inceledikleri çalışmalarında, bu amaç için Portekiz'deki bir BOY firmasının yürüttüğü 372 uçak bakım projesine ait verileri kullanmışlardır [65].

Uçak Bakım Tahmin Çerçevesi (FRAME) adını verdikleri veri analizi yaklaşımı ile 3D-MDA (Üç Boyutlu Bakım Veri Analizi) uzay-zaman-yetenek temelli bir koordinat sistemi geliştirmişler ve bunu bakım planlama ve programlarının optimizasyonunda kullanmışlardır. Novák vd. insansız hava araçlarının (UAV) uçak bakım proseslerinde görsel muayene için kullanılması üzerine yeni bir çalışma yapmıştır [66]. Yapılan bu çalışmada, uçak bakımında insan müdahalesinin getirdiği risklerin minimize edilmesinde kullanılabilir araç ve prosesler arasında insansız hava araçlarının kullanımı gösterilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında, bu uygulamaya örnek olarak sertifikalı bir ticari uçak BOY firması ile bir Sürekli Uçuşa Elverişlilik Yönetim Organizasyonunda (CAMO) "Akıllı Hangar" adı verilen konseptin uygulanmasını göstermişlerdir. Yapılan çalışmada, insansız hava araçlarının bakım proseslerinde kullanılmasının avantajları yanında dezavantajlarına da değinilmiştir. Oyesola ve arkadaşları yaptıkları çalışmada hibrid-eklemeli imalat (HEM) teknolojisinin BOY faaliyetlerinin üretkenlik ve karlılığının artırılmasında kullanılmasına değinmişlerdir [67]. Çalışmada, hibrid eklemeli imalat teknolojisinde takım tezgahlarının kullanılmadığı eklemeli imalat teknolojisi ile maliyetler düşürülürken konvansiyonel talaş kaldırma yöntemi ise nihai ürünlerin elde edilmesinde ve son proses işlemlerinde kullanılmaktadır. Araştırmacılar bahsedilen bu hibrid imalat sisteminin BOY faaliyetlerine entegrasyonu için bir maliyetleme yaklaşım modeli geliştirmişlerdir [67].

#### **4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)**

Küreselleşen dünyamızda diğer ulaşım sistemlerine göre hızlı, güvenli ve etkin bir sektör olarak havacılığın ön plana çıktığı görülmektedir. Ekonomik büyüme, sosyal gelişmeler ve artan nüfus hızı birlikte sektör yolcu ve yük taşımacılığında dünya ekonomisinde itici güç unsurlarından biri olmaya devam edecektir. Havacılık sektörünün sürdürülebilirliğinin sağlanması için, uçuş emniyeti ve havacılık güvenliğinin uluslararası kurallara uygunluğunun temin edilmesi olmazsa olmaz unsurlardır. Bu kapsamda uçuş güvenliğinin sağlanması amacıyla, kamu ve özel sektör havacılık işletmelerinin gerçekleştirdikleri bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri (BOY) sivil havayolu taşımacılığında önemini her geçen gün arttırmaktadır. Ayrıca ulaşımın, iletişimin, üretim, tedarik ve lojistik zincirlerinin son derece dinamik ve değişken bir hal aldığı günümüzde tüm endüstriyel alanlarda hız ve verimliliğin artırılmasında faydalanılan Endüstri 4.0 ile ilişkili teknolojiler ve kavramlar havacılık sektöründe de kendisini göstermeye başlamıştır. Bu kapsamda, 2011 yılında Almanya'da soyut bir kavram olarak karşımıza çıkan Endüstri 4.0, her alanda olduğu gibi havacılık sektöründe de kendisine yer bulmuş ve Havacılık 4.0 kavramının doğmasına neden olmuştur. Bu durumun bir sonucu olarak BOY faaliyetlerinde artık günümüz ihtiyaçları için yetersiz kalmaya başlayan geleneksel optimizasyon metodları da yerini Endüstri 4.0 teknolojileri ile doğrudan veya dolaylı olarak ilişkilendirilmiş BOY yaklaşımlarına bırakmaya başlamıştır. Bu çalışmada, küresel

ölçekteki BOY faaliyetleri ile ilgili temel bilgiler verilerek Endüstri 4.0 ile ilgili yeni trendler açıklanmaya çalışılmıştır. Dünya genelinde faaliyet gösteren BOY işletmeleri ancak teknolojinin hızına ayak uydurabildikleri ve Endüstri 4.0'a adaptasyon süreçlerini tamamlayabildikleri ölçüde hıza, verimliliğe ve teknoloji kullanımına dayalı günümüz rekabet ortamında ayakta kalmayı başarabileceklerdir.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. İnternet: European union: air safety statistics in the EU [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Air\\_safety\\_statistics\\_in\\_the\\_EU](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Air_safety_statistics_in_the_EU) Erişim: 01.05.2020.
2. A. De Graaff, 2001. Aviation safety, an introduction. *Air & Space Europe*, 3(3-4), 203-205. doi:10.1016/s1290-0958(01)90095-4.
3. A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, C. Bil, Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing, *Journal of Computational Design and Engineering*, 6: 516-526, 2019.
4. A. Regattieri, M. Gamberi, R. Gamberini, R. Manzini, Managing lumpy demand for aircraft spare parts. *Journal of Air Transport Management*, 11(6): 426-431, 2005.
5. A.C. Karaoğlanlı, T. Grund, A. Turk, T. Lampke, A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs). *Surface & Coatings Technology*, 371: 47-67, 2019.
6. İnternet: Maintaining airworthiness with a strong aircraft maintenance program <https://www.intelligent-aerospace.com/commercial/article/16544919/maintaining-airworthiness-with-a-strong-aircraft-maintenance-program> Erişim: 01.05.2020.
7. İnternet: FAA, Continuous airworthiness maintenance program (CAMP) guidance and policy [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Notice/N\\_8900.516.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Notice/N_8900.516.pdf) Erişim: 01.05.2020.
8. D.A. Marx, R.C. Graeber, Human error in aircraft maintenance. Seattle, Washington: Boeing Commercial Airplane Group, 131-144, 1993.
9. G. Lei, Z. Shuguang, T. Peng, Yi Lu, An integrated graphic–taxonomic–associative approach to analyze human factors in aviation accidents, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27 (2): 226-240, 2014.
10. İnternet: Background to the development of annex 1-personnel licensing. Training Manual (ICAO) PartD-1 Aircraft maintenance. [http://www.aviationchief.com/uploads/9/2/0/9/92098238/icao\\_doc\\_7192\\_-\\_training\\_manual\\_-\\_part\\_d1\\_-\\_acft\\_maintenance\\_-\\_2nd\\_edition\\_-\\_2004.pdf](http://www.aviationchief.com/uploads/9/2/0/9/92098238/icao_doc_7192_-_training_manual_-_part_d1_-_acft_maintenance_-_2nd_edition_-_2004.pdf). Erişim: 01.05.2020.
11. E. Uhlmann, M. Bilz, J. Baumgarten, MRO-challenge and chance for sustainable enterprises, *Procedia CIRP*, 11: 239-244, 2013.
12. İnternet: CASA, Becoming a licensed aircraft maintenance engineer (LAME) <https://www.casa.gov.au/standard-page/becoming-licensed-aircraft-maintenance-engineer-lame> Erişim: 01.05.2020.
13. İnternet: FAA, Technical implementation procedures for airworthiness and environmental certification, [https://www.faa.gov/aircraft/air\\_cert/international/bilateral\\_agreements/baa\\_basa\\_listing/media/EUT\\_IP\\_Rev6\\_w\\_amdt1\\_amdt2.pdf](https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/international/bilateral_agreements/baa_basa_listing/media/EUT_IP_Rev6_w_amdt1_amdt2.pdf) Erişim: 01.05.2020.
14. İnternet: The difference between line, base and component maintenance, <https://blog.dviation.com/2018/11/14/the-difference-between-line-base-and-component-maintenance/> Erişim: 01.05.2020.
15. S. Shaukat, M. Katscher, C.L. Wu, F. Delgado, H. Larrain, Aircraft line maintenance scheduling and optimization, *Journal of Air Transport Management*, 89, 101914, 2020.
16. D. Kritzinger, Aircraft system safety assessments for initial airworthiness certification, Chapter 11: Continuing Safety, Woodhead Publishing, 371-385, 2017.
17. İnternet: Sustainment of commercial aircraft gas turbine engines: an organizational and cognitive engineering approach, <https://core.ac.uk/download/pdf/18321856.pdf> Erişim: 01.05.2020.
18. J. Geng, X. Tian, M. Bai, X. Jia, X. Liu, A design method for three-dimensional maintenance, repair, and overhaul job card of complex products, *Computers in Industry*, 65(1): 200-209, 2014.
19. İnternet: The Importance of MRO, <https://www.mane.co.uk/news/the-importance-of-mro-145171/> Erişim: 01.05.2020.
20. C. Ucler, O. Gok, Innovating general aviation MRO's through IT: The sky aircraft management system-SAMS, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195: 1503-1513, 2015.

