

## Nikel Esaslı Waspaloy'un WC Takımlar ile Farklı Soğutma/Yağlama Şartları Altında Frezelenmesinde Kesme Kuvvetinin Araştırılması

<sup>1</sup>Çağrı Vakkas Yıldırım, <sup>\*2</sup>Turgay Kıvak ve <sup>3</sup>Fehmi Erzincanlı  
<sup>1</sup>Bolu Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Türkiye  
<sup>\*2</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye  
<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

### Özet

Bu çalışmada, nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesi esnasında işleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler, Taguchi  $L_{27}$  ortogonal dizini kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında kesme parametresi olarak, kesici takım kaplama türü (kaplamasız, PVD, CVD), soğutma-yağlama yöntemi (kuru, geleneksel soğutma, minimum miktarda yağlama), kesme hızı (30, 45, 60 m/dak) ve ilerleme (0.1, 0.15, 0.2 mm/dev) tercih edilmiştir. İşleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmak için istatistiksel analiz yöntemi olarak sinyal-gürültü oranı (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda ortaya çıkan deney sonuçları için regresyon analizi aracılığı ile tahmin denklemleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en düşük kesme kuvveti değeri PVD TiAlN kaplamalı karbür takım, ıslak işleme, 60 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre kesme kuvveti üzerindeki en etkili parametre soğutma-yağlama yöntemi (%53.2) olmuştur.

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

## Investigation of the cutting force during milling of nickel based Waspaloy under different cooling/lubricating conditions with WC tools

### Abstract

In this study, effects of machining parameters on the cutting force during milling of nickel based waspaloy super alloy were investigated. Tests were carried out by using Taguchi  $L_{27}$  orthogonal array. In the tests, cutting tool coating type (uncoated, PVD, CVD), cooling-lubricating method (dry, traditional cooling, minimum quantity lubrication), cutting speed (30, 45, 60 m/min) and feed rate (0.1, 0.15, 0.2 mm/rev) were used. For the investigation of the effects of machining parameters on the cutting force, signal-noise ratio (S/N) and variance analysis (ANOVA) were employed as the statistical analysis method. For the test results coming out at the end of the study, estimation equations were obtained via regression analysis. According to the test results, the lowest cutting force value were obtained with PVD TiAlN coated carbide tool, wet machining, 60 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev feed rate. According to ANOVA results the most effective parameter on the cutting force was cooling-lubricating method (53.2%).

**Key words:** Waspaloy, Cutting force, milling, MQL, Taguchi

### 1. Giriş

Waspaloy, nikel esaslı bir süper alaşım olup oksidasyon direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti ve korozyon direnci nedeniyle tercih edilen bir malzeme türüdür. Kritik uygulamalarda çalışma

\*Corresponding author: Address: Faculty of Thecnology, Department of Manufacturing Engineering Duzce University, 81620, Duzce TURKEY. E-mail address: turgaykivak@duzce.edu.tr, Phone: +903805421133

sıcaklığı 650 °C olan Waspaloy, 870 °C’de bile özelliklerini koruyabilmektedir. Alaşımın yüksek sıcaklık dayanımı, bünyesinde bulunan molibden, kobalt ve krom elementleri sayesinde meydana gelirken yaşlandırma, alüminyum ve titanyum elementleri sayesinde [1]. Güncel ve potansiyel kullanım alanları arasında kompresör ve rotor diskleri, miller, vidalar, keçeler, bilezik ve muhafazaları, bağlantı elemanları, uçak gövdesi, kimyasal tesis ekipmanları, petrokimya ekipmanları, füze sistemleri ve çeşitli motor parçaları vardır [2]. Waspaloy’un da içerisinde yer aldığı süper alaşımlar, yüksek kesme mukavemeti, kaynak eğilimi, düşük termal iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle işlenebilirliği son derece zor malzemelerdir [3].

