





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Alüminyum 6061-T651 Alaşımının Kaplamalı Kesici Uçlarla Frezelenmesinde Kesici Takım Aşınmasının Optimizasyonu

 Berat Serhat BEKTAŞ^a,  Gürcan SAMTAŞ^{b,*}

^a İmalat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gurcansamtas@duzce.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.971025

Öz

Bu çalışmada 80x80x30 mm ebatlarında alüminyum 6061-T651 alaşımına yüzey frezeleme işlemleri gerçekleştirilerek kesme parametrelerinin kesici takım aşınması üzerine etkileri araştırılmıştır. Yüzey frezeleme işlemi için; üç farklı kaplamaya sahip kesici uç (CVD tekniği ile TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplanmış, PVD tekniği ile TiALN-NANO kaplanmış ve PVD tekniği ile ALTiN kaplanmış) üç farklı kesme hızı (250, 350 ve 450 m/dak) ve üç farklı ilerleme oranı (0.15, 0.30 ve 0.45 mm/diş) kullanılmıştır. Deneyler kuru şartlarda yürütülüp kesme derinliği 0.5 mm olarak tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Deneysel tasarım ve optimizasyon için Taguchi metodu kullanılmış, Taguchi L₉ (3³) ortogonal dizisi seçilerek 9 deney yürütülmüştür. Her bir deney sonrası takım yan yüzey aşınmaları ölçülmüştür. Deneyler sonunda elde edilen değerler optimize edilmiş, varyans analizi (ANOVA), üç boyutlu grafikler ve regresyon metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneyler sonrası en düşük takım aşınması için kesme parametreleri, Taguchi metoduyla başarılı bir şekilde optimize edilmiştir. Taguchi analizi sonucu minimum aşınma değeri için elde edilen optimum kesme şartları; TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uç, 450 m/dak kesme hızı ve 0.30 mm/diş ilerleme oranı olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: AA 6061-T651, Yüzey frezeleme, Kesici takım aşınması, Optimizasyon, Taguchi metodu

Optimization of Cutting Tool Wear When Milling 6061-T651 Aluminum Alloy with Coated Inserts

ABSTRACT

In this study, the effects of cutting parameters on cutting tool wear were investigated by performing surface milling on 80x80x30 mm 6061-T651 aluminum alloy. Inserts with three different coatings (TiN-TiCN-Al₂O₃ coated by CVD technique, TiALN-NANO coated by PVD technique, and ALTiN coated by PVD technique), three different cutting speeds (250, 350, and 450 m/min), and three different feed rates (0.15, 0.30, and 0.45 mm/tooth) were used for the face milling process. The experiments were conducted in a dry setting and the depth of cut was kept constant at 0.5 mm in all experiments. The Taguchi method was used for the design and optimization of the experiments; Taguchi L₉ (3³) orthogonal array was selected and 9 experiments were conducted. Tool flank wear was measured after each run. The obtained results were optimized and evaluated using variance analysis (ANOVA), 3-D graphs, and regression method. After the measurements, cutting parameters were optimized successfully using the Taguchi method to achieve minimum tool wear. As a result of the Taguchi analysis, the optimum cutting conditions obtained for minimum wear value were determined as the TiN-TiCN-Al₂O₃ coated insert, 450 m/min cutting speed, and 0.30 mm/tooth feed rate.

Keywords: AA 6061-T651, Face milling, Cutting tool wear, Optimization, Taguchi method

I. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları günümüzde, havacılık, otomotiv ve havacılık sanayinde, plastik enjeksiyon kalıplarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Alüminyumun iyi olan birçok özelliklerinin yanında döküm ve mekanik özellikleri zayıftır. Bu özelliklerin iyileştirilebilmesi için bu malzemelere genellikle alaşım katılmaktadır. Bir mühendislik malzemesinin işlenebilirliği, kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler gibi birçok parametreye bağlıdır [2], [3]. Özellikle, takım aşınması, ürün kalitesinde önemli bir rol oynar ve işleme doğruluğunun değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Al-Zn alaşımları olarak bilinen alüminyum 7000 serileri yaygın bir şekilde havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır [4]. Yaşla sertleşebilen 7000 serisi alüminyum alaşımlarının, üstün ağırlık-mukavemet oranına, iyi korozyon ve aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir [5]. Ayrıca bu alaşımların işlenebilirlik açısından iyi performans gösterirler. Vakondios vd. [6], AA 7075-T6 alüminyum alaşımına cep frezeleme işlemi uygulayarak frezeleme stratejilerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Rao ve Shin karbit ve elmas kesiciler kullanarak alüminyum 7075-T6 malzemesine yüzey frezeleme işlemi uygulamışlardır. Deneylerde elde edilen sonuçlar talaş biçimi ve kesme kuvvetleri açısından değerlendirilmiştir [7]. 6000 serisi alüminyum alaşımları ise genelde, magnezyum, silikon ve bakır esaslı olup, bina materyallerinden otomobil mobilyalarına kadar üretim süreçlerinin hemen hepsinde kullanılabilir. Ayrıca bu alaşımların da işlenmesi kolaydır ve çökertme sertleşmesi uygulanabilir [8]-[10]. Campatelli ve Scippa alüminyum 6082-T4 alaşımının frezeleme kesme kuvvetleri katsayılarının tahmininde bulunmuşlardır [11]. Dimin vd. [12], TiALN kaplamalı kesici takımlarla Al 6061-T6511'i parmak frezeleme işlemi uygulayarak en ideal yüzey kalitesi için uygun kesme parametrelerini araştırmışlardır. Rahmati vd., alüminyum 6061-T6 alaşımının frezeleme nano soğutma sıvısı kullanarak işleme yüzeyinin şekil bilgisini incelemişlerdir [13]. Sayuti vd. alüminyum 6061-T6 alaşım için SiO₂ nano soğutma sıvısı kullanarak frezeleme yüzeylerinin şekil bilgisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 40x40x100 mm ölçülerinde alüminyum numuneleri ve iki ağızlı 10 mm çapa sahip karbit kesici takım kullanmışlardır [14]. Sukumar vd. CNC yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirerek alüminyum 6061 alaşımının işlenmiş yüzeyinden elde edilen yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmede Taguchi ve yapay sinir ağları yaklaşımı kullanmışlardır [15]. Tsai v.d. yaptıkları çalışmada, alüminyum 6060-T6 alaşımının frezeleme kesme kuvvetlerini ve kesme parametrelerini incelemişlerdir [16]. Singh vd., Al-6061 alaşımına frezeleme işlemi uygulayarak, talaş kaldırma oranını artırmak için kesme parametrelerini ve minimum yağlama parametresini Taguchi metoduyla optimize etmişlerdir [17]. Nathan v.d. 6061 alüminyum alaşımına minimum miktarda yağlama tekniği ile uçtan frezeleme işlemi gerçekleştirerek, yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır [18]. Pınar vd. yaptıkları çalışmada, 5083-H36 alüminyum alaşımının cep frezeleme işleminde klasik soğutma ile vorteks tip soğutma tipini birbirleriyle karşılaştırmışlardır [19]. Diğer taraftan Martini ve Morri yaptıkları çalışmada, EN AB – 43300 alüminyum alaşımına PVD ve CVD metotlarla kaplanmış karbit takımlarla yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirmişlerdir [20]. Dikshit vd. eğrisel uçlu parmak freze kullanarak Alüminyum 2014 – T6 malzemesini frezeleyerek kesme kuvvetlerini ölçmüşlerdir. Deneysel modelleme olarak yanıt yüzey metodunu kullanmışlardır [21].

Bu çalışmada, deneysel tasarım ve optimizasyon için Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel tasarım için Taguchi L9 ortogonal dizisi seçilerek 9 deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üç farklı kesici uç, üç farklı ilerleme ve kesme hızı kullanılarak yüzey frezeleme işlemi uygulanmıştır. Her bir deney sonrası, kesici uç yan yüzey aşınmaları ölçülmüştür. Sonuçlar, varyans analizi, üç boyutlu grafikler ve regresyon metodu kullanılarak yorumlanmıştır.

II. MALZEME VE YÖNTEM

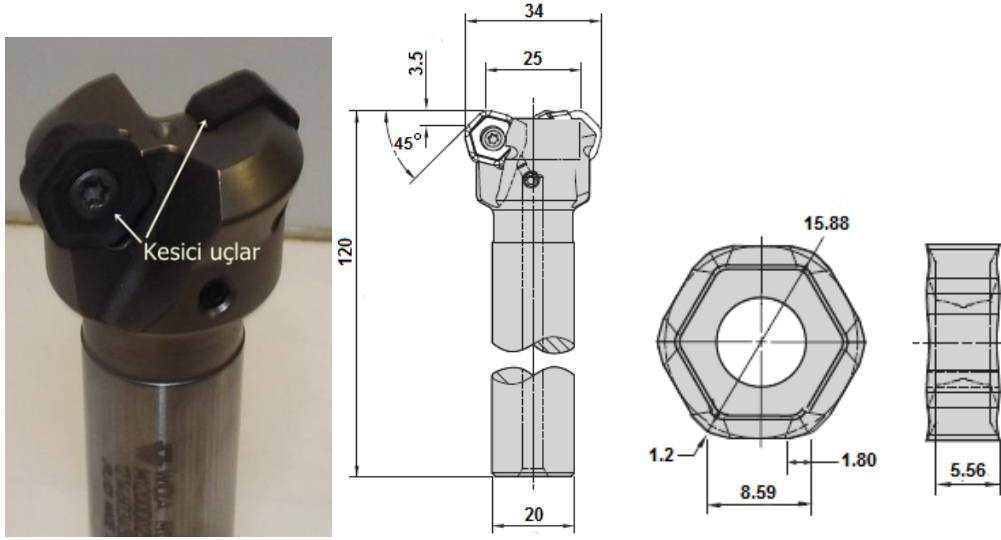
Frezeleme deneyleri, maksimum devri 10000 RPM olan DELTA SEİKİ marka 1050A model 3 eksenli dikey freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deney malzemesi olarak 80x80x30 mm ebatlarında alüminyum 6061-T651 alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan malzemeye ait teknik özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum 6061-T651 alaşımının özellikleri (Matweb)

