

# Kriyojenik İşlem Görmüş EN AW 5754 (AlMg<sub>3</sub>) Alüminyum Alaşımının Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü İçin Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Gürcan SAMTAŞ<sup>1\*</sup>, Salih KORUCU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Ankara Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.04.2018 ; Kabul/Accepted : 27.07.2018)

## ÖZ

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 EN AW 5754 (AlMg<sub>3</sub>) alüminyum alaşımına kriyojenik işlem uygulanmış, kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlarla yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve yüzey frezeleme işlemi esnasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal dizini ile üç farklı kesici uç (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN kaplamalı, TiAlN kaplamalı Nano, TiB<sub>2</sub> kaplamalı), kesme hızı (310, 450, 600 m/dak), ilerleme oranı (0.15, 0.25, 0.35 mm/diş) ve üç farklı kesme derinliği (0.5, 1, 1.5 mm) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerler, sinyal-gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA), üç boyutlu grafikler ve regresyon metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Taguchi analizi sonucu minimum yüzey pürüzlülüğü için elde edilen optimum kesme şartları; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN kaplamalı kesici uç, 1 mm kesme derinliği, 600 m/dak kesme hızı ve 0.15 mm/diş ilerleme oranı olarak bulunmuştur. Bu kesme şartları için yüzey pürüzlülük değerleri hesaplamalarda 0.47 µm olarak bulunmuş, doğrulama deneylerinde 0.32 µm olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** EN AW 5754, yüzey pürüzlülüğü, kriyojenik işlem, Taguchi metodu.

## Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Milling of Cryogenic Treated EN AW 5754 (AlMg<sub>3</sub>) Aluminum Alloy

### ABSTRACT

Aluminum alloys are now widely used in plastic injection molds in the automotive and aerospace industries due to their high strength and weight ratio, good corrosion and fatigue resistance. In this study, EN AW 5754 (AlMg<sub>3</sub>) 5754 aluminum alloy with dimensions of 80x80x30 mm was subjected to cryogenic treatment, face milling was performed with coated and uncoated inserts, and then the effects of cutting parameters on surface roughness during face milling were examined. The experiments were conducted with Taguchi L<sub>9</sub> orthogonal array, using three different cutting inserts (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN coated, TiAlN coated Nano, TiB<sub>2</sub> coated), cutting speeds (310, 450, 600 m / min), feed rates (0.15, 0.25, 0.35 mm / tooth) and depths of cut (0.5, 1, 1.5 mm). 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 method. Taguchi analysis has revealed that optimum cutting conditions for the minimum surface roughness are the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN coated insert, 1 mm depth of cut, 600 m/min cutting speed and 0.15 mm/tooth feed rate. The surface roughness values for these cutting conditions were found as 0.47 µm in the calculations and 0.32 µm in the verification experiments.

**Keywords:** EN AW 5754, surface roughness, cryogenic process, Taguchi method.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişmelerle birlikte alüminyumun; dayanıklılık, hafiflik, yüksek korozyon direnci, işlenebilirlik, şekillendirilebilirlik, tekrar kullanılabilirlik gibi özellikleri gibi avantajları sebebiyle sanayi sektöründeki kullanım alanları hızla artmaktadır. Ayrıca

alüminyum alaşımları (AA), yüksek dayanım /ağırlık oranları, son yıllarda iyi aşınma /yorulma direnci ve işlenebilirlik açısından yüksek ilerleme oranları nedeniyle havacılık, otomotiv, plastik enjeksiyon kalıpları ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. EN AW 5754 AA'nın korozyona, özellikle endüstriyel atmosfere ve deniz suyuna karşı dayanımı yüksektir. Özellikle hidrolik ekipmanlar, otomotiv yan sanayii, gemi ve inşaat ekipmanları ve

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : grcann@gmail.com

kimya ve gıda sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2].

Frezeleme işlemlerinde doğru ölçülerin elde edilmesine ilişkin belli problemlerin ortaya çıkmasının yanı sıra, en büyük problemlerden biri deney numunesine uygun yüzey ve yüzey pürüzlülüğü elde etmektir. Kaliteli yüzey elde etmek, ticari ve teknolojik açıdan birçok nedenden ötürü önemlidir [3]. Özellikle, yüzey pürüzlülüğü ürün kalitesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır [4]. Bu nedenle, işleme operasyonlarında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu ve öngörüsü, son yıllarda birtakım araştırmacıların çalışma odağı olmuştur [5-7]. Yüzey pürüzlülüğü kesme hızı, ilerleme hızı, kesici takım geometrisi, deney numunesinin mikro yapısı, deney numunesine uygulanan ısı işlemler, kesme takımlarına uygulanan ısı işlemler ve takım tezgahının rijitliği de dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir [8, 9]. Bu parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilebilir [10,11]. Son zamanlarda, Taguchi yöntemi, çeşitli endüstriyel alanlarda ve akademik araştırma çalışmalarında büyük ölçüde kullanılmaktadır [12-20].