Waspaloy gibi yeni nesil malzemelerin ortaya çıkması ile birlikte imalat sürecini başarıya ulaştırmanın en önemli ayaklarından birisi de kesme sıvısı kullanımıdır. Ancak klasik kesme sıvısı kullanımı, sıvı içerisinde bulunan kimyasalların doğaya zarar vermesi, insan sağlığını riske atması ve depolama, tedarik etme, atığı yok etme gibi safhalarından dolayı çevre, insan sağlığı ve üretim maliyetlerine olumsuz etkide bulunmaktadır [4]. Bu nedenle kesme yağlarının çok küçük miktarda kullanıldığı yarı kuru kesme olarak da adlandırılan MMY sistemi pratik operasyonlar için çok önemli rol oynamaktadır. MMY sistemi, en genel tanımıyla çok az miktarda (10- 150ml/h) [5] kesme sıvısının kesme bölgesine basınçlı hava desteği ve nozul yardımıyla püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, konvansiyonel soğutma-yağlama sistemi ile arasında yaklaşık 1/10000 lik bir kesme sıvısı tasarrufu oluşmaktadır [6].

Literatür incelemesi sonunda Waspaloy ile yapılan işlenebilirlik çalışmalarının çok az olması nedeniyle benzer özelliklere sahip bazı süper alaşımlar ile yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Zhang ve arkadaşları [7], kuru kesme ve biyoçözünür bitkisel esaslı kesme yağının kullanıldığı MMY sistemi altında Inconel 718’in kaplamalı karbür takımlar ile frezelenmesinde işleme parametrelerinin takım aşınması ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, MMY sisteminin takım ömrü ve kesme kuvvetinin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu iddia etmişlerdir. Yuan ve arkadaşları [8] GH4169 süper alaşımının frezelemesinde MMY, hava ile soğutma ve ıslak işleme tekniklerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, ıslak işleme ile karşılaştırılan hava ile soğutma ve MMY tekniklerinde daha düşük kesme kuvveti ve daha iyi yüzey kalitesi elde edildiğini iddia etmişlerdir. Hood ve arkadaşları [9], Udimed 720’nin frezelenmesinde soğutma-yağlama yöntemi (kuru, ıslak, yüksek basınçlı hava ile soğutma ve MMY) ve kesme hızının (25 and 50 m/min) takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ahmad Yasir ve arkadaşları [10], Ti-6Al-4V’nin frezelenmesinde soğutma-yağlama sistemi ve kesme parametrelerinin takım ömrü ve kesme kuvveti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyler esnasından PVD kaplamalı karbür takım kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, MMY sisteminin kullanılması ile daha uzun takım ömrü ve daha düşük kesme kuvveti çıkmıştır.

Bu çalışmada, nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde soğutma-yağlama yöntemi ve kesme parametrelerinin (kesici takım kaplama türü, kesme hızı, ilerleme) kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. En düşük kesme kuvvetinin elde edilmesi için Taguchi S/N oranı kullanılmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi görebilmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Regresyon analizi ile tahmin denklemleri oluşturulmuş ve geliştirilen modellerin güvenilirliğini test etmek için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

## 2. Malzeme ve Method

Frezeleme deneyleri, 11 kW motor gücü ve 10000 dev/dak maksimum devir sayısına sahip DELTA SEIKI CNC-1050 A marka üç eksenli CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Deney numunesi olarak kullanılan ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilen nikel esaslı Waspaloy süper alaşımı 150mm x 100mm x 21mm ölçülerinde kesilmiştir. Kesme derinliği tüm deneylerde sabit (0.5 mm) tutulmuştur.

**Tablo 1.** Waspaloy alaşımının kimyasal bileşenleri

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

### 2.1. Kesici Uçlar ve Takım Tutucu

Talaş kaldırma deneyleri, bütün özellikleri Tablo 2’de verilen kaplamasız, PVD kaplamalı ve CVD kaplamalı olmak üzere üç farklı kaplama yapısına sahip karbür takım ile yürütülmüştür. Ayrıca, sementit karbür uçlar için 25 mm işleme çapında ve 100 mm boyunda R300-025A20-10M kodlu takım tutucu tercih edilmiştir.

**Tablo 2.** Karbür uçlar için kesici takım özellikleri

ISO Kodu	Kalite	Kaplama Yöntemi	Kaplama Türü	Sertlik (HV3)	Kaplama Kalınlığı (µm)
R300-1032E-KL	H13A	-	Kaplamasız	1550	-
R300-1032E-PM	GC1030	PVD	TiAlN	1650	3
R300-1032E-MM	GC2040	CVD	TiCN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	1300	3

### 2.2. Soğutma/Yağlama Yöntemleri ve Parametreleri

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 tezgahının 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.