21. A. Benito, G. Alonso, Energy efficiency in air transportation. Chapter 7: Maintenance. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
22. F.D. Florio, Chapter 5-Type certification, airworthiness (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 85-122, 2016.
23. F.D. Florio, An introduction to aircraft certification and operations. Third Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016.
24. E. Kasturi, S.P. Devi, S.V. Kiran, S. Manivannan, Airline route profitability analysis and optimization using BIG DATA analytics on aviation data sets under heuristic techniques. *Procedia Computer Science*, 87: 86-92, 2016.
25. D. West, J. Bradley, Airline flight networks, cycle times, and profitability: *Operations Management Research*. 1, 129-140, 2008.
26. Y. Wang, Y. Shi, M. Cai, W. Xu, Q. Yu, Efficiency optimized fuel supply strategy of aircraft engine based on air-fuel ratio control, *Chinese Journal of Aeronautics*, 32 (2): 489-498, 2019.
27. J.C. Taylor, The evolution and effectiveness of Maintenance Resource Management (MRM), *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26 (2): 201-215, 2000.
28. K. Seymour, M. Held, G. Georges, K. Boulouchos, Fuel estimation in air transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88: 102528, 2020.
29. M. Lee, L.K.B. Li, W. Song, Analysis of direct operating cost of wide-body passenger aircraft: A parametric study based on Hong Kong. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32 (5): 1222-1243, 2019.
30. İnternet: ICAO global reporting format. Introducing reporting of runway condition relevant for aircraft-performance. [https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/GRF%20Workshop%20\(Helsinki\)/GRF%20wkshp%20Hels%20PPT02.pdf](https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/GRF%20Workshop%20(Helsinki)/GRF%20wkshp%20Hels%20PPT02.pdf) Erişim: 01.05.2020.
31. M.A. Fernández-Montesinos, P. Janssens, R.A. Vingerhoeds, Enhancing aircraft engine condition monitoring, *IFAC Proceedings*, 27 (16): 161-166, 1994.
32. S. Gudmundsson, Chapter 7- Selecting the power plant, Editor(s): Snorri Gudmundsson, *General Aviation Aircraft Design*, Butterworth-Heinemann, 181-234, 2014.
33. M. Caetano, C. Jorge, Innovation system in air transport management. *Journal of Information Systems and Technology Management*, 16, 2019.
34. V.F.F. Filho, R.F.G. Ribeiro, P.T. Lacava, Turbofan engine performance optimization based on aircraft cruise thrust level. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 41: 64, 2019.
35. D.M. Bushnell, Aircraft drag reduction-a review, *Journal of Aerospace Engineering: 25th Anniversary Collection*, 217(1): 1-18, 2003.
36. C. Baker, T. Johnson, D. Flynn, H. Hemida, A. Quinn, D. Soper, M. Sterling, *Train Aerodynamics*, Chapter 7- Aerodynamic drag, Editor(s): Chris Baker, Terry Johnson, Dominic Flynn, Hassan Hemida, Andrew Quinn, David Soper, Mark Sterling, Butterworth-Heinemann, 129-149, 2019.
37. P. Adam, Ā. Jirı, K. Vojtĕch, Calibration and its use in measuring fuel consumption with the can-bus network. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 64: 503-507, 2016.
38. C.C. Kuo, J.Z. Shyu, K. Ding, Industrial revitalization via industry 4.0-A comparative policy analysis among China, Germany and the USA, *Global Transitions*, 1: 3-14. 2019.
39. D. Cozmiuc, I. Petrisor, Industrie 4.0 by Siemens: Steps made today. *Journal of Cases on Information Technology*, 20 (2): 30-48, 2018.
40. A.M. Miller, R. Alvarez, N. Hartman, Towards an extended model-based definition for the digital twin. *Computer-Aided Design and Applications*, 15(6): 880-891, 2018.
41. P. Hold, S. Erol, G. Reisinger, W. Sihn, Planning and evaluation of digital assistance systems. *Procedia Manufacturing*, 9: 143-150, 2017.
42. P. Marcon, F. Zezulka, I. Vesely, Z. Szabo, Z. Roubal, O. Sajdl, P. Dohnal, Communication technology for industry 4.0, *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 1694-1697, 2017.
43. S. Vaidya, P. Ambad, S. Bhosle, Industry 4.0-A Glimpse, *Procedia Manufacturing*, 20: 233-238, 2018.
44. İnternet: Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-30A, Aviation maintenance technician handbook-General. [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/) Erişim: 01.05.2020.
45. İnternet: EU, Interim evaluation of the clean sky 2 joint undertaking operating under horizon 2020 experts group report. <https://ec.europa.eu/research/evaluations/pdf/cs2.pdf> Erişim: 01.05.2020.
46. R. French, H. Marin-Reyes, M. Benakis, Transfer analysis of human engineering skills for adaptive robotic additive manufacturing in the aerospace repair and overhaul industry, *Advances in*