Al-Zn alaşımları olarak bilinen 7000 serisi alüminyum uçak uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Bu serilere uygulanan özellikle küresel parmak frezeleme işlemleri serbest formlu yüzey bitirme operasyonlarında kullanılır. Vakondios vd. 7075-T6 AA'ya küresel parmak frezeleme işlemleri ile frezeleme stratejilerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmış ve freze stratejileri için oluşturulan tüm modellerin istatistiksel geçerliliğini deneysel olarak doğrulanmışlardır [22]. Kuram ve Özçelik, 7075 AA malzeme ve küresel uçlu parmak freze kesici takımları kullanarak mikro freze işlemlerini yürütmüşlerdir. Ayrıca, Taguchi tabanlı gri ilişki analizi kullanarak kesme parametrelerini optimize etmişlerdir [23]. Dinim vd., en iyi yüzey kalitesi için uygun kesme parametrelerini araştırmış ve 6061-T6511 AA malzeme üzerine, kaplamalı kesici takımlar ile parmak frezeleme işlemini uygulamışlardır [24]. Yüzey pürüzlülüğünü istatistiksel olarak inceleyen Kadırgama vd. Tepki Yüzey Metodu (RSM) kullanarak 6061-T6 AA'nın işlenmesinde, minimum yüzey pürüzlülüğü için matematiksel tahmin modeli elde etmişlerdir. Bu çalışma iki boyutlu RSM grafikleriyle desteklenmiştir [25]. Baharudin vd. 6061 AA malzemesinde yüzey frezeleme işlemini HSS kesici uçlarla yürütmüşler ve ölçümlerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini Taguchi yöntemiyle optimize etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada,

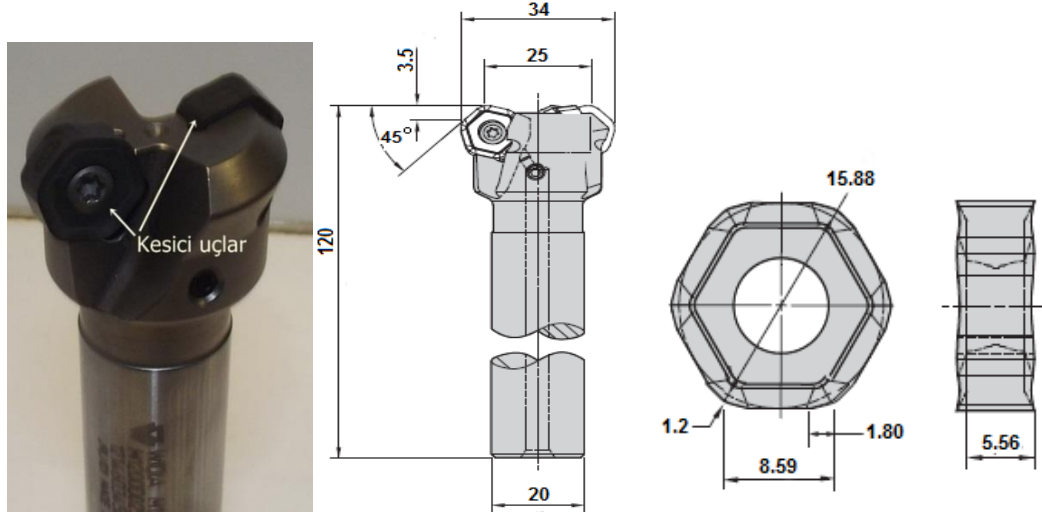
yüzey pürüzlülüğü için 884 dev/dak iş mili hızı, 243 mm/dk. ilerleme oranı ve sıfır derece aksel talas açısı gibi optimize edilmiş parametreler kullanılmış ve çalışma S/N grafiği ile desteklenmiştir [26]. Özel bir işlenebilirlik verileri mevcut olmasa da, 5083 AA, tornalama, frezeleme, delme ve taşlama gibi klasik yöntemlerle iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir [27]. Pınar, 5083 AA malzeme üzerine cep işlemede minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için, kesme parametreleri ve seviyeleri kullanılarak oluşturulan deneysel tasarımla yürütülen deneyler ile yüzey pürüzlülüğü üzerindeki kesme parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Ayrıca L<sub>27</sub> ortogonal diziyeye göre yapılan deneyler ANOVA ve sinyal-gürültü oranları ile değerlendirilmiştir [28].

Bu çalışmada, EN AW 5754 AA'ya kriyojenik işlem uygulanmış ve bu malzemenin frezelenmesinde kesici uç, kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme oranı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Taguchi metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Yürütülen deneylerde Taguchi L<sub>9</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 yorumlanmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Bu çalışmada 80x80x30 mm ebatlarında EN AW 5754 AA, deney numunesi olarak kullanılmıştır. Deneyler yapılmadan önce numunelere, dakikada 1 °C kriyojenik işlem fırını değişme sıcaklığında, -145 °C'de 12 saat kriyojenik işlem uygulanmıştır. Alüminyum alaşımlarına literatür taraması dikkate alındığında, değişik sıcaklıklarda kriyojenik ısı işlem uygulanabilmektedir [29-33]. Uygulanan kriyojenik ısı işlem sonrası deney numunesinin sertliği 54.9 Brinell olarak ölçülmüştür. Deneylerde WIDIA (Germany) kesici takım firmasına ait TN5515 kodlu CVD tekniği ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN kaplanmış, TN6525 kodlu PVD tekniği ile TiAlN kaplanmış nano ve TN6501 kodlu PVD tekniği ile TiB<sub>2</sub> kaplanmış 12 kesme kenarına sahip 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 uçlar detayı (Details of tool holder and inserts used)

Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir

araştırmaktır [36]. Taguchi yönteminde kullanılan işlem parametrelerinin kalite özelliklerini belirlemek için bazı

Çizelge 1. EN AW 5754 alüminyum alaşımının özellikleri [34, 35] (Properties of EN AW 5754 aluminum alloy)

Kimyasal Bileşimi (%)										
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
Fiziksel Özellikleri										
Yoğunluk	Ergime noktası	Isıl genişleme	Elastik modülü	Isıl iletkenlik	Elektrik özdirenci					
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					
Mekanik Özellikler										
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., çalışma basıncı 5.5 bar, motor gücü 12 kW) üç eksenli dikey freze tezgâhı kullanılmıştır. Çalışmada, yüzey pürüzlülük ölçümleri Taylor Hobson Surtronic S25 yüzey pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri (Ra), deney numunesinin dört farklı noktasından 4 mm’lik örnekleme uzunluğunda parça kenarına dik olacak şekilde ölçülmüştür.

## 2.2. Taguchi Metodu (Taguchi Method)

Taguchi yöntemi, süreç değişkenliklerinin azaltılmasını içeren işlem parametrelerini optimize etmek için kullanılan basit ve sağlam bir tekniktir. Tekniğin amacı, farklı işlem parametrelerinin süreç performans özelliklerinin ortalama ve varyansını nasıl etkilediğini ve hangi faktörün önemli ölçüde katkıda bulunduğunu

fonksiyonlar kullanır. Bu fonksiyonların 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. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması istenildiğinden “En küçük en iyi” prensibine dayanan formül kullanılmıştır (Eşitlik 1).

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

Burada, n gözlemlenen değer sayısıdır. y ise, gözlemlenen veridir [37].

Bu çalışmada, kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametreleri ve bu parametrelerin seviyeleri Çizelge 2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Kesme parametreleri ve seviyeleri (Cutting parameters and their levels)

Sembol	Kesme parametreleri	Seviyeleri		
		1	2	3
A	Kesici uç (kt)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	TiAlN Nano	TiB <sub>2</sub>
B	Kesme derinliği (a, mm)	0.5	1	1.5
C	Kesme hızı (V, m/dak)	310	450	600
D	İlerleme oranı (f, mm/diş)	0.15	0.25	0.35

Taguchi birkaç özel ortogonal dizi oluşturmuş ve sonuçlarını analiz etmiştir. Ortogonal dizi seçimi, optimizasyon için incelenecek faktör sayısına, incelenecek etkileşimlerin sayısına, her faktör için gerekli seviyelerin sayısına, deneyin amacına ve deneysel bütçeye ve kaynakların kullanılabilirliğine bağlı olduğu için kritik önem taşır. 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

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. Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanan S/N oranları ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 3’de gösterilmiştir. Yapılan 9 deneyden sonra yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri, 0.48 µm ve aynı şekilde ortalama S/N oranı ise, 6.32 dB olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.** Yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranları (Surface roughness values and S/N ratios)

Deney no	Kontrol faktörleri				Yüzey pürüzlülük değerleri (µm)					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/dk.)	İlerleme oranı (mm/diş)						
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	0.5	310	0.15	0.32	0.40	0.42	0.60	<b>0.44</b>	7.131
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1	450	0.25	0.32	0.46	0.30	0.46	<b>0.39</b>	8.179
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN	1.5	600	0.35	0.36	0.44	0.40	0.48	<b>0.42</b>	7.535
4	TiAlN-Nano	0.5	450	0.35	0.56	0.34	0.50	0.70	<b>0.53</b>	5.514
5	TiAlN-Nano	1	600	0.15	0.38	0.44	0.50	0.46	<b>0.45</b>	6.936
6	TiAlN-Nano	1.5	310	0.25	0.60	0.44	0.56	0.70	<b>0.58</b>	4.731
7	TiB <sub>2</sub>	0.5	600	0.25	0.52	0.46	0.62	0.46	<b>0.52</b>	5.680
8	TiB <sub>2</sub>	1	310	0.35	0.48	0.78	0.34	0.46	<b>0.52</b>	5.680
9	TiB <sub>2</sub>	1.5	450	0.15	0.58	0.56	0.36	0.60	<b>0.53</b>	5.514

SRa<sub>m</sub> (Yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması)= 0.48 µm

SRa<sub>m</sub>-S/N (Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları ortalaması)= 6.32 dB

**Çizelge 4.** S/N oranları ve yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması (Average of S/N ratios and surface roughness values)