### 2.3. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Kesme kuvveti ölçümlerini yapmak için KISTLER 9257B 4 bileşenli piezo-elektrik dinamometre temin edilmiştir. Dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına (KISTLER PCIM DAS 1602/16) aktarılması için KISTLER 5070-A çok kanallı amplifikatör deney tasarımına eklenmiştir. Ayrıca, veri aktarımı için 1677-A5 veri kablosu, 1500-B15 kablo, RS232 kablo temin edilmiştir. Son olarak verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı hazır olarak temin edilmiştir. Kesme kuvvetlerinin

ölçümü önceden belirlenen parametrelere bağlı olarak her bir numune için 100 mm boyda yüzey frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deney Tasarımı ve Optimizasyon

#### 3.1. Taguchi Metodu ile Deney Tasarımı

Bu çalışmanın amacı en düşük kesme kuvveti değerini hesaplamak olduğundan “en küçük en iyi” seçilmiştir ve Eşitlik 1’de gösterildiği gibi 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 [11]

Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3’de gösterilmektedir. Optimum kesme parametrelerini belirlemek ve işleme parametrelerinin etkilerini analiz etmek için en uygun ortogonal dizi olan  $L_{27}$  ( $3^4$ ) seçilmiştir.

**Tablo 3.** Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesici takım	A	Kaplamasız	PVD	CVD
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

### 4. Deney Sonuçlarının Analizi ve Değerlendirilmesi

#### 4.1. Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı Analizi

En küçük kesme kuvvetinin elde edildiği S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” eşitliği kullanılmıştır. Deney sonuçları ve S/N oranları Tablo 4’te gösterilmektedir. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda elde edilen ortalama kesme kuvveti değeri 728.4 N çıkarken bu deneylere ait S/N oranlarının ortalama değeri -57.16 dB çıkmıştır.

**Tablo 4.** 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 (f)		
1	Kaplamasız	Kuru	30	0.10	816	-58.23
2	Kaplamasız	Kuru	45	0.15	848	-58.57
3	Kaplamasız	Kuru	60	0.20	851	-58.60
4	Kaplamasız	Islak	30	0.15	802	-58.08
5	Kaplamasız	Islak	45	0.20	885	-58.94
6	Kaplamasız	Islak	60	0.10	609	-55.69
7	Kaplamasız	MMY	30	0.20	766	-57.68
8	Kaplamasız	MMY	45	0.10	680	-56.65
9	Kaplamasız	MMY	60	0.15	705	-56.96
10	PVD	Kuru	30	0.15	803	-58.09
11	PVD	Kuru	45	0.20	886	-58.95
12	PVD	Kuru	60	0.10	757	-57.58
13	PVD	Islak	30	0.20	649	-56.24
14	PVD	Islak	45	0.10	524	-54.39
15	PVD	Islak	60	0.15	566	-55.06
16	PVD	MMY	30	0.10	659	-56.38
17	PVD	MMY	45	0.15	677	-56.61
18	PVD	MMY	60	0.20	682	-56.68
19	CVD	Kuru	30	0.20	887	-58.96
20	CVD	Kuru	45	0.10	814	-58.21
21	CVD	Kuru	60	0.15	843	-58.52
22	CVD	Islak	30	0.10	626	-55.93
23	CVD	Islak	45	0.15	632	-56.01
24	CVD	Islak	60	0.20	686	-56.73
25	CVD	MMY	30	0.15	677	-56.61
26	CVD	MMY	45	0.20	738	-57.36
27	CVD	MMY	60	0.10	599	-55.55

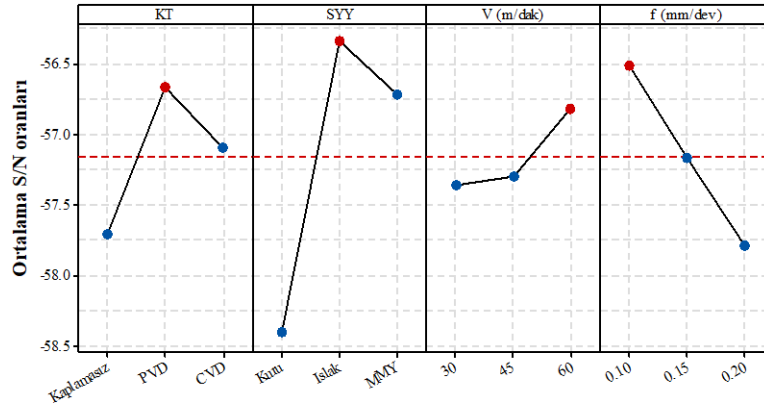
$T_{Fr}$  (ortalama kesme kuvveti değeri) = 728.4 N

