



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Nikel Esaslı Waspaloy Süper Alaşımının Seramik Takımlarla Frezelenmesinde Kesme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu

Çağrı Vakkas YILDIRIM<sup>a,\*</sup>, Turgay KIVAK<sup>b</sup>, Fehmi ERZİNCANLI<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Makine Programı, Bolu Meslek Yüksekokulu, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, TÜRKİYE

<sup>b</sup> İmalat Müh. Bölümü, Teknoloji Fakültesi,, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Makine Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi,, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

\* Corresponding author's e-mail address: cagriyildirim@ibu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada, nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesi esnasında işleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler esnasında işleme parametresi olarak, üç farklı seramik uç (alümina takviyeli, whiskers takviyeli, sialon takviyeli), üç farklı soğutma-yağlama yöntemi (kuru, geleneksel, minimum miktarda yağlama), üç farklı kesme hızı (500, 600, 700 m/dak), üç farklı ilerleme (0.02, 0.04, 0.06 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0.5 mm) seçilmiştir. Deney sonuçlarının analizi ile birlikte en iyi kesme kuvveti değerini sialon takviyeli seramik uçla, minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi kullanılarak 600 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme hızında çıktığı görülmüştür. Deneylerle elde edilen kesme kuvveti değerleri için varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve işleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre, kesme kuvveti üzerinde en etkili parametrenin %60,9 katkı oranı ile soğutma-yağlama yöntemi olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Frezeleme, Kesme kuvveti, MMY, Taguchi, Waspaloy

## Optimization of Cutting Force in Milling of Nickel Based Waspaloy Superalloy with Ceramic Tools by Taguchi Method

### ABSTRACT

In this study, the effects of machining parameters on the cutting force during the milling of nickel based Waspaloy superalloy was investigated. During the experiments, three different ceramic tools (alumina reinforced, whiskers reinforced, sialon reinforced), three different cooling-lubrication methods (dry, conventional, minimum quantity lubrication), three different cutting speeds (500, 600, 700 m/min), three different feed rates (0.02, 0.04, 0.06 mm/rev), and constant depth cuts (0.5 mm) were selected as machining parameters. Experiments were performed using the orthogonal array of Taguchi L<sub>27</sub> (3<sup>4</sup>). The analysis results revealed that the best cutting force value obtained with sialon reinforced ceramic tool, minimum quantity

lubrication system (MQL), 600 m/min cutting speed and 0.02 mm/rev feed rate.

Variance analysis was performed for the cutting force values obtained by the experiments and the effect of the machining parameters on the cutting force was investigated. In addition, regression analysis was applied to reveal the relationship between dependent variables and independent variables. According to the analysis results, the most effective parameter on the cutting force was the cooling-lubrication method (60.9%). (genel olarak elden geçmesi lazım)

*Keywords: Milling, Cutting force, MQL, Taguchi, Waspaloy*

## I. GİRİŞ

**W**aspaloy, nikel esaslı bir süper alaşım olup yüksek oksidasyon direnci, mükemmel derecede yüksek işlenebilirlik, genellikle malzemeyi işlemedeki kolaylık ya da zorluk olarak ifade edilebilmektedir. Bir başka deyişle, iş parçasının kesici takım aracılığıyla şekillendirilmesindeki kolaylık veya zorluktur [5]. Bir malzemenin işlenebilirliği, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi bileşenler ölçülerek tanımlanmaktadır [6]. Bu bileşenlerden biri olan kesme kuvveti, işlenebilirliğin diğer çıktı parametreleri olan yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve işleme sırasında meydana gelen titreşimle doğrudan ilgili bir kavramdır [7]. Bu nedenle, talaş kaldırma işlemlerinde kalitenin artırılması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi için kesme kuvvetlerinin tespiti ve analiz edilmesi önem arz etmektedir [8]. Kesme mekaniğinin farklılığı nedeniyle frezeleme işlemi geometrik olarak diğer talaş kaldırma yöntemlerinden daha karmaşıktır [9]. Kesme işleminde talaş bazen takıma yapışarak bir sonraki adıma taşınır ve bu kesme kenarında talaş yığılmasına dolayısıyla kesme kuvvetlerinin artışına sebep olur. Ayrıca birden fazla kesici ağız kesme işlemine katıldığından, kesme kuvvetlerinde dalgalanma meydana gelir. Frezelemede kesme kuvvetleri, frezeleme tipi, takım konumu, iş malzemesi, takım geometrisi, talaş kalınlığı, takım aşınma tipi ve kesme parametreleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle frezeleme işlemlerindeki kesme kuvvetlerinin tespiti diğer talaş kaldırma işlemlerine göre daha zor ve önemlidir [10]. Verimli bir frezeleme işlemi için kesme gücünün hesaplanması ve buna bağlı olarak da iş mili ve iş bağlama aparatının boyutlandırılması gerekir [11]. Optimum kesme kuvvetlerinin elde edilmesi için uygulanan yöntemlerden biri de kesme sıvısı kullanımıdır [12].