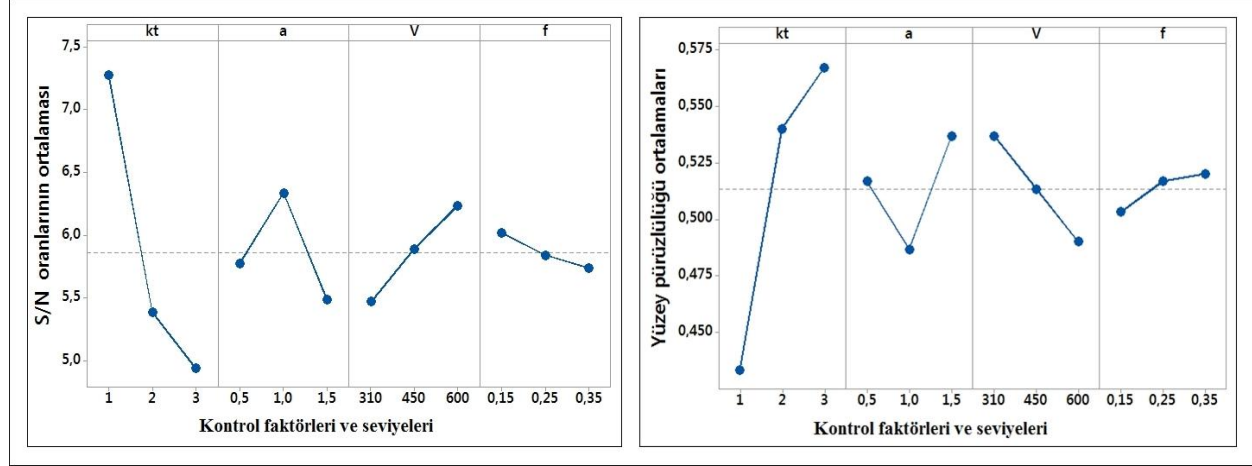
Kontrol faktörleri	Seviye			Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
S/N oranları (dB)				
A	7.270	5.384	4.936	2.335
B	5.774	6.334	5.482	0.852
C	5.467	5.890	6.233	0.766
D	6.014	5.840	5.735	0.279
Yüzey pürüzlülüğü (µm)				
A	<b>0.4333</b>	0.5400	0.5667	0.1333
B	0.5167	<b>0.4867</b>	0.5367	0.0500
C	0.5367	0.5133	<b>0.4900</b>	0.0467
D	<b>0.5033</b>	0.5167	0.5200	0.0167

için en uygun dizi [L<sub>9</sub> (3<sup>4</sup>)] seçilmiştir [38]. Tüm parametrelerinin etkileşimlerini kullanarak 81 adet deney yapmak yerine Taguchi'nin L<sub>9</sub> ortogonal dizisi kullanılarak sadece 9 deney gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4'te kontrol faktörleri olarak ifade edilen kesme parametreleri, seçilen ortogonal diziyeye 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 değerlerin seviyelere göre ortalaması alınarak hesaplanan değerleri göstermektedir. Optimum değer hesaplamasında bir diğer gereklilik de optimum seviyeleri belirlemektir. Optimum seviyeler,  $L_9$

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 2).



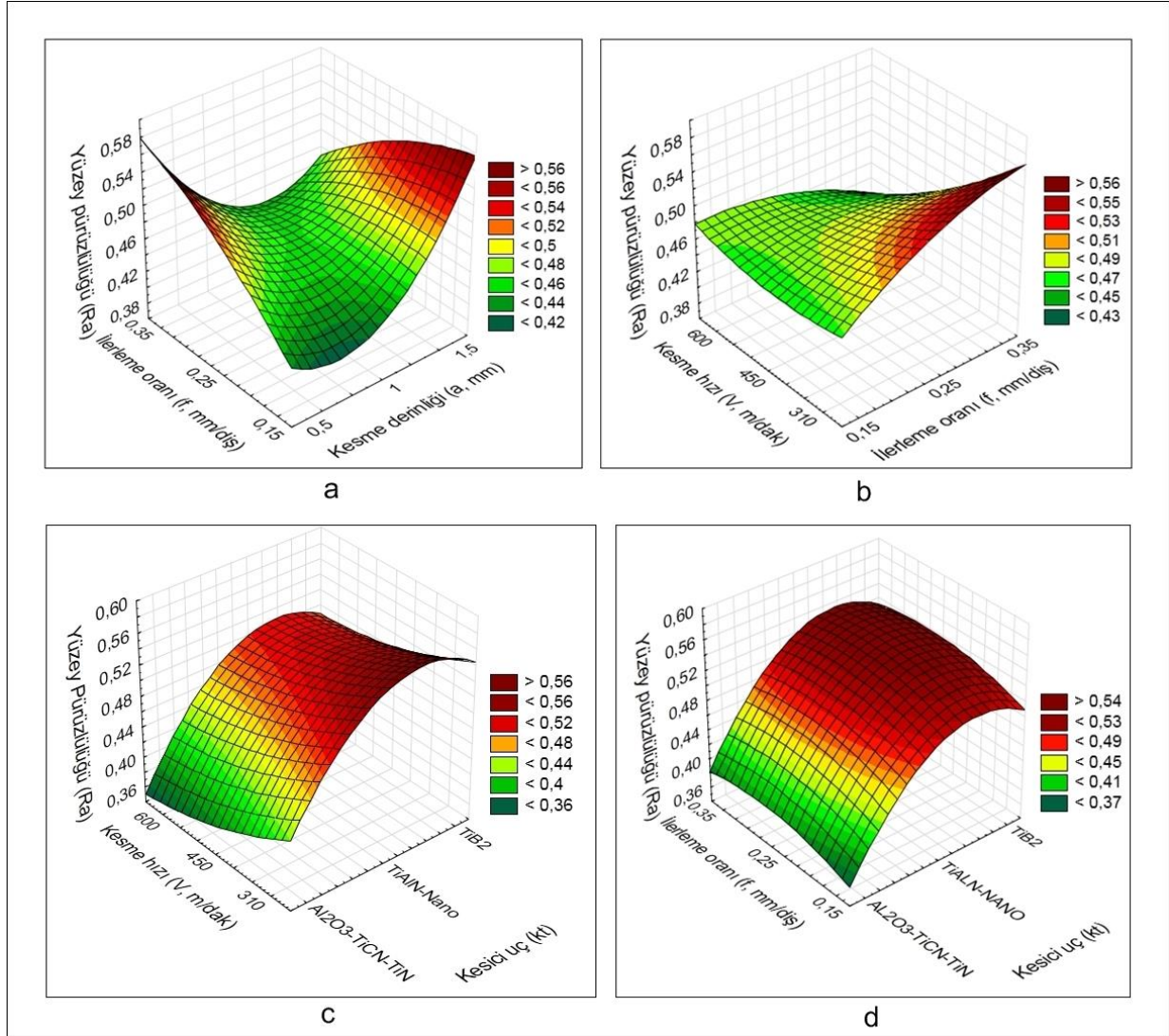
Şekil 2. Kontrol faktörleri için ortalama etki grafiği (Mean effect plot for control factors)