$T_{Fr-S/N}$  (S/N oranlarının Ortalama değeri) = -57.16 dB

Kesme kuvveti için S/N yanıt tablosu Tablo 5’te verilmiştir. Ayrıca, Fr için kontrol faktörlerinin seviyeleri ve bu seviyelere ait değerlerin grafik görünüşleri Şekil 1’de verilmiştir. Her bir kontrol faktörü için en iyi seviye, bu kontrol faktörü seviyelerindeki en yüksek S/N oranına göre bulunmuştur. Buna göre, optimum kesme kuvveti değerini veren seviyeler ve S/N oranları faktör A için (seviye 2, S/N=-56.66 dB), faktör B için (seviye 2, S/N=-56.34 dB), faktör C için (seviye 3, S/N=-56.82 dB) ve faktör D için (seviye 1, S/N=-56.51 dB) olmuştur (Şekil 1). Bir başka deyişle, optimum Fr değeri PVD kaplamalı takım, ıslak işleme, 60 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/rev ilerleme ile ortaya çıkmıştır.

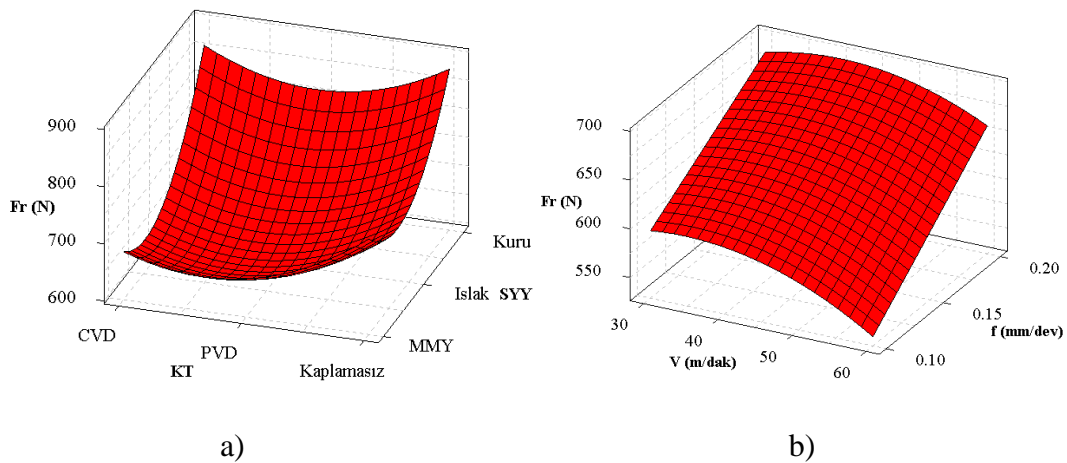
**Tablo 5.** Kesme kuvveti için S/N yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	Kesme Kuvveti (Fr)			
	A	B	C	D
Seviye 1	-57.71	-58.41	-57.36	<b>-56.51</b>
Seviye 2	<b>-56.66</b>	<b>-56.34</b>	-57.30	-57.17
Seviye 3	-57.10	-56.72	<b>-56.82</b>	-57.79
Delta	1.05	2.07	0.54	1.28

**Şekil 1.** İşleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi

#### 4.2. Deneysel Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametreleri altında yapılan frezeleme işleminde kesme kuvveti ile diğer ana faktör etkileşimlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 2’de verilmiştir.

**Şekil 2.** Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yaglama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme

Şekil 2a'daki kesme kuvveti ile kesici takım kaplama tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, en düşük kesme kuvvetinin PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uçlarda olduğu görülmektedir. Kaplamasız karbür kesici uçlarda kesme kuvvetinin yüksek çıkması bu takımların sürtünmeye karşı gösterdiği dirençle açıklanabilir. Kaplamalı takımlarda adhezif ve kohezif etkiler nedeniyle kaplamanın kalkmasına kadar kesme kuvvetleri düşük çıkmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kaplama katmanı kesme kuvvetlerinin düşürülmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu literatürde de yer almaktadır [12, 13]. Kaplamasız karbür takımlar ile PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlar ve CVD (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN) kaplamalı karbür takımlar karşılaştırıldığında kesme kuvvetinde iyileşme sırasıyla %10.9 ve %6.61 oranlarında olmuştur. Yine Şekil 2a'da yer alan kesme kuvveti ile soğutma-yaglama yönteminin arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde en düşük kesme kuvvetinin ıslak işlemede elde edildiği görülmektedir. Sürtünme ve aşınma kesici takımın performansını sürekli olarak sınırlandırmakta, özellikle kuru işleme şartları kesici kenarın yüksek termal, mekanik ve kimyasal yüklerle maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu da kuru işlemede yüksek kesme kuvveti oluşmasının temel nedeni olarak yorumlanabilmektedir. PVD (TiAlN) kaplamalı takımlar kaplama özellikleri gereği kesme sıvısının kullanımına daha uygun oldukları için kesme kuvveti açısından daha iyi sonuçlar vermiştir denilebilir. Bu durum literatürle de paralellik arz etmektedir [14]. Kuru işleme ile yapılan deneylerle ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %20.33 ve %17.61 oranlarında iyileşme görülmüştür. Şekil 2b'de yer alan kesici takım türü ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızındaki artış kesme kuvvetinde azalmaya neden olmuştur. Kesme kuvvetinin, kesme hızının artışına bağlı olarak düşmesinin sebebi, akış bölgesindeki yüksek sıcaklık ve azalan temas yüzey alanının olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalar da bu tespiti doğrulamaktadır. [15, 16]. 30 m/dak kesme hızı ile 45 m/dak ve 60 m/dak kesme hızı karşılaştırıldığında kesme kuvvetindeki azalma sırasıyla %2.44 ve %5.79 oranlarında olmuştur. Şekil 2b'de yer alan ve kesme kuvvetinin ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde ilerlemenin kesme kuvveti üzerinde çok etkisinin olmadığı ancak ilerleme değerinin artması ile birlikte küçük de olsa kesme kuvvetinde bir artış meydana geldiği görülmektedir.

#### 4.3. ANOVA Metodu

Tablo 6'da kesme kuvveti deneylerine ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde, kesme kuvveti üzerinde faktör A, B, C, ve D'nin yüzde katkıları sırasıyla %11.3, %53.2, %3.8, ve %17.3 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında, kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün soğutma-yaglama yöntemi (B) olduğu görülmektedir. Deneylere ait hata yüzdesi %14.4 olarak bulunmuştur.

**Tablo 6.** ANOVA sonuçları

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	2	32485	16242	7.01	0.006	11.3
B	2	152518	76259	32.93	0.000	53.2
C	2	11065	5533	2.39	0.120	3.8
D	2	49719	24859	10.74	0.001	17.3
Hata	18	41462	2316	-	-	14.4
Toplam	26	287469	-	-	-	100

#### 4.4. Regresyon Modelleri ve Analizi

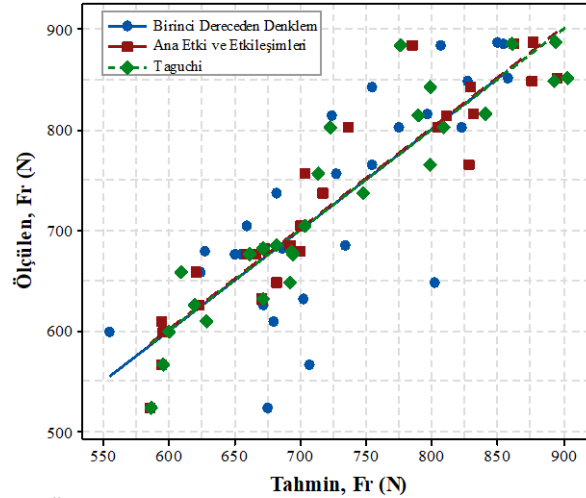
Regresyon denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım tipi (KT), soğutma/yağlama yöntemi (SYY), kesme hızı (V) ve ilerleme (f) parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan linear denklemler kesme kuvveti için Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$F_r = 833.2 - 25.6KT - 73.4SYY - 1.43V + 1051f \quad (2)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen linear denklemlerin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0.580 olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel kesme kuvveti ile deneysel çalışmalarla elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem oluşturulmuştur. Bu denklem Eşitlik 3’te verilmiştir.

