



## Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method

İbrahim Çiftçi<sup>1\*</sup>, Hüseyin Gökçe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Çankırı Karatekin University, Çankırı, 18100 Turkey

<sup>2</sup>Department of Machine and Metal Technologies, Çankırı Karatekin University, Çankırı, 18200, Turkey

### Highlights:

- Forming molybdenum and its alloys through milling method
- Determination of optimum milling parameters leading to minimum surface roughness and cutting forces
- Prediction of surface roughness and cutting forces by statistical methods

### Keywords:

- Molybdenum alloys
- Taguchi method
- Milling
- Surface roughness
- Optimisation

### Graphical/Tabular Abstract

Pure molybdenum, titanium - zirconium - molybdenum (TZM) and molybdenum - hafnium - carbon (MHC) are among the most industrially used molybdenum based materials. Although there are many applications areas of these materials, they are mainly used in defence and aerospace industries. Finishing cuts are among the critical machining operations because of the requirements of high surface quality and dimensional accuracy. Due to the requirements of high surface quality and high dimensional accuracy, it is important to determine and optimise finishing cut parameters beforehand. For this reason, it is necessary to determine the machining parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut and cutting tool material and geometry.

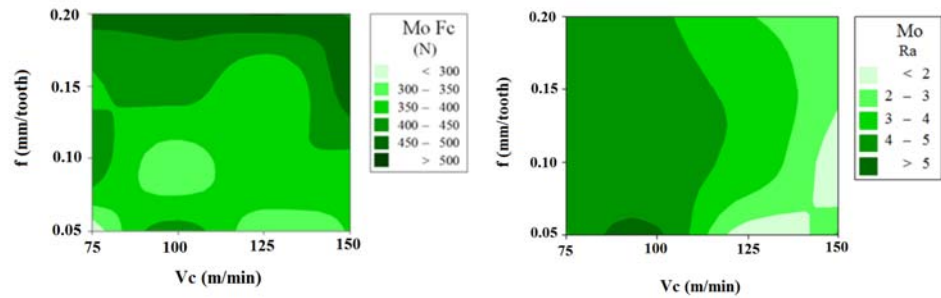


Figure A. Influence of feed rate-cutting speed interactions on cutting force and surface roughness

### Article Info:

Research Article  
Received: 25.05.2017  
Accepted: 18.01.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416482

### Acknowledgement:

The authors would like to thank Karabuk University for the financial support of this study through KBU-BAP-15/2-DR-002 project.

### Correspondence:

Author: İbrahim Çiftçi  
e-mail:  
iciftci@karatekin.edu.tr  
phone: +90 376 218 95 32 -  
8380

**Purpose:** This study aims at determining the optimum cutting tools and cutting parameters in terms of average surface roughness and cutting forces in milling of pure molybdenum, TZM and MHC.

**Theory and Methods:** The experimental design was accomplished using Taguchi's L16 orthogonal array. Analysis of variance (ANOVA) was also employed to determine the level of the effect of control factors for the main cutting force and average surface roughness. The milling tests were carried out at various cutting parameters using carbide cutting tools.

**Results:** The results showed that the feed rate was the most significant parameter for the cutting forces while the cutting speed was the most significant parameter for the surface roughness.

**Conclusion:** Increasing feed rate increased the cutting forces and increasing cutting speed decreased the surface roughness values of all the three materials.



## Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu

İbrahim Çiftçi<sup>1\*</sup>, Hüseyin Gökçe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 18100, Çankırı, Türkiye

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine Ve Metal Teknolojileri Programı, 18200, Çankırı, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Molibden ve alaşımlarının frezeleme yöntemi ile şekillendirilmesi
- En düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti açısından optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi
- Yüzey pürüzlülük değeri ve kesme kuvvetinin istatistikî yöntemlerle tahmin edilmesi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 25.05.2017  
Kabul: 18.01.2018

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416482

#### Anahtar Kelimeler:

Molibden alaşımları,  
taguchi yöntemi,  
frezeleme,  
yüzey pürüzlülüğü,  
optimizasyon

#### ÖZET

Saf molibden, titanyum-zirkonyum-molibden (TZM) ve molibden-hafniyum-karbon (MHC) alaşımları endüstride yoğun olarak kullanılan başlıca molibden esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler savunma ve havacılık sanayileri başta olmak üzere pek çok farklı sektörde kullanılmaktadır. Talaş miktarı düşük olan son işleme operasyonları, kaliteli parça üretimi gerekliliğinden dolayı kritik imalat süreçlerindedir. Yüksek yüzey kalitesi ve boyut tamlığı gereksiniminden dolayı, son işlemeyi etkileyen parametrelerin önceden belirlenmesi ve optimize edilmesi önemlidir. Bu nedenle kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesici takım malzemesi ve geometrisi gibi kesme parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, üç farklı molibden alaşımının frezelemesi işleminde oluşan kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler, Taguchi L16 dikey dizini kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri üzerinde kesme parametrelerinin önem seviyelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Sinyal/Gürültü oranları kullanılarak elde edilen kontrol faktörlerinin optimum değerleri esas kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için farklı seviyelerde bulunmuştur. ANOVA analizine göre, kesme kuvvetleri için en önemli parametrenin ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin ise kesme hızı olduğu belirlenmiştir.

## Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method

### H I G H L I G H T S

- Forming molybdenum and its alloys through milling method
- Determination of optimum milling parameters leading to minimum surface roughness and cutting forces
- Prediction of surface roughness and cutting forces by statistical methods

#### Article Info

Research Article  
Received: 25.05.2017  
Accepted: 18.01.2018

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416482

#### Keywords:

Molybdenum alloys,  
Taguchi method,  
milling,  
surface roughness,  
optimisation

#### ABSTRACT

Pure molybdenum, titanium - zirconium - molybdenum (TZM) and molybdenum - hafnium - carbon (MHC) are among the most industrially used molybdenum based materials. Although there are many applications areas of these materials, they are mainly used in defence and aerospace industries. Finishing cuts are among the critical machining operations because of the requirements of high surface quality and dimensional accuracy. Due to the requirements of high surface quality and high dimensional accuracy, it is important to determine and optimise finishing cut parameters beforehand. For this reason, it is necessary to determine the machining parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut and cutting tool material and geometry. In this study, it is aimed to determine the optimum cutting tools and cutting parameters in terms of average surface roughness ( $R_a$ ) and cutting forces ( $F_c$ ) in milling of three different molybdenum based materials. The milling test design was accomplished using Taguchi's L16 orthogonal arrays. An analysis of variance (ANOVA) was also employed to determine the level of the effect of control factors for the main cutting force ( $F_c$ ) and average surface roughness ( $R_a$ ). By using the signal/noise ratios, the optimum values of the control factors were found to be at different levels for the cutting forces and average surface roughness. The ANOVA analysis showed that the feed rate was the most significant parameter for the cutting forces while the cutting speed was the most significant parameter for the surface roughness.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: iciftci@karatekin.edu.tr, huseyingokce@karatekin.edu.tr / Tel: +90 376 218 95 32 - 8380

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İleri mühendislik uygulamalarında kullanılan ve refrakter metallere olan molibden, oldukça yüksek sıcaklıklarda, yüksek mekanik dayanım sağlar. Saf molibden ve molibden esaslı alaşımların üstün mekanik özelliklerinin olduğu bilinmektedir [1]. Birçok yapısal uygulamada bileşenler sıcaklık değişimlerine büzülerek veya genişerek tepki gösterirler. Bu durum da karmaşık geometrideki bileşenlerin istenmeyen termal gerilme ve yüklere maruz kalmasına ve ömürlerinin kısılmasına neden olur [2]. Molibden yüksek ergime noktası, yüksek ısı iletkenliği, yüksek elastikiyet modülü ve düşük ısı genleşme katsayısı ile karakterize edilir [3]. Havacılık, savunma, nükleer ve elektronik sanayilerindeki gelişmelerle beraber, oda sıcaklığında yüksek mekanik özellikler sağlaması ve artan sıcaklık koşullarında bu özelliklerini önemli ölçüde koruması nedeniyle molibden talebinde artışlar yaşanmaktadır. Molibdene çok küçük miktarlarda titanyum ve zirkonyum ilavesi ile meydana gelen TZM, 1200°C'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sürünme direnci sağlar [4]. Molibden esaslı alaşımlardan olan TZM nükleer enerji ve havacılık sistemleri için bilinen en iyi alaşımlardan biridir [5]. Molibden esaslı diğer bir malzeme olan MHC alaşımı yüksek sürünme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı ile bilinir. MHC alaşımının yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik davranışı, yapısındaki hafniyum karbürlerden kaynaklanır [6]. MHC alaşımı izotermal dövme kalıplarında ve sıcak metal ekstrüzyon kalıplarında kalıp malzemesi olarak kullanılır. Son zamanlarda X-ray tüplerinde de kullanılmaktadır [7].