- Manufacturing, Production Management and Process Control, International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Springer, 793: 3-12, 2018.
47. R.A. Valdes, V.F.G. Comendador, A.R. Sanz, J.P. Castan, Aviation 4.0: More safety through automation and digitization, DOI: 10.5772/intechopen.73688, 2017.
  48. N. Testoni, L.D. Marchi, A. Marzani, Detection and characterization of delaminations in composite plates via air-coupled probes and warped-domain filtering. *Composite Structures*, 153, 773-781, 2016.
  49. F. Borello, E. Cestino, G. Frulla, Structural uncertainty effect on classical wing flutter characteristics, *Journal of Aerospace Engineering*, 23 (4): 327-338, 2010.
  50. H. Eschen, T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch, T. Schüpptuhl, Augmented and virtual reality for inspection and maintenance processes in the aviation industry, *Procedia Manufacturing*, 19: 156-163, 2018.
  51. A. D'Anniballe, J. Silva, P. Marzocca, A. Ceruti, The role of augmented reality in air accident investigation and practitioner training, *Reliability Engineering & System Safety*, 204, 107149, 2020.
  52. A. Ceruti, A. Liverani, P. Marzocca, A 3D user and maintenance manual for UAVs and commercial aircraft based on augmented reality, SAE Technical Paper, 2015-01-2473, 2015.
  53. F. De Crescenzo, M. Fantini, F. Persiani, S. Luigi Di, A. Pietro, S. Salti, Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support, *Computer Graphics and Applications*, IEEE. 31: 96-101, 2011.
  54. A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya, Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 53: 124-149, 2019.
  55. Y. Saadlaoui, J.L. Milan, J.M. Rossi, P. Chabrand, Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes, *Manufacturing Systems*, 43 (1): 178-186, 2017.
  56. İnternet: How the digital twin makes the aftermarket more profitable. <https://blogs.3ds.com/northamerica/digital-twin-overhauls-aftermarket-for-enhanced-servitization/> Erişim: 01.05.2020.
  57. İnternet: It's a twin-win with digital! <https://www.aero-mag.com/ifs-mro-digital-twin-aerospace-15052020/> Erişim: 01.05.2020.
  58. İnternet: Rapid expansion of global aviation industry propels investment <https://oxfordbusinessgroup.com/overview/skybound-rapid-expansion-global-aviation-industry-propels-investment-6> Erişim: 01.05.2020.
  59. D.A. Ghadge, M. Er, H. Moradlou, M. Goswami, The impact of industry 4.0 implementation on supply chains, *Journal of Manufacturing Technology Management*. Doi: 10.1108/JMTM-10-2019-0368, 2020.
  60. A. Ahmadi, I. Soleimanmeigouni, J. Block, C. Letot, Optimum failure management strategy for periodically inspected units with imperfect maintenance. *IFAC-Papers online*, 49-12, 799-804, 2016.
  61. A. Bierer, U. Götze, S. Köhler, R. Lindner, Control and evaluation concept for smart MRO approaches. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing-Decoupling Growth from Resource Use, *Procedia CIRP*, 40: 699-704, 2016.
  62. J. Chen, O. Gusikhin, W. Finkenstaedt, Y.N. Liu, Maintenance, repair, and operations parts inventory management in the era of industry 4.0, *IFAC Papers Online*, 52-13, 171-176, 2019.
  63. B. Denkena, P. Nyhuis, B. Bergmann, N. Nübel, T. Lucht, Towards an autonomous maintenance, repair and overhaul process: Exemplary holistic data management approach for the regeneration of aero-engine blades. 19th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry 2019 (MIC 2019), Hannover, Germany, *Procedia Manufacturing*, 40, 77-82, November 27-28, 2019.
  64. D. Dinis, A. Barbosa-Povoa, A.P. Teixeira, Valuing data in aircraft maintenance through big data analytics: A probabilistic approach for capacity planning using Bayesian networks, *Computers & Industrial Engineering*, 128: 920-936, 2019.
  65. D. Dinis, Barbosa-Povoa, A.P. Teixeira, A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry, *International Journal of Production Economics*, 218: 1-15, 2019.
  66. A. Novák, A.N. Sedláčková, M. Bugaj, B. Kandra, T. Lusiak, Use of unmanned aerial vehicles in aircraft maintenance, 9th International Conference on Air Transport-INAIR 2020, Challenges of Aviation Development. *Transportation Research Procedia*, 51: 160-170, 2020.
  67. M.O. Oyesola, K. Mpofu, R.N. Mathe, A. Daniyan, Hybrid-additive manufacturing cost model: A sustainable through-life engineering support for maintenance repair overhaul in the aerospace, *Procedia Manufacturing*, 49: 199-205, 2020.



## Investigation of the Performance of Ecological Cooling/Lubrication Methods in the Milling of AISI 316L Stainless Steel

Emine Şirin<sup>1</sup>, Şenol Şirin<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Düzce University, Gümüşova Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies, Düzce, Turkey

### ARTICLE INFO

Received: 22.03.2021  
Accepted: 25.04.2021

#### Keywords:

AISI 3016L  
Milling  
MQL  
Cryogenic Cooling  
Ecological  
cooling/lubrication

### ABSTRACT

Ecological and eco-friendly cooling/lubrication methods have an important place in the sustainable manufacturing process. The hazards of the conventional cooling can be minimized, and it can be contributed the manufacturing performance, thanks to these ecological systems. In this study, the machinability of AISI 316L stainless steel under ecological cooling/lubrication methods was investigated. The face milling operation was applied to AISI 316L stainless steel for machinability examination under three different cooling/lubricating conditions (minimum quantity lubrication-MQL, LN<sub>2</sub> and MQL+LN<sub>2</sub>), three different cutting speeds (120, 150 and 180 m/min), constant feed rate (0.1 mm/rev) and a constant cutting depth (0.5 mm). The average surface roughness (Ra- $\mu$ m), cutting temperature (T-°C), and tool wear (V<sub>B</sub> - mm) were selected as machinability performance criteria. At the end of experiments, the lowest value of the cutting temperature (101.1 °C) was obtained at 120 m/min cutting speed under LN<sub>2</sub> cutting condition. The lowest value of surface roughness (0.237  $\mu$ m) was obtained at 150 m/min cutting speed under MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition. The lowest cutting tool flank wear (0.170 mm) was obtained under MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition, at the end of 16 minutes machining time and at 180 m/min cutting speed. When the experimental results were evaluated in general, it was understood that the MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition provided significant improvements in all cutting parameters compared to other cutting conditions.

## AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Frezelenmesinde Ekolojik Soğutma/Yağlama Yöntemlerinin Performansının İncelenmesi

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 22.03.2021  
Kabul: 25.04.2021

#### Anahtar Kelimeler:

AISI 316L  
Frezeleme  
MQL  
Kriyojenik soğutma  
Ekolojik soğutma/yağlama

### ÖZET

Sürdürülebilir imalat sürecinde ekolojik, çevreyle dost soğutma/yağlama yöntemleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu sistemler sayesinde konvansiyonel soğutmanın zararları minimize edilebilmekte ve üretim performansına katkılar sağlanabilmektedir. Bu çalışmada ekolojik soğutma/yağlama yöntemleri altında AISI 316L paslanmaz çeliğinin işlenebilirliği incelenmiştir. İşlenebilirlik incelemesi için AISI 316L paslanmaz çeliğine üç farklı soğutma/yağlama koşulunda (minimum miktarda yağlama-MQL, LN<sub>2</sub> ve MQL+LN<sub>2</sub>), üç farklı kesme hızında (120, 150 ve 180 m/dak), sabit ilerlemede (0.1 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde (0,5 mm) yüzey frezeleme operasyonu uygulanmıştır. İşlenebilirlik performans kriteri olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra- $\mu$ m), kesme sıcaklığı (T-°C) ve maksimum yanak aşınması (V<sub>B</sub> - mm) değişimleri izlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilerle kesme sıcaklığının en düşük değeri (101.1 °C) 120 m/dak kesme hızında ve LN<sub>2</sub> kesme koşulunda elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri (0.237  $\mu$ m) ise 150 m/dak kesme hızında ve MQL+LN<sub>2</sub> kesme koşulunda elde edilmiştir. En düşük kesici takım yanak aşınması (0,170 mm), MQL+LN<sub>2</sub> hibrit kesme koşulu altında, 16 dakikalık işleme süresinin sonunda ve 180 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde MQL+LN<sub>2</sub> hibrit kesme koşulunun diğer koşullara göre tüm kesme parametrelerinde önemli iyileşmeler sağladığı anlaşılmıştır.

## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Austenitic stainless steels are widely used in the chemical, petrochemical, food and pharmaceutical industries, nuclear power plants, and stainless equipment. However, these materials are difficult to cut due to their high ductility, high strength, and low thermal conductivity [1-2]. Especially in difficult to cut conditions, high cutting force, difficulty in chip removal, chip adhesion to the cutting tool, poor surface quality, and rapid tool wear are observed during the machining of AISI 316 stainless steel. Therefore, it is important to select suitable cooling/lubrication methods during the machining of this materials. Although the conventional coolant provides significant improvements in efficiency of machining, it has some concerns on the environment and human health. In order to minimize the negative effects of conventional cutting fluids, the researchers started to be preferred the Minimum Quantity Lubrication (MQL) methods (also known as semi-dry machining) in the machining operations [3-4].

In the MQL method, a small amount of cutting oil is sent to the cutting zone in the form of aerosol with compressed air [5]. The MQL method provides significant improvements in machining efficiency, machining cost, and the environment, and human health [6-7]. However, the MQL system performs better in finish, and medium cutting conditions [8]. Due to the low quantity of oil used in heavy machining conditions, MQL cannot provide sufficient cooling/lubrication condition [9]. Recently, researchers started to study on the cryogenic cooling method (also called subzero cooling condition) as an alternative to the MQL method [10-11]. Liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>), and liquid carbon dioxide (LCO<sub>2</sub>) are the most widely used refrigerants in cryogenic cooling conditions [12]. Nitrogen gas (melting point: -210.01 °C, boiling point: -198.79 °C), which is present in large amounts in the atmosphere (78.03%), is a lighter gas than air [13-14]. Therefore, immediately after liquid nitrogen is applied to the cutting zone, it evaporates and disperses into the atmosphere [9]. Due to these positive properties, LN<sub>2</sub> is one of the most preferred cryogens in the machining process [15]. Because of all these positive effects, the cryogenic cooling method is known as an environmentally friendly method compared to the conventional cooling methods [16]. LN<sub>2</sub> cutting condition gives positive results in terms of cutting temperature, cutting force, chip formation, surface quality and tool wear, besides its environmentally friendly, and harmless features [17]. However, when cooling applied for a long time in machining process, the temperature that helps plastic deformation reduce to low levels. In addition, since no lubricant agent used in LN<sub>2</sub> cutting condition, the friction coefficient can increase on the interface of cutting tool/workpiece. Nowadays, hybrid cooling/lubrication methods, which include two different methods, have been started to work. The lubrication properties of MQL, and cooling properties of cryogenic are combined in the hybrid cooling/lubrication methods. So machining efficiency can be increased, and machining costs can be decreased due to the hybrid cooling/lubrication methods.

There are not enough studies in the literature that use of MQL, and cryogenic cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel. For this reason, some of the similar studies are listed below. Yıldırım examined the cutting temperature, and surface roughness values in the milling of AISI 316 material under MQL, and graphite (0.5, and 1 vol%) added nanofluid cutting conditions. As a result of the experimental study, the 1 vol% nano graphite added nanofluid cutting condition were better performance on surface roughness and cutting temperature than other condition [18]. Dhar and Ahmet examined dry, wet, and MQL cutting condition on surface roughness, and tool wear during the turning of AISI 4340 material. At the end of their study, they stated that the MQL cutting condition improved the surface roughness, and reduced tool wear [6]. Jerald and Kumar examined the cutting force, surface roughness, cutting temperature, and tool wear when turning of AISI 316 stainless steel under dry, wet, and cryogenic (CO<sub>2</sub>) cutting conditions. The researchers claimed that the CO<sub>2</sub> cutting condition reduced the cutting temperature 32%, and improved the surface quality 52% compared to wet cutting condition [19]. Ravi and Gurusamy investigated the effects of machining performance of dry, wet, and LN<sub>2</sub> cutting conditions during the milling of AISI D2 material. They stated that the LN<sub>2</sub> cutting condition showed improvements in terms of machining performance [20]. Leadebal et al., examined the effects of dry, and LN<sub>2</sub> cutting condition during turning of AISI D6 material. According

to the experimental results, the researchers claimed that the LN<sub>2</sub> cutting condition showed better machining performance compared to dry condition [21]. Dhananchezian et al., in the turning of AISI 304 stainless steel, investigated the performance of wet and LN<sub>2</sub> cutting condition. The researchers stated that the LN<sub>2</sub> cutting condition provided significant improvements in terms of cutting temperature, cutting force, surface roughness, and tool wear [22]. Yıldırım et al., examined the performance of MQL, LN<sub>2</sub>, and hybrid MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition when turning of Ni based Inconel 625 superalloy. As a result of the experimental study, it was emphasized that hybrid MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition provides significant improvements in terms of machining performance [15].

When the studies in the literature are evaluated, it is understood that LN<sub>2</sub>, and especially hybrid MQL+LN<sub>2</sub> cutting conditions provide significant improvements in terms of machining performance. In this study, it is aimed to milling of AISI 316L stainless steel, not enough study have been investigated sufficiently, under ecological cooling/lubrication methods. Surface roughness, cutting temperature, and tool wear were selected as criteria for machinability performance of MQL, LN<sub>2</sub> and hybrid MQL+LN<sub>2</sub> cutting conditions. Thus, it was aimed that investigating the machining performance of hybrid cutting conditions during milling of AISI 316L stainless steel.

## 2. MATERIAL AND METHOD (MALZEME VE METOD)

### 2.1. Workpiece and Cutting Tool (İş Parçası ve Kesici Takım)


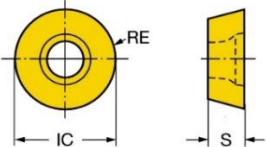
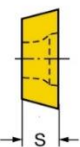
Commercial AISI 316L stainless steel was used in the milling experiments. The chemical composition of AISI 316L material is given in Table 1.

Table 1. Chemical composition of AISI 316L (wt %) (AISI 316L paslanmaz çeliği kimyasal bileşimi (% ağırlıkça))

C	Cr	Ni	Mn	Si	S	Mo	P	N	Cu	Fe
0.016	16.71	10.28	1.66	0.48	0.0006	2.07	0.02	0.067	0.12	Balance

R300-1032E-MM 2040 CVD coated cutting tool, and R300-025A20-10M coded tool holder (25 mm diameter) were used (manufactured by Sandvik company), in this study. Specifications, and sizes of the cutting tool are given in Table 2.

Table 2. Cutting tool specifications and sizes (Kesici takım özellikleri ve boyutları)

	<b>Radius (RE)</b>	5 mm
	<b>Inner Circle (IC)</b>	10 mm
	<b>Thickness (S)</b>	3.175 mm
	<b>Coating</b>	CVD TiCRN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN

### 2.2. Experimental Setup and Devices (Deney Düzeneği ve Cihazlar)

Milling experiments were carried out in DELTA SEIKI CNC-1050 A CNC vertical machining center that maximum spindle speed is 10000 rev/min. SKF brand Vario model MQL device and Özen brand compressor were used in the MQL system (Figure 1-c). Mineral based oil (density; 0.93 gr/mL at 20 °C, and kinematic viscosity; 14 cSt) produced by SKF company was used in the MQL system. The oil mixed in the system was applied to the cutting area at 8 bar pressure, 50 mL/hour flow rate, and 2 mm nozzle diameter.

XL 45 HP liquid cylinder produced by Taylor Wharton company was used in the cryogenic cooling experiments (Figure 1-d). LN<sub>2</sub>, which is filled with pressure into the cylinder, was applied to the cutting area with a constant pressure of 15 bar, and a nozzle with a diameter of 3 mm.

