



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Temperlenmiş Alüminyum 5754 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu

Gürcan SAMTAŞ<sup>a,\*</sup>, Salih KORUCU<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mekanik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>b</sup> İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

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

### ÖZET

Alüminyum alaşımları günümüzde, yüksek dayanım ve ağırlık oranı, iyi korozyon ve yorulma direnci nedeniyle, otomotiv ve havacılık sanayinde, plastik enjeksiyon kalıplarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 80x80x30 mm ebatlarında 5754-H111 temperlenmiş alüminyumun alaşımına, kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlarla yüzey frezeleme işlemi uygulanmış ve yüzey frezeleme işlemi esnasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneilerde Taguchi L<sub>27</sub> ortogonal dizini ile üç farklı kesici uç (Kaplamasız, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN kaplamalı, TiAlN Nano kaplamalı), kesme hızı (250, 350, 550 m/dak), ilerleme oranı (0.1, 0.2, 0.35 mm/diş) ve üç farklı kesme derinliği (1, 1.5, 2 mm) kullanılmıştır. Deneiler sonunda elde edilen değerler, sinyal-gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA), üç boyutlu grafikler ve regresyon metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneilerden sonra en düşük yüzey pürüzlülüğü; kaplamasız kesici uç, 1 mm kesme derinliği, 350 m/dak kesme hızı ve 0.35 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir. Bu kesme şartları için yüzey pürüzlülük değerleri hesaplamalarda 0.26 µm olarak bulunmuş, doğrulama deneilerinde 0.29 µm olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** AA 5754, Yüzey pürüzlülüğü, Yüzey frezeleme, Taguchi metodu, Optimizasyon

## The Optimization of Cutting Parameters Using Taguchi Method in Milling of Tempered Aluminum 5754 Alloy

### ABSTRACT

Aluminum alloys have been widely used in plastic injection molds in the automotive and aerospace industries due to their high strength and weight ratio, and good corrosion and fatigue resistance. In this study, 5754-H111 tempered aluminum alloy piece with 80x80x30 mm dimensions was machined with face milling operation using coated and uncoated inserts. The effects of cutting parameters on surface roughness during face milling were investigated. In the experiments, different inserts (uncoated, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN coated, TiAlN Nano coated), cutting speeds (250, 350, 550 m/min), feed rates (0.1, 0.2, 0.35 mm/tooth) and cutting depths (1, 1.5, 2 mm) — each having three conditions — were used with the Taguchi L<sub>27</sub> orthogonal array. The values obtained at the end of the

experiments were evaluated using signal-to-noise ratio (S/N), variance analysis (ANOVA), three-dimensional graphs, and regression analyses. The minimum surface roughness was obtained using the uncoated insert at 1 mm cutting depth, 350 m/min cutting speed and 0.35 mm/tooth feed rate. The surface roughness values for these cutting conditions were found as 0.26  $\mu\text{m}$  in the calculations and measured as 0.29  $\mu\text{m}$  in the verification experiments.

*Keywords: AA 5754, Surface roughness, Face milling, Taguchi method, Optimization*

## I. GİRİŞ

**F**rezeleme işlemlerinde doğru ölçülerin elde edilmesine ilişkin belli problemlerin ortaya çıkmasının yanı sıra, en büyük problemlerden biri üretilen mamulün işlevsel fonksiyonuna uygun yüzey ve yüzey pürüzlülüğü elde etmektir. Kaliteli yüzey elde etmek, ticari ve teknolojik olarak birçok nedenden ötürü önemlidir. Bir mühendislik malzemesinin işlenebilirliği, takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü gibi unsurlar göz önünde bulundurularak işleme süreçlerine uygulanabilirliği anlamına gelmektedir. Özellikle, yüzey pürüzlülüğü ürün kalitesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır ve işleme hassasiyetinin değerlendirilmesinde büyük önem taşıyan bir parametredir. Bu nedenle, işleme operasyonlarında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu ve öngörüsü, son yıllarda birtakım araştırmacıların çalışma odağı olmuştur [1-3]. Yüzey pürüzlülüğü, kesme hızı, ilerleme hızı, kesici takım geometrisi, iş parçasının mikro yapısı, malzemeye uygulanan ısıl işlemler, kesici takımlara uygulanan ısıl işlemler ve takım tezgahının rijitliği de dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri, Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilebilir.

Vakondios vd. yaptıkları çalışmada; AA 7075-T6'ya küresel parmak freze uçları kullanılarak, frezeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış ve freze stratejileri için oluşturulan tüm modellerin istatistiksel geçerliliği deneysel olarak doğrulanmıştır [4]. Kuram ve Özçelik, AA 7075 malzeme ve küresel uçlu parmak freze kesici takımları kullanarak mikro freze işlemlerini yürütmüşlerdir. Ayrıca, Taguchi tabanlı gri ilişki analizi kullanarak kesme parametrelerini optimize etmişlerdir [5]. Rubio vd. 90 mm çapında AA 7050 alaşım çubukları kullanılarak tornalama operasyonlarında, işleme boyunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmıştır [6]. 6000 serisi alüminyum alaşımları (AA) genellikle magnezyum alaşımı, silikon ve bakır esaslı olup otomobilden yapı malzemeleri ile ilgili neredeyse tüm üretim süreçlerinde kullanılabilirler. Bu alaşımlar kolaylıkla işlenebilir ve çökeltme sertleşmesi uygulanabilir [7-9]. Dinim vd. en iyi yüzey kalitesi için uygun kesme parametrelerini araştırmış ve AA 6061-T6511 malzeme üzerine, kaplamalı kesici takımlar ile frezeleme işlemleri gerçekleştirmiştir [10]. Yüzey pürüzlülüğünü istatistiksel olarak inceleyen Kadirgama vd., Tepki Yüzey Metodu kullanarak AA 6061-T6'nın işlenmesinde, minimum yüzey pürüzlülüğü için matematiksel tahmin modeli elde etmişlerdir [11]. Baharudin vd. AA 6061 yaptıkları çalışmada, yüzey pürüzlülüğü için 884 rpm iş mili hızı, 243 mm/dak ilerleme oranı ve 0° eksenel talaş açısı gibi optimize edilmiş parametreler kullanılmış ve çalışma S/N grafiği ile desteklenmiştir [12]. Durmuş, kaplamasız karbürü kesici takımlarla AA 6013 malzeme üzerine parmak frezeler ile deneyler yapmıştır. Çalışmasında, yaşlanma süreci, kesme hızı, ilerleme oranı, eksenel kesme derinliği ve dairesel kesme derinliği gibi beş farklı kesme parametreleri ile Taguchi'nin  $L_{16}$  dizinini kullanarak yüzey pürüzlülüğü için uygun kesme parametrelerini araştırmıştır [13]. Pınar, AA 5083 malzeme üzerine cep işlemede minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için deneysel tasarımda için belirlenen faktör seviyeleri ile yüzey pürüzlülüğü üzerindeki işlem parametrelerinin etkilerini araştırmış ve  $L_{27}$  dizinine dayalı olarak yapılan deneyler ANOVA ve sinyal-gürültü oranları ile değerlendirmiştir [14]. Kıvık yaptığı çalışmada, PVD TiAlN ve CVD TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı kesici uçlar kullanarak, Hadfield çeliğinin frezelemesinde Taguchi yöntemi kullanarak yüzey pürüzlülüğü ve yan yüzey aşınmasını optimize etmiş ve bu

