

*Araştırma Makalesi- Research Article*

# Invar 36 Alaşımının Seramik Takımlar ile İşlenmesinde Kesme Kuvveti Bileşenleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Bakımından İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi

## Evaluation of Machinability in Terms of Cutting Force Components and Surface Roughness in Machining of Invar 36 Alloy with Ceramic Tools

Mahir Akgün<sup>1\*</sup>

*Geliş / Received: 18/10/2021*

*Revize / Revised: 12/01/2022*

*Kabul / Accepted: 21/01/2022*

### ÖZ

Invar 36, düşük ısıl genleşme katsayısı nedeniyle uzay ve havacılık alanında yüksek boyutsal stabilitenin gerekli olduğu mühendislik uygulamalarında kullanılan bir malzemedir. Bu çalışmada, kesme kuvveti bileşenleri (Fc, Ff, Fp) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) bakımından Invar 36 alaşımının işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Torna lama deneyleri, kuru kesme şartlarında CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, varyans analizi (Anova) ile kesme kuvveti bileşenleri ve Ra üzerinde kesme parametrelerinin etki düzeyleri belirlenmiştir. Analiz sonuçları, ilerleme miktarının Fc, Ff ve Ra üzerinde en etkili parametre olduğunu talaş derinliğinin ise Fp üzerinde en etkili kesme parametresi olduğunu göstermektedir. Kesme kuvveti bileşenleri (Fc, Ff ve Fp) için en düşük değerler 240 m/dak (Vc), 0,12 mm/dev (f) ve 0,6 mm (a) değerlerinde yapılan deneylerde sırasıyla 95 N, 80 N ve 20 N olarak ölçülmüştür. En düşük Ra değeri ise 180 m/dak (Vc), 0,12 mm/dev (f) ve 0,6 mm (a) değerlerinde yapılan deneyler sonucunda 0,452 µm olarak elde edilmiştir.

*Anahtar Kelimeler- Invar 36 Alaşımı, Kesme Kuvveti, Yüzey Pürüzlülüğü, Varyans Analizi*

### ABSTRACT

Invar 36 is an alloy used in engineering applications where high dimensional stability is required in the field of space and aviation due to its low thermal expansion coefficient. In this study, the machinability of Invar 36 alloy has been evaluated in regard to the cutting force components (Fc, Ff and Fp) and surface roughness (Ra). The turning experiments were performed on dry conditions without using cooling liquid on a CNC lathe. The impact levels of the cutting parameters on the cutting force components and Ra are also determined with analysis of variance (Anova). The analysis results show that the feed rate has the highest significance on Fc, Ff, and Ra while the cutting depth has the highest significance on Fp. The minimum values for the cutting force components in the tests performed at a (Vc) of 240 m/min, at a (f) of 0.12 mm/rev and a (a) of 0.6 mm, have been measured as 95N, 80N, and 20N, respectively. The lowest Ra value was obtained as 0.452 µm as a result of the experiments performed at 180 m/min (Vc), 0.12 mm/rev (f) and 0.6 mm (a).

*Keywords- Invar 36 Alloy, Cutting Force, Surface Roughness, Variance Analysis*

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [mahirakgun@aksaray.edu.tr](mailto:mahirakgun@aksaray.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-4522-066X>)

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

## I. GİRİŞ

Invar 36 (Fe-36Ni), Charles-Édouard Guillaume tarafından geliştirilen, %36 nikel içeren ikili Demir-Nikel alaşımıdır. Bu alaşımın ana özelliği, her türlü uygulama için boyutsal kararlılık sağlayan, oda sıcaklığında son derece düşük ısıl genleşme katsayısıdır ve Invar adı bu özelliğine “boyutlarının değişmezliğine” atfedilerek değişmez kelimesinden gelmektedir [1-4]. Dahası, Curie sıcaklığı (279°C) altında, Invar 36 alaşımı ferromanyetiktir ve son derece düşük ısıl genleşme katsayısı sunmaktadır. Geniş bir çalışma sıcaklığı aralığında bu özel boyutsal değişmezlikten yararlanan Invar 36 alaşımı, şiddetli sıcaklık değişimlerinde yüksek boyutsal stabilitenin gerekli olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir [5]. Özellikle, uzay ve havacılık sanayinden, uzay kamerası, hassas aletler, halka lazer jiroskopları, optik montaj bileşenleri, ikiz metalik işaretleyici, sismik sürünme sensörleri, zaman tutma sistemleri gibi bileşenlerde ve yanı sıra metroloji cihazları ve televizyonun gölge maskesi çerçevesi de dahil olmak üzere birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [6-10].