Mahr brand Marsurf PS 10 model mobile surface roughness device was used to measure the surface roughness values. The mobile surface roughness device has probe positioning speed of 0,5

mm/sec, and cut off length of 0.08 mm, and traversing length is selected as 4 mm according to the ISO 12085 standard. ISO 4287 standard [23] was taken as reference in the surface roughness evaluation, and the arithmetic mean of the roughness deviation Ra values was taken for the machined surfaces. Three measurements were made from the beginning, middle, and end of each milled surface. Surface roughness Ra values were calculated by taking the arithmetic mean of the three values obtained. Before the experiments, the surface roughness measurement device was calibrated with a calibration block and the accuracy of the measurements performed was ensured.

Optris brand PI 450 model infrared thermal camera was used to measure the cutting temperature at the cutting zone (Figure 1-b). The thermal camera was calibrated by the manufacturer. The emissivity value is taken as 0.6 that recommended by manufacturer catalogue for stainless steel. The cutting temperature values in the cutting zone were measured and recorded with the Optris Connect software.

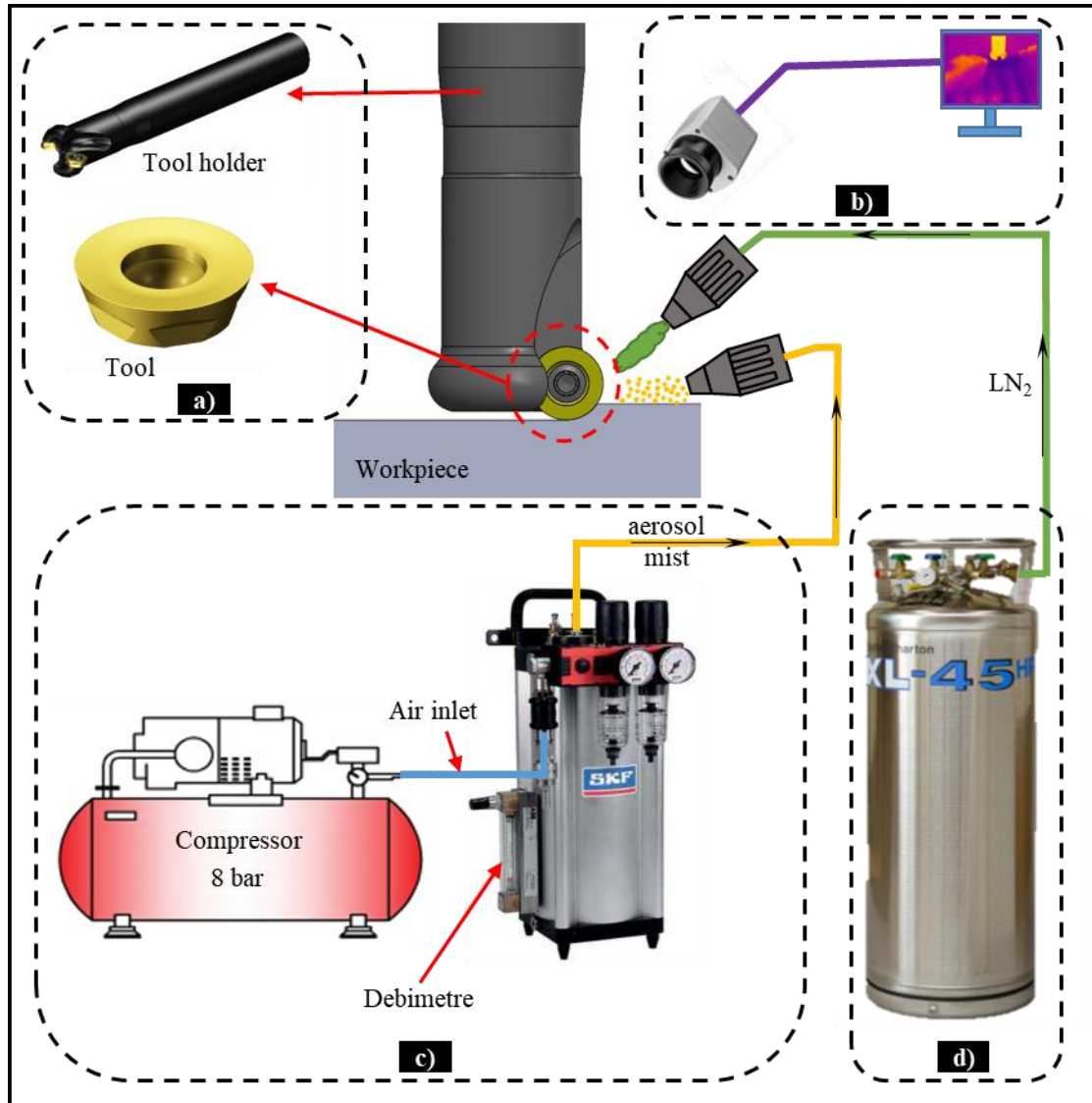


Figure 1. Experimental setup, a) Cutting tool and tool holder, b) Thermal imager, c) MQL system, d) Cryogenic cylinder (Deney düzeneği, a) Kesici takım ve takım tutucu, b) Termal kamera, c) MQL sistemi, d) Kriyojenik silindir)

DinoLite brand AM 4113 ZT model polarized digital microscope was used to measure the maximum value of cutting tool flank wear ( $V_B$ ). Flank wear values were determined for each cutting condition at a cutting speed of 180 m/min, and at the end of the milling process for 16 minutes. Machining parameters, and variables used in milling experiments are given in Table 3.

Table 3. Machining parameters, and experimental variables (İşleme parametreleri ve deneysel değişkenleri)

<b>Cutting condition</b>	MQL, LN <sub>2</sub> , and MQL+LN <sub>2</sub>
<b>Cutting speed (m/min)</b>	120, 150 and 180
<b>Feed rate (mm/rev)</b>	0.1
<b>Cutting depth (mm)</b>	0.5
<b>Radial cutting depth (mm)</b>	15
<b>Cutting tool</b>	CVD coating, R300-1032E-MM 2040
<b>Tool holder</b>	R300-025A20-10M
<b>MQL oil</b>	Mineral based
<b>MQL pressure (bar)</b>	8
<b>MQL flow (mL/h)</b>	50
<b>Cryogenic cooling pressure (bar)</b>	15

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS (DENEY SONUÇLARI)

#### 3.1. Surface Roughness Results (Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları)

Surface roughness is a very important machining performance criteria, and it can also be defined as the quality characteristic of workpieces. Friction is inevitable in machine parts that work in contact with each other. Measuring, and controlling of surface roughness is very important because it reduce the friction and give visuality to the machined surfaces. Roughness average Ra is the most commonly used in the measuring of surface roughness. In this study, the Ra results of the machined surfaces at 120, 150 and 180 m/min cutting speed under MQL, LN<sub>2</sub>, and MQL+LN<sub>2</sub> cutting conditions were evaluated. The arithmetic average of Ra values for all cutting conditions measured from the beginning, middle, and at the end of the 150 mm machined surfaces are given in Figure 2.