Kesme sıvısı kullanımı, talaş kaldırma esnasında kesme bölgesinde meydana gelen ısıyı azaltarak işlenebilirliğin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Ancak, klasik kesme sıvısı kullanımı, sıvı içerisinde bulunan kimyasalların doğaya zarar vermesi, cilde temas halinde insan sağlığını riske atması, depolama, tedarik etme ve atığı yok etme gibi nedenlerden dolayı çevre, insan sağlığı ve üretim maliyetlerine olumsuz etkide bulunmaktadır [13]. Bu nedenlerden dolayı, işletmeler kullanılan kesme sıvısı miktarını azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için alternatif yöntem arayışlarını sürdürmektedirler [14]. Kriyojenik soğutma, katı soğutma-yağlama, minimum miktarda yağlama (MMY), yüksek basınçla soğutma, basınçlı gazlarla soğutma, kesme sıvısını takım içinden verme gibi birçok yöntem bu alternatifler arasındadır [15]. Bu yöntemlerden biri olan minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi, çevre ve insan sağlığını çok daha az etkilemesi ve üretim maliyetleri üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle popüleritesi giderek artan bir yöntemdir.

Yarı kuru işleme olarak da bilinen MMY sisteminin en belirgin faydaları üretim maliyetlerini aşağı çekmek, çevre ve işçi sağlığını korumak olarak sıralanabilir [16]. MMY sistemi en genel tanımıyla çok az miktarda (10-200ml/h) yağın basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmesi olarak tanımlanabilmektedir [17]. MMY, konvansiyonel işleme ve kuru işleme ile karşılaştırıldığında, buğu ve püskürtmeyi azaltma, kesici takımın termal şoklardan dolayı oluşan zararları azaltma, takım-ış parçası ara yüzündeki ısıyı azaltma, kesici takımdaki aşınmayı azaltma ve üretim maliyetlerini düşürme gibi birçok avantaja sahiptir [18].

Literatür incelemesi yapıldığında, Waspaloy'un işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmaların ve seramik takımların soğutma-yağlama sistemi kullanılarak test edilmesine ait çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle nikel esaslı süper alaşımların MMY sistemi altındaki işlenebilirlik çalışmalarının bazıları aşağıda verilmiştir.

Olgun ve Budak [19] kuru, ıslak ve MMY şartları altında 1050, Waspaloy ve Ti6Al4V malzemelerini tornalamışlar ve soğutma-yağlama yönteminin takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Waspaloy'un işlenmesinde kuru işleme ye göre ıslak işleme ve MMY %100 iyileşme sağladığı iddia edilmiştir. Olovşjö ve Nyborg [20] yaptıkları çalışmada, farklı mikro yapılarıdaki Inconel 718 ve Waspaloy'un kaplamasız karbür takımlarla sabit kesme hızı (30 m/dak), sabit ilerleme (0.1 m/dev) ve sabit kesme derinliği (2mm) altında tornalayarak malzeme türüne bağlı olarak yanak aşınması, çentik aşınması, krater aşınması ve kesme kuvvetindeki değişimi incelemişlerdir. Wang ve arkadaşları [21], kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlar ile nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 182'nin frezelenmesinde MMY sistemini kuru işleme ile karşılaştırmışlardır. Braga ve arkadaşları [22] Alüminyum-Slikon alaşımının (A356) kaplamasız ve elmas kaplamalı karbür takımlar ile ıslak ve MMY (10 ml/s 72 m<sup>3</sup>/s ve 4.5 bar basınç) soğutma-yağlama sistemleri altında delinmesinin işlenebilirlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sreejith [23] çalışmasında, elmas kaplamalı karbür takımlar ve farklı soğutma-yağlama yöntemlerinin 6061 alüminyum alaşımını işlenmesinde kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Diniz ve arkadaşları [24] yaptıkları bu çalışmada, kaplanmış CBN takımla sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğini minimum miktarda yağlama, kuru kesme ve konvansiyonel kesme şartlarında işleyerek çıkan sonuçları incelemişlerdir.

Bu çalışmada, Waspaloy'un frezelenmesinde kesici takım takviye türü, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi incelenerek en uygun işleme parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Deney tasarımı sırasında Taguchi L<sub>27</sub> ortogonal dizini kullanılmıştır. Minimum kesme kuvvetine ulaşmada optimum kesme koşullarının belirlenmesi için Taguchi S/N oranı kullanılmıştır. Ayrıca, bundan sonraki benzer çalışmalara yardımcı olması için lineer ve quadratic regresyon analizi uygulanmış ve tahmin denklemleri geliştirilmiştir. Son olarak da geliştirilen modellerin güvenilirliği doğrulama deneyleriyle test edilmiştir.

## II. MALZEME ve YÖNTEM

### *A. MALZEME*

Frezeleme deneylerinde nikel esaslı bir süper alaşım olan Waspaloy kullanılmıştır. Waspaloy, içeriğindeki nikel, krom ve kobalt nedeniyle mükemmel bir yüksek sıcaklık mukavemeti ve oksidasyon direncine sahip bir malzemedir. Deneylerde kullanılan numuneler 150x100x21 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Deneylere geçmeden önce yüzeydeki oksit ve kalıntıların sonuçları

etkilememesi için yüzey frezeleme ile numunenin yüzeyi temizlenmiştir. Malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Waspaloy alaşımının kimyasal özellikleri