Molibden, roket endüstrisinde, nozüller gibi yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların üretilmesinde çok önemli bir yer tutar. Roketlerin yönlendirme ve destek kanatlarında, ısı-radyasyon kanallarında, ısı emiciler, türbin tekerlekleri ve pompalar gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan yapısal parçaların üretiminde önemli rol oynar. Molibden alaşımları, sıcak sertlikleri, yüksek yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve termal döngüden sonra mekanik özelliklerini koruyabilmeleri nedeniyle havacılık ve uzay sanayisinde kullanımları uygundur [8].

Molibden ve molibden esaslı alaşımlar, üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı işlenmesi genellikle güç malzemelerdir. Saf molibdenin işlenmesini etkileyen en önemli özellik tane yapısıdır. Molibden nispeten kolay işlenir ancak ilk işlemeden sonra işleme zorlaşmaya başlar. Molibden işlenirken kırılma eğilimine girer. İş parçası sıkıca bağlanmalı, kesici takım rijit bir şekilde desteklenmeli ve takım tezgâhı yeterince güçlü olmalıdır. [9]. Molibden ve alaşımlarının işlenmesi diğer metal ve alaşımlarının işlenmesi sürecine benzer. Çok basit parçalardan, çok karmaşık parçalara kadar istenilen ölçü ve toleranslarda işlem yapmak mümkündür. Elde edilen yüzeyin kalitesi, yüksek hız çelikleri ve karbür takımlar arasında seçim yapmaya bağlıdır. Her iki durumda da takım ömrü çeliklerin işlenmesindeki takım ömründen daha kısadır. Çünkü

molibden, aynı sertlikteki çeliklerden daha fazla kesici takımı aşındırmaya meyillidir. Yüksek hız çelikleri, genellikle düşük yüzey kaliteleri veya kaba işlemlerde kullanılır. İyi yüzey kaliteleri ve sıkı toleranslar için karbür takımlar tercih edilir. Frezeleme işlemlerinde genellikle C2 kalitesindeki karbür takımlar tercih edilir. Molibden için kullanılan kesici takım malzemesi dökme demirler için kullanılanlarla da benzerlik gösterir. Molibden ve alaşımlarının üreticilerinden biri olan ED FAGAN şirketinin 2016 yılında yayınlamış olduğu bir bültende, molibden ve alaşımlarının aynı sertlikteki çelikten daha fazla aşındırıcı olduğu ve az sayıda parça üretimi ve kaba işlemler için yüksek hız çeliği takımların kullanılabilmesi belirtilmiştir. Bu bültende ayrıca bitirme tornalama ve frezeleme işlemlerinin C2 kalite karbür ve kaba tornalama, delme, rayba çekme, kılavuz çekme ve vida açma işlemlerinin yüksek hız çeliği ve C2 kalite karbür takımlarla yapılması önerilmiştir [10].

Oldukça yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım gereksinimi olduğu zaman, niobyum, tantalum, tungsten ve molibden gibi refrakter malzemeler kullanılır. Ancak, refrakter malzemelerin işlenmesi üstün özelliklerinden dolayı zordur ve bunların işlenmesi hakkında bilgiler literatürde nadir bulunmaktadır. Sortino vd. tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada, sinterlenmiş molibden kesme sıvısı kullanılmadan bitirme tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Seramik, sermet ve karbürlerden oluşan çeşitli kesici takımlar seçilmiştir. Tornalama deneyleri sabit talaş derinliği, sabit ilerleme değeri ve farklı kesme hızlarında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım aşınması incelenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucu seramik ve sermet takımların yüksek kırılma direnci nedeniyle molibdenin işlenmesinde uygun olmadığı görülmüştür. Farklı geometri ve farklı kalitelerde seçilen karbür takımların çoğunun da uygun olmadığı görülmüştür. İyi yüzey kalitesi ve tatmin edici takım ömrünün nispeten yüksek kesme hızlarında kesme sıvısı kullanılmadan orta seviyede kobalt birleştirici içeren ve çok ince taneli WC takımlarla elde edilebildiği görülmüştür. Artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülük değeri önemli derecede düşmüştür. Benzer şekilde kesme kuvveti de artan kesme hızıyla düşmüştür. Düşük kesme hızlarında kesici takım talaş yüzeyine iş parçası malzemesinin önemli miktarda yapıştığı gözlenmiştir. Pozitif talaş açılara sahip kesici takımlar düşük kesme hızları da dahil tüm kesme hızlarında iyi bir performans sergilemişlerdir. Sinterlenmiş molibdenin tornalama yöntemiyle işlenmesinde pozitif talaş açısına sahip, kesici ucu az miktarda yuvarlatılmış, ince katmanlı kaplamaya sahip ve yüzeyi parlatılmış orta derecede kobalt birleştirici içeren, çok ince taneli karbür kesici takımların kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır [11].

Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri işlenen parça boyutları, ısı oluşumu, takım ömrü ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yüksek kesme kuvvetleri işlem esnasında iş parçasının kırılmasına veya ciddi olarak deforme olmasına da neden olabilir. Bu

durum, özellikle molibden gibi çok pahalı malzemelerde ciddi maliyet artışlarına neden olur. Önemli bir yüzey kalite göstergesi olan yüzey pürüzlülük değeri de bileşenlerin kalitesini etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Yüzey pürüzlülük değeri bileşenlerin sürtünme, aşınma, korozyon ve yorulma ömürleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Talaşlı imalat işlemleri esnasında oluşan kuvvetlerin ve işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük olması istenir. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri iş parçası malzemesi, kesici takım ve kesme parametrelerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla, düşük kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini sağlayan kesici takım ve işleme koşullarının belirlenmesi yüksek kaliteli bileşenlerin düşük maliyette üretilmesi için önemlidir [12-14].