malzemenin işlenebilirliğini değerlendirmek için ayrıca regresyon analizi uygulamıştır. Çalışmada Taguchi'nin L<sub>18</sub> ortogonal dizisini kullanmış, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yan yüzey aşınması üzerine etkilerini incelemek için ANOVA kullanmıştır [15]. Yıldırım vd. yaptıkları çalışmada nikel esaslı Waspaloy süper alaşımın frezelenmesinde sürdürülebilir işlemeye katkı sağlayacak minimal yağlama miktarı parametrelerini belirlemeye yönelik bir araştırma yapmışlardır. Frezeleme işleminde kaplamasız karbür uçlar ve kesme yağı olarak mineral, sentetik, mineral-sentetik ve bitki esaslı yağları kullanmışlardır. Çalışmada kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği sabit tutularak minimal yağlama miktarının takım ömrü ve kesme kuvveti üzerine etkileri Taguchi L<sub>16</sub> ortogonal dizisi kullanılarak optimize edilmiştir [16]. Kara yaptığı çalışmada, DIN 1.2344 takım çeliğinin tornalanmasında takım yan yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etki eden kesme parametrelerini Taguchi metodu kullanarak optimize etmiştir. Çalışmasında, Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal dizi kullanmış, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve yan yüzey aşınması üzerine etkilerini ANOVA ile araştırmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar için çoklu regresyon analizi uygulayarak tahmin denklemlerini elde etmiştir [17]. Diğer benzer bir çalışmada Kara ve Öztürk, DIN 1.2738 çeliğinin tornalanmasında kesici takım, kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım yan kenar aşınmasına etkilerini istatistiksel olarak Taguchi metodu ile incelemiştir. Çalışmalarında Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizisini kullanarak minimum yüzey pürüzlülüğü ve yan kenar aşınması için kesme parametrelerini optimize etmişlerdir. Kesme parametrelerinin etkileri ANOVA ile belirlenmiş optimizasyonun doğruluğunu doğrulama deneyleriyle test edilmiştir [18]. Kara yaptığı çalışmada, AISI P20+S plastik kalıp çeliğinin bitirme frezeleme işleminde kesme parametrelerinin performansını incelenmiştir. Çalışmada Taguchi metodu kullanılarak deney sayısı azaltılmıştır. Taguchi L<sub>8</sub> ortogonal dizisi kullanılarak yapılan çalışmada deneysel sonuçlar, ANOVA, S/N oranları ve çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Yapılan optimizasyon sonrası en iyi yüzey pürüzlülüğü için kesme şartları; 150 m/da kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme, 0,16 mm kesme derinliği ve ıslak soğutma metodu olmuştur [19].

Bu çalışmada, temperlenmiş 5754-H111 alüminyum alaşımının frezelenmesinde kesici uç, kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme oranı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Taguchi metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Yürütülen deneylerde Taguchi L<sub>27</sub> ortogonal dizisi kullanılmış, yapılan optimizasyonla en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca deney sonuçları; sinyal gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA) ve üç boyutlu grafikler kullanılarak yorumlanmış, regresyon analizi ile %95 güven seviyesinde yüzey pürüzlülüğü için matematiksel model çıkartılmıştır. Çalışma sonunda en uygun kombinasyonlar için doğrulama deneyleri yapılmış, optimize edilen parametrelerin kalite kayıplarını ne kadar azalttığı tespit edilerek optimizasyonun işleme süreci üzerindeki performansı test edilmiştir.

## II. DENEYSEL DETAYLAR

### *A. DENEYSEL YÖNTEM*

Deneylerde WIDIA kesici takım firmasına ait THM-U kodlu kaplamasız, TN5515 kodlu CVD tekniği ile kaplanmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN kaplamalı ve TN6525 kodlu PVD tekniği ile kaplanmış 12 kesme kenarına sahip kesici uçlar kullanılmıştır. Takım tutucu olarak WIDIA firmasına ait iki ağızlı Victory M1200 mini takım tutucu kullanılmıştır. Deney numunesi, 80x80x30 mm ebatlarında temperlenmiş 5754-H111 (AlMg<sub>3</sub>) alüminyum alaşımıdır. 5754-H111 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** 5754-H111 alüminyum alaşımına ait özellikler

<i>Kimyasal Bileşimi (%)</i>										
Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Mn+Cr	Diğer
Denge	0,40	0,40	0,10	0,50	3,6	0,20	0,30	0,15	0,60	0,15
<i>Fiziksel Özellikleri</i>										
Yoğunluk	Ergime noktası	Isıl genleşme			Elastik modülü	Isıl iletkenlik		Elektrik öz direnci		
2,66 g/cm <sup>3</sup>	600 °C	24x10 <sup>-6</sup> / K			68 GPa	147 W/m.K		0,049x10 <sup>-6</sup> Ωm		
<i>Mekanik Özellikler</i>										
Akma Mukavemeti (Min-Maks.)	Çekme mukavemeti (Min-Maks.)		Uzama (%50)			Brinell sertliği				
80-100 MPa	190-215 MPa		24			44 HB				

Kesme parametrelerinin belirlenmesinde kesici takım üreticisinin katalog değerleri dikkate alınmıştır. Frezeleme işlemlerinde, DELTA S2 1050A (Fanuc Oimate MC, iş milinin maksimum hızı 8000 dev/dk, işletme basıncı 5,5 bar, motor gücü 12kw) üç eksenli dikey freze tezgâhı kullanılmıştır. Bu çalışmada 81 adet tam faktöriyel deney sayısı Taguchi metodu ile 27 adede düşürülmüştür. Deneyler sonrasında yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış Taguchi tekniği ile optimize değerler elde edilmiştir. Optimize değerler kullanılarak doğrulama deneyleri yapılmış ve daha sonra ANOVA, S/N oranları ve üç boyutlu grafikler ile değerler yorumlanmış ve son olarak regresyon analizi ile yüzey pürüzlülüğü için kesme parametreleri kullanılarak matematiksel model elde edilmiştir.

### **B. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ**

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Taylor Hobson Surtronic S25 yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri, işlenen parçanın dört farklı noktasından 4 mm'lik örnekleme uzunluğunda parça kenarına dik olacak şekilde ölçülerek, bu dört ölçümün ortalaması kullanılmıştır.