Bileşen öğeleri özellikleri									
Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Diğer
95.8-98.6	0.04 -0.35	0.15 -0.40	0.7	0.8 -0.12	0.15	0.4 – 0.8	0.15	0.25	0.15

Mekanik özellikler					
Yoğunluk	Sertlik, Vickers	Çekme mukavemeti	Elastisite modülü	Yorulma mukavemeti	İşlenebilirlik
2.70 g/cm ³	107	310 Mpa	68.9 GPa	96.5 Mpa	%50

Frezeleme deneylerinde WIDIA kesici takım firmasına ait WK15CM kodlu CVD tekniği ile TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplanmış, TN6520 kodlu PVD tekniği ile TiAlN kaplanmış Nano ve WP25PM kodlu PVD tekniği ile AlTiN kaplanmış 12 kesme kenarına sahip hexagonal kesici uçlar kullanılmıştır. Takım tutucu olarak WIDIA firmasına ait iki ağızlı Victory M1200 mini takım tutucu kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Kullanılan takım tutucu ve kesici uçların detayları.

A. DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Kesici takım yan yüzey aşınma görüntüleri için Dino-Lite Pro2 AMT413ZT model, 240 kat büyütme özelliğine sahip polarize mikroskop kullanılmıştır. Görüntüler 50 kat büyütme ile alınmış, ölçümler Dino Capture 2.0 programı ile elde edilmiştir. Kesici takım aşınma görüntüleri 5 dakikalık işleme süresi sonunda çekilmiştir.

III. DENEYLER VE OPTİMİZASYON

Bu çalışmada deneysel tasarım ve optimizasyon için Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi yönteminin ilk adımı, kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametrelerine dayalı uygun bir ortogonal dizi seçmektir. Optimum kesme parametrelerini belirlemek ve bu belirlenmiş parametrelerin etkilerini analiz etmek için en uygun dizi [L9 (3³)] seçilmiştir. Deneylerden elde edilen aşınmalar için minimum değer arzu edildiğinden “En küçük en iyi” prensibine dayanan kalite karakteristiği seçilerek S/N (Sinyal gürültü oranı) oranları hesaplanmıştır. Deney parametrelerinin seviyeleri Tablo 1,

deneysel tasarım, deneysel sonuçlar ve aşınma değerleri için hesaplanan S/N oranları Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneysel tasarım için kesme parametreleri ve seviyeleri

Kesme parametreleri	Seviyeler		
	1	2	3
A Kesici uçlar (<i>Kt</i>)	TiN-TiCN-	TiALN-Nano	AlTiN-Multi Layer
B Kesme hızı (<i>V</i> , <i>m/dak</i>)	250	350	450
C İlerleme oranı (<i>f</i> , <i>mm/diş</i>)	0.15	0.30	0.45

Tablo 3. Deneylerden elde edilen aşınma değerleri ve S/N oranları

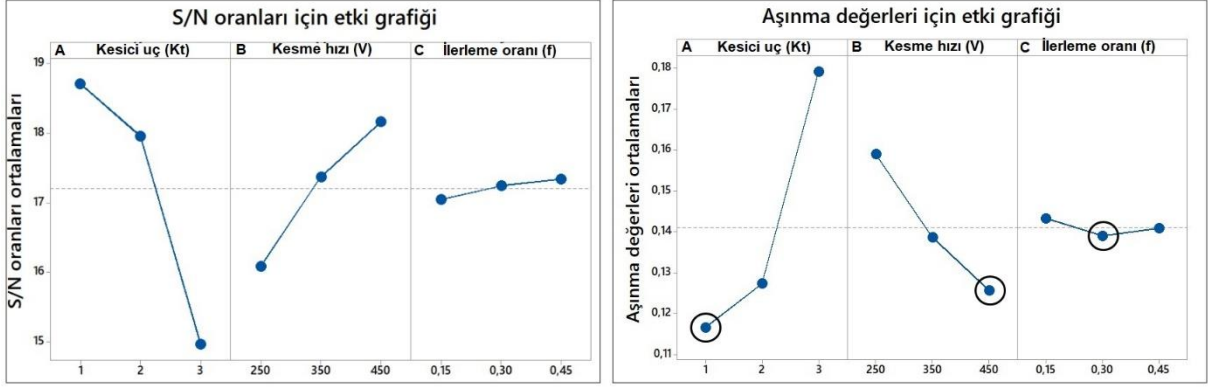
Deney no	Kesme parametreleri			Sonuçlar	
	A Kesici uçlar (<i>Kt</i>)	B Kesme hızı, <i>V</i> (<i>m/dak</i>)	C İlerleme, <i>f</i> (<i>mm/diş</i>)	Ua Aşınma (<i>mm</i>)	S/N (<i>dB</i>)
1	TiN-TiCN-Al ₂ O ₃	250	0.15	0.134	17.458
2	TiN-TiCN-Al ₂ O ₃	350	0.30	0.111	19.094
3	TiN-TiCN-Al ₂ O ₃	450	0.45	0.105	19.576
4	TiALN-Nano	250	0.30	0.147	16.654
5	TiALN-Nano	350	0.45	0.122	18.273
6	TiALN-Nano	450	0.15	0.113	18.938
7	AlTiN-Çok katmanlı	250	0.45	0.196	14.155
8	AlTiN- Çok katmanlı	350	0.15	0.183	14.751
9	AlTiN- Çok katmanlı	450	0.30	0.159	15.972