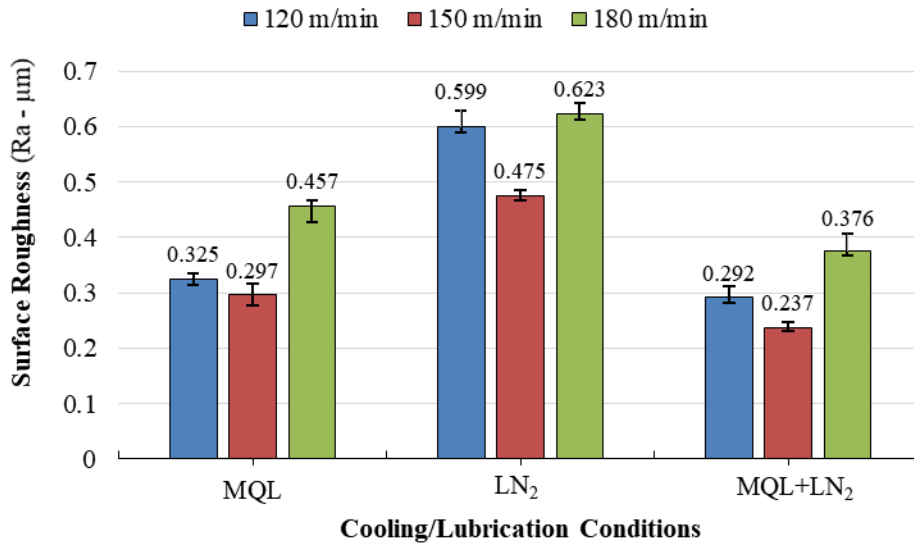


Figure 2. Measurement results of surface roughness under ecological cooling/lubrication cutting conditions, after the 150 mm machined surface (Ekolojik soğutma/yağlama kesme koşulları altında elde edilen yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları, 150 mm işleme sonrasında)

When Figure 2 is examined, it is understood that the lowest Ra value (0.237 µm) was obtained in MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition, and at 150 m/min cutting speed. The lowest Ra of the MQL, and LN<sub>2</sub> cutting condition was obtained at a cutting speed of 150 m/min. MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition improved the Ra 20.20% compared to the MQL cutting condition, and 50.11% improvement compared to LN<sub>2</sub> cutting condition. On the other hand, the MQL cutting condition were provided 37.47% improvement compared to the LN<sub>2</sub> cutting condition. MQL is a cutting condition where a very small amount of oil sending with pressure to the cutting zone via the nozzles. In this lubrication method, the compressed air/oil mixture is sent to the cutting zone from the tip of the nozzle to create an aerosol mist. Thanks to the lubrication tribofilm layer formed in the cutting



tool/workpiece/chip interface areas, friction is minimized, vibration is reduced to reasonable levels, and chips are removed from the cutting zone [24]. In the LN<sub>2</sub> cooling method, the cutting temperature values occurring during the machining can be reduced to low levels with the -196 °C coolant gas sent to the cutting zone (Figure 4). However, the chips tend to be plastered to the machined surfaces on the workpiece (Figure 3). This is because of the LN<sub>2</sub> reduces the cutting temperature which is facilitating plastic deformation [15]. It can be said that the Ra roughness values were measured high due to the chips plastered on the workpiece surface in the LN<sub>2</sub> cutting condition. In the MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition, where the lubricating effect of the MQL system and the cooling effect of the cryogenic system are together, better machined surfaces quality were obtained in all parameters compared to other cutting conditions. Similarly, it has been stated that hybrid cooling/lubrication cutting conditions improve the surface quality relatively compared to other conditions, in the literature [15], [25], [26].

When the cutting speed values was increased in all cutting conditions, it was observed that the surface roughness values improved. As the cutting speed increases, the temperature in the cutting zone increases. Increased temperatures which were facilitating plastic deformation, it has enabled chips to be separated from the workpiece more easily. Thus, it has been achieved improvements in the surface roughness Ra values. When the highest value of the cutting speed, 180 m/min, was reached, the worst roughness values were measured in all cutting conditions. When the surface roughness were measured the flank wear values, under LN<sub>2</sub>, MQL, and MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition, reached 0,141 mm, 0,102 mm, and 0,091 mm at 180 m/min cutting speed, respectively (Figure 6). It can be said that with the further increase of the cutting speed, the roughness values worsened because of the plastered of the chips on the cutting tool, and workpiece surfaces.

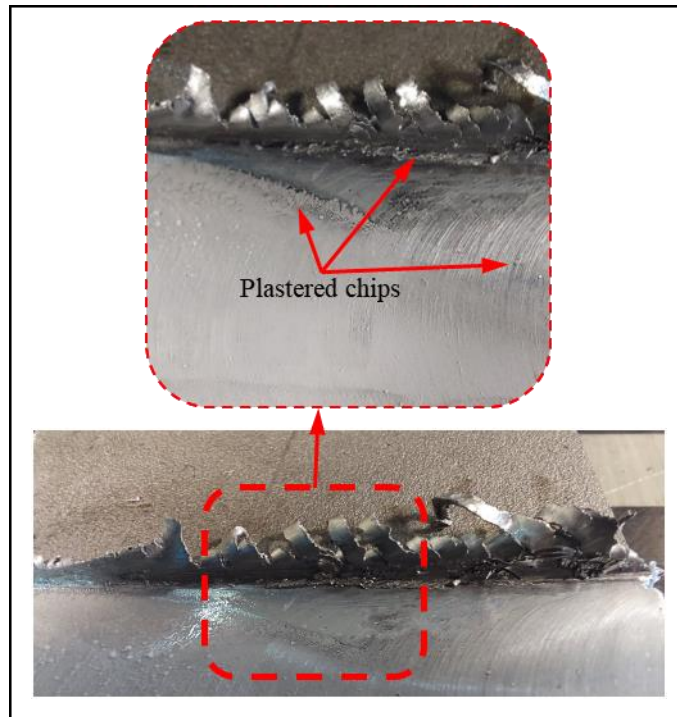


Figure 3. Plastered chips under LN<sub>2</sub> cutting condition (LN<sub>2</sub> kesme koşulunda talaş sıvanması)

### 3.2. Cutting Temperature Results (Kesme Sıcaklığı Sonuçları)

In metal cutting processes, when the temperature values increase, it can cause sudden abrasions of the cutting tool and deteriorations in workpiece surface quality [27]. Therefore, it is extremely important to control the temperature in the metal cutting processes. In this study, the cutting temperature value reached in the cutting zone was recorded by the Infrared Thermal Camera, which measures online and thermographic. The maximum value of cutting temperature was measured for all cutting conditions during the 4 minutes of machining time. The cutting temperature values obtained are given in Figure 4. The highest cutting temperature value (241.3 °C) was measured in

MQL cutting condition, and at 180 m/min cutting speed (Figure 5-a). For all cutting conditions, the highest cutting temperature values were obtained at 180 m/min cutting speed. When the cutting temperatures were measured the flank wear values under LN<sub>2</sub>, MQL, and MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition reached 0.201 mm, 0.124 mm, and 0.103 mm, respectively (Figure 6). The lowest cutting temperature value (101.1 °C) was obtained in LN<sub>2</sub> cutting condition, and 120 m/min cutting speed (Figure 5-b). The lowest cutting temperature values of the MQL+LN<sub>2</sub> (132.4 °C), and MQL (197.9 °C) cutting conditions, was obtained at 120 m/min cutting speed. In other words, the LN<sub>2</sub> cutting condition reduced the cutting temperature by 23.65%, and 48.91%, compared to the MQL+LN<sub>2</sub>, and MQL cutting condition, respectively.