### **C. TAGUCHI METODU**

Taguchi yöntemi, süreç değişkenliklerinin azaltılmasını içeren işlem parametrelerini optimize etmek için kullanılan basit ve sağlam bir tekniktir. Taguchi yöntemiyle yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmeler sonucunda deney sayısını önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Ayrıca Taguchi yöntemi, yüksek kaliteli sistem tasarımı için son derece yararlı olan deneysel bir tasarım tekniğidir. Taguchi, tasarım sürecinin üç aşamadan oluştuğunu öne sürmüştür. Bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır. Sistem tasarımı aşamasında, temel kavram, gerekli performansı sağlamak ve temel parametre değerlerini hesaplamak için teorik bilgi ve deneyimi kullanarak yapılan karşılaştırmadır [20]. Taguchi yöntemi, kalite özelliklerini belirlemek için de bazı fonksiyonlar kullanır. Kayıp fonksiyon değerleri de bir sinyal-gürültü (S/N) oranına ( $\eta$ ) dönüştürülür. Genel olarak, S/N oranı analizinde; “Nominal en iyi”, “En büyük en iyi” ve “En küçük en iyi” olmak üzere üç farklı kalite özelliği vardır (Eşitlik 1, 2 ve 3).

$$\text{Nominal en iyi: } \eta = S/N_T = 10 \log \left( \frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{En büyük en iyi: } \eta = S/N_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{En küçük en iyi: } \eta = S/N_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Burada  $\bar{y}$  gözlemlenen değerlerin ortalamasıdır.  $s_y^2$ ,  $y$ 'nin varyansıdır.  $n$  gözlemlenen değer sayısıdır.  $y$  ise, gözlemlenen veridir [21, 22].

Geleneksel deneysel tasarımlarla karşılaştırıldığında, Taguchi yöntemi, kalite özelliklerini az sayıda denemeye incelemek için özel bir ortogonal dizi tasarımı kullanmaktadır [23]. Ortogonal dizi seçimi, optimizasyon için incelenecek faktör sayısına, incelenecek etkileşimlerin sayısına, her faktör için gerekli seviyelerin sayısına, deneyin amacına ve tabiki deneysel bütçeye ve kaynakların kullanılabilirliğine bağlı olduğu için kritik önem taşır. Seçilen ortogonal dizi tasarımının önerilen deney için yeterli derecede serbestlik sağlayacağını garanti altına almak için, ortogonal dizinin serbestlik derecesi sayısı  $\geq$  ana etki ve etkileşimin etkisini incelemek için gereken serbestlik derecesi sayısı şartını sağlamalıdır [24]. Kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametreleri ve bu parametre seviyeleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	Kontrol faktörleri	Seviyeleri		
		1	2	3
A	Kesici uç ( $kt$ )	Kaplamasız	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	TiAlN Nano
B	Kesme derinliği ( $a$ , mm)	1	1.5	2
C	Kesme hızı ( $V$ , m/dak)	250	350	550
D	İlerleme oranı ( $f$ , mm/diş)	0,1	0,2	0,35

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 [L<sub>27</sub> (3<sup>4</sup>)] seçilmiştir.

Yürütülen deneyler sonucunda ölçülen değerlerin optimizasyonu ve kalite özelliklerinin belirlenmesi S/N oranları ile sağlanmaktadır. S/N oranları, sistemin kalite karakteristiğinin değişkenliğini yansıtır ve ortalamanın ayarlanmasına bağlı değildir. Hedef değer değiştirilirse bile S/N oranı kaliteyi tahmin etmek kullanışlıdır [25]. Deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün minimum değerinde olması istenildiği için [26], S/N oranının hesaplanmasında “En küçük en iyi” prensibine dayanan eşitlik seçilmiştir [Eş. (3)]. Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanan S/N oranları Tablo 3’de gösterilmiştir. Yapılan 27 deneyden sonra yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri, 0,47µm ve aynı şekilde ortalama S/N oranı ise, 6,82 dB olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** Deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranları

Deney no	Kontrol faktörleri				Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ( $\mu m$ )					S/N oranı (dB)
	A	B	C	D	Ra <sub>1</sub>	Ra <sub>2</sub>	Ra <sub>3</sub>	Ra <sub>4</sub>	Ra <sub>m</sub>	S/N
	Kesici uçlar	Kesme derinliği (mm)	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme oranı (mm/diş)						
1	Kaplamasız	1	250	0,1	0,28	0,32	0,30	0,31	<b>0,30</b>	10,46
2	Kaplamasız	1	250	0,1	0,30	0,34	0,38	0,31	<b>0,33</b>	9,63
3	Kaplamasız	1	250	0,1	0,28	0,32	0,33	0,3	<b>0,31</b>	10,17
4	Kaplamasız	1,5	350	0,2	0,32	0,38	0,32	0,4	<b>0,36</b>	8,87
5	Kaplamasız	1,5	350	0,2	0,28	0,32	0,36	0,35	<b>0,33</b>	9,63
6	Kaplamasız	1,5	350	0,2	0,38	0,34	0,32	0,35	<b>0,35</b>	9,12
7	Kaplamasız	2	550	0,35	0,32	0,32	0,33	0,31	<b>0,32</b>	9,90
8	Kaplamasız	2	550	0,35	0,26	0,35	0,28	0,32	<b>0,30</b>	10,46
9	Kaplamasız	2	550	0,35	0,28	0,26	0,34	0,29	<b>0,29</b>	10,75
10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1	350	0,35	0,42	0,46	0,42	0,48	<b>0,45</b>	6,94
11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1	350	0,35	0,46	0,44	0,48	0,5	<b>0,47</b>	6,56
12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1	350	0,35	0,58	0,34	0,43	0,5	<b>0,46</b>	6,74
13	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1,5	550	0,1	0,64	0,68	0,68	0,65	<b>0,66</b>	3,61
14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1,5	550	0,1	0,78	0,42	0,66	0,54	<b>0,60</b>	4,44
15	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1,5	550	0,1	0,58	0,78	0,56	0,68	<b>0,65</b>	3,74
16	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	2	250	0,2	0,68	0,66	0,88	0,32	<b>0,64</b>	3,88
17	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	2	250	0,2	0,60	0,58	0,54	0,74	<b>0,62</b>	4,15
18	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	2	250	0,2	0,78	0,60	0,76	0,58	<b>0,68</b>	3,35
19	TiAlN-Nano	1	550	0,2	0,32	0,50	0,56	0,5	<b>0,47</b>	6,56
20	TiAlN-Nano	1	550	0,2	0,40	0,39	0,45	0,48	<b>0,43</b>	7,33
21	TiAlN-Nano	1	550	0,2	0,36	0,50	0,40	0,58	<b>0,46</b>	6,74
22	TiAlN-Nano	1,5	250	0,35	0,50	0,66	0,44	0,58	<b>0,55</b>	5,19
23	TiAlN-Nano	1,5	250	0,35	0,48	0,58	0,46	0,58	<b>0,53</b>	5,51
24	TiAlN-Nano	1,5	250	0,35	0,55	0,66	0,34	0,6	<b>0,54</b>	5,35
25	TiAlN-Nano	2	350	0,1	0,53	0,44	0,58	0,64	<b>0,55</b>	5,19
26	TiAlN-Nano	2	350	0,1	0,54	0,56	0,62	0,6	<b>0,58</b>	4,73
27	TiAlN-Nano	2	350	0,1	0,58	0,50	0,50	0,65	<b>0,56</b>	5,04