Yürütülen 9 deney sonrası aşınma değerleri S/N oranı ortalama değeri 17.207 dB olarak bulunmuştur. Tablo 4’de kesme parametreleri, seçilen ortogonal diziye göre farklı seviyeler ve olası etkileri göz önünde bulundurularak ayırt edilmiştir. Bu tablo optimum parametreye göre Taguchi tahmin değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Tablo 4. Herbir seviye için S/N oranları ortalamaları

Kesme parametreleri	Seviyeler			Delta
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
S/N oranları (dB) (Aşınma, Ua)				
<i>Kt</i>	18.71	17.95	14.96	3.75
<i>V</i>	16.09	17.37	18.16	2.07
<i>f</i>	17.05	17.24	17.33	0.29

Taguchi metodunda optimum değer hesaplamasında önemli olan optimum seviyeleri belirlemektir. Optimum seviyeler, L9 ortogonal dizi tarafından üretilen kombinasyonların sonuçlarına göre parametrelerin farklı seviyelerinin minimum değeri esas alınarak belirlenmektedir.



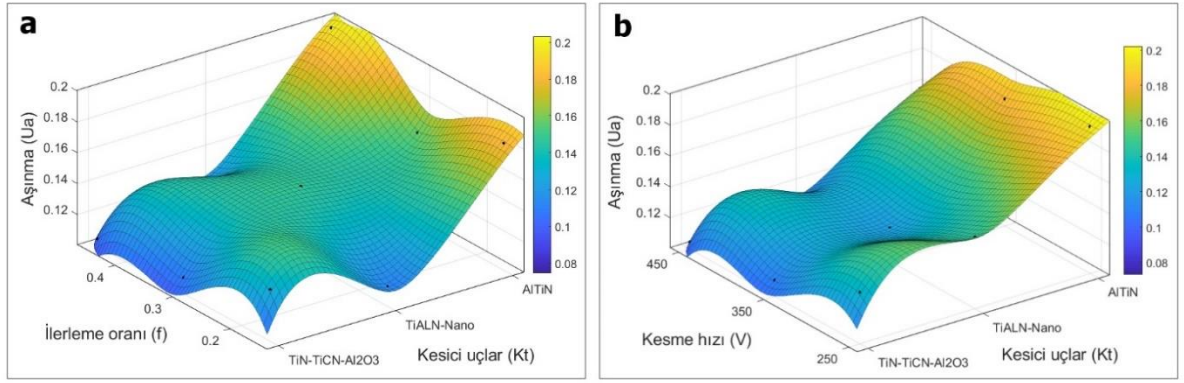
Şekil 2. Kesme parametreleri için ana etki grafikleri

Kesme parametreleri ve seviyelerine göre hesaplanan ortalama deney sonuçlarının dağılımları Şekil 2'de gösterilmektedir. Çalışmada “En küçük en iyi” karakteristik seçildiğinden, kesme parametrelerinin optimal kombinasyonunu belirlemek için deneysel sonuçlara ait tüm seviyeler için en düşük ortalama değerleri değerlendirilmiştir. Aynı şekilde S/N oranları için de en büyük değerler dikkate alınabilir. Buna göre, takım aşınması için optimal kombinasyon $A_1B_3C_2$ ($A_1 = \text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç, $B_3 = 450$ m/dak kesme hızı, $C_2 = 0.30$ mm/diş ilerleme oranı) olarak elde edilmiştir.