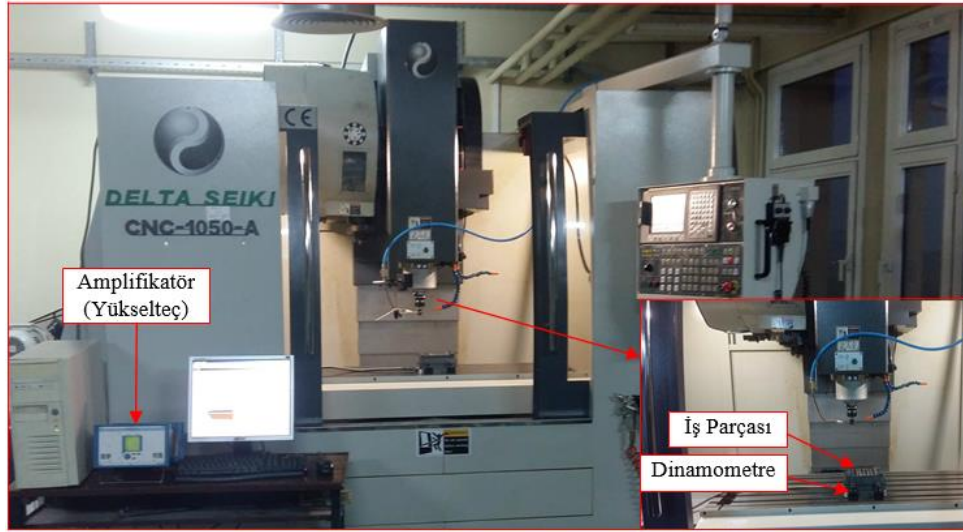
%Al	%B	%C	%Cr	%Co	%Fe	%Mo	%Ni	%Ti	%Zr
1.40	0.010	0.050	19.50	13.00	1.00	4.30	57.00	3.00	0.70

**Tablo 2.** Waspaloy alaşımının mekanik özellikleri

Erime Aralığı (°C)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Sertliği Rockwell C	Çekme Dayanımı	% Uzama
1330-1360	204	38	897-1276 MPa	26.6

### B. FREZELEME ŞARTLARI

Frezeleme deneyleri için maksimum motor gücü 11 kW ve maksimum devir sayısı 10.000 dev/dak olan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. Şekil 1’de frezeleme deneyleri için hazırlanan deney düzeneği görülmektedir.



**Şekil 1.** Deney düzeneği

### C. KESİCİ UÇLAR VE TAKIM TUTUCU

Talaş kaldırma deneyleri, teknik özellikleri Tablo 3’de verilen sialon, whiskers ve alümina olmak üzere üç farklı takviye türüne sahip seramik takımlar ile yürütülmüştür. Deneyler esnasında, ISO 8688-1’de tanımlanan özelliklere ve deneylerin yapıldığı CNC dik işleme merkezinin kesici takım bağlama başlığı yuvasına uygun olarak R300C-025A20-09M kodlu SANDVİK marka takım tutucu seçilmiştir.

**Tablo 3.** Kesici takım özellikleri

ISO Kodu	Takviye Türü	İçeriği (%)	İç Teğet Daire Çapı	Köşe Radyüsü
RPGN090300E 6060	Sialon	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.525 mm	4.762 mm
RPGN090300T 01020 670	Whiskers	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (80) SiCw (20)	9.525 mm	4.762 mm
RPGN090300T 01020 650	Alümina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70) TiN (22,5) TiC (7,5)	9.525 mm	4.762 mm

#### **D. SOĞUTMA-YAĞLAMA YÖNTEMLERİ**

İşlenebilirlik deneyleri esnasında kuru, geleneksel ve minimum miktarda yağlama (MMY) olmak üzere üç tip işleme şartı tercih edilmiştir. Islak işleme olarak da bilinen geleneksel işleme ile talaş kaldırma işlemi için %8 oranında bor yağı katkılı yağ-su emülsiyonu hazırlanmış ve CNC freze tezgâhının kendi soğutma sistemi kullanılmıştır. MMY sistemi ile yapılan deneyler için SKF firması tarafından üretilen Vario modeli tercih edilmiştir. Yapılan ön deneyler ve literatür araştırması neticesinde MMY parametresi olarak; 8 bar basınç, bitkisel esaslı kesme yağı (yoğunluk: 0.895 g/cm<sup>3</sup>-20°C, kinematik viskozite: 5 mm<sup>2</sup>/sn-40 °C, parlama noktası: 170 °C), 100 ml/h debi, 25 mm püskürtme mesafesi ve 45° püskürtme açısı seçilmiştir.

#### **E. KESME KUVVETİ ÖLÇÜMLERİ**

Kesme kuvveti ölçümlerini yapmak için KISTLER 9257B bileşenli piezo-elektrik dinamometre kullanılmıştır. Dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına (KISTLER PCIM DAS 1602/16) aktarılması için KISTLER 5070-A çok kanallı amplifier kullanılmıştır. Son olarak verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı kullanılmıştır. Dinamometreye deney numunesinin bağlanabilmesi için eksenler arası 120 mm olan 8 mm çapında boydan boya delik delinmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçümü önceden belirlenen parametrelere bağlı olarak her bir numune için 100 mm boyda yüzey frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deliklerin olduğu bölgede kesme kuvvetlerinde değişim olacağı göz önüne alınarak kesme kuvveti ölçümleri orta kısımlardan yapılmıştır.