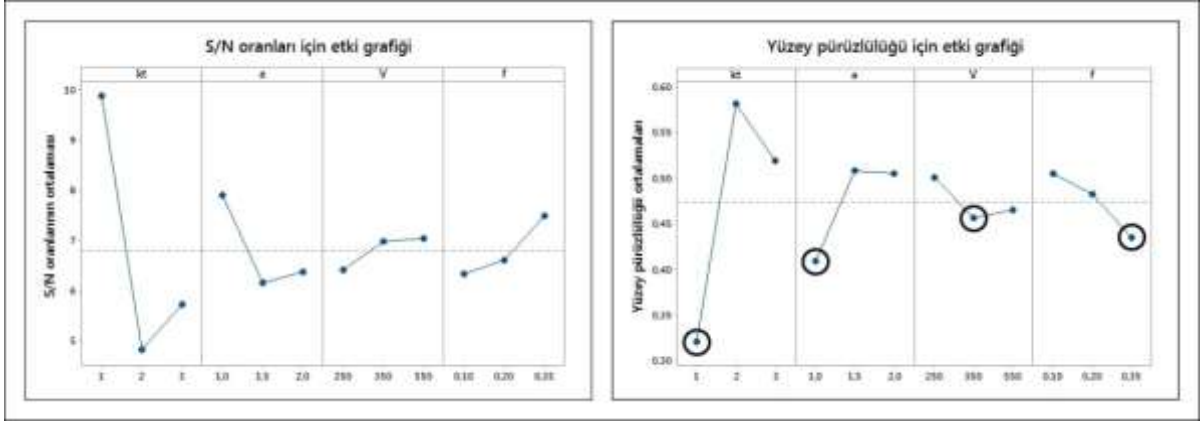
SR<sub>a<sub>m</sub></sub> (Yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamasının ortalaması)= 0,47  $\mu m$

SR<sub>a<sub>m</sub></sub>-S/N (Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları ortalaması)= 6,82 dB

**Tablo 4.** S/N oranları (dB) ve yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması

Kontrol faktörleri	Yüzey pürüzlülüğü (Ra <sub>m</sub> )			Mak-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
S/N oranları (dB)				
A	9,874	4,813	5,733	5,062
B	7,894	6,154	6,372	1,740
C	6,401	6,974	7,045	0,643
D	6,323	6,614	7,483	1,160
Yüzey pürüzlülüğü ( $\mu m$ )				
A	0,3211	0,5811	0,5189	0,260
B	0,4089	0,5078	0,5044	0,0989
C	0,5000	0,4567	0,4644	0,0433
D	0,5044	0,4822	0,4344	0,0700

Tablo 4'de kontrol faktörleri olarak ifade edilen kesme parametreleri, seçilen ortogonal diziye göre farklı seviyeler ve olası etkileri göz önünde bulundurularak ayırt edilmiştir. Bu seviyeler deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğünün analizi için hesaplanan sinyal gürültü oranlarını ve yüzey pürüzlülüğü için elde edilen toplam değerlerin seviyelere göre ortalaması alınarak hesaplanan yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir. S/N oranı, ortalama ve varyansı birleştiren bir istatistiktir ve kalite karakteristiğinin türüne bağlıdır [21, 22]. Ayrıca, her faktör düzeyinin kalite karakteristiği üzerindeki etkileri S/N oranları kullanılarak analiz edilebilir. Bu etkiler, deneysel sonuçların veya S/N oranlarının toplam ortalama değerlerine göre tanımlanabilir ve değerlendirilebilir. Optimum değer hesaplamasında bir diğer gereklilik de optimum seviyeleri belirlemektir. Optimum seviyeler,  $L_{27}$  ortogonal dizi tarafından üretilen kombinasyonların sonuçlarına göre kontrol faktörlerinin farklı seviyelerini değerlendirerek belirlenebilir. Bu seviyeler, yüzey pürüzlülüğü değerlerini ve S/N oranları ana etki grafiğini çizmek için kullanılır (Şekil 1).



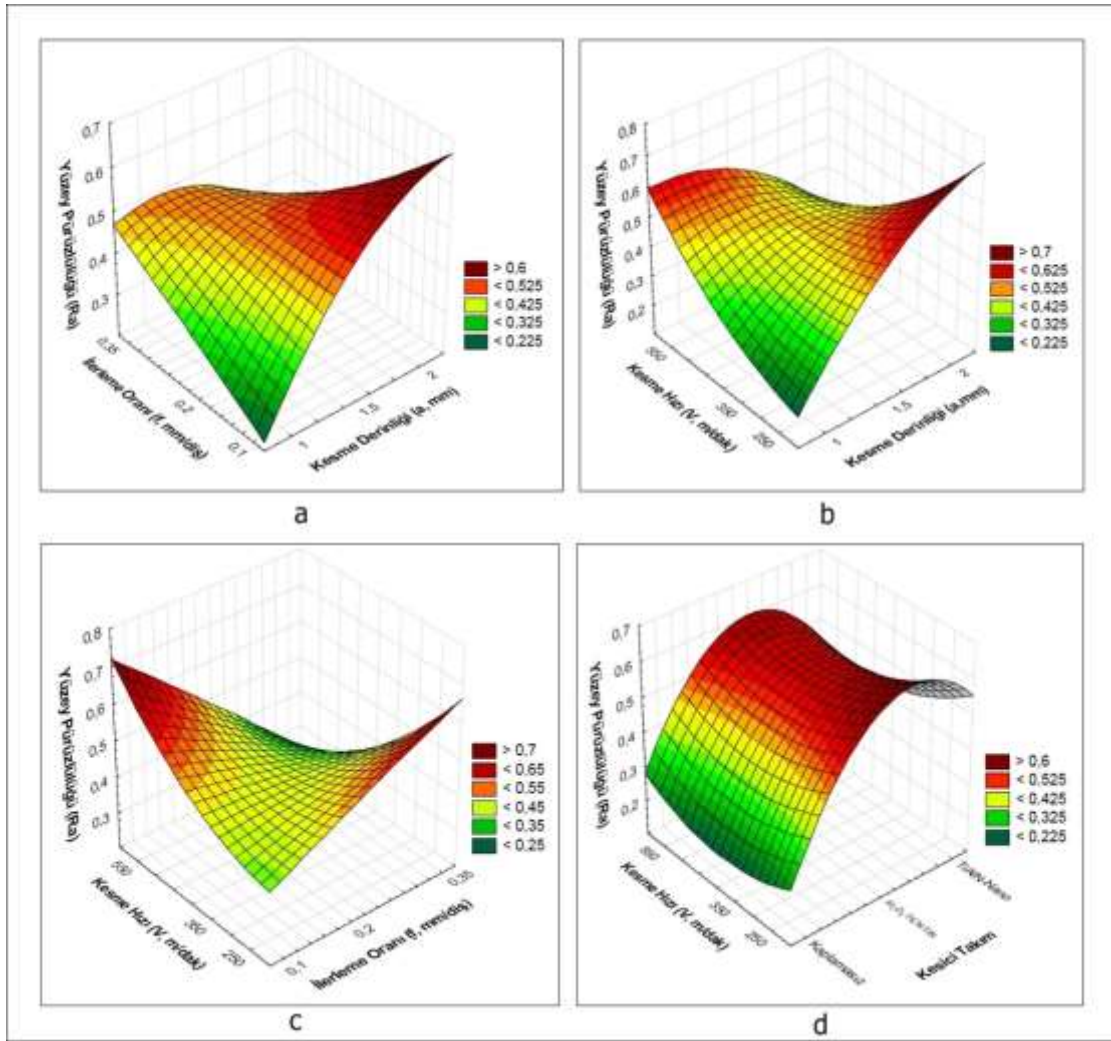
Şekil 1. Kontrol faktörleri için ortalama etki grafiği