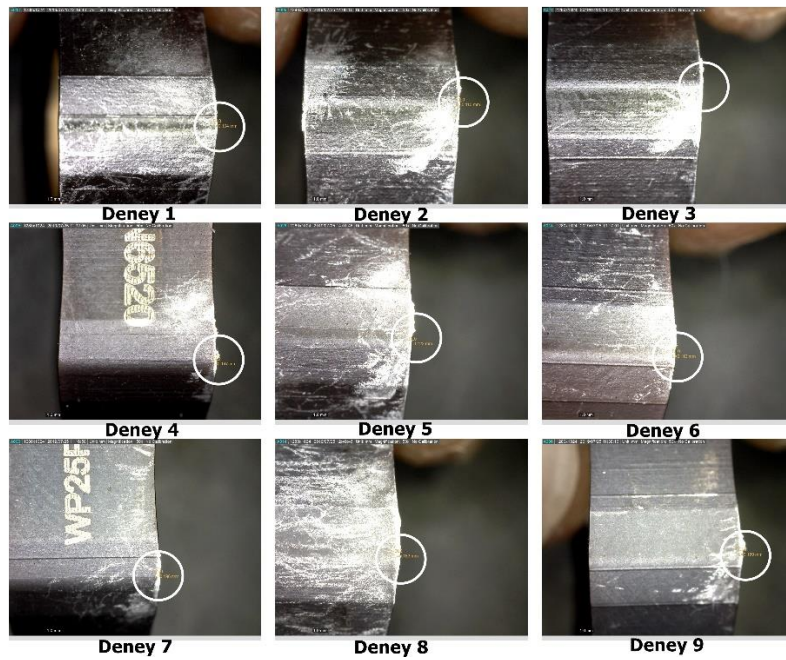
IV. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

A. KESME PARAMETRELERİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

Şekil 3’de kesme parametrelerinin aşınma üzerine etkilerini gösteren üç boyutlu grafikler ve Şekil 4’de optik mikroskopla 50 kat büyütülerek alınmış aşınma görüntüleri verilmiştir. Şekil 3a’da ilerleme oranı ve kesici uçların aşınma üzerine etkilerini gösteren grafik verilmiştir. Bu grafikte en düşük aşınma değeri 0.30 mm/diş ilerleme ve TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uçta olmuştur. Bu durum Taguchi optimizasyon değerleri ile aynıdır. Kaplamalar, karbür takımların difüzyon aşınmasına, oksidasyon aşınmasına ve sıcak sertlik kabiliyetine karşı direnci artırır [22]. Üç farklı kaplama malzemesiyle kaplanmış ilk kesici uçta aşınmaya karşı direncinin yüksek olması beklenen bir durumdur. Diğer taraftan Şekil 3a’da AlTiN kaplamalı kesici uçta ise aşınma değerlerinin arttığı görülmektedir. Özellikle 0.4 mm/diş ilerlemede aşınma değerleri daha da artmıştır. Alüminyum titanium nitridür (AlTiN) kaplama, bileşiminde alüminyum ve titanium nitridür barındırır. TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplama ise bileşiminde, titanium karbo nitridür, titanium nitridür ve alüminyum oksit barındırır. Dolayısıyla bünyesinde daha çok malzeme barındıran TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplama, diğerine göre daha yüksek performans göstermesi beklenen bir durumdur. Titanyum karbür ve alüminyum oksit yüksek aşınma direnci sağlayan, kimyasal olarak başka malzemelerle reaksiyona girmeyen, takım ile talaş arasında kimyasal ve ısıl bir kalkan oluşturan, çok sert malzemelerdir [23], [24]. Dolayısıyla bu durum, TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamanın diğer kaplamalara göre daha sert bir yapı sergilediğine atfedilebilir.



Şekil 3. Kesme parametrelerinin aşınma üzerine etkileri ;(a) Kesici uçlar ve ilerlemenin aşınma üzerine etki grafiği, (b) Kesme hızı ve kesici uçların aşınma üzerine etki grafiği



Şekil 4. Aşınma görüntüleri (büyültme: 50x)

Şekil 3b'de, kesme hızı ve kesici uçların aşınma üzerine etkilerini gösteren üç boyutlu grafik verilmiştir. Burada da en iyi performansı , TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uç vermiştir. En düşük aşınma değeri ise 450 m/dak kesme hızı ve , TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı uçta olmuştur. Bu durum da Taguchi optimize değerlerle aynıdır.

B. ANOVA KULLANILARAK VERİ ANALİZİ

Kesici uç, kesme hızı ve ilerlemenin aşınma üzerine etkileri ANOVA metodu ile analiz edilmiş, deney sonuçları %95'lik bir güven düzeyinde değerlendirilmiştir. ANOVA değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Varyans analizi sonuçları

Kesme parametreleri	Serbestlik derecesi (DoF)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Faktör etkisi (%)
Aşınma (U _a , mm)						
Kesici uç (Kt)	2	0.006745	0.003372	93.39	0.011	78.99
Kesme hızı (V)	2	0.001694	0.000847	23.45	0.041	19.83
İlerleme oranı (f)	2	0.000028	0.000014	0.39	0.719	(0.32)
Hata (e)	2	0.000072	0.000036			0.86
Toplam	8	0.008539				100