### **III. DENEYSEL TASARIM VE OPTİMİZASYON**

#### **A. TAGUCHİ METODU VE DENEY TASARIMI**

Geleneksel deneysel tasarım yöntemleri oldukça karmaşık ve kullanımı zordur. Ayrıca, işleme parametrelerinin sayısı arttıkça yapılacak deney sayısı da artmaktadır. Bütün bu karmaşıklığı ortadan kaldırmak için bir takım deney tasarım yöntemleri geliştirilmiştir [25]. Bu yöntemlerden biri olan

Taguchi yöntemi, deney tasarımı için "ortogonal dizi" denilen özel tabloları kullanır ve böylece deney sayısını önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, bu yöntem sayesinde kontrol edilemeyen faktörlerin deneyler üzerindeki etkisi minimize edilebilmektedir. Taguchi yönteminin temel felsefesi tasarım aşamasında kaliteyi sağlamaktır. Taguchi yönteminin en büyük avantajları, deney sayısını azaltmak, maliyeti düşürmek ve daha kısa sürede hedefe ulaşılmasını sağlamaktır [26, 27].

Taguchi yöntemi, sonuçları incelemek için S/N oranı denilen istatistiksel bir ölçü kullanmaktadır. Bu yöntemde, "sinyal" çıkış karakteristiği için istenen değeri (ortalama) belirtirken "gürültü" istenmeyen değeri (standart sapma) ifade etmektedir [28]. S/N oranlarının analizinde "en büyük en iyi", "en küçük en iyi" ve "nominal en iyi" olmak üzere üç ana karakteristik değeri kullanılmaktadır [29]. Çalışmanın amacı en düşük kesme kuvveti değerini hesaplamak olduğundan "en küçük en iyi" yaklaşımı seçilmiştir ve Eşitlik 1 kullanılarak S/N oranları hesaplanmıştır;

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

Burada,

$Y$ : Performans karakteristik değeri (kesme kuvveti),

$n$ :  $Y$  değerlerinin sayısıdır [30]

Kontrol faktörü olarak seçilen kesici takım, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ( $V$ ) ve ilerleme ( $f$ ) ile bu faktörlere ait seviyeler Tablo 4'te gösterilmektedir. Optimum kesme parametrelerini belirlemek ve işleme parametrelerinin etkilerini analiz etmek için en uygun ortogonal dizi olan  $L_{27}(3^4)$  seçilmiştir [31].

**Tablo 4.** İşleme parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesici takım takviye türü	A	Alümina	Whiskers	Sialon
Soğutma-Yağlama yöntemi	B	Kuru	Islak	MMY
Kesme hızı (m/dak)	C	30	45	60
İlerleme (mm/dev)	D	0.1	0.15	0.2

## IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen kesme kuvveti değerleri ve S/N oranları Tablo 5'te sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda kesme kuvvetlerinin ortalama değeri 775.3 N olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde S/N oranlarının ortalama değeri -57.61 dB olarak hesaplanmıştır.

*Tablo 5. Deney sonuçları ve S/N oranları*

Den. No.	Kontrol faktörleri				Kesme Kuvveti, (N)	S/N oranı (dB)
	A Kesici takım (KT)	B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY)	C Kesme hızı (V)	D İlerleme hızı (f)		
1	Alümina	Kuru	500	0.02	811	-58.18
2	Alümina	Kuru	600	0.04	836	-58.44
3	Alümina	Kuru	700	0.06	938	-59.44
4	Alümina	Islak	500	0.04	789	-57.94
5	Alümina	Islak	600	0.06	831	-58.39
6	Alümina	Islak	700	0.02	784	-57.89
7	Alümina	MMY	500	0.06	756	-57.57
8	Alümina	MMY	600	0.02	643	-53.95
9	Alümina	MMY	700	0.04	659	-54.95
10	Whisker	Kuru	500	0.04	923	-59.30
11	Whisker	Kuru	600	0.06	948	-59.54
12	Whisker	Kuru	700	0.02	881	-58.90
13	Whisker	Islak	500	0.06	847	-58.56
14	Whisker	Islak	600	0.02	703	-56.94
15	Whisker	Islak	700	0.04	768	-57.71
16	Whisker	MMY	500	0.02	629	-55.97
17	Whisker	MMY	600	0.04	729	-57.25
18	Whisker	MMY	700	0.06	741	-57.40
19	Sialon	Kuru	500	0.06	893	-59.02
20	Sialon	Kuru	600	0.02	707	-56.99
21	Sialon	Kuru	700	0.04	764	-57.66
22	Sialon	Islak	500	0.02	749	-57.49
23	Sialon	Islak	600	0.04	810	-58.17
24	Sialon	Islak	700	0.06	846	-58.54
25	Sialon	MMY	500	0.04	675	-56.59
26	Sialon	MMY	600	0.06	642	-56.80
27	Sialon	MMY	700	0.02	631	-56.00