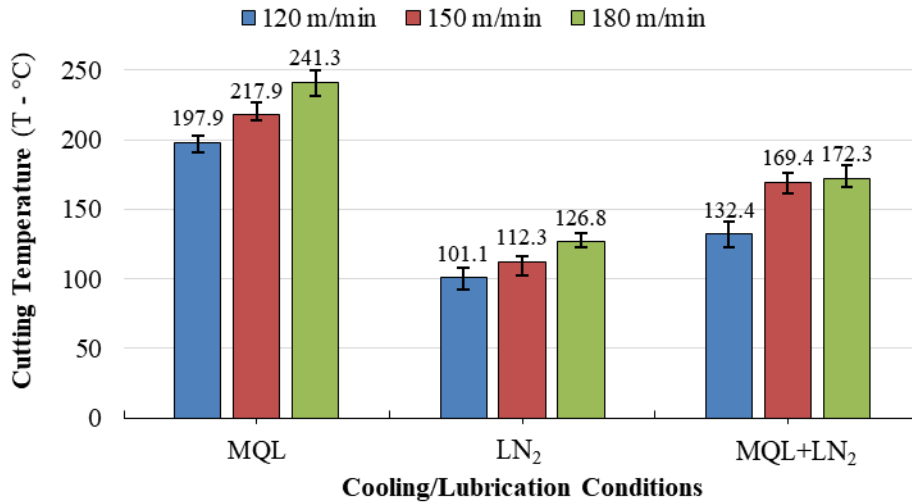


Figure 4. Measurement results of the cutting temperature under ecological cooling/lubrication cutting conditions, during 4 min machining time (Ekolojik soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen kesme sıcaklığı ölçüm sonuçları, 4 dak işleme süresi boyunca)

When Figure 4 continues to be examined, it is seen that the increase in the cutting speed values increases the cutting temperature values. If the cutting speed is increased, the cutting tool workpiece contact rate also increases, as a result, it can be increase the coefficient of friction and coefficient of heat partition [28].

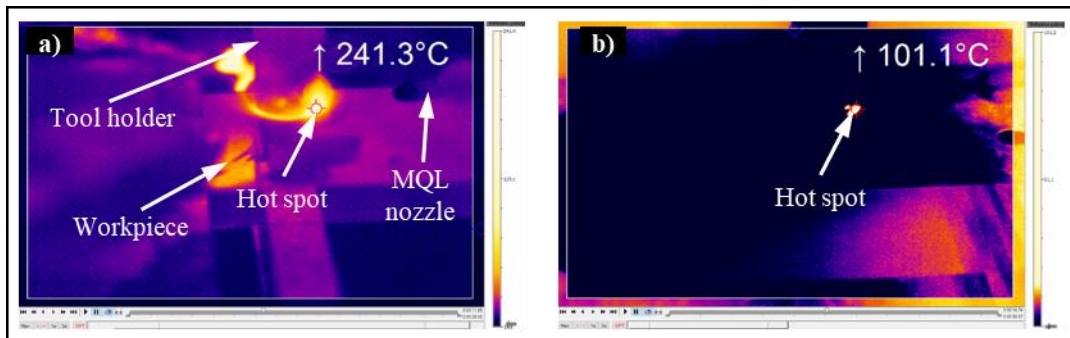


Figure 5. Cutting temperature results at the infrared thermal camera, a) MQL cutting condition, b) LN<sub>2</sub> cutting condition (Kızılötesi termal kamerada kesme sıcaklığı sonuçları, a) MQL kesme koşulu, b) LN<sub>2</sub> kesme koşulu)

When the cutting temperature values are evaluated in general, the lowest cutting temperature values were obtained under LN<sub>2</sub> cutting condition at all cutting speeds. This situation can be explained by sending N<sub>2</sub> with a temperature value of -196 °C in liquid form to the cutting zone. However, it is thought that the cutting tool is forced to separating the chips from the workpiece surface, as it reduces the temperature values in the cutting zone to undesirable levels. Surface roughness results (Figure 2), and plastered chips formation (Figure 3) support this situation.



### 3.3. Tool Wear Results (Takım Aşınma Sonuçları)

In this section, cutting tool maximum values of the flank wear ( $V_B$ ) were measured at 180 m/min cutting speed under LN<sub>2</sub>, MQL, and MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting conditions, and at the end of 16 minutes of machining time. The flank wear values obtained are given in Figure 6. When Figure 6 is examined, the lowest  $V_B$  value (0.170 mm) was obtained at the MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition. The MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition was followed by MQL (0.306 mm) and LN<sub>2</sub> (0.780 mm) cutting conditions, respectively. In other words, the MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition improved tool wear by 44.44%, and 78.21%, respectively, compared to the MQL, and LN<sub>2</sub> cutting conditions. This situation can be explained as the MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition, which includes the lubrication capabilities of the MQL method and the cooling capabilities of the LN<sub>2</sub> method, provided significant improvements in cutting tool life. The highest cutting tool wear in the LN<sub>2</sub> cutting condition can be explained with the cutting temperature. Figure 4 cutting temperature results can be contributed to this situation. The lowest cutting temperature values were obtained in the LN<sub>2</sub> cutting condition. Cutting tools are exposed to variable thermal shocks in the milling operations. The thermal shock changes in the milling operations, the cutting tools can be cause rapidly wear, and it can be triggered development of wear mechanisms [29]. It can be stated that the cutting tool flank wear was measured to highest in the LN<sub>2</sub> cutting condition, because of the thermal shock changes on the cutting tool are greater.

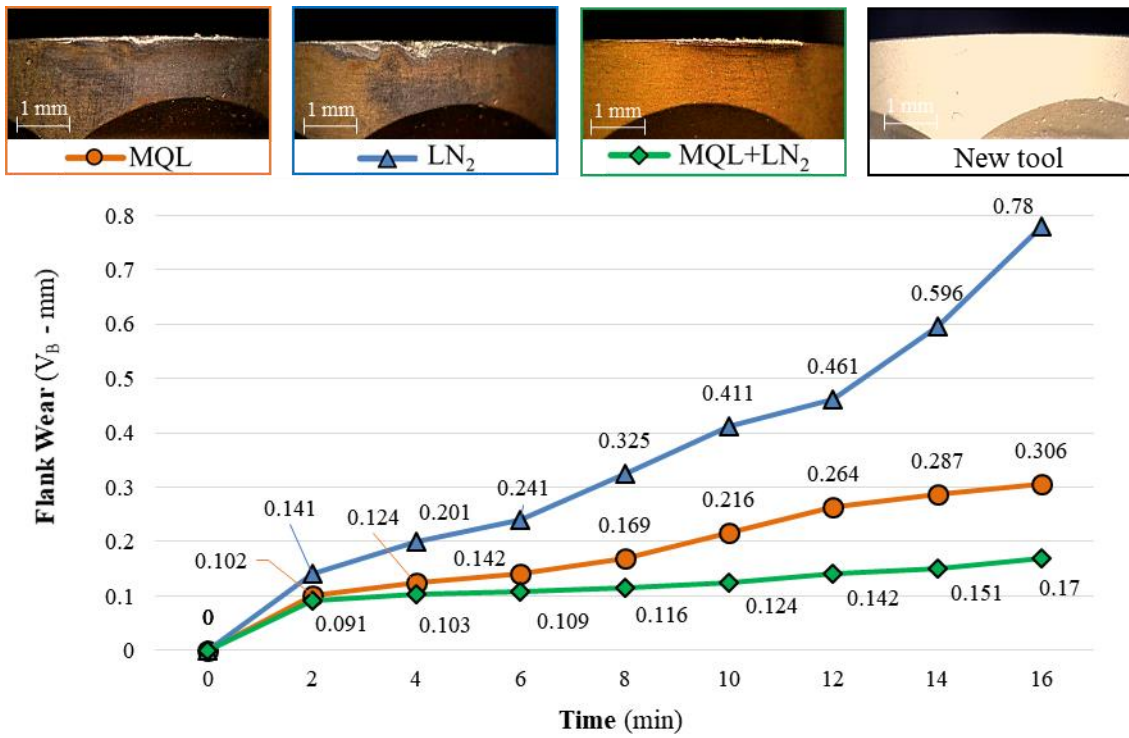


Figure 6. Flank wear results (at 180 m/min cutting speed, and 0.1 mm/rev feed rate) (Maksimum yanak aşınma sonuçları (180 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerlemede))

### 4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the performances of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel were investigated. Three different cutting conditions (MQL, LN<sub>2</sub>, and MQL+LN<sub>2</sub>), three different cutting speeds (120, 150, and 180 m/min), constant feed (0.1 mm / rev), and constant cutting depth (0.5 mm) were selected as machining parameters. Average surface roughness, cutting temperature, and tool wear were used as performance criteria. The results obtained from the experimental study are given below.