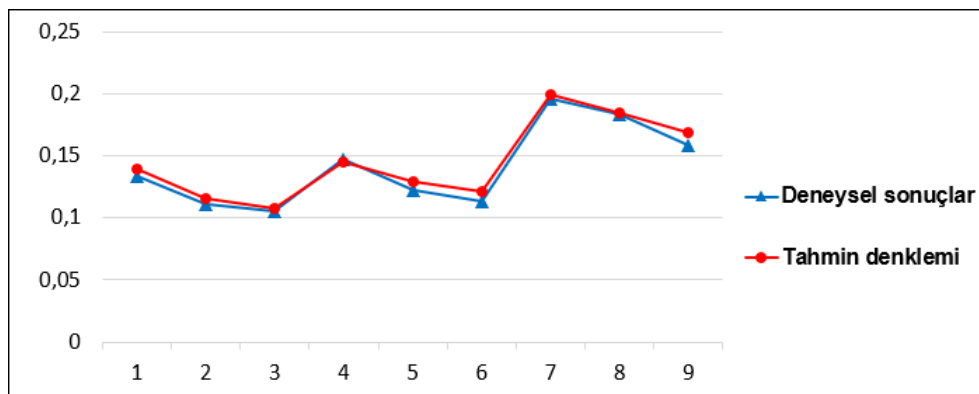
Tablo 5’de her bir parametre serbestlik derecesi ile hata serbestlik derecesine göre (2, 2) F değeri (F=19) karşılaştırıldığında ilerleme oranının aşınma üzerine etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Yüzde olarak faktör etkisinde de görüldüğü gibi ilerlemenin yüzde katkısı çok düşüktür. Bu durumda aşınma üzerine en etkili faktör %78.99 ile kesici uçlar olmuştur. Bu faktörü %19.83 ile kesme hızı takip etmektedir. Bu sonuç üç boyutlu grafikler ile de doğrulanmaktadır (Şekil 3).

C. REGRESYON ANALİZİ VE MATEMATİKSEL MODEL

Çoklu regresyon analizi, kontrol faktörlerinin her kombinasyonu ile deneysel tasarımlar yoluyla elde edilen sürekli bağımlı değişkenlerin tahmin denklemlerini türetmek için kullanılmaktadır [25]. İkinci dereceden regresyon modeli için öngörülen eşitlik Eş. 1’de verilmiştir;

$$U_{aT} = 0.2610 - 0.0513Kt - 0.000423V - 0.092f + 0.02067Kt^2 + 0.0000004V^2 + 0.141f^2 \quad (1)$$

Denklemden U_{aT}, aşınma değerleri için kesme parametreleri ile oluşturulan tahmin denklemdir. Burada Kt, kesici uçlar olup 1, 2 ve 3 sayı numaraları ile denklemden kullanılmalıdır. Her bir numaranın karşılığı Tablo 2’de görülmektedir. Aşınma tahmin değerleri için diğer kesme parametrelerinde rastgele değerler kullanılabilir. Regresyon analizi ile elde edilen denklemin R² değeri 0.99 (%99) olarak hesaplanmıştır. Şekil 5’de mevcut parametreler kullanılarak deneysel sonuçlar ve tahmin denkleminin sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. Deneysel sonuçlar ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5’de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ile denklem 1 ile elde edilen değerler neredeyse örtüşmektedir. Diğer bir deyişle regresyon analizi ile elde edilen denklem gerçek değerleri %99 oranında doğrulamaktadır.

D. DOĞRULAMA DENEYLERİ

Doğrulama deneyleri, Taguchi yönteminin son adımıdır. Doğrulama deneylerinin amacı, analiz aşamasında elde edilen sonuçların geçerliliğini doğrulamaktır. kontrol faktörlerinin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak; $A_1B_3C_2$ için Taguchi metoduna göre tahmin aşınma değeri Ua_p aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [26].

$$Ua_p = 10^{-(A_1+B_3+C_2-2Ua_{S/N})/20} \quad (2)$$

Denklemlerde; A_1 , B_3 ve C_2 optimum seviyelere ait S/N oranlarıdır. $Ua_{S/N}$, aşınma değerleri S/N oranlarının ortalamasıdır. Denklem 2 kullanılarak Taguchi tahmin değeri (Ua_p), 0.103 mm olarak elde edilmiştir. Taguchi metodunda doğrulama deneylerinin kalite özelliğini doğrulamak için, güven aralığı (CI) kullanılır. Optimum değerlerin tahmin edilmesinde kullanılan CI aşağıda yer alan eşitlikle hesaplanır [27].

$$CI_{Ua} = \sqrt{F_{\alpha;1,V_e} V_{ep} \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (3)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (4)$$

Denklem 3'de, $F_{\alpha;1,V_e}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi, $1 - \alpha$ güven aralığı, V_e hatanın serbestlik derecesi (Tablo 5), V_{ep} hatanın varyansı (Tablo 5), r doğrulama deney sayısı (3) ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır. Denklem 4'de, N toplam deney sayısını (9), V_t , Tablo 5 dikkate alınarak ortalamanın hesaplandığı işlem parametrelerine ait toplam serbestlik derecesidir (6). Buna göre $n_{eff} = 1.29$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3 ve 4 kullanılarak $CI_{Ua} = 0.027$ olarak bulunmuştur. Bu çalışmada optimum parametreler kullanılarak 3 adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Buna göre Taguchi optimum tahmin değeri dikkate alınarak doğrulama deneyleri ortalaması, 0.076-0.13 μm (0.103 ± 0.027) aralığında olması umulmaktadır. Optimum parametreler kullanılarak yürütülen 3 doğrulama deneyinin ortalaması 0.102 mm (0.102, 0.101 ve 0.104 mm), olarak elde edilmiştir. Bu durumda doğrulama deneyleri ortalaması hesaplanan güven aralığı içerisinde gerçekleşmiştir. Böylece, %95 güven aralığında Taguchi yöntemi kullanılarak, optimizasyon başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tablo 6'da, Taguchi metodu kullanılarak elde edilen öngörülen değerlerle deney sonuçlarının karşılaştırmasını gösterilmiştir. Tahmin edilen değerler ve deneysel değerler birbirine çok yakın çıkmıştır. Güvenilir istatistiksel analiz için hata değerleri %20'den az olmalıdır [26].