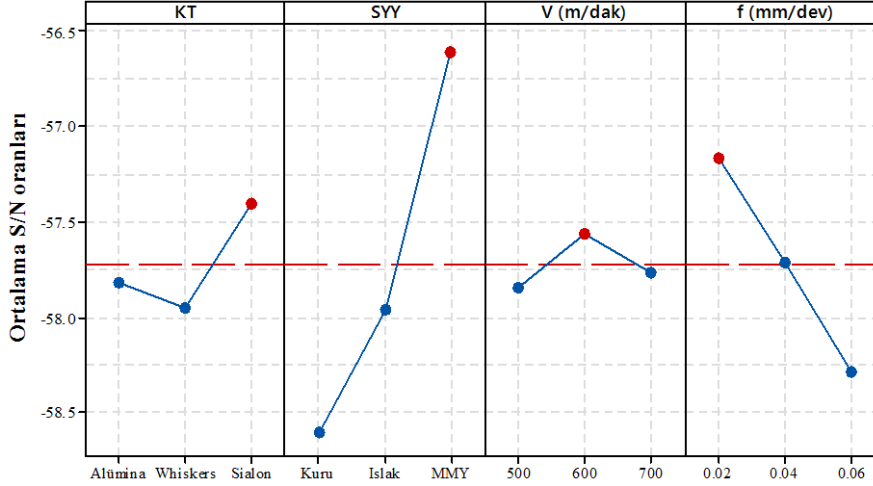
Deney tasarımına uygun şekilde elde edilen sonuçlar Taguchi metodu aracılığıyla S/N oranları ile optimize edilmiştir. Tablo 6’da kesme kuvvetleri için S/N tablosu verilmiştir ve kesme kuvveti için kontrol faktörlerine ait optimum seviyeleri göstermektedir.

*Tablo 6. Kesme kuvvetleri için S/N yanıt tablosu*

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	A	B	C	D
Seviye 1	-57.82	-58.61	-57.85	<b>-56.17</b>
Seviye 2	-57.95	-57.96	<b>-57.56</b>	-57.72
Seviye 3	<b>-57.40</b>	<b>-56.61</b>	-57.77	-58.29

Delta 0.55 2.00 0.29 1.12

En düşük kesme kuvveti değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları, faktör A için (Seviye 3, S/N= -57.40 dB), faktör B için (Seviye 3, S/N=-56.61 dB), faktör C için (Seviye 2, S/N=-57.56 dB) ve faktör D için (Seviye 1, S/N=-56.17 dB) olarak belirlenmiştir (Tablo 6). Şekil 2’de Fr değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

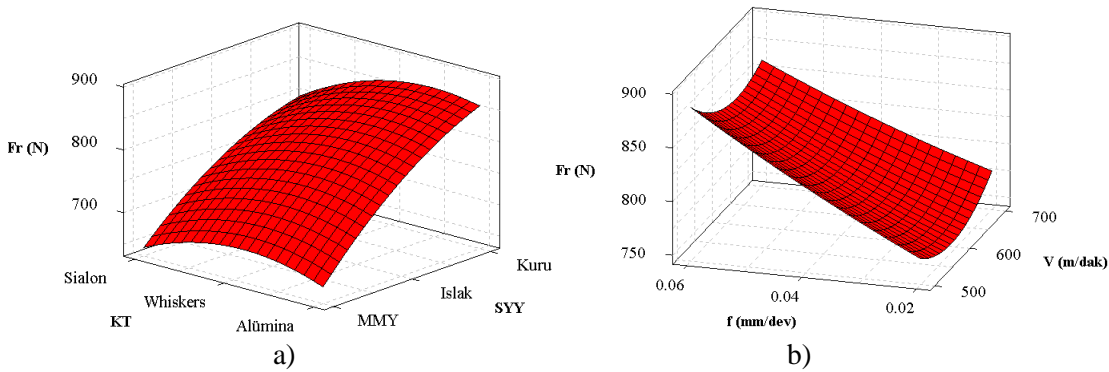


Şekil 2. S/N oranları ana etki grafiği

Şekil 2 incelendiğinde, en düşük kesme kuvveti değeri Sialon takviyeli kaplamalı karbür kesici uçla ( $A_3$ ), MMY sistemi kullanılarak ( $B_3$ ), 600 m/dak kesme hızı ( $C_2$ ) ve 0.02 mm/dev ilerleme ( $D_1$ ) ile elde edildiği görülmüştür.

### A. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 3’te farklı kesme parametreleri altında yapılan frezeleme işleminde kesme kuvveti ile diğer ana faktör etkileşimlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren üç boyutlu yüzey grafikleri verilmiştir.



Şekil 3. Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme

Şekil 3a incelendiğinde, en düşük kesme kuvvetinin sialon takviyeli seramik kesici uçlarla yapılan deneylerde elde edildiği görülmektedir. Alümina takımlar ile yürütülen deneylerden elde edilen kesme kuvveti değeri whiskers takviyeli takımlarda %1.73 oranında artarken sialon takviyeli takımlar ile



yapılan deneylerde %4.69 oranında azalmıştır. Kesme parametreleriyle beraber kesici takım geometrisi ve işlenen malzemenin sertliği de kesme kuvvetleri üzerinde önemli etkiye sahiptir [32]. Dolayısıyla, yuvarlak geometriye sahip takımların üçgen geometriye sahip takımlara nazaran işlenebilirliğe katkı açısından daha iyi sonuçlar verdiğine dair bilgiler literatürde yer almaktadır [33-35]. Sialon takviyeli kesiciler, yüksek hızlarda aşınmaya karşı daha fazla dayanım gösteren bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışına karşı direnç göstermiş ve böylece kesme kuvvetleri düşük çıkmıştır [36]. Dahası, kesme bölgesinde takım-talaş ara yüzeyindeki temas yüzeyinin kısılması ve sürtünmenin azalması kesme kuvvetlerinin düşüşünde önemli rol oynamıştır. Sialon takviyeli seramik kesici takımların kullanılması esnasında elde edilen düşük kesme kuvveti literatürle de paralellik göstermektedir [37-39].