$$\begin{aligned} F_r = & 1180 - 241KT - 411SYY + 3.97V + 984f + 58.8KT^2 + 96.1SYY^2 \\ & - 0.0951V^2 + 178f^2 - 15.90KTxSYY + 0.91KTxV - 195KTxf - 0.18SYYxV \\ & - 50SYYxF + 11.2Vxf \end{aligned} \quad (3)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0.878 olarak bulunmuştur. % 95 güvenilirlik seviyesinde birinci dereceden ve kontrol faktörlerinin yanı sıra etkileşimlerinin de yer aldığı denklemle elde edilen tahmini kesme kuvveti değerleri ve bunların arasındaki karşılaştırma kesme kuvveti değerleri Şekil 3’te verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 3. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.5. Optimizasyon

Frezeleme deneyleri sonucunda en düşük kesme kuvvetini veren parametre grubu  $A_2B_2C_3D_1$  şeklinde elde edilmiştir. Optimum kesme kuvveti tahmininde Eşitlik 4 kullanılmıştır.



$$Fr_{opt} = (A_2 - T_{Fr}) + (B_2 - T_{Fr}) + (C_3 - T_{Fr}) + (D_1 - T_{Fr}) + T_{Fr} \quad (4)$$

Bu eşitlikteki (Eşitlik 5) A, B, C ve D değerleri kesme kuvvetinin optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Tablo 7).  $T_{Fr}$  değerleri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama kesme kuvveti değerlerini temsil etmektedir (Tablo 4). Hesaplamalar sonucu  $Fr_{opt}$  değeri 544.1 N olarak bulunmuştur.

**Tablo 7.** Ortalama yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	A	B	C	D
Seviye 1	773.6	833.9	742.8	<b>676.0</b>
Seviye 2	<b>689.2</b>	<b>664.3</b>	742.7	728.1
Seviye 3	722.4	687.0	<b>699.8</b>	781.1
Delta	84.3	169.6	43.0	105.1

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını hesaplamak için Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır [17].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,f_e} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (5)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + T_{dof}} \quad (6)$$

Burada  $F_{\alpha,1,f_e}$  %95 güvenilirlik oranını,  $\alpha$  önem seviyesini,  $f_e$  hatanın serbestlik derecesini,  $V_e$  hata varyansını,  $n_{eff}$  tekrarlanan etkinlik sayısını,  $R$  doğrulama deneyleri için tekrar sayısını vermektedir (Eşitlik 5).  $N$  toplam deney sayısını,  $T_{dof}$  serbestlik derecesinin toplam ana faktörlerini vermektedir (Eşitlik 6).  $F_{0.05,1,18}=4.4139$ ,  $V_e=2316$  (Tablo 6),  $R=2$  (Eşitlik 5).  $N=27$ ,  $T_{dof}=8$  ve  $n_{eff}=3$  (Eşitlik 6). Elde edilen değerler Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'da yerine konularak kesme kuvveti deneyleri için güven aralığı  $CI_{Fr}=\pm 92.3$  bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini kesme kuvveti değeri;

$$[Fr_{opt} - CI_{Fr}] < Fr_t < [Fr_{opt} + CI_{Fr}] \quad (7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Değerler yerine konularsa:

$$[544.1 - 92.3] < 511 < [544.1 + 92.3] = 451.8 < 511 < 636.4 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır.

#### 4.6. Doğrulama Deneyleri

Tablo 8'de 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 8.** Doğrulama deneyi sonuçları

Seviye	Lineer eşitlik			Quadratic eşitlik			Taguchi eşitliği		
	Deney	Tahmin	Hata (%)	Deney	Tahmin	Hata (%)	Deney	Tahmin	Hata (%)
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	511	525	2.74	511	508	0.59	511	502	1.76
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	803	823	2.49	803	805	0.25	803	809	0.75
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	677	652	3.69	677	685	1.81	677	691	2.06

## Sonuçlar

Bu çalışma, Waspaloy süper alaşımının karbür takımlarla frezelenmesinde soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda madde madde verilmiştir;