Kontrol faktörlerine ve seviyelerine göre hesaplanan S/N oranları ve ortalama yüzey pürüzlülüğü dağılımları Şekil 2'de gösterilmektedir. Çalışmada "En küçük en iyi" karakteristik seçildiğinden, kontrol faktörlerinin optimal kombinasyonunu belirlemek ve yüzey pürüzlülüğü değerleri için en düşük ortalamalar alınmıştır. Benzer şekilde, yüksek S/N oranları da optimum kombinasyonu belirlemek için kullanılabilir. Buna göre yüzey frezeleme için kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu  $kt_1 a_2 V_3 f_1$  ( $kt= Al_2O_3-TiCN-TiN$  kaplamalı kesici uç,  $a = 1$  mm kesme derinliği,  $V = 600$  m/dak kesme hızı,  $f = 0.15$  mm/diş ilerleme oranı) olarak belirlenmiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENTAL RESULTS)

Kontrol faktörlerine ve varyasyonlarına bağlı olarak deneysel çalışmadan elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü grafikleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3a'da, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada kesme derinliği arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak 1 mm kesme derinliğinde pürüzlülük bir düşme göstermiş, daha sonra tekrar yükselmiştir. Çünkü talaş miktarının artması az da olsa kesici takımın talaş yığılmasına neden olmuş bu da pürüzlülük değerini arttırmıştır. Aynı şekilde, ilerleme oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri de artmıştır. Şekil 3a'da, en iyi yüzey pürüzlülüğü, 0.15 mm/diş ilerleme ve 1 mm kesme derinliğinde görülmüştür. Şekil 3b'de kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğe etkisini gösteren grafik yer almaktadır. Burada, ilerleme oranı arttıkça pürüzlülük değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, 600 m/dk. kesme hızında ve 0.35

mm/diş ilerleme oranında ani bir düşüş yaşanmıştır. Şekil 3b'de 0.15 mm/diş ilerleme oranında kesme hızlarını artması, pürüzlülük değerinde bir değişime neden olmamıştır. Burada, 450 m/dk. kesme hızında ve 0.15 mm/diş ilerleme oranında pürüzlülük değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Şekil 3c'de kesme hızı ve kesici uçların yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada en düşük yüzey pürüzlülüğü  $Al_2O_3-TiCN-TiN$  kaplamalı kesici uç ve 600 m/dk. kesme hızında olmuştur. Diğer kesici uçlarda yüzey pürüzlülüğünde artışlar gözlemlenmiştir.  $Al_2O_3$  katman, aşındırıcı aşınmaya karşı direnç kazandırmak içindir. TiCN kaplamalar ise iyi bir aşınma direnci sağlar ve sert malzemelerin işlenmesinde iyi özelliklere sahiptir. TiN kaplama, yüzeyde düşük bir sürtünme katsayısı sağlayarak talaş yığılmasını engeller [39]. Bu üç kaplamanın tek bir kesici takımında kullanılması aşınmaya karşı yüksek direnç oluşturmuştur. Bu da daha iyi bir kesme şartları dolayısıyla daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Diğer taraftan TiAlN kaplamalar yüksek hızlarda yürütülen talaş kaldırma işlemlerde daha iyi sonuç vermektedir. Çizelge 3 incelendiğinde bu kesici takımdan elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri düşük kesme hızında yükseldiği görülmektedir.  $TiB_2$  yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete ve yüksek aşınma direncine sahip sert bir kaplamadır. Ancak düşük kesme hızlarında daha az mukavemet göstermektedir. Şekil 3d'de ilerleme oranı ve kesici uçların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri görülmektedir. Burada,  $Al_2O_3-TiCN-TiN$  kaplamalı kesici uç ve 0.15 mm/diş ilerleme oranında yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3c'ye benzer şekilde Şekil 3d'de diğer kesici uçlarda yüzey pürüzlülük değerinde artışlar görülmüştür.



Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametrelerinin etkisi (Effect of the cutting parameters on surface roughness)

### 3.1. ANOVA Kullanılarak Veri Analizi (Data Analysis Using ANOVA)

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 (Çizelge 5). Çizelge 5'de; kt kesici uç, a kesme derinliği (mm), V kesme hızı (m/dk.) ve f ilerleme oranıdır (mm/diş).

Çizelge 5. ANOVA sonuçları (Results of ANOVA)

Faktörler	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F	Faktör etkisi (%)
Yüzey pürüzlülüğü (Ra <sub>m</sub> -µm)					
kt	2	0.029867	0.014933	-	79.86
a	2	0.0038	0.001900	-	10.16
V	2	0.003267	0.001633	-	8.73
f	2	0.000467	0.000233	-	1.25
Hata (e)	0	-	-	-	-
Toplam	8	0.0374			

Çizelge 5’de ANOVA sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışmada 4 ana etki ele alınmış ve her bir hücrede tek gözlem olduğundan dolayı hataya ilişkin serbestlik derecesi sıfır çıkmıştır. Çizelge 5’de kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri; kesici uç (kt) %79.86, kesme derinliği (a) %10.16, kesme hızı (V) %8.73 ve ilerleme oranı (f) %1.25 olarak elde edilmiştir. Çizelgeye göre bu çalışma için yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli faktör %79.86 ile kesici uç olmuştur. Bu faktörü %10.16 oranla kesme derinliği takip etmektedir.

### 3.2. Deneysel Sonuçlar için Regresyon Metodu (Regression Method for Experimental Results)

Bu çalışmada, polinomial (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 kullanılmaktadır. İkinci dereceden regresyon modeli için öngörülen eşitlik aşağıda gösterilmiştir:

$$Ra_r = 0.4026 + 0.249kt - 0.0492kt^2 - 0.3916a + 0.20333a^2 - 0.000455V + 0.00000031746V^2 + 0.8f - 1.41666f^2 \quad (2)$$

$Ra_r$ , yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerini kullanarak oluşturulan tahmin denklemini ifade etmektedir. Regresyon sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü için elde edilen denklemin  $R^2$  değeri 1 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 6.** Yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranları kombinasyonlarının karşılaştırılması (Comparison of surface roughness and S/N ratios combinations)

	Seviye	$Ra$ ( $\mu m$ )	S/N (dB)
Başlangıç kombinasyonu	$A_2B_3C_1D_2$	0.58	4.731
Optimal kombinasyon (deneysel)	$A_1B_2C_3D_1$	0.32	9.897
Optimal kombinasyon (tahmin)	$A_1B_2C_3D_1$	0.47	6.558

Çizelge 6’da yüzey pürüzlülüğü değerleri deney ve tahmin vasıtasıyla elde edilen optimal kombinasyonlara göre karşılaştırılmıştır. Burada  $A_2B_3C_1D_2$  kombinasyonu, başlangıç kombinasyonu olarak 9 adet deneyden seçilmiştir. Çizelge 6’ya göre yüzey pürüzlülüğü değerleri  $0.58 \mu m$ ’dan  $0.32 \mu m$ ’a düşürülmüş ve optimal kombinasyonu sayesinde geliştirilen doğruluk verimliliği, %44.83’e  $((0.58-0.32)/0.58)$  kadar arttırılmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, EN AW 5754 AA’ya  $-145^\circ C$ ’de 12 saat kriyojenik işlem uygulanmış ve bu malzemeye dört farklı kesme parametresi kullanılarak yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Taguchi  $L_9$  ortogonal dizisi kullanılmış 81 deney yerine 9 deney yapılmış analiz sonucu optimal yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Optimal kombinasyonlarla yürütülen

### 3.3. Doğrulama Deneyleri (Confirmation Experiments)

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. Taguchi optimizasyon tekniğinde, optimize koşulun doğrulanması için en az bir doğrulama deneyinin yapılması gereklidir [37]. Doğrulama deneylerinden önce tahmin denklemi ve optimum şartlar kontrol faktörünün pürüzlülük değeri tahmin edilir. Kontrol faktörlerinin bireysel etkileri göz önünde bulundurularak;  $A_1B_2C_3D_1$  ( $A_1 = Al_2O_3-TiCN-TiN$  kaplamalı kesici uç,  $B_2 = 1$  mm kesme derinliği,  $C_3 = 600$  m/dak kesme hızı,  $D_1 = 0.15$  mm/dış ilerleme oranı) minimum yüzey pürüzlülüğü değeri ( $Ra_c$ ) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır;

$$Ra_c = A_1 + B_2 + C_3 + D_1 - 3Ra_m \quad (3)$$

Burada  $A_1$ ,  $B_2$ ,  $C_3$  ve  $D_1$  Çizelge 4 dikkate alınarak elde edilen değerler ve  $Ra_m$ , yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamasıdır. Bu değerler dikkate alındığında minimum yüzey pürüzlülük değeri ( $Ra_c$ ),  $0.47 \mu m$  olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmaların performansını değerlendirmek için optimal koşullar kullanılarak üç doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Optimal seviyeler dikkate alınarak ( $A_1B_2C_3D_1$ ) yürütülen doğrulama deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla  $0.34$ ,  $0.30$  ve  $0.32 \mu m$  olarak elde edilmiş ve bunların ortalamaları da  $0.32 \mu m$  olarak hesaplanmıştır.