Soğutma-yağlama sisteminin kesme kuvveti üzerindeki etkisini gösteren kısım incelendiğinde (Şekil 3a), en düşük kesme kuvvetinin MMY sistemi ile yapılan talaş kaldırma işleminde elde edildiği görülmektedir. Bu durum, ıslak işleminin seramik takımlar için tavsiye edilen bir soğutma-yağlama yöntemi olmaması ile ilişkilendirilmiştir [40]. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %7.45 ve %20.73 oranlarında iyileşme görülmüştür.

Şekil 3b'de yer alan ve kesme hızı ile kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, 500 m/dak kesme hızında yüksek kesme kuvveti çıkarken 600 m/dak kesme hızında kesme kuvveti azalmış 700 m/dak kesme hızında yine artma eğilimine girmiştir. Düşük kesme hızlarında yüksek kesme kuvveti çıkması bilinen bir durumken yüksek kesme hızlarında kesme kuvveti artışı iş parçası kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların kesici takım üzerinde oluşturduğu serbest kenar ve çentik aşınmalarıyla ilişkilendirmiştir [41]. Bir başka deyişle, düşük kesme hızlarında kesici takımda meydana gelen aşınmanın kesme kuvvetini artırdığı, yüksek hızlarında ise kesme kenarındaki sıcaklık artışı iş parçası malzemesinin takım kesme kenarına basınçla kaynak olmasına neden olması ve böylece kesme kuvvetinin artması ile açıklanabilir [42]. 500 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile 600 m/dak ve 700 m/dak kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kesme kuvvetindeki azalma sırasıyla %3.15 ve %0.85 oranlarında olmuştur.

Şekil 3b'de yer alan ve kesme kuvvetinin ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde, düşük ilerleme değerinde kesme kuvvetinin daha düşük olduğu, ilerlemenin artması ile birlikte kesme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Bu artış 0.04 mm/dev ilerleme için %6.35 oranında olurken 0.06 mm/dev ilerleme için %13.83 seviyesinde olmuştur. İlerlemenin artışı ile kesme kuvvetindeki artış değerlendirildiğinde, ilerlemenin artması ile birlikte kaldırılan talaş hacmi artmış ve böylece kesme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Bu durum literatürle paralellik arz etmektedir [43].

## *B. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)*

Kesme kuvveti deneyleri için ANOVA sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde, kesme kuvveti üzerinde faktör A, B, C, ve D'nin yüzde katkıları sırasıyla %5.1, %60.9, %1.3, ve %19.1 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün soğutma-yağlama yöntemi (B) olduğu görülmektedir. Kesme kuvveti için hata yüzdesi %13.6 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Tablo 7. ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	2	12148	6074	3.36	0.057	5.1
B	2	145192	72596	40.21	0.000	60.9
C	2	2972	1486	0.82	0.455	1.3
D	2	45488	22744	12.60	0.000	19.1
Hata	18	32497	1805	-	-	13.6
Toplam	26	238296	-	-	-	100

### C. REGRESYON ANALİZİ

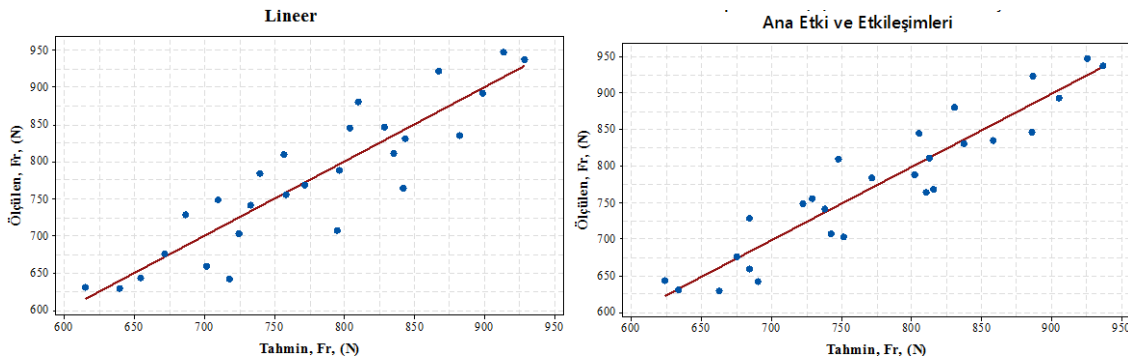
Regresyon ile ilgili giriş cümlesi. Kesme kuvveti denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım kaplama tipi (KT), soğutma-yaglama yöntemi (SYY), kesme hızı (V) ve ilerleme (f) parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