Yapılan literatür taramasından molibden ve alaşımlarının talaşlı imalatı ile ilgili çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu alaşımların frezelenmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kesme parametrelerinin önem seviyelerini belirlemek için ANOVA analizi yapılmıştır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Kesme Şartları ve Kullanılan Cihazlar (Cutting Conditions and Used Devices)

İşleme deneyleri kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü deneyleri olmak üzere iki farklı CNC dik işlem merkezinde kesme sıvısı kullanılmadan parmak frezeleme yöntemiyle yapılmıştır. Kesme kuvvetleri deneyleri Johnford VMC-550 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük deneyleri ise Taksan TMC-500V CNC dik işlem merkezinde yapılmıştır. Her iki deney için de iş parçası olarak 50x50x5 mm boyutlarında prizmatik parçalar hazırlanmıştır. İş parçalarının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Kesici takımlar farklı üreticilerden temin edilmiştir. Kesici takım seçiminde üretici firma tavsiyeleri ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bütün kesici takımlar, uç yarıçapları 0,8 mm olacak şekilde temin edilmiştir. Kesici takımlar ve takım tutucuların özellikleri Tablo 2'de verilmektedir. Deneylerde kullanılan kesici takımlar 12 mm çapında değiştirilebilir uçlu takım tutuculara rijit bir şekilde mekanik olarak bağlanmıştır. Takım tutucular, tek ağızlı (bir adet kesici takımın bağlanabildiği) olarak seçilmiştir. Kesme kuvvetleri ölçümü için yapılan deneylerde parmak freze alından talaş kaldıracak şekilde bir frezeleme yöntemi

**Tablo 1.** İş parçalarının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri  
(Chemical composition and mechanical properties of workpieces)

Özellik	Birim	Saf Molibden	TZM	MHC
Kimyasal Bileşim	%	>99,97 Mo	0,5 Ti, 0,08 Zr, 0,03 C	1,2 Hf, 0,08 C
Yoğunluk (20°C'de)	g/cm <sup>3</sup>	10,22	10,16	10,00
Ergime noktası	°C	2617	2620	
Brinell sertliği	BH	205	212	225
Akma gerilmesi	MPa	600	680	725
Çekme gerilmesi	MPa	800	850	890
Elastikiyet modülü	GPa	330	325	
Poison oranı		0,38	0,38	
Isı iletim katsayısı (20°C'de)	[W/(mK)]	138	140	

**Tablo 2.** Kesici takımlar ve takım tutucuların özellikleri (Specifications of cutting tools and tool holders)

No	Takım Markası	Takım Kodu	Kalite Sınıfı	Tutucu Kodu
1	Mitsubishi	AOMT123608PEER-H	VP15TF PVD (Al,Ti)N	KMTAOMT100 R 121W16S
2	Kennametal	EDPT10T308PDSRGE	KC522M PVD (Al,Ti)N PM 4240	12A01R020A16 ED10 R390-012A16-
3	Sandvik	R390-11 T308M	CVD Ti(C,N)+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN)	11L Coromill 390 R390-012A16-
4	Sandvik	R390-11 T308M	H13A Kaplamasız	11L Coromill 390

kullanılmıştır. Eksenel kesme derinliği 0,5 mm olarak verilmiştir. Takım tutucu (değiştirilebilir uçlu parmak freze) eksen, iş parçalarının 5 mm'lik kısmının ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için yapılan deneylerde yanıl frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Eksenel kesme derinliği 5 mm ve radyal kesme derinliği 0,5 mm olarak verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerlerinin ölçümü ISO 4287 standardına uygun Mahr MarSurf PS1 marka ve model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır [15]. Molibden ve alaşımlarının işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde üç kuvvet bileşenini ( $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_r$ ) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, Kistler 9272-A tipi piezoelektrik esaslı bir dinamometre kullanılmıştır.

## 2.2. Deney Tasarımı ve Analiz (Experimental Design and Analysis)

Taguchi metodu literatürde bilim insanları tarafından en çok kullanılan deney tasarım yöntemlerinden biridir. Ghani vd. AISI H13 takım çeliğinin parmak freze ile işlenmesinde frezeleme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodunu uygulamışlardır. Kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğini kontrol faktörleri olarak ve kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü de kalite karakteristiği olarak seçmişlerdir. Deney tasarımı için L27 ortogonal dizisi seçilmiştir. Deneyler TiN kaplamalı karbür takımlarla AISI H13 takım çeliği iş parçası malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Düşük kesme kuvvetleri ve düşük yüzey pürüzlülük değerleri yüksek kesme hızı, düşük ilerleme miktarı ve düşük kesme derinliğinde yapılan deneylerde elde edilmiştir. [16]. Günay, AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri ve iş parçası yüzey pürüzlülük değerleri için kesici takım uç yarıçapı ve kesme parametrelerinin optimizasyonunu yapmıştır. Bu amaçla Taguchi L9 dikey dizini kullanmış ve önem seviyelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulamıştır. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı olduğu görülmüştür [17].

Taguchi metodu geleneksel deney tasarımının dikkate almadığı kontrol edilemeyen faktörlerin meydana getirdiği değişkenliğin denetimine izin verir. Bu faktörlere karşı kontrol faktörlerinin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü oranına (S/N) dönüştürür. S/N oranı, istenilmeyen rastgele gürültü değeri için istenilen sinyal oranı olarak tanımlanmakta olup, deneysel verilerin kalite karakteristiklerini gösterir. Amaç fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda S/N oranı olarak ifade edilen “en küçük en

iyi, en büyük en iyi ve hedef değer en iyi” olmak üzere temelde üç farklı fonksiyon kullanılır. Ayrıca kesme parametrelerinin istatistiksel önemini belirlemek için ANOVA analizi uygulanır. ANOVA analizi ve S/N oranı yardımıyla kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenir. Son olarak, Taguchi metodu ile bulunan optimum işleme parametreleri kullanılarak doğrulama deneyi yapılır ve optimizasyonun geçerliliği test edilir [18].

Bu çalışmada, üç farklı molibden alaşımı olan saf molibden, TZM ve MHC için frezeleme ile şekillendirme işlemlerinde oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri için en uygun kesici takım ve kesme parametresi optimizasyonu yapılmıştır. Kesici takım (Kt), kesme hızı ( $V_c$ ) ve ilerleme miktarı (f) kontrol faktörleri olarak belirlenmiş ve her kontrol faktörü için 4 farklı seviye seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi metodunun L16 dikey dizisi kullanılmıştır. Kontrol faktörleri ve kontrol faktörlerinin seviyeleri Tablo 3’de verilmiştir. Her malzeme için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri kalite karakteristiği olarak belirlenmiş ve kesici takım ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için ayrı deneyler yapılmıştır. Kontrol faktörlerinin uygun seviyelerini belirlemek için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin en küçük olduğu durum belirlenmelidir. Bu amaçlar S/N oranının hesaplanmasında Eş. 1’de verilen “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

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

Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kontrol faktörlerinin etkisini belirlemek için deney sonuçlarına %95 güven aralığında ANOVA analizi uygulanmıştır. Taguchi metodu ve ANOVA analizi Minitab17 programı ile yapılmıştır.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının frezeleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri ve “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu ile elde edilen S/N oranları Tablo 4’te verilmiştir. Üç farklı malzemenin aynı kontrol faktörleri ile işlenmesi sonucunda elde edilen ortalama kesme kuvvetleri; saf molibden için 403 N, TZM için 329 N ve MHC için 340 N olurken ortalama pürüzlülük değerleri de saf molibden, TZM ve MHC için sırasıyla 3,699  $\mu$ m, 3,614  $\mu$ m ve 3,882  $\mu$ m olmuştur. Bu sonuçlar kesme kuvvetlerinin işlenen malzemeye göre önemli derecede değiştiğini göstermektedir.