Kontrol faktörlerine ve seviyelerine göre hesaplanan S/N oranları ve ortalama yüzey pürüzlülüğü dağılımları Şekil 1'de gösterilmektedir. Çalışmada “En küçük en iyi” karakteristik seçildiğinden, kontrol faktörlerinin optimal kombinasyonunu belirlemek için tüm seviyeler için en düşük ortalama değerleri değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, yüksek S/N oranları da optimum kombinasyonu belirlemek için kullanılabilir. Buna göre frezeleme parametrelerinin optimum kombinasyonu  $A_1B_1C_2D_3$  ( $A_1$ =Kaplamaşız kesici uç,  $B_1$  = 1 mm talaş derinliği,  $C_2$  = 350 m/dak,  $D_3$  = 0,35 mm/diş ) olarak belirlenmiştir.

### III. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kontrol faktörlerine ve varyasyonlarına bağlı olarak deneysel çalışmadan elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2a'da, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri gösterilmiştir. Şekilde kesme derinliği arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Ancak 2 mm kesme derinliği ve 0,35 mm/diş ilerleme oranında bir düşme göstermiştir. Ayrıca 1 mm derinlikte yine yüzey pürüzlülüğünde azalma görülmektedir. Şekil 2a'da en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,1 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme derinliğinde elde edilmiştir. Şekil 2b'de kesme hızı ve kesme derinliğinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisi gösterilmiştir. Grafikte 250 ve 350 m/dak kesme hızında ve 1 mm kesme derinliğinde pürüzlülük değerinin düştüğü görülmektedir. 2 mm kesme derinliğinde ve 250 m/dak kesme hızında ise ortalama

pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Grafikte kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak 2 mm derinlik ve 550 m/dak kesme hızında düşüş yaşanmıştır. Bu durumda, kesme hızını arttırdıkça kesme derinliğinin de artırılması yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki etmektedir. Şekil 2c'de, ilerleme oranı ve kesme hızının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi gösterilmiştir. Burada, 350 m/dak kesme hızı ve 0,35 mm/diş ilerleme oranında ortalama yüzey pürüzlülüğünün düştüğü görülmektedir. İlerleme oranıyla beraber kesme hızı arttırıldığında pürüzlülük değerleri de düşmektedir. 0,1 mm/diş ilerleme oranında kesme hızını arttırmak pürüzlülük değerini de arttırmıştır. Ayrıca Şekil 2c'de düşük kesme hızı ve düşük ilerleme oranında pürüzlülük değeri de düşük çıkmıştır. Şekil 2d'de, kesme hızı ve kesici takım türünün ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi gösterilmiştir. Grafikte, 350 m/dak kesme hızında ve kaplamasız kesici uç ile yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, Taguchi tekniği ile elde edilen optimum kombinasyonlarla paralellik göstermektedir. Aynı grafikte kaplamasız takımla ve üç farklı kesme hızında yüzey pürüzlülük değeri, düşük seviyede seyretmektedir.



Şekil 2. Yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametrelerinin etkisi



## A. ANOVA KULLANILARAK VERİ ANALİZİ

Kesici uç, kesme derinliği, kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri ANOVA metodu ile analiz edilmiş, deney sonuçları %95'lik bir güven düzeyinde değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA değerleri Tablo 5'de, S/N oranları için ANOVA değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F	Faktör etkisi (%)
Yüzey pürüzlülüğü ( $R_{am}-\mu_m$ )					
kt	2	0,331763	0,165881	422,53	77,47
a	2	0,056763	0,028381	72,29	13,25
V	2	0,009607	0,004804	12,24	2,24
f	2	0,023030	0,011515	29,33	5,38
Hata (e)	18	0,007067	0,000393	-	1,66
Toplam	26	0,428230	-	-	-

**Tablo 6.** S/N oranları için ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F	Faktör etkisi (%)
Sinyal gürültü oranı ( $S/N-dB$ )					
kt	2	131,108	65,5538	509,82	82,80
a	2	16,169	8,0843	62,87	10,21
V	2	2,250	1,1248	8,75	1,42
f	2	6,495	3,2474	25,26	4,10
Hata (e)	18	2,314	0,1286	-	1,47
Toplam	26	158,335	-	-	-