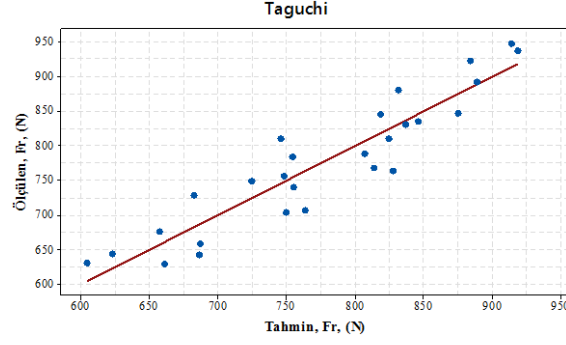
$$Fr = 908.9 - 18.3KT - 88.7SYY - 0.034V + 2511f \quad (2)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı  $R^2 = 0.810$  olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel kesme kuvvetleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$Fr = 1328 + 121KT + 2SYY - 2.330V + 5549f - 32.00KT^2 - 24.90SYY^2 + 0.00215V^2 + 10246f^2 + 11.6KT \times SYY - 0.058KT \times V + 14KT \times f + 0.01SYY \times V - 528SYY \times f - 4.72V \times f \quad (3)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı  $R^2 = 0.867$  olarak bulunmuştur. Şekil 4'te deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait olduğu görülmektedir.





Şekil 4. Fr için ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması

#### D. OPTİMUM KESME KUVVETİNİN TAHMİNİ

Kesme kuvveti deneyleri neticesinde optimum parametre grubu  $A_3B_3C_2D_1$  şeklinde elde edilmiştir. Optimum kesme kuvveti tahmininde Eşitlik 4 kullanılmıştır.

$$Fr_{opt} = (A_3 - T_{Fr}) + (B_3 - T_{Fr}) + (C_2 - T_{Fr}) + (D_1 - T_{Fr}) + T_{Fr} \quad (4)$$

Burada, ( $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ) kesme kuvvetinin optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Tablo 8).  $T_{Fr}$  değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama kesme kuvveti değerini temsil etmektedir (Tablo 5). Hesaplamalar sonucunda  $Fr_{opt}$  değeri 586.1 N olarak bulunmuştur.

Tablo 8. Kesme kuvvetleri için ortalama yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	A	B	C	D
Seviye 1	782.9	855.6	785.8	<b>726.4</b>
Seviye 2	796.6	791.9	<b>761.0</b>	772.6
Seviye 3	<b>746.3</b>	<b>678.3</b>	779.1	826.9
Delta	50.2	177.3	24.8	100.4

#### E. DOĞRULAMA DENEYLERİ

En düşük kesme kuvvetine ait parametre grubu deneylerden farklı olarak  $A_3B_3C_2D_1$  şeklinde elde edilmiştir. Optimum sonuçları veren parametre grubu yürütülen deneylerin arasında yer almadığından doğrulama deneyi yapmak gerekmektedir. Tablo 9'da deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

**Tablo 9.** Doğrulama deneyi sonuçları

Seviye	Birinci Dereceden Denklem			Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem			Taguchi Denklemi		
	Deney	Tahmin	Hata (%)	Deney	Tahmin	Hata (%)	Deney	Tahmin	Hata (%)
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	586.1	717.07	22.35	586.1	612.65	4.53	586.1	670.21	14.35
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	784	739.62	5.66	784	771.46	1.60	784	754.49	3.76
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	707	795.12	12.46	707	742.42	5.01	707	763.51	7.99

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, işlenebilirliği zor malzemeler arasında yer alan Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde kesici takım farkı, kesme parametreleri ve soğutma-yaglama yöntemlerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla CNC freze tezgâhında ISO 8688-1 standardına uygun olarak bir dizi deney yapılmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Deneyler neticesinde en düşük kesme kuvveti değeri MMY sistemi altında sialon takviyeli seramik takımlarla 600 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerlemede elde edilmiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 586.1 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise kuru işleme altında whiskers takviyeli seramik takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 600 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri ise 948 N olarak ölçülmüştür. Maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri arasında %61.75 oranında bir fark oluşmuştur.
- En düşük kesme kuvveti değerini veren soğutma-yaglama yöntemi MMY sistemi olurken en yüksek kesme kuvveti değerlerine kuru işleme altında ulaşılmıştır.
- Soğutma-yaglama yönteminin etki sıralaması MMY sistemi ile işleme, ıslak işleme ve kuru işleme şeklinde olmuştur. MMY sistemi, kesme kuvvetlerinin azaltılmasında önemli katkılar sağlamıştır.
- Faktörlerin etki sıralaması soğutma-yaglama yöntemi (%60.9), ilerleme (%19.1), kesici takım takviye türü (%5.1) ve kesme hızı (%1.3) şeklinde sıralanmıştır.
- Soğutma yağlama yönteminden sonra kesme kuvveti üzerinde en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu görülmüştür. Artan ilerleme hızı ile birlikte kaldırılan talaş hacminin artmasının kesme kuvvetlerinin artması üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.
- Kesme hızının artması ile kesme kuvveti azalsa da kesme hızındaki artışın devam etmesi ile kesici takım aşınma sürecine girmiş ve böylece kesme kuvvetleri artmaya başlamıştır.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2015.07.04.335).