doğrulama deneyleriyle en uygun pürüzlülük değerlerine ulaşılmıştır. Bu bağlamda çalışmadan elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Uygulanan kriyojenik ısıl işlem sonrası deney numunesinin yüzey sertliği  $54.9$  Brinell olarak ölçülmüştür. Bu alaşımın katalog bilgilerinde belirtilen sertlik değeri  $44$  HB’dir [34]. Alüminyum alaşımları, plastik deformasyon sürecindeki dislokasyon hareketinden kaynaklanan çok sayıda kayma sistemine sahip yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahiptir. Düşük sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik yapısı, kafes yapısını değiştirmeden dislokasyonların hareketini aktive eder ve böylece bu malzemelerin sünekliğinin düşük sıcaklıklarda artmasına veya korunmasına neden olur. Ancak bu durum kriyojenik şartlar altında değişkendir. Yapılan bir çalışmada; 5000 serisi alüminyum alaşımlarının sertleşme özelliğinde, 6000 serisi alüminyumlara

göre kriyojenik şartlar altında %9'luk bir artış gözlemlenmiştir[40]. Malzemenin sertleşmesindeki artış, kriyojenik işlem sonrası dislokasyon hareketlerini kısıtlayan bir yapı oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Deneysel sonuçlarına göre yüzey frezeleme parametrelerinin optimum kombinasyonu  $kt_1 a_2 V_3 f_1$  ( $kt_1 = \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN-TiN}$  kaplamalı kesici uç,  $a = 1$  mm kesme derinliği,  $V = 600$  m/dak kesme hızı,  $f = 0.15$  mm/diş ilerleme oranı) olarak bulunmuştur.
- ANOVA sonuçlarına göre kesici ucun %79.86 oranla yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermiştir. Bu faktörü %10.16 oranla kesme derinliği takip etmiştir.
- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiCN-TiN}$  kaplamalı kesici ucun yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif etkileri olduğu deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.
- Yürütülen deneyler sonucunda seçilen başlangıç pürüzlülük değeri  $0.58 \mu\text{m}$ 'dan optimum koşullarla yürütülen doğrulama deneyleriyle  $0.32 \mu\text{m}$ 'a düşürülmüştür.

Bu çalışmada Taguchi yöntemi, kesme parametrelerinin optimum kombinasyonlarını belirlemek, endüstride yaygın olarak kullanılan ve kriyojenik işlem uygulanmış EN AW 5754 AA'nın yüzey frezelemesinde işleme maliyetlerini ve süresini en aza indirmek için başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada sunulan metot, alüminyum alaşımlarının çeşitli işleme operasyonlarına uygulanabilir niteliktedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

2017.06.06.564 ve 2012.06.06.120 numaralı projelere vermiş oldukları destekten dolayı Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Durmuş H., "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).
- [2] Rawangwong S., Chatthong J., Boonchouytan W. and Burapa R., "Influence of cutting parameters in face milling semi-solid AA-7075 using carbide tool affected the surface roughness and tool wear", *Energy Procedia*, 56 (1): 448–457, (2014).
- [3] Escalona P.M. and Maropoulos P.G., "A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools", *Journal of Manufacturing Systems*, 36: 216–223, 2015.
- [4] Kechagias J., Petropoulos G., Iakovakis V. and Maropoulos S. (2009), "An investigation of surface texture parameters during turning of an inforced polymer composite using design of experiments and analysis", *Int. J. Experimental Design and Process Optimization*, 1 (2/3): 164–177, (2009).
- [5] Danilevsky V., "Manufacturing Engineering", No. 121, TMMOB Publishing, Ankara, (1987).
- [6] Boothroyd G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, 5th ed.", McGraw- Hill, New York, (1981).
- [7] Yang J.L. and Chen J.C., "A systematic approach for identifying optimum surface roughness performance in end-milling operations", *Journal Industrial Technology*, 17 (1): 1–8, (2001).
- [8] Benardos P.G. and Vosniakos G.C., "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (6): 833–844, (2003).
- [9] Risbood K.A., Dixit U.S. and Sahasrabudhe A.D., "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process", *Journal of Materials Processing Technology*, 132 (1–3): 203–214, (2003).
- [10] Khattree R. and Rao C.R., "Statistics in Industry, Handbook of Statistics V.22", Gulf Professional Publishing, Netherlands, (2003).
- [11] Davim J.P., "Sustainable Manufacturing", John Wiley and Sons, Hoboken, (2010).
- [12] Lin Y.C., Chen Y.F., Wang D.A. and Lee H.S., "Optimization of machining parameters in magnetic force assisted EDM based on Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (7): 3374–3383, (2009).
- [13] Zhang J.Z., Chen J.C. and Kirby E.D. (2007), "Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method", *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (1–3): 233–239, (2007).
- [14] Mandal N., Doloi B., Mondal B. and Das R., "Optimization of flank wear using zirconia toughened alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and regression analysis", *Measurement*, 44 (10): 2149–2155, (2011).
- [15] Asiltürk İ. and Neşeli S., "Multi response optimization of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis", *Measurement*, 45 (4): 785–794, (2012).
- [16] Günay M. and Yücel E., "Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron", *Measurement*, 46 (2): 913–919, (2013).
- [17] Kurt M., Bağcı E. and Kaynak Y., "Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes", *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40 (5–6): 458–469, (2009).
- [18] Babu GHV P., Murthy BSN., Rao K.V., Kumar K.A., "Taguchi based optimization of process parameters in orthogonal turn milling of ASTM B319", *Materials Today Proceedings*, 4 (2, Part A): 2147–2156, (2017).
- [19] Vardhan M. V., Sankaraiyah G., Yohan M., Rao H. J., "Optimization of parameters in CNC milling of P20 steel using Response Surface Methodology and Taguchi Method", *Materials Today Proceedings*, 4 (8): 9163–9169, (2017).
- [20] Aravind S., Shunmugesh K., Biju J., Vijayan J.K., 2017, "Optimization of micro-Drilling parameters by Taguchi Grey Relational Analysis", *Materials Today Proceedings*, 4 (2, Part B): 4188–4195, (2017).