- Kesme kuvveti deneylerinde en düşük kesme kuvveti değerini ıslak işleme altında PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlarla 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme parametreleri vermiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 524 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise kuru işleme altında CVD (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 30 m/dak kesme hızı ve 0.2 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 887 N olarak çıkmıştır. Maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri arasında %40.92 oranında bir fark oluşmuştur.
- Kaplama türünün kesme kuvveti üzerindeki etkisi açısından kaplamasız takımlar en yüksek kesme kuvveti değerlerini verirken en düşük kesme kuvveti değerlerini PVD (TiAlN) kaplamalı takımlar vermiştir. Kesici takım kaplamalarının kesme kuvveti üzerindeki etki sıralaması iyiden kötüye doğru PVD (TiAlN), CVD (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN) ve kaplamasız karbür şeklinde olmuştur.
- Soğutma-yağlama yönteminin kesme kuvveti üzerindeki etkisi açısından en düşük kesme kuvveti değerini ıslak işleme verirken en yüksek kesme kuvveti değerlerine kuru işleme altında ulaşılmıştır. Soğutma-yağlama türünün kesme kuvveti üzerindeki etki sıralaması iyiden kötüye doğru ıslak işleme, MMY sistemi ile işleme ve kuru işleme şeklinde olmuştur.
- Kesme kuvveti açısından faktörlerin etki sıralaması sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi (%53.2), ilerleme (%17.3), kesici takım kaplama türü (%11.3) ve kesme hızı (%3.8) şeklinde sıralanmıştır.
- Regresyon modeli, deneysel ve tahmini değerler arasında yüksek bir korelasyon göstermiştir.

## Teşekkür

2015.07.04.335 no'lu proje ile bu çalışmanın finansal desteğini sağlayan Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

## Kaynakça

- [1] Razavi, RS. Lazer beam welding of waspaloy: charecterization and corrosion behavior evaluation. *Optics and Laser Technology* 2016;82:113-120.
- [2] Chang K, Liu X. Effect of  $\gamma$  content on the mechanical behavior of the Waspaloy alloy system. *Materials Science and Engineering* 2001;A308:1-8.
- [3] Isik, Y. Using internally cooled cutting tools in the machining of difficult-to-cut materials based on Waspaloy. *Advances in Mechanical Engineering* 2016;8(5):1-8.
- [4] Astakhov VP. Ecological machining: near-dry machining, In: Davim JP (ed) *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer, London, 2008.
- [5] Autret R, Liang SY. Minimum quantity lubrication in finish hard turning. *Communication And Control Environment and Management (HNICEM) International Conference*, Philippines, 2003.
- [6] Kim H, Seo K, Kang KH, Kim AD. Nano-Lubrication: A Review. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing* 2016;17 (6):829-841.
- [7] Zhang S, Li, JF, Wang YW. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production* 2012;32:81-87.
- [8] Yuan SM, Yan LT, Liu WD, Liu Q. Investigation of Machinability in Minimum Quantity Lubrication Milling of GH4169 Aerospace Super alloy. *Applied Mechanics and Materials* 2010;34-35:666-670.
- [9] Hood R, Morris J, Soo SL. Workpiece Surface Integrity when Milling Udimet 720 Superalloy. *Procedia CIRP* 2016;45:283-286.
- [10] Ahmad Yasir MS, Che Hassan CH, Jaharah AG, Norhamidi M, Gusri AI, Zaid AY. Cutting Force Analysis when Milling Ti-6Al-4V under Dry and Near Dry Conditions Using Coated Tungsten Carbides. *Advanced Materials Research* 2010;129-131:993-998.
- [11] Manivel D, Gandhinathan R. Optimization of surface roughness and tool wear in hard turning of austempered ductile iron (grade 3) using Taguchi method. *Measurement* 2016;93:108-116.
- [12] Krain HR, Sharman ARC, Ridgway K. Optimization of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM. *Journal of Processing Technology* 2007;189:153-161.
- [13] Subhas BK, Bhat, R, Ramachandra K, Balakrishna HK. Dimensional instability studies in machining of Inconel 718 Nickel based superalloy as applied to aerogas turbine components. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2000;122 (1):55-61.
- [14] Obikawa T, Kamata Y, Asano Y, Otieno A. Micro-liter lubrication machining on Inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 2008;48:1605-1612.
- [15] Liu G, Chen GM, Shen Z. Experimental Studies on machinability of Six Kinds of Nickel-Based Superalloys. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 2006;1 (3):287-300.
- [16] Altın A, Nalbant M, Taskesen A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. *Materials and Design* 2007;28:2518-2522.
- [17] Kırık T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement* 2014;50:19-28.