## V. KAYNAKLAR

- [1] S. Caruso, S. Imbrogno, S. Rinaldi, D. Umbrello (2016) DOI: 10.1007/s00170-016-9037-y
- [2] R. S. Razavi, Optics and Laser Technology **82** (2016) 113-120.
- [3] A. Chamanfar, M. Jahazi, J. Gholipour, P. Wanjara, S. Yue, Materials Characterization 104 (2015) 149-161.
- [4] D. Kulawinski, S. Henkel, H. Biermann, D. Holländer, M. Thiele, U. Gampe, International Journal of Fatigue **81** (2015) 21-36.
- [5] G. Uzun, Y. Durgut, *DIN 1.2344 ve DIN 1.2379 takım çeliklerine uygulanan dolgu kaynaklarının frezelenmesinde kesme parametrelerinin incelenmesi*, **4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı**, Gaziantep-Türkiye 2016.
- [6] E. O. Ezugwu, Journal of Materials Processing Technology **134** (2003) 233-253.
- [7] A. H. Tazehkandi, M. Shabgard, G. Kiani, Journal of Cleaner Production **135** (2016) 1637-1649.
- [8] U. Şeker, A. Kurt, İ. Çiftçi, Materials and Design **23** (2002) 355-360.
- [9] H. Sağlam, Selçuk Teknik Online Dergisi, **3** (1) (2001).
- [10] M. Akkurt, *Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgâhları*, 1. Baskı, Birsen yayınevi, (1992).
- [11] E. Ekici, Alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli ve grafit katkılı kompozitlerin üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2012).
- [12] Ş. Karabulut, Measurement **66** (2015) 139–149.
- [13] M. Sarıkaya, A. Güllü, Journal of Cleaner Production **91** (2015).
- [14] F. Pusavec, D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopac, Journal of Cleaner Production **18** (2015) 1211-1221.
- [15] V. S. Sharma, M. Dogra, N. M. Suri, Int. J. Mach. Tools Manufact **49** (2009) 435-453.
- [16] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda, N. L. Coppini, Journal of Materials Processing Technology **122** (2012) 127-138.
- [17] Y. Kamata, T. Obikawa, Journal of Materials Processing Technology **193** (2007) 251-256.
- [18] S. Thamizhmanii, Rosli, S. Hasan, Materials Science and Engineering **39** (2009) 38-44.
- [19] U. Olgun, E. Budak, Procedia CIRP **8** (2013) 81 – 87.

- [20] S. Olovsjö, L. Nyborg, *Wear*, **283** (2012) 12–21.
- [21] C. Wang, K. Li, M. Chen, Z. Liu, *Journal of Cleaner Production* **108** (2015) 145-157.
- [22] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda, N. L. Coppini, *Journal of Materials Processing Technology* **122** (2012) 127-138.
- [23] P. S. Sreejith, *Materials Letters* **62** (2007) 276–278.
- [24] A. E. Diniz, J. R. Ferreira, F. T. Filho, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **43** (2003) 317–326.
- [25] A. Hasçalık, U. Çaydas, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **38** (2008) 896–903.
- [26] E. Kuram, B. Ozcelik, *Measurement* **46** (2013) 1849–1864.
- [27] İ. Asiltürk, H. Akkuş, *Measurement* **44** (2011) 1697–1704.
- [28] A. M. Pinar, S. Filiz, B. S. Ünlü, *Int J Adv Manuf Technol* **83** (2016) 1431–1440.
- [29] A. Gupta, H. Singh, A. Aggarwal, *Expert Syst. Appl.* **38** (2011) 6822–6828.
- [30] D. Manivel, R. Gandhinathan, *Measurement* **93** (2016) 108–116.
- [31] K.R. Ranjit, *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold, (1990).
- [32] M. A. Elbestawi, L. Chen, C. E. Becze, T. I. El-Wardany, *CIRP Annals-Manuf Technol* **46** (1997) 57–62.
- [33] A. Altın, M. Nalbant, A. Taskesen, *Materials and Design* **28** (2007) 2518–2522.
- [34] R.T. Coelho, L. R. Silva, A. Braghini, A. A. Bezerra, *Journal of Materials Processing Technology* **148** (2004) 147–153.
- [35] R. Arunachalam, M. A. Mannan, *Machining Science and Technology* **4** (2000) 127-168.
- [36] A. Cicek, T. Kivak, I. Uygur, E. Ekici, Y. Turgut, *J Adv Manuf Technol* **60** (2012) 65–73.
- [37] X. Tian, J. Zhao, Z. Gong and Y. Dong, *Int J Adv Manuf Technol* **69** (2013) 2669–2678.
- [38] Z. Jun, D. Jianxin, Z. Jianhua, A. Xing, Elsevier (1997) 220–5.
- [39] L. Li, N. He, M. Wang, Z.G. Wang, *Journal of Materials Processing Technology* 127–30 (2002).
- [40] Anonim, <http://www.sandvik.coromant.com> (Erişim tarihi: 28 Ocak 2017)
- [41] A. Taşhyan, M. Acarer, U. Şeker, H. Gökkaya, B. Demir, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* **22** (2007) 1-5.

- [42] E. O. Ezugwu, *Journal of Materials Processing Technology* **134** (2003) 233-253.
- [43] A. Çiçek, F. Kara, T. Kivak and E. Ekici, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **41** (2013) 461–469.