**Tablo 3.** Kontrol faktörleri ve seviyeler (Control factors and their levels)

Kontrol Faktörleri	Birim	Kod	Seviyeler			
			1	2	3	4
Kesici Takım (Kt)	-	A	VP15TF	KC522M	4240	H13A
İlerleme Miktarı (f)	mm/dış	B	0,05	0,1	0,15	0,2
Kesme Hızı ( $V_c$ )	m/dak	C	75	100	125	150

**Tablo 4.** L16 dikey dizinine göre deney sonuçları ve S/N oranları  
(S/N ratios and experimental results according to L16 orthogonal array)

Deney No	Kontrol faktörleri				Deney sonuçları		S/N oranı			
	A	Kesici takım (Kt)	B	İlerleme miktarı (mm/diş)	C	Kesme hızı (m/dak)	F <sub>c</sub> (N)	R <sub>a</sub> (µm)	S/N - F <sub>c</sub> (dB)	S/N - R <sub>a</sub> (dB)
<b>Saf Molibden</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	256	3,898	-48,1648	-11,8168
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	330	4,354	-50,3703	-12,7778
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	360	3,693	-51,1261	-11,3476
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	441	2,375	-52,8888	-7,5133
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	426	4,070	-52,5882	-12,1919
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	441	4,542	-52,8888	-13,1449
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	491	3,420	-53,8216	-10,6805
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	504	3,071	-54,0486	-9,7456
9	3	4240	1	0,05	3	125	323	2,865	-50,1841	-9,1425
10	3	4240	2	0,1	4	150	391	2,593	-51,8435	-8,2761
11	3	4240	3	0,15	1	75	390	4,487	-51,8213	-13,0391
12	3	4240	4	0,2	2	100	459	4,176	-53,2363	-12,4152
13	4	H13A	1	0,05	4	150	356	3,207	-51,029	-10,1220
14	4	H13A	2	0,1	3	125	386	3,668	-51,7317	-11,2886
15	4	H13A	3	0,15	2	100	421	4,322	-52,4856	-12,7137
16	4	H13A	4	0,2	1	75	480	4,437	-53,6248	-12,9418
<b>Ortalama</b>							403	3,699	-51,9908	-11,1973
<b>TZM</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	199	4,315	-45,9771	-12,6996
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	267	4,502	-48,5302	-13,0681
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	289	3,589	-49,2180	-11,0995
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	387	2,299	-51,7542	-7,2308
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	251	4,334	-47,9935	-12,7378
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	286	3,985	-49,1273	-12,0086
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	367	1,418	-51,2933	-3,0335
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	399	2,742	-52,0195	-8,7613
9	3	4240	1	0,05	3	125	284	2,838	-49,0664	-9,0602
10	3	4240	2	0,1	4	150	361	2,120	-51,1501	-6,5267
11	3	4240	3	0,15	1	75	340	4,726	-50,6296	-13,4899
12	3	4240	4	0,2	2	100	419	4,502	-52,4443	-13,0681
13	4	H13A	1	0,05	4	150	290	2,414	-49,2480	-7,6547
14	4	H13A	2	0,1	3	125	350	3,189	-50,8814	-10,0731
15	4	H13A	3	0,15	2	100	354	4,942	-50,9801	-13,8781
16	4	H13A	4	0,2	1	75	413	5,915	-52,3190	-15,4391
<b>Ortalama</b>							329	3,614	-50,1645	-10,6143
<b>MHC</b>										
1	1	VP15TF	1	0,05	1	75	243	4,821	-47,7121	-13,6627
2	1	VP15TF	2	0,1	2	100	234	4,204	-47,3843	-12,4733
3	1	VP15TF	3	0,15	3	125	324	4,083	-50,2109	-12,2196
4	1	VP15TF	4	0,2	4	150	376	3,484	-51,5038	-10,8416
5	2	KC522M	1	0,05	2	100	281	4,353	-48,9741	-12,7758
6	2	KC522M	2	0,1	1	75	329	3,940	-50,3439	-11,9099
7	2	KC522M	3	0,15	4	150	390	2,769	-51,8213	-8,8465
8	2	KC522M	4	0,2	3	125	421	2,654	-52,4856	-8,4780
9	3	4240	1	0,05	3	125	316	3,060	-49,9937	-9,7144
10	3	4240	2	0,1	4	150	344	2,813	-50,7312	-8,9834
11	3	4240	3	0,15	1	75	357	5,372	-51,0534	-14,6027
12	3	4240	4	0,2	2	100	431	4,793	-52,6895	-13,6121
13	4	H13A	1	0,05	4	150	281	2,838	-48,9741	-9,0602
14	4	H13A	2	0,1	3	125	351	3,510	-50,9061	-10,9061
15	4	H13A	3	0,15	2	100	359	3,846	-51,1019	-11,7002
16	4	H13A	4	0,2	1	75	399	5,570	-52,0195	-14,9171
<b>Ortalama</b>							340	3,882	-50,4941	-11,5440

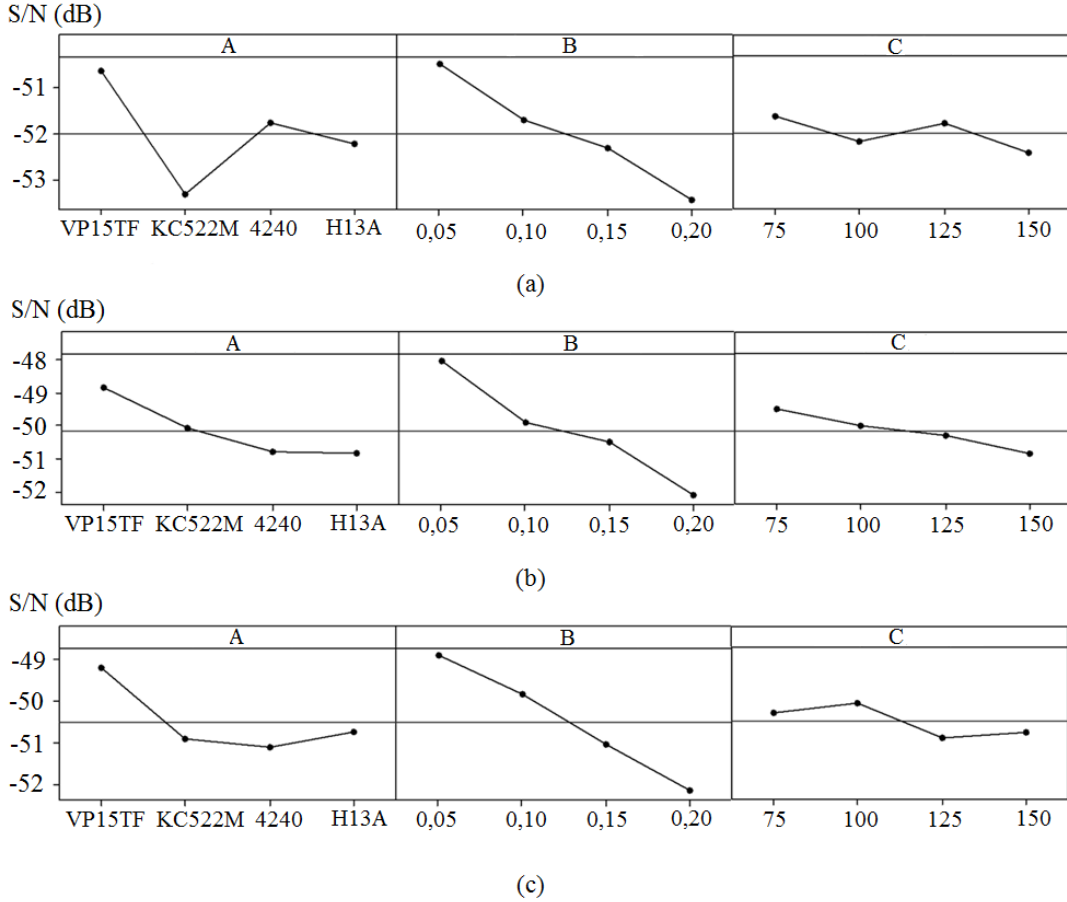
### 3.1. Kesme Kuvvetlerinin Analizi (Analysis of Cutting Forces)

Her bir malzeme için gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen S/N oranları belirlenmiştir. S/N oranları için ana etki grafikleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Aynı zamanda Tablo 5'te kesme kuvvetleri için hesaplanan ortalama S/N oranlarının kontrol faktörlerine göre dağılımı verilmiştir.