Tablo 6. Optimum ve rastgele seviyelerin deneysel ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması

Seviyeler	Deneysel sonuçlar	Taguchi tahmin sonuçları	Hata (%)
$Ua, (mm)$			
$A_1B_3C_2$ (Optimum)	0.102	0.103	0.97
$A_2B_2C_3$ (Rastgele seçim-1)	0.122	0.122	0
$A_2B_3C_1$ (Rastgele seçim-2)	0.113	0.115	1.7
$A_1B_3C_3$ (Rastgele seçim-3)	0.105	0.102	2.85

Tablo 6'da görüldüğü gibi rastgele seçim kombinasyonlarına ait denklem 2 kullanılarak hesaplanan tahmin değerlerinin hata ortalaması %1.52 olarak elde edilmiştir. Bu sonuca göre Taguchi tahmin denklemini kullanılarak elde edilecek değerler %95 güven aralığı içerisinde olacaktır.

V. SONUÇLAR

Alüminyum 6061 alaşımının, kaplamalı kesici uçlarla frezelenmesinde kesme şartlarının aşınma üzerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, deney sayısının azaltılması ve optimizasyon için Taguchi metodu kullanılmıştır. 27 tam faktoriyel tasarım yerine 9 deney yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Değerlerini minimize etmek için yapılan optimizasyonda, kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu $A_1B_3C_2$ ($A_1 = \text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç, $B_3 = 450$ m/dak kesme hızı, $C_2 = 0.30$ mm/diş ilerleme oranı) olarak elde edilmiştir.
- İstatistiksel analiz sonucunda, kesici uç aşınmasına etki eden en etkili faktör %78.99 ile kesici uçlar olmuştur. Bu faktörü %19.83 ile kesme hızı takip etmektedir
- Taguchi metoduyla elde edilen optimum kombinasyonlarla yürütülen doğrulama deneylerinde deneysel sonuçlara göre en düşük takım aşınması ölçülmüştür.
- Kesici uç aşınması için ikinci dereceden regresyon modeline göre elde edilen denklemin kolerasyon katsayısı 0.99 ($R^2 = \%99$) çıkmıştır.
- Doğrulama deneyleriyle elde edilen sonuçlar ile tahmin değerleri arasındaki hata oranı çok küçük çıkmış, bu değerler %95 güven aralığının içinde yer almıştır. Ayrıca rastgele olarak seçilen parametrelerle elde edilen deneysel ve tahmin sonuçları için de aynı durum söz konusudur.
- Minimum kesici uç aşınması için en iyi performansı TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uç göstermiştir.
- Varyans analizinde görüldüğü gibi bu malzemenin frezelenmesinde kesici uç aşınmasında ilerlemenin etkisiz olduğu görülmüştür. Farklı çalışmalarda kaplamasız kesici uçlarla, kaplamalı uçlar karşılaştırılarak bu durum araştırılabilir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde Taguchi metodu, alüminyum 6061-T651 alaşımının frezelenmesinde üretim maliyetlerinin ve üretim zamanının azaltılmasında güvenilir bir yöntemdir. Bu çalışmada regresyon analizi ile bulunan tahmin denklemi ile aynı kesici uçlar kullanılarak (1, 2 ve 3 sayıları ile) farklı kesme hızı ve ilerleme oranlarında deney yapmadan aşınma değerleri %99 güvenilirlikte hesaplanabilir. Çalışmada kesici uç aşınmasına ilerleme oranının etkisi istatistiksel analiz F oranı değerlendirmesine göre yoktur. Bu durum aynı malzemenin kaplamalı ve kaplamasız uçlarla işlenmesi ile yapılacak yeni çalışmada incelenebilir. Ayrıca başka bir çalışmada malzemeye kriyojenik işlem uygulanarak yine kaplamalı uçlarla işlenebilirlik performansı incelenebilir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. (Proje numarası: 2019.06.06.910).

VI. KAYNAKLAR

- [1] J. Hirsch, B. Skrotzki, and G. Gottstein, *Aluminium Alloys, Their Physical and Mechanical Properties*, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2008, pp. 2286.
- [2] J. Kechagias, C. K. Ziogas, M. Pappas and I. Ntziatzias, "Parameter optimization during finish end milling of Al alloy 5083 using robust design", *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2011)*, London, 2011, pp. 1.