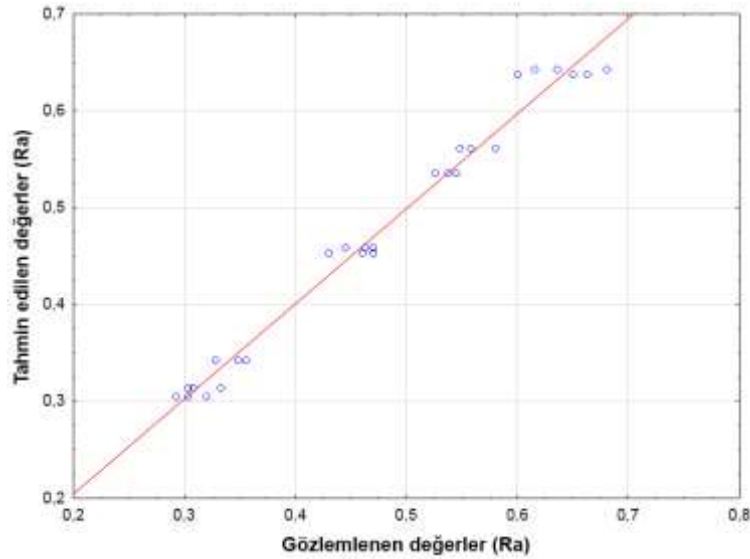
Tablo 5 ve Tablo 6'daki ANOVA çizelgelerinde kontrol faktörlerinin önem durumu, her kontrol faktörünün F değerini alfa 0,05 için bir F tablosundan elde edilen  $F_{0,05}$  değeri (3,5546) ile karşılaştırarak belirlenmiştir [27]. Bu durumda çizelgedeki tüm faktörler etkilidir. Tablo 5'de yüzde dağılımları; kesici uç (kt) %77,47, kesme derinliği (a) %13,25, kesme hızı (V) %2,24, ilerleme oranı (f) %5,38 ve hata (e) %1,66 olarak elde edilmiştir. Tabloya göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en etkili faktör %77,47 ile kesici uç olmuştur. Bu faktörü %13,25 oranla kesme derinliği takip etmektedir. Yüzey pürüzlülüğüne üzerinde en az etkiye sahip parametre %2,24 oranla kesme hızı olmuştur. Tablo 6'da, S/N oranlarına göre yapılan varyans analizinde; kesici uç (kt) %82,80, kesme derinliği (a) %10,21, kesme hızı (V) %1,42, ilerleme oranı (f) %4,10 ve hata (e) %1,47 olarak elde edilmiştir. Tablo 6'ya göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en etkili faktör %82,80 ile yine kesici uç olmuştur. Bu faktörü %10,21 ile kesme derinliği takip etmektedir. Her iki tabloda faktörler, etki durumuna göre değerlendirildiğinde etki sıraları birbirine benzerdir.

## B. DENEYSEL SONUÇLAR İÇİN REGRESYON METODU

Bu çalışmada, polinomiyal (polynomial) regresyon modeli kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme parametreleri arasındaki ilişki düzeyi belirlenmiştir. Çoklu regresyon analizi, kontrol faktörlerinin her kombinasyonu ile deneysel tasarımlar yoluyla elde edilen sürekli bağımlı değişkenlerin tahmin denklemlerini türetmek için kullanılabilir. İkinci dereceden regresyon modeli için öngörülen eşitlik aşağıda gösterilmiştir:

$$Ra_r = -0,489 + 0,742kt - 0,161kt^2 + 0.688a - 0,198a^2 - 0.0013V + 0,000001611V^2 - 0,164f - 0,267f^2 \quad (4)$$

$Ra_r$ , yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerini kullanarak oluşturulan tahmin denklemini ifade etmektedir. Regresyon sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü için elde edilen denklemin  $R^2$  değeri 0,98 olarak hesaplanmıştır. Tahmin denklemi ile tahmin edilen değerler ve deneysel sonuçlarla gözlemlenen değerler Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

## C. DOĞRULAMA DENEYLERİ VE KALİTE KAYIPLARININ BELİRLENMESİ

Doğrulama deneyleri ve kalite kayıplarının belirlenmesi Taguchi yönteminin son adımıdır ve bu uygulamaların amacı kalite özelliklerini analiz etmektir. Doğrulama deneylerinin amacı, analiz aşamasında elde edilen sonuçların geçerliliğini doğrulamaktır. Doğrulama deneyleri, faktörlerin ve düzeylerinin spesifik kombinasyonunu test etme amacına hizmet eder ve kontrol faktörleri tarafından üretilen toplam etki tarafından tanımlanır [28, 29]. Bu faktörler, her bir etkinin toplamına eşittir. Taguchi optimizasyon tekniğinde, optimize koşulun doğrulanması için en az bir doğrulama deneyinin yapılması gereklidir [24]. Minimum yüzey pürüzlülüğü, değerlendirilen optimal kombinasyon içindeki etkili faktörler göz önüne alınarak elde edilir. Bu nedenle, kontrol faktörlerinin bireysel etkileri göz önünde

bulundurulur;  $A_1B_1C_2D_3$  ( $A_1$ =Kaplamaşız kesici uç,  $B_1 = 1$  mm talaş derinliği,  $C_2 = 350$  m/dak,  $D_3 = 0,35$  mm/dış ) için minimum yüzey pürüzlülüğü değeri ( $Ra_c$ ) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır [19];

$$\eta_g = A_1 + B_1 + C_2 + D_3 - 3\eta_{S/N} \quad (5)$$

$$Ra_c = 10^{-\eta_g/20} \quad (6)$$

Burada  $A_1, B_1, C_2$  ve  $D_3$  faktörlerin optimum seviyelerine ait S/N oranlarıdır.  $\eta_{S/N}$ , bütün faktörlerin S/N oranlarının ortalamasıdır.  $\eta_g$ , optimum seviyeler için hesaplanan S/N oranıdır. Bu değerler dikkate alındığında minimum yüzey pürüzlülük değeri ( $Ra_c$ ), 0,26  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneylerinin kalite özelliğini doğrulamak için, güven aralığı (CI) kullanılır. Güven aralığı, gerçek ortalamanın belirtilen güven düzeyine düşmesi gereken bir maksimum ve minimum değerdir. Optimum değerlerin tahmin edilmesinde kullanılan CI aşağıda yer alan eşitlikle hesaplanır [30, 31].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha:1, V_e} \times V_{ep} \times \left( \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (7)$$

Burada  $F_{\alpha:1, V_e}$  önem düzeyi  $\alpha$ 'nın F oranı,  $\alpha$  önem düzeyi,  $1 - \alpha$  güven aralığı,  $V_e$  hatanın serbestlik derecesi,  $V_{ep}$  hatanın varyansı,  $r$  doğrulama deney sayısı ve  $n_{eff}$  etkin ölçülen sonuçların sayısıdır [30].

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (8)$$

Burada  $N$  toplam deney sayısını (27),  $V_t$ , Tablo 5 dikkate alınarak ortalamanın hesaplandığı işlem parametrelerine ait toplam serbestlik derecesidir (8). Buna göre  $n_{eff} = 3$  olarak hesaplanmıştır [32]. Yüzey pürüzlülüğü için 95 % güven aralığında yapılan değerlendirmede  $\alpha=0,05$  ve  $V_e = 18$  dikkate alınarak çizelgeden  $F_{\alpha:1, V_e}=4,4139$  olarak bulunmuştur. Eş. (7) ve Eş. (8) kullanılarak  $CI= 0,034$  olarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu 95% güven aralığıyla ( $0,26 \pm 0,0,034$ )  $\mu\text{m}$  ya da  $0,226-0,294$   $\mu\text{m}$  arası umulmaktadır. Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmaların performansını değerlendirmek için optimal koşullar kullanılarak üç doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Optimal seviyeler dikkate alınarak ( $A_1B_1C_2D_3$ ) yürütülen doğrulama deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,28, 0,30 ve 0,29  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiş ve bunların ortalamaları da 0,29  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 7. Yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranları kombinasyonlarının karşılaştırılması**