- According to the average surface roughness results, the lowest value was obtained with 0.237  $\mu\text{m}$  under MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition. The lowest Ra values of the MQL cutting condition with 0.297  $\mu\text{m}$ , and LN<sub>2</sub> cutting condition with 0.475  $\mu\text{m}$  was obtained at 150 m/min

cutting speed. MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition improved the surface roughness by 20.20%, and 50.11% compared to MQL, and LN<sub>2</sub> cutting condition, respectively.

- Surface roughness values decreased under all cutting conditions when cutting speed increased from 120 to 150 m/min. However, when the cutting speed increased to 180 m/min, the worst surface roughness value was obtained in all conditions.
- When the cutting temperature values at the cutting zone are examined, the lowest cutting temperature value was obtained with 101.1 °C under LN<sub>2</sub> cutting condition. The lowest cutting temperature of the MQL+LN<sub>2</sub> (132.4 °C), and MQL (197.9 °C) cutting conditions was observed at 120 m/min cutting speed. The LN<sub>2</sub> cutting condition provided a decrease in cutting temperature values at the rates of 23.65% and 48.91%, respectively, compared to MQL+LN<sub>2</sub>, and MQL cutting conditions.
- When the cutting speed increased from 120 to 180 m/min, the cutting temperature values tended to increase.
- Flank wear V<sub>B</sub> values were measured at a cutting speed of 180 m/min, under all cutting conditions, and end of the 16 min experimental time. The lowest V<sub>B</sub> value (0.170 mm) occurred on the cutting tool was reached under the MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition. The MQL+LN<sub>2</sub> hybrid cutting condition was followed by MQL (0.306 mm), and LN<sub>2</sub> (0.780 mm) cutting conditions, respectively. MQL+LN<sub>2</sub> cutting condition improved tool wear by 44.44%, and 78.21%, respectively, compared to MQL, and LN<sub>2</sub> cutting conditions.

When this study is evaluated in general, it is understood that hybrid cutting conditions, which combine the superior aspects of two different ecological cutting conditions, are promising for future studies. It is thought that especially MQL where tribological lubrication is provided and LN<sub>2</sub> cutting conditions where cooling is provided will provide important contributions to the sustainable manufacturing process.

## REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. F.T. Cheng, K.H. Lo, H.C. Man, A preliminary study of laser cladding of AISI 316 stainless steel using preplaced NiTi wire, *Materials Science and Engineering: A*, 380(1-2): 20-29, 2004.
2. A.E. Reiter, B. Brunner, M. Ante, J. Rechberger, Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 200(18-19): 5532-5541, 2006.
3. A. Yücel, Ç.V. Yıldırım, AA2024 alaşımının tornalanmasında nanoakışkan konsantrasyon oranı ve MQL parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(3): 18-32, 2020.
4. A. Çakır Şencan, A. Duran, U. Şeker, The effect of different cooling methods to hole quality and tool life in the drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(2): 1-13, 2020.
5. Ç.V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvak, Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknolojileri Dergisi*, 7(1): 466-476, 2019.
6. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2): 299-304, 2006.
7. Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, F. Erzincanlı, Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy Waspaloy, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(11): 4667-4681, 2017.
8. M.M.A. Khan, N. R. Dhar, Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 7(11): 1790-1799, 2006.
9. Ç.V. Yıldırım, Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL, *Tribology International*, 144: 106127, 2020.
10. A. Bagherzadeh, E. Kuram, E. Budak, Experimental evaluation of eco-friendly hybrid cooling methods in slot milling of titanium alloy, *Cleaner Production*, 289: 125817, 2021.
11. S. Akıncioğlu, H. Gökçaya, İ. Uygur, A review of cryogenic treatment on cutting tools, *International Advance Manufacturing Technology*, 78: 1609-1627, 2015.

- 12.I.S. Jawahir, H. Attia, D. Biermann, J. Duflou, F. Klocke, D. Meyer, S.T. Newman, F. Pusavec, M. Putz, J. Rech, V. Schulze, D. Umbrello, Cryogenic manufacturing processes,” CIRP Annals, 65(2): 713-736, 2016.
- 13.Z.S. Park, J. Kim, Y.Y. Woo, H. Lee, J.H. Kim, Y.H. Moon, Forced circulation of nitrogen gas for accelerated and eco-friendly cooling of metallic parts, Applied Sciences, 9(18): 3679, 2019.
- 14.Y. Yıldız, M. Nalbant, A review of cryogenic cooling in machining processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48(9): 947-964, 2008.
- 15.Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ş. Şirin, Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL,” Journal of Material Research and Technology, 9(2): 2079-2092, 2020.
- 16.A. Aramcharoen, Influence of cryogenic cooling on tool wear and chip formation in turning of titanium alloy, Procedia CIRP, 46: 83-86, 2016.
- 17.S. Debnath, M.M. Reddy, Q.S. Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review, Journal of Cleaner Production, 83: 33-47, 2014.
- 18.Ç.V. Yıldırım, Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316'nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(1): 326-341, 2019.
- 19.B. D. Jerold, M.P. Kumar, Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling, Materials and Manufacturing Process, 27(10): 1059-1065, 2012.
- 20.S. Ravi, P. Gurusamy, Experimental studies on the effect of LN2 cooling on the machining of tool steel, Materials Today: Proceedings, 33(7): 3292-3296, 2020.
- 21.W.V. Leadebal, A.C.A. de Melo, A. J. de Oliveira, N. A. Castro, Effects of cryogenic cooling on the surface integrity in hard turning of AISI D6 steel, Journal of the Brazilian Society Mechanical Science and Engineering, 40(1): 1-14, 2018.
- 22.M. Dhananchezian, M.P. Kumar, T. Sornakumar, Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts, Materials and Manufacturing Processes, 26(5): 781-785, 2011.
- 23.ISO 4287, Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters, International Organization for Standardization, 1997.
- 24.Ç.V. Yıldırım, Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625, Tribology International, 137: 366-378, 2019.
- 25.M.K. Gupta, Q. Song, Z. Liu, M. Sarıkaya, M. Jamil, M. Mia, V. Kushvaha, A.K. Singla, Z. Li, Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy, Sustainable Materials and Technologies, 26: e00218, 2020.
- 26.M.K. Gupta, Q. Song, Z. Liu, M. Sarıkaya, M. Jamil, M. Mia, N. Khanna, G.M. Krolczyk, Experimental characterisation of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy, Tribology International, 153: 106582, 2021.
- 27.Ş. Şirin, Sürdürülebilir imalat için Inconel X 750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 2020.
- 28.F. Zemzemi, J. Rech, W. Ben Salem, A. Dogui, P. Kapsa, Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI4142 treated steels, Journal of Materials Processing Technology, 209(8): 3978-3990, 2009.
- 29.G. Le Coz, D. Dudzinski, Temperature variation in the workpiece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718, International Advance Manufacturing Technology, 74: 1133-1139, 2014.