Şekil 1'deki ana etki grafikleri ve Tablo 5'teki S/N oranlarının en yüksek ve en düşük noktaları incelendiğinde kesme kuvvetleri üzerinde etkili olan en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı (f) olduğu görülmektedir. Tablo 5 incelendiğinde, saf molibden, TZM ve MHC'nin işlenmesinde meydana gelen kesme kuvvetleri üzerinde etkili olan kontrol faktörlerinin önem sırası sırasıyla ilerleme miktarı (f), kesici takım (Kt) ve kesme hızı ( $V_c$ ) olduğu görülmektedir. Ayrıca, önem sırasının da her deney malzemesi için aynı olduğu görülmektedir. 3 farklı malzemenin 4 farklı takım ile işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvveti değerlerinin kesme hızı-ilerleme miktarı etkileşimine göre değişimleri yüzey grafikleri şeklinde Şekil 2'de gösterilmiştir. Grafikler ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetleri değerlerinin de arttığını ortaya koymakla beraber, istatistiksel sonuçları da doğrular niteliktedir. Tablo 4'ten en yüksek ortalama kesme kuvvetinin saf molibdenin işlenmesi esnasında olduğu görülmektedir. Saf molibdenin

diğer alışılara göre düşük sertliği ve düşük dayanım değerleri nispeten yüksek sünekliğinin bir göstergesidir, Tablo 1. Yüksek süneklik talaşlı imalat işlemlerinde kesici takım talaş yüzeyine (ikinci deformasyon bölgesine) daha fazla talaşın yapışmasına neden olur ve bu durum da kesme kuvvetlerini artırır [13].

İlerleme miktarının artması ile talaş kesit alanı artacağından talaş kaldırmak için daha fazla güce ihtiyaç duyulur. Bundan dolayı ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetleri değerlerinin yükselmesi beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, Tablo 5 ve Şekil 2'den kesme hızının kesme kuvvetlerini ciddi olarak etkilemediği görülmektedir. Kontrol faktörlerinin kesme kuvvetleri üzerinde etki seviyelerini belirleyebilmek için ANOVA analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Bu tabloda serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), F oranı, kontrol faktörlerinin  $F_c$  üzerindeki anlamlılık düzeyini belirten P değeri ve yüzde katkı oranları verilmiştir. ANOVA analizi sonuçlarına göre P değerinin 0,05'den küçük olması kontrol faktörlerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Tablo 6 incelendiğinde her malzeme gurubunda da kesme kuvveti üzerinde en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı (saf molibden %50,2, TZM %69,9, MHC %65,1) olduğu görülmektedir.

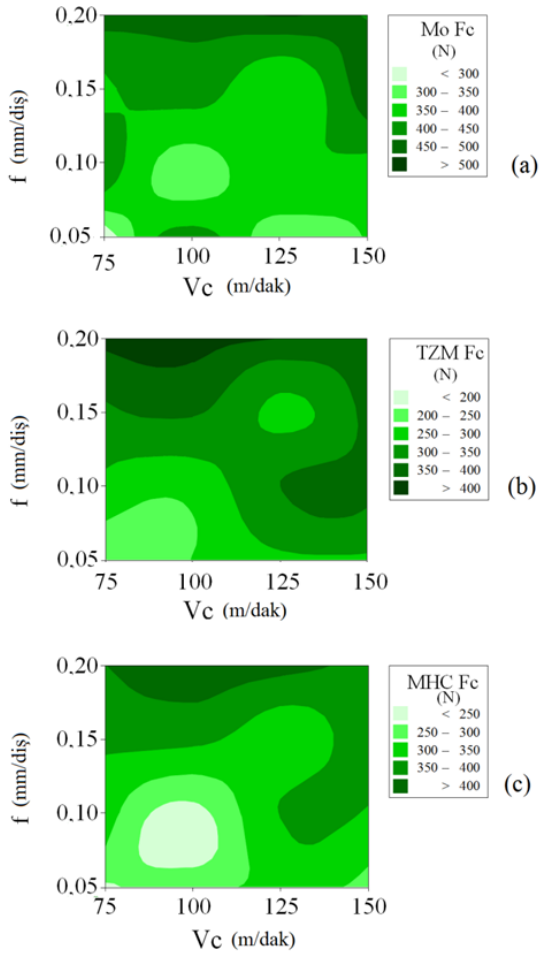


Şekil 1. Kesme kuvvetlerinin S/N oranları için ana etki grafikleri (a: Saf Molibden b: TZM c: MHC)



**Tablo 5.** Kesme kuvvetlerinin ortalama S/N oranları için kontrol faktörlerinin önem sırası  
(Importance of control factors for mean S/N ratio of cutting forces)

Kontrol faktörleri	S/N oranları (dB)				Mak - Min	Önem sırası
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4		
<b>Saf Molibden</b>						
Kt	-50,64	-53,34	-51,77	-52,22	2,70	2
f (mm/diş)	-50,49	-51,71	-52,31	-53,45	2,96	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-51,62	-52,17	-51,77	-52,40	0,77	3
<b>TZM</b>						
Kt	-48,87	-50,11	-50,82	-50,86	1,99	2
f (mm/diş)	-48,07	-49,92	-50,53	-52,13	4,06	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-49,51	-49,99	-50,30	-50,86	1,35	3
<b>MHC</b>						
Kt	-49,20*	-50,91	-51,12	-50,75	1,91	2
f (mm/diş)	-48,91*	-49,84	-51,05	-52,17	3,26	1
V <sub>c</sub> (m/dak)	-50,28	-50,04	-50,90	-50,76	0,86	3

**Şekil 2.** Kesme hızı-ilerleme miktarı etkileşiminin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi (a: Saf Molibden b: TZM c: MHC)

(Effect of feed rate-cutting speed interactions on the cutting force) (a: Pure molybdenum b: TZM c: MHC)

Kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı olan diğer bir kontrol faktörü de kesici takımdır,

Tablo 5 ve Tablo 6. Talaşlı imalat işlemlerinde oluşan kesme kuvvetleri kesici takım geometrisinden, kaplamasından ve kesici takımın yüzeyinden etkilenir. Bu çalışmada kullanılan kesici takımların geometrisi ana hatlarıyla aynıdır. Ancak, bu takımlar farklı üreticilerden temin edilmiştir ve aynı üreticiden temin edilen iki kesici takımın bir tanesi kaplamalı ve diğeri de kaplamasızdır. Bu takımların kesme yapan uç kısımları ve talaş kırıcı geometrileri de farklılık göstermektedir, Tablo 2 Kesme yapan uç kısmının ve talaş kırıcının geometrisinin farklı olması kesme kuvvetlerinin farklı olmasına neden olur. Ayrıca, iki farklı kesici takımın geometrisi aynı olsa bile kesici takıma uygulanan kaplama da kesme kuvvetleri üzerinde etkilidir. Üçüncü bir kontrol faktörü olan kesme hızının saf molibden ve MHC üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir. TZM üzerindeki etkisi ise istatistiksel olarak anlamlı görülmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinin az miktarda da olsa azalması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur [19].

Taguchi metodunda, en uygun sonuçları verecek olan kontrol faktörlerinin seviyelerinin belirlenmesinden sonraki aşama, optimizasyonun doğruluğunun test edildiği doğrulama deneylerinin yapılması aşamasıdır. “En küçük en iyi” amaç fonksiyonu ile hesaplanan S/N oranlarına göre kesme kuvvetleri için optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri, saf molibdenin için A1-B1-C1, TZM için A1-B1-C1 ve MHC için A1-B1-C2 olduğu belirlenmiştir (Tablo 5 ve şekil 1). Bu seviyelere göre elde edilebilecek tahminsel en düşük kesme kuvvetleri ( $F_{c\text{hes}}$ ) Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7’de verilmiştir.

$$\eta_G = \bar{\eta}_G + (\bar{A}_0 - \bar{\eta}_G) + (\bar{B}_0 - \bar{\eta}_G) + (\bar{C}_0 - \bar{\eta}_G) \quad (2)$$

$$F_{c\text{hes}} = 10^{-\eta/20} \quad (3)$$

Optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deneyi sonuçları Eş. 4’ten hesaplanan güven aralığı (CI) değeri dikkate alınarak değerlendirilmektedir.