	Seviye	Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N (dB)
Başlangıç Kombinasyonu	$A_2B_3C_1D_2$	0,68	3,35
Optimal kombinasyon (deneysel)	$A_1B_1C_2D_3$	0,29	10,75
Optimal kombinasyon (tahmin)	$A_1B_1C_2D_3$	0,26	11,70

Tablo 7'de yüzey pürüzlülüğü değerleri deney ve tahmin vasıtasıyla elde edilen optimal kombinasyonlara göre karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda  $A_2B_3C_1D_2$  kombinasyonu, başlangıç kombinasyonu olarak 27 adet deneyden seçilmiştir. Tablo 7'ye göre yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,68

$\mu\text{m}$ 'dan 0,29  $\mu\text{m}$ 'a düşürülmüş ve optimal kombinasyonla geliştirilen doğruluk, yüzey pürüzlülüğü için %57,35'ye ((0,68-0,29)/0,68) kadar arttırılmıştır. Tablo 8'de ilk ve en uygun koşullar arasındaki performans karşılaştırmaları listelenmiştir. Doğrulama deneylerinin ortalaması 0,226-0,294  $\mu\text{m}$  aralığında yani tahmin edilen aralıkta bulunan 0,29  $\mu\text{m}$ 'dur. Bu aralık bu çalışmada ele alınan kontrol faktörlerinin hem anlamlı hem de doğru olduğu anlamına gelir.

**Tablo 8.** Başlangıç ve optimal kombinasyon arasında performansın karşılaştırılması

	Başlangıç kombinasyonu	Optimal kombinasyon	
		Tahmin	Doğrulama
Seviye	$A_2B_3C_1D_2$	$A_1B_1C_2D_3$	$A_1B_1C_2D_3$
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0,68	0,26 $\pm$ 0,034	0,29
Kalite kaybı			%18,09

Bu deneyin kalite karakteristiği Çizelge 8'de belirtildiği üzere 0,68  $\mu\text{m}$ 'dan ( $A_2B_3C_1D_2$ , başlangıç kombinasyonu) 0,29  $\mu\text{m}$ 'a ( $A_1B_1C_2D_3$ , optimal kombinasyon) geliştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ilk ve optimal kombinasyonlar arasındaki kalite kayıpları, kalite kaybı fonksiyonu oranı olarak hesaplanabilmektedir. Bu fonksiyon, kalite iyileştirmesindeki her 3 dB'in kalite kaybının yarısını azaltacağı ilişkisini ifade eder. Kalite kaybı fonksiyonu aşağıda belirtilen eşitlikle hesaplanmaktadır [25].

$$\frac{L_{opt}(y)}{L_{ini}(y)} \approx \left(\frac{1}{2}\right)^{\Delta\eta/3} \quad (9)$$

Burada  $L_{opt}(y)$  ve  $L_{ini}(y)$  sırasıyla başlangıç ve optimal kombinasyonlardır.  $\Delta\eta$ , optimum ve başlangıç kombinasyonlarının S/N oranları arasındaki farktır. Doğrulama deneyleri için optimal kombinasyonun kalite kaybını değerlendirmek için kullanılacak S/N oranlarındaki farklar, 7,4 [ $\Delta\eta = 7,4 (= 10,75 - 3,35)$ ] olarak bulunmuştur. Doğrulama testinin kalite kaybı Eş. (9) kullanılarak 0,1809 olarak hesaplanmıştır. Bu şekilde, optimal kombinasyonun kalite kaybı, ilk kombinasyonun sadece % 18,09'u kadar olur. Bu nedenle, Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyonda yüzey pürüzlülüğü için kalite kaybı %81,91 oranında düşürülmüştür.

#### IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Literatür incelendiğinde 5754 alüminyum alaşımının frezelenmesiyle ilgili yapılan çalışmalarda tek tip kesici takım kullanıldığı görülmüştür. Kesici uç yarıçapının dikkate alındığı ilk çalışmada, elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri 0,30  $\mu\text{m}$ 'a kadar düşmüştür bu durum çalışmamızla benzerlik göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada en iyi yüzey pürüzlülüğü için kesme derinliği ve ilerleme miktarının düşük değerlerde olması vurgulanmıştır. Çalışmada en düşük yüzey pürüzlülüğü; düşük devir sayısı, düşük ilerleme ve yüksek kesme derinliğinde elde edilmiştir [33]. Diğer bir çalışmada Taguchi metodu kullanılarak 9 deney gerçekleştirilmiş ve yüzey frezeleme işleminde çalışmamızdan farklı olarak soğutma yağı, tek tip takım ve farklı kesme parametreleri kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin en düşük değerlerinde ise en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Çalışmada optimum kombinasyonlar incelendiğinde en düşük kesme derinliği en düşük pürüzlülük değerini vermiştir. Bu durum

çalışmamızla benzerlik göstermektedir [34]. Bu çalışmada, deney numunesine dört farklı kesme parametresi kullanılarak yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 81 deney yerine Taguchi metodu kullanılarak 27 deney yapılmış bu sayede hem zamandan hem de enerji maliyetlerinden tasarruf sağlanmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen kombinasyonla yürütülen doğrulama deneyleriyle optimizasyonun geçerliliği test edilmiş, seçilen başlangıç pürüzlülük değeri, 0,68  $\mu\text{m}$ 'dan optimizasyon sonrası 0,29  $\mu\text{m}$ 'a düşmüştür. Bu şekilde yüzey pürüzlülük değerleri %57,35 oranında iyileştirilmiştir. 27 deneyden elde edilen sonuçlar üç boyutlu grafiklerle yorumlanmış ve elde edilen sonuçlar, Taguchi ile elde edilen optimize koşullar ile benzerlik göstermiştir. Ayrıca çalışmada varyans analizi kullanılarak kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri belirlenmiştir. Bu bağlamda çalışmadan elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Deney sonuçlarına göre yüzey frezeleme parametrelerinin optimum kombinasyonu  $A_1B_1C_2D_3$ ( $A_1$ =Kaplamasız kesici uç,  $B_1$  = 1 mm talaş derinliği,  $C_2$  = 350 m/dak,  $D_3$  = 0,35 mm/diş) olarak bulunmuştur.
- Deneysel sonuçlar kesici takımın %77,47 oranla yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktör olduğunu göstermiştir. Bu faktörü %13,25 oranla kesme derinliği (a) takip etmiştir.
- Doğrulama deneyleriyle gözlemlenen değerler, hesaplanan güven aralığının (CI) içinde çıkmıştır. Bu da Taguchi metodunun başarıyla uygulandığını göstermektedir.
- Optimum kombinasyon kullanılarak elde edilen yüzey pürüzlülüğünün kalite kaybı %18,09'a düşürülmüştür.
- Kaplamasız kesici ucun yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif etkileri olduğu deneysel çalışmalarda elde edilmiştir.
- Yürütülen deneyler sonucunda seçilen başlangıç pürüzlülük değeri 0,68  $\mu\text{m}$ 'dan optimum koşullarla yürütülen doğrulama deneyleriyle 0,29  $\mu\text{m}$ 'a düşürülmüştür.
- Üç boyutlu grafikler incelendiğinde ilerleme oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak aynı grafiklerde en yüksek kesme hızında ve en yüksek ilerleme oranında yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü görülmektedir. Kesme hızları takım üretici firmaların önerdiği aralıklarda seçildiği için kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine fazla etkisi olmadığı literatürde hakim bir görüştür. Literatüre bağlı olarak çalışmada elde edilen bulgular göz önüne alındığında, alüminyum alaşımları için kesme hızının pürüzlülük değerine önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [35]. Taguchi ile elde edilen optimum değerlerde yüksek ilerleme oranı çıkmıştır. Bu durum, kesme hızından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada Taguchi yöntemi, kesme parametrelerinin optimum kombinasyonlarını belirlemek ve endüstride yaygın olarak kullanılan 5754-H111 alüminyum alaşımının yüzey frezelenmesinde işleme maliyetlerini ve süresini en aza indirmek için başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada sunulan metot, alüminyum alaşımlarının çeşitli işleme operasyonlarına uygulanabilir niteliktedir.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. (Proje numaraları: 2017.06.06.564 ve 2012.06.06.120).