- [21] Meyers A.R. and Slattery T.J., “**Basic Machining Reference Handbook**”, Industrial Press, New York, (2001).
- [22] Vakondios D., Kyratsis P., Yıldız S. and Antoniadis A., “Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy AL7075-T6”, *Measurement*, 45 (6): 1480–1488, (2012).
- [23] Kuram E. and Özçelik B., “Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill”, *Measurement*, 46 (6): 1849–1864, (2013).
- [24] Dimin S. F., Anand T.J.S., Jamli R., Kamely A., “Surface quality investigation of Al 6061-T6511 using TiAlN coated milling tool”, *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, 10 (4): 55-59, (2010).
- [25] Kadirgama K., Noor M.M., Rahman M.M., Rejad M. R. M., Haron C.H.C., “Surface roughness prediction model of 6061-T6 aluminium alloy machining using statistical method”, *European Journal Scientific Research*, 25 (2): 250-256, (2009).
- [26] Baharudin B.T.H.T., İbrahim M.R., İsmail N., Leman Z., Ariffin M.K.A. and Majid D.L., “Experimental investigation of HSS face milling to AL6061 using Taguchi method”, *Procedia Engineering*, 50: 933–941, (2012).
- [27] Kechagias J.D., Ziogas C.K., Pappas M.K. and Ntziatzias I.E., “Parameter optimization during finish end milling of Al alloy 5083 using robust design”, *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2011)*, London, UK, (2011).
- [28] Pınar A.M., “Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminum alloy via Taguchi method”, *Arabian Journal Science and Engineering*, 38 (3): 705–714, (2013).
- [29] Chen P., Malone T., Bond R. and Torres P., “Effects of cryogenic treatment on the residual stress and mechanical properties of an aerospace aluminum alloy”, *Proceedings of the 4th Conference on Aerospace Materials, Processes, and Environmental Technology*, (2001).
- [30] Pavan K.M., Sachin L.S., Mayur S., Chandrashekara A. and Ajaykumar B.S., “Effect of cryogenic treatment on the mechanical and microstructural properties of aluminum alloys – a brief study”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2 (5): 95-99, (2014).
- [31] Trieu H.H., Morris L.H., Kaufman M.E., Hood R. and Jenkins L.S., “Investigation of cryogenic treatment of UHMWPE”, *Proceedings of the Sixteenth Southern Biomedical Engineering Conference*, 90-91, (1997).
- [32] Lulay K.E., Khan K. and Chaaya D., “The Effect of Cryogenic Treatments on 7075 Aluminum Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(5): 479-480, (2002).
- [33] Joshi P., Singh J., Dhiman P., Shekhar H. and Kumar V., “Effect of cryogenic treatment on various materials: A review”, *HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research*, 14: 1-11, (2015).
- [34] [www.aalco.co.uk](http://www.aalco.co.uk), “Properties of 5754 H111 Aluminum Alloy”, (2018).
- [35] [www.seykoc.com.tr](http://www.seykoc.com.tr), “Alüminyum 5754 H111 alaşımının özellikleri”, (2018).
- [36] Krishnaiah K. and Shahabudeen P., “*Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*”, PHI Learning Private Limited, New Delhi, (2012).
- [37] Roy R.K., “*A Primer on the Taguchi Method, Competitive Manufacturing Series*”, Van Nostrand Reinhold, New York, (1990).
- [38] Fowlkes W.Y. and Creveling C.M., “*Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*”, Prentice Hall, New Jersey, (1995).
- [39] [www.kapco.com.tr](http://www.kapco.com.tr), “Kesici Uç Kaplama Türleri ve Özellikleri”, (2018).
- [40] Park D.H., Choi S.W., Kim J.H. and Lee J.M., “Cryogenic mechanical behavior of 5000- and 6000-series aluminum alloys: Issues on application to offshore plants” *Cryogenics*, 68: 44-58, (2015).