**Tablo 6.** Kesme kuvvetlerinin S/N oranlarına göre ANOVA analizi sonuçları  
(Result of ANOVA analysis according to S/N ratios of cutting forces)

Kontrol faktörleri	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler Ortalaması, KO	F oranı	P değeri	% Katkı
<b>Mo-F<sub>c</sub></b>						
Kt	3	14,9717	4,9906	18,49	0,002	41,2
f (mm/diş)	3	18,2396	6,0799	22,52	0,001	50,2
Vc (m/dak)	3	1,5104	0,5035	1,87	0,236	4,2
Artık Hata	6	1,6196	0,2699			4,5
Toplam	15	36,3413				100,0
R <sup>2</sup>	%95,54					
<b>TZM-F<sub>c</sub></b>						
Kt	3	10,3680	3,4560	56,73	0,000	21,4
f (mm/diş)	3	33,8166	11,2722	185,04	0,000	69,9
Vc (m/dak)	3	3,8348	1,2783	20,98	0,001	7,9
Artık Hata	6	0,3655	0,0609			0,8
Toplam	15	48,3849				100,0
R <sup>2</sup>	%99,24					
<b>MHC-F<sub>c</sub></b>						
Kt	3	9,1641	3,0547	9,86	0,010	24,6
f (mm/diş)	3	24,2155	8,0718	26,05	0,001	65,1
Vc (m/dak)	3	1,9474	0,6491	2,10	0,202	5,2
Artık Hata	6	1,8588	0,3098			5,0
Toplam	15	37,1858				100,0
R <sup>2</sup>	%95					

**Tablo 7.** Kesme kuvvetleri için doğrulama deneyi sonucu ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması  
(Comparison of calculated values with confirmatory test result of cutting forces)

Malzeme	Doğrulama deneyi sonuçları		Hesaplanan tahminsel değerler		Farklar	
	F <sub>c</sub> ölç (N)	S/N (η <sub>ölç</sub> , dB)	F <sub>c</sub> hes (N)	S/N (η <sub>hes</sub> , dB)	F <sub>c</sub> ölç - F <sub>c</sub> hes	η <sub>ölç</sub> - η <sub>hes</sub>
Saf Molibden	256	-48,1648	272	-48,7722	16	0,6074
TZM	199	-45,9771	194	-46,1253	5	0,1482
MHC	226	-47,0822	221	-47,1656	5	0,0834

$$CI = \sqrt{F_{0,05,(1,U_e)} V_e (1/\eta_{eff} + 1/r)} \quad (4)$$

Deney tekrar sayısının hesaplanması, toplam deney sayısı ve kesme kuvvetleri üzerinde anlamlı etkisi olan kontrol faktörlerinin serbestlik dereceleri toplamı Eş. 5'te yerine konulduğunda 1,6 olarak hesaplanmış ve dolayısıyla deney tekrarı sayısı (η<sub>eff</sub>) iki olarak bulunmuştur.

$$\eta_{eff} = N/1 + U_T \quad (5)$$

F<sub>0,05,(1,U<sub>e</sub>)</sub> değeri, Tablo 6'daki hata serbestlik derecesi dikkate alınarak ilgili F tablosundan tespit edilmiştir. Eş. 4'deki hata varyansı (U<sub>e</sub>), Tablo 6'daki veriler yardımıyla belirlenmiştir.

Bulunan değerler Eş. 4'te yerine konulduğunda kesme kuvvetleri için güven aralığı (CI) değerleri, saf molibden için 4,2171 dB, TZM için 2,0032 dB ve MHC için 4,5180 dB olarak hesaplanmıştır. Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerine göre yapılan doğrulama deneyi sonucu ile Eş. 2

ve Eş. 3 yardımıyla hesaplanan değerlerin karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir.

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçların S/N oranları ile Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanan değerlerin S/N oranları arasındaki farkların saf molibden için 0,6074 dB, TZM için 0,1482 dB ve MHC için 0,0834 dB olduğu Tablo 7'den görülmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında, hesaplanan değerlerin güven aralığı değerlerinden (CI) küçük olduğu görülür. Bu sonuç kesme kuvveti için gerçekleştirilen optimizasyonun uygun olduğunu göstermektedir.

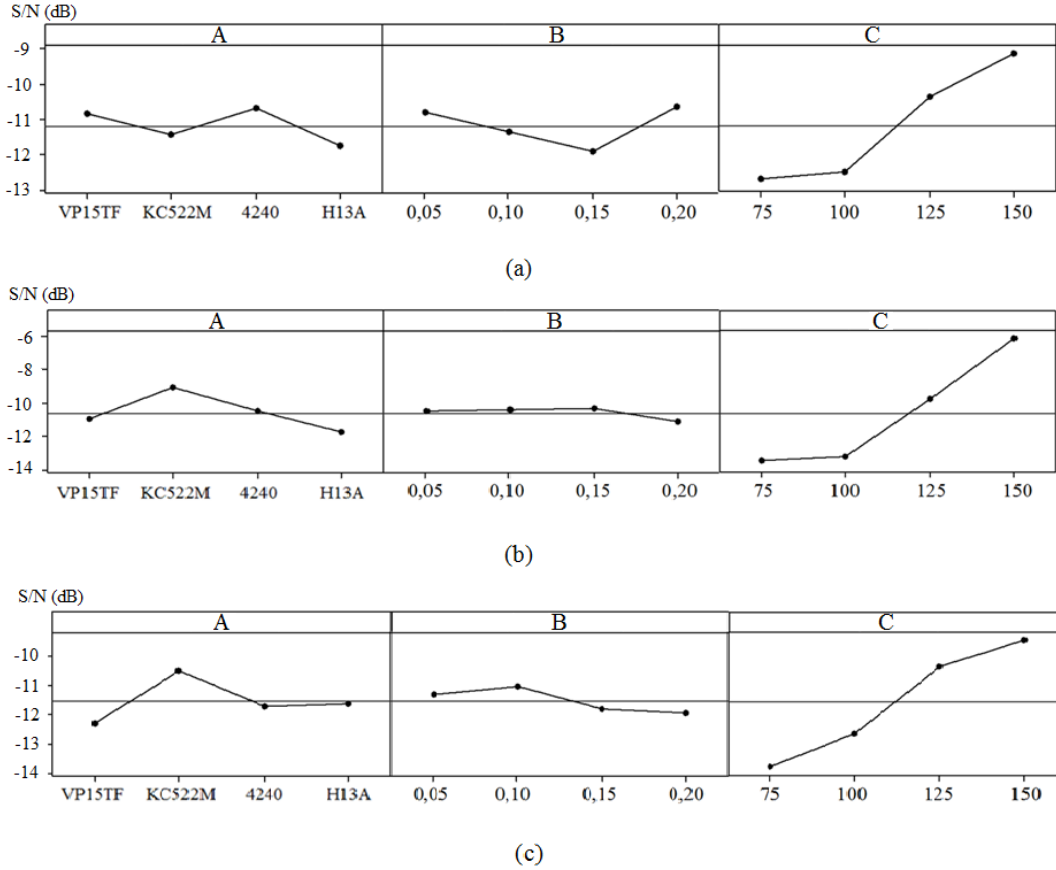
### 3.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Analizi (Surface Roughness Analysis)

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının karbür takımlarla işlenmesinde kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Tablo 8'de ise yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme şartlarının belirlenebilmesi amacıyla hesaplanan ortalama S/N oranları verilmiştir.

Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının frezelenmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen önemli kontrol faktörlerinin başında kesme hızının ( $V_c$ ) geldiği tespit edilmiştir (Şekil 3). S/N oranlarının en yüksek ve en düşük olduğu noktalar arasındaki fark bu tespiti doğrulamaktadır (Tablo 8). TZM ve MHC için yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kontrol faktörlerinin önem sırası; kesme hızı, kesici takım ve ilerleme miktarı iken saf

molibden için de; kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici olduğu görülmektedir.