## V. KAYNAKLAR

- [1] V. Danilevsky, *Manufacturing Engineering*, No. 121, TMMOB publishing, Ankara, 1987.
- [2] G. Boothroyd, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 5th ed., New York, USA: McGraw- Hill, 1981.
- [3] J. L. Yang and J. C. Chen, “A systematic approach for identifying optimum surface roughness performance in end-milling operations”, *Journal Industrial Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 1–8, 2001.
- [4] D. Vakondios, P. Kyratsis, S. Yıldız and A. Antoniadis, “Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy AL7075-T6”, *Measurement*, vol. 45 no. 6, pp. 1480–1488, 2012.
- [5] E. Kuram and B. Özçelik, “Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill”, *Measurement*, vol. 46, no. 6, pp. 1849–1864, 2013.
- [6] E. M. Rubio, A. M. Camacho, J. M. Sanchez-Sola and M. Marcos, “Surface roughness of AA7050 alloy turned bars analysis of the influence of the length of machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.162–163, no. 1, pp. 682–689, 2005.
- [7] A.R. Meyers and T.J. Slattery, *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, New York, 2001.
- [8] E. Kuram and B. Özçelik, “Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill”, *Measurement*, vol. 46, no. 6, pp. 1849–1864, 2013.
- [9] D. J. Lloyd, “Some aspects of the metallurgy of automotive al alloys”, *Materials Forum*, vol. 28, pp. 107-117, 2004.
- [10] S.F. Dimin, T.J.S. Anand, R. Jamli and A. Kamely A, “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.
- [11] K. Kadirgama, M. M. Noor, M. M. Rahman, M. R. M. Rejad and C.H.C. Haron, “Surface roughness prediction model of 6061-T6 aluminium alloy machining using statistical method”, *European Journal Scientific Research*, vol. 25, no. 2, pp. 250-256, 2009.
- [12] B. T. H. T. Baharudin, M. R. İbrahim, N. İsmail, Z. Leman, M. K. A. Ariffin and D. L. Majid, “Experimental investigation of HSS face milling to AL6061 using Taguchi method”, *Procedia Engineering*, vol. 50, pp. 933–941, 2012.
- [13] 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*, vol. 46, no. 4, pp. 383–388, 2012.
- [14] A. M. Pınar, “Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminum alloy via Taguchi method”, *Arabian Journal Science and Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 705–714, 2013.
- [15] T. Kıvık, “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, *Measurement*, vol. 50, pp. 19-28, 2014.

- [16] Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya and F. Erzincanlı, “Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy Waspaloy”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, pp. 4667-4681, 2017.
- [17] F. Kara, “Taguchi optimization of surface roughness and flank wear during the turning of DIN 1.2344 tool steel”, *Materials Testing*, vol. 59, no. 10, pp. 903-908, 2017.
- [18] F. Kara and B. Öztürk, “Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel”, *Sensor Review*, DOI: 10.1108/SR-12-2017-0266, 2018.
- [19] F. Kara, “Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel”, *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, vol. 52, no. 2, pp. 195–200, 2018.
- [20] M. Savaşkan, Y. Taptık ve M. Ürgen, “Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu”, *ITU Dergisi*, c. 3, s. 6, ss.117–128, 2004.
- [21] K. Krishnaiah and P. Shahabudeen, *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.
- [22] C. Camposeco-Negrete, “Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 53, no.53, pp. 195–203, 2013.
- [23] İ. Asiltürk ve S. Neşeli, “Multi response optimization of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis”, *Measurement*, vol. 45, no. 4, pp. 785–794, 2012.
- [24] R. K. Roy, *A. Primer on the Taguchi Method, Competitive Manufacturing Series*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [25] W.Y. Fowlkes and C.M. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1995.
- [26] D. K. Baek, T. J. Ko and H.S. Kim “Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 41, no. 3, pp. 451–462, 2001.
- [27] M. Sarıkaya and A. Güllü, “Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 65, no. 1, pp. 604–616, 2014.
- [28] T. Hill and P. Lewicki, *Methods and Applications: A Comprehensive Reference for Science, Industry, Mining*, StatSoft, USA, 2006.
- [29] N. Mandal, B. Doloi, B. Mondal and R. Das, “Optimization of flank wear using zirconia toughened alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis”, *Measurement*, vol. 44, no. 10, pp. 2149–2155, 2011.
- [30] Y.T. Liu, W.C. Chang ve Y. Yamagata, “A study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the taguchi method”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, pp. 40-48, 2010.
- [31] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering, 2nd ed.*, USA: Mc-Graw-Hill, 1996.

- [32] A. M. Pınar, E. Atik ve U. Çavdar, “AA 7075 alüminyum alaşımının frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme oranı, işleme deseni ve talaş derinliği işlem parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, *2.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, 2010.
- [33] M. K. Kulekci, U. Eşme, A. K. Ekşi, Z. Koçoğlu ve N. F. Yılmaz, “En Aw 5754 (Almg3) alüminyum alaşımının frezelenmesi işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 32, s.2, ss. 153-160, 2017.
- [34] D. Fratila and C. Caizar, “Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and conditions in face milling of AlMg3”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, pp. 640-645, 2011.
- [35] M. Sekmen, M. Günay ve U. Şeker, “Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi”, *Politeknik dergisi*, c.18, s.3, ss. 141-148, 2015.