- [3] J. Kechagias, G. Petropoulos, V. Iakovakis and S. Maropoulos, “An investigation of surface texture parameters during turning of a reinforced polymer composite using design of experiments and analysis”, *Int. J. Experimental Design and Process Optimisation*, vol. 1, no. 2/3, pp. 164–177, 2009.
- [4] A. R. Meyers and T. J. Slattery, *Basic Machining Reference Handbook*, New York: Industrial Press, 2001.
- [5] Y. Chen, Y. Yang, Z. Feng, B. Huang, and X. Luo, “Surface gradient nanostructures in high speed machined 7055 aluminum alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 726, pp. 367-377, 2017.
- [6] D. Vakondios, P. Kyratsis, S. Yaldız and A. Antoniadis, “Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy AL7075-T6”, *Measurement*, vol. 45, pp. 1480-1488, 2012.
- [7] B. Rao and Y.C. Shin, “Analysis on high – speed face-milling of 70075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters”, *International J. of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 1763-1781, 2001.
- [8] Taber (2022, April 8), *6000 Series Aluminum Alloys* [Online]. Available: <http://www.taberextrusions.com>
- [9] R. A. Gonçalves and M.B. Da Silva, “Influence of Copper Content on 6351 Aluminum Alloy Machinability”, *Procedia Manufacturing*, vol. 1, pp. 683-695, 2015.
- [10] D. J. Lloyd, “Some aspects of the metallurgy of automotive al alloys”, *Materials Forum*, vol. 4, no. 28, pp. 107-117, 2004.
- [11] G. Campatelli and A. Scippa, “Prediction of milling force coefficients for aluminum 6082-T4”, *Procedia CIRP I*, pp. 563-568, 2012.
- [12] S.F. Dimin , T.J.S. Anand, R. Jamli and A. Kamely, “Surface quality investigation of Al 6061-T6511 using TiAlN soated milling tool”, *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, vol. 10, no. 4, pp. 55-59, 2010.
- [13] B. Rahmati, A.A.D. Sarhan and M. Sayuti, “Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nano lubrication in end milling machining”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 685-691, 2014.
- [14] M. Sayuti, O.M. Erh, A.A.D. Sarhan and M. Hamdi, “Investigation on the morphology of the surface in end milling of aerospace AL6061-T6 for novel uses of SiO₂ nano lubrication system”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 655-663, 2014.
- [15] M.S. Sukumar, P.V. Ramaiah and A. Nagarjuna, “Optimization and Prediction of Parameters in Face Milling of Al-6061 Using Taguchi and ANN Approach”, *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 365–371, 2014.
- [16] M.Y. Tsai, S.Y. Chang, J.P. Hung and C.C. Wang, “Investigation of milling cutting forces and cutting coefficient for aluminum 6060-T6”, *Computers and Electrical Engineering*, pp. 1-11, 2015.

- [17] K. Singh, A.K. Singh and K.D. Chattopadhyay, “Effect of machining parameters and MQL parameter on material removal rate in milling of Aluminium alloy”, *Advances in Production and Industrial Engineering*, pp. 359-368, 2020.
- [18] D. Nathan, D. Elilraja, T. Prabhuram and S.P. Singh, “Experimental investigation of surface roughness in end milling of AA6061 alloy with flooded cooling and minimum quantity lubrication (MQL) technique”, *Trends in Manufacturing and Engineering Management*, pp. 649-659, 2020.
- [19] A.M. Pınar, S. Filiz and B.S. Ünlü, “A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, pp. 1431-1440, 2016.
- [20] C. Martini and A. Morri, “Face milling of the EN-AB-43300 aluminum alloy by PVD and CVD coated cemented carbide inserts”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 29, pp. 662-673, 2011.
- [21] M.K. Dikshit, A.B. Puri and A. Maity, “Experimental study of cutting forces in ball end milling of Al2014-T6 using response surface methodology”, *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 612-622, 2014.
- [22] Davim J. P., *Machinability of Advanced Materials*, England: John Wiley&Sons, 2014.
- [23] İ. Demirayak, “Kesme parametreleri, ve kaplama tabakasının talaş kaldırma işlemine etkileri,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi Bursa, Türkiye, 2006.
- [24] Surftech (2021, July 12), *TiALN futura nano coating brochures*, *Surface Technology Coatings, Suttontools*, [Online]. Available: <http://www.surftech.com.au>
- [25] S. Korucu, “The effects of sharpened tools on tool flank wear-surface roughness and optimization of cutting parameters in milling Vanadis 4E powder metallurgical tool steel”, *Sādhanā*, vol. 45, no. 137, pp. 1-13, 2020.
- [26] F. Kara, “Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20 + S plastic-mold steel”, *Mater. Tehnol. Mater. Technol.* vol. 52, no. 2, pp. 195–200, 2018.
- [27] T. Kıvak, “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, *Measurement*, vol. 5, pp. 19–28, 2014.