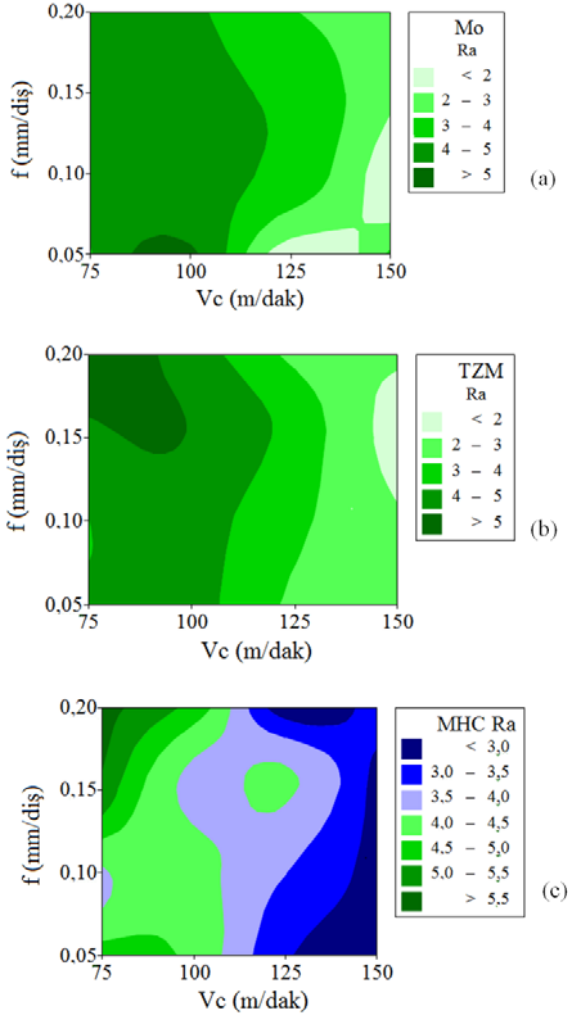
Şekil 4'te her malzeme için yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı-ilerleme miktarı etkileşimine bağlı olarak değişimi yüzey grafikleri şeklinde verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kesme hızı değerlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.** Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranları için ana etki grafikleri (a: saf molibden b: TZM c: MHC)  
(Main effect plots for the S/N ratios of the surface roughness) (a: Pure molybdenum b: TZM c: MHC)

**Tablo 8.** Yüzey pürüzlülüğünün ortalama S/N oranları ve kontrol faktörlerinin önem sırası  
(Importance of factors for mean S/N ratios of surface roughness)

Kontrol faktörleri	S/N oranları (dB)				Mak - Min	Önem sırası
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4		
<b>Saf Molibden</b>						
Kt	-10,864	-11,441	-10,718	-11,767	1,048	3
f (mm/diş)	-10,818	-11,372	-11,945	-10,654	1,291	2
$V_c$ (m/dak)	-12,736	-12,525	-10,381	-9,148	3,588	1
<b>TZM</b>						
Kt	-11,024	-9,135	-10,536	-11,761	2,626	2
f (mm/diş)	-10,538	-10,419	-10,375	-11,125	0,750	3
$V_c$ (m/dak)	-13,409	-13,188	-9,749	-6,111	7,298	1
<b>MHC</b>						
Kt	-12,299	-10,503	-11,728	-11,646	1,797	2
f (mm/diş)	-11,303	-11,068	-11,842	-11,962	0,894	3
$V_c$ (m/dak)	-13,773	-12,640	-10,330	-9,433	4,340	1



**Şekil 4.** Kesme hızı-ilerleme miktarı etkileşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi (a: saf molibden b: TZM c: MHC) (Effect of feed rate-cutting speed interactions on the surface roughness) (a: Pure molybdenum b: TZM c: MHC)

Yüzey pürüzlülüğü için uygulanan ANOVA analiz sonuçları Tablo 9’da verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için en fazla öneme sahip kontrol faktörü kesme hızı (saf molibden için %75,3, TZM için %85,5 ve MHC için %73,2) olduğu görülmüştür.

Kesme kuvvetlerinde ele alınan yöntemlere uygun olarak, yüzey pürüzlülüğü optimizasyon geçerliliğinin test edildiği doğrulama deneyleri yapılmıştır. Tablo 8 ve Şekil 3 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri sırasıyla; saf molibden için A3-B4-C4, TZM için A2-B3-C4 ve MHC için A2-B2-C4 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sıralamalara göre oluşabilecek en düşük yüzey pürüzlülük değerleri Eş. 2 ve Eş. 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Eş. 4 ile hesaplanan güven aralığı (CI) değerleri dikkate alınarak, optimum kontrol faktörlerinin seviyeleri ile yapılan doğrulama deney sonuçları değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için CI

değerleri, saf molibden için 7,2480 dB, TZM için 9,2586 dB ve MHC için 9,8014 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4 incelendiğinde her üç malzeme için de elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamalarının birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Ayrıca, bu değerlerin oldukça yüksek olduğu da görülmektedir. Deneye tabi tutulan üç malzeme içerisinde en yüksek sünekliğe sahip olan malzeme saf molibden olsa da TZM ve MHC’nin de sünekliklerinin yüksek olduğu Tablo 1’den anlaşılabilir. Sünek malzemelerin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Çünkü yüksek süneklik özellikle TZM ve MHC’nin işlenmesinde kesici uçta büyük ve kararsız yığıntı talaş (BUE) oluşturma eğilimini artırır [20]. Büyük ve kararsız yığıntı talaş ta yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine neden olur.

Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin azalması yüksek kesme hızlarında yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalmasıyla açıklanabilir. Özellikle kesici takım ucu yüksek kesme hızından dolayı aşınmaya maruz kalmadıkça yüzey pürüzlülük değeri artan kesme hızıyla azalır [11, 19].

Saf molibden için, ilerleme miktarı ve kesici takımın yüzey pürüzlülüğüne % katkı oranlarının düşük ve birbirlerine yakın değerlerde olduğu ANOVA analizi sonuçlarından görülmektedir, Tablo 9. TZM ve MHC’de ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkiye sahip değildir. Ancak, kesici takım yüzey pürüzlülüğü üzerinde yaklaşık olarak %10 civarında bir etkiye sahiptir. İşleme esnasında kesici uçta oluşan ve yüzey pürüzlülüğünü artıran yığıntı talaş kesici uç geometrisinden, kesici takımın kaplamalı/kaplamasız olmasından ve kaplamanın türünden etkilenir. Ayrıca, kesici ucu yuvarlatılmış ve/veya pah kırılmış kesici takımların yığıntı talaş oluşturma eğilimini artırdığı bilinmektedir [21]. Bu çalışmada kullanılan kesici takımlar farklı kaplamalara sahiptirler ve ayrıca bu takımlar üç farklı üreticiden temin edildiği için kesici uç geometrilerinde de farklılıklar olması muhtemeldir. İşleme esnasında oluşan ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen yığıntı talaş oluşumunda farklı kaplamaların ve farklı uç geometrilerinin farklılıklara neden olması oldukça muhtemeldir.

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçların S/N oranları ile Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanan değerlerin S/N oranları arasındaki farklar (saf molibden için -0,2176 dB, TZM için 1,3598 dB ve MHC için -0,1226 dB) yüzey pürüzlülüğü için hesaplanan CI değerlerinden (saf molibden için 7,2480 dB, TZM için 9,2586 dB ve MHC için 9,8014 dB) oldukça küçüktür. Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü için Taguchi optimizasyon yöntemine dayalı olarak tespit edilen optimum kontrol faktörlerinin seviyelerini doğrulamaktadır.

Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü için yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, kesme kuvvetleri için en önemli kontrol faktörünün ilerleme miktarı (f) ve yüzey

**Tablo 9.** Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranlarına göre ANOVA analiz sonuçları  
(Result of ANOVA analysis according to S/N ratios of surface roughness)

Kontrol faktörleri	Serbestlik derecesi, SD	Kareler Toplamı, KT	Kareler KO	Ortalaması, F oranı	P değeri	% Katkı
<b>Mo-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	2,8958	0,9653	1,21	0,384	6,1
f (mm/diş)	3	4,1149	1,3716	1,72	0,262	8,6
V <sub>c</sub> (m/dak)	3	35,9779	11,9926	15,04	0,003	75,3
Artık Hata	6	4,7837	0,7973			10
Toplam	15	47,7723				100,0
R <sup>2</sup>	%89,99					
<b>TZM-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	14,709	4,903	3,77	0,078	8,9
f (mm/diş)	3	1,447	0,482	0,37	0,777	0,9
V <sub>c</sub> (m/dak)	3	141,845	47,282	36,35	0,000	85,5
Artık Hata	6	7,803	1,301			4,7
Toplam	15	165,804				100,0
R <sup>2</sup>	%95,29					
<b>MHC-R<sub>a</sub></b>						
Kt	3	6,798	2,266	1,55	0,295	10,3
f (mm/diş)	3	2,193	0,731	0,50	0,695	3,3
V <sub>c</sub> (m/dak)	3	48,410	16,137	11,07	0,007	73,2
Artık Hata	6	8,745	1,458			13,2
Toplam	15	66,146				100,0
R <sup>2</sup>	%86,78					

**Tablo 10.** Yüzey pürüzlülüğü için doğrulama deneyi sonucu ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması  
(Comparison of calculated values with confirmatory test result of surface roughness)

Malzeme	Doğrulama sonuçları		deneyi Hesaplanan tahminsel değerler			Farklar	
	R <sub>a</sub> ölç (N)	S/N dB)	(η <sub>ölç</sub> , R <sub>a</sub> hes (N)	S/N dB)	(η <sub>hes</sub> , R <sub>a</sub> ölç - R <sub>a</sub> hes	η <sub>ölç</sub> - η <sub>hes</sub>	
Saf Molibden	2,613	-8,3431	2,546	-8,1255	0,067	-0,2176	
TZM	1,418	-3,0335	1,623	-4,3933	-0,205	1,3598	
MHC	2,523	-8,0383	2,258	-7,9157	0,265	-0,1226	

pürüzlülüğü için en önemli kontrol faktörünün de kesme hızı (V<sub>c</sub>) olduğunu söylemek mümkündür.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

a	: Talaş derinliği (mm)
CI	: Güven aralığı değeri
f	: İlerleme miktarı (mm/diş)
F <sub>c</sub>	: Kesme kuvveti (N)
Kt	: Kesici takım
N	: Toplam deney sayısı
n <sub>eff</sub>	: Deney tekrar sayısı
r	: Kesici takım uç yarıçapı (mm)
R <sub>a</sub>	: Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
S/N	: Sinyal/Gürültü oranı (dB)
V <sub>c</sub>	: Kesme hızı (m/dak)
V <sub>e</sub>	: Hata varyansı
BUE	: Yığıntı talaş

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Her üç malzeme için de kesme kuvveti (F<sub>c</sub>) üzerinde en fazla öneme sahip kontrol faktörünün ilerleme miktarı olduğu (saf molibden %50,2, TZM %69,9, MHC %65,1) ve yüzey pürüzlülüğü (R<sub>a</sub>) üzerindeki en önemli kontrol faktörünün ise kesme hızı (saf molibden için %75,3, TZM için %85,5 ve MHC için %73,2) olduğu tespit edilmiştir.

Artan ilerleme miktarı ile birlikte kesme kuvvetleri artmıştır. En düşük kesme kuvveti TZM alaşımının VP15TF kesici takımla 0,05 mm/diş ilerleme miktarı ve 75 m/dak kesme hızında işlenmesi esnasında 199 N olarak ölçülmüştür. Artan kesme hızı ile birlikte yüzey pürüzlülük değerleri her üç malzeme için de azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarının kayda değer bir etkisi görülmemiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değeri TZM alaşımının KC522M kesici takımla 0,15 mm/diş ilerleme miktarı ve 150 m/dak

kesme hızında işlenmesi sonucunda 1,418 µm olarak ölçülmüştür. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin her üç malzeme için de genellikle yüksek olduğu görülmüştür.

Ölçülen bu yüksek değerler molibden esaslı malzemelerin nispeten yüksek sünekliklerine atfedilebilir. Daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için daha yüksek kesme hızlarında işlem yapılabilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel araştırma Projesi Birimi (KBÜ-BAP-15/2-DR-002) tarafından desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Pöhl C., Schatte J., Leitner H., Metallographic characterization of the molybdenum based alloy MHC by a color etching technique, *Materials Characterization*, 77, 63-69, 2013.
- Shi H.J., Korn C., Pluvinage G., High temperature isothermal and thermomechanical fatigue on a molybdenum-based alloy, *Materials Science and Engineering A*, 247, 180-186, 1998.
- Fan J., Lu M., Cheng H., Tian J., Huang B., Effect of alloying elements Ti, Zr on the property and microstructure of molybdenum, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27, 78-82, 2009.
- Warren J., The 700°C tensile behavior of Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.025C (TZM) extruded bar measured transverse and parallel to the billet extrusion axis, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 16, 149-157, 1998.
- Calderon H., Kistorz G., Ullrich G., Microstructure and plasticity of two molybdenum-based alloys (TZM), *Materials Science and Engineering A*, 160 (2), 189-199, 1993.
- Raffo P.L., Thermomechanical processing of molybdenum-hafnium-carbon alloys, *NASA Technical Note, TN D-5645*, Washington D.C., 1970.
- Eremenko V.N., Shabanova S.V., Velikanova T.Y., Structure of alloys and the phase equilibrium diagram of the Hf-Mo-C system VI. isothermal section of the Hf-Mo-C system at 1400 °C, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 16, 772-777, 1977.
- ASM Handbook, *Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*, ASM International, 2, 1990.
- Kuljanic E., Sortino M., Totis G., Machinability of difficult machining materials, 14th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 1-14, 2010.
- ED Fagan Inc., *General Guide to Machining Molybdenum and molybdenum Alloy*, [http://www.edfagan.com/litPDF/Machining\\_Guide\\_Molybdenum\\_Moly\\_Alloys.pdf](http://www.edfagan.com/litPDF/Machining_Guide_Molybdenum_Moly_Alloys.pdf), 2015, Erişim tarihi Mart 27 2017.
- Sortino M., Totis G., Prospero F., Dry turning of sintered molybdenum, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1179-1190, 2013.
- Kalpajian S., Schmid S.R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 6<sup>th</sup> Edition, Pearson Education, 2009
- Trent E.M., Wright P.K., *Metal Cutting*, 4<sup>th</sup> Edition, Butterworth Heinemann, 2000.
- Wang W., Kweon S.H., Yang S.H., A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by miniaturized machine tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 702-708, 2005.
- ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters*, International Organisation for Standardisation, Geneva, 1997.
- Ghani J.A., Choudhury I.A., Hassan H.H., Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 84-92, 2004.
- Günay M., Optimization with Taguchi Method of Cutting Parameters and Tool Nose Radius in Machining of AISI 316L Steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 437-444, 2013.
- Saat M., Kalite denetiminde Taguchi yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3, 97-108, 2000.
- Çiftçi İ., The Influence of Cutting Tool Coating and Cutting Speed on Cutting Forces and Surface Roughness in Machining Of Austenitic Stainless Steels, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 20 (2), 205-209, 2005.
- Ezugwu E.O., Kim S.K., The performance of cermet cutting tools when machining an Ni-Cr-Mo (En 24) steel, *Lubrication Engineering*, 51, 139-145, 1995.
- Sandvik Coromant, *Modern metal cutting – A practical handbook*. English ed. 1994.