Invar 36 alaşımı, yüz merkezli kübik (FCC) kristal yapıya sahip tek fazlı bir östenit ( $\gamma$ -Fe) yapıda oluşmaktadır. Östenitik alaşımların yüksek sünekliği, düşük ısı iletkenliği ve yüksek deformasyon sertleşme eğilimleri zor işlenmelerinin nedenleri olarak kabul edilmektedir [11,12]. Ayrıca, Invar 36'nın işleme sürecinde yığıntı talaş (BUE) oluşumu, kesici takım ömrünü ve üretim verimliliğini ciddi şekilde etkilemektedir [13]. Invar 36 alaşımın farklı imalat yöntemleriyle işlenmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirildiğinde, Khanna ve arkadaşları, Invar 36 alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu üzerine çalışmışlardır [14]. Frezeleme deneylerini Taguchi L9 dizinine göre tasarlamışlardır. Sonuç olarak, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için 0,3 mm talaş derinliği, 0,144 m/min ilerleme miktarı ve 75,4 m/min kesme hızını optimum kesme parametreleri olarak belirlemişlerdir. Basmacı ve arkadaşları, Invar 36 alaşımının farklı kesme şartlarında işlenmesinde kesme parametrelerinin makine öğrenimi yöntemiyle modellenmesi üzerine çalışmışlardır [15]. Tornalama deneylerini iki farklı kesici takım kullanarak, kuru kesim, MQL 20ml, MQL40ml ve CO2 olmak üzere dört farklı kesme şartında gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, geliştirilen yapay sinir ağı modeli ve arayüz uygulaması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tahminin mümkün olduğunu bildirmişlerdir. Porwal ve arkadaşları, Invar 36 Gri ilişki analizi (GRA) kullanılarak Invar 36 alaşımının elektro erozyon yöntemi ile mikro delinmesi üzerine çalışmışlardır [16]. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve delik konikliği çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, optimum işleme şartlarında malzeme kaldırma oranının %125 iyileştirdiğini, takım aşınma oranının %35 ve delik konikliğinin ise %27 azaldığını belirlemişlerdir. Zheng ve arkadaşları, kaplamalı karbür takımlar kullanılarak Invar36 alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin mikro sertliğe etkisini araştırmışlardır [17]. Sonuçlar işleme sonrası ölçülen mikro sertliğin 80 $\mu$ m ile 160 $\mu$ m arasında değiştiğini ve mikro sertliğin kesme derinliğinden ve ilerleme miktarından önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir.

Son zamanlarda, eklemeli imalat yöntemindeki hızlı gelişmeler, Invar 36 alaşımından yüksek hassasiyetli karmaşık bileşenlerinin üretilmesine olanak sağlamıştır. Metalik alaşımlar için doğrudan metal biriktirme (DMD), elektron ışını eritme (EBM) ve seçici lazer eritme (SLM) dahil olmak üzere birçok eklemeli (katmanlı) üretim teknolojisi geliştirilmiştir [18-20]. Literatürde, birçok araştırmacının, seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle Invar 36 alaşımından bileşenlerin üretimi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [21-23]. Örneğin, Khanna ve arkadaşları seçici lazer eritme (SLM) ile Invar 36 alaşımının üretilmesinde yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır [24]. Sonuç olarak, tabaka kalınlığının hem yoğunluk hem de yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili proses parametresi olduğunu ve ayrıca, yoğunluğun yanı sıra yüzey pürüzlülüğü ile işlemin enerji yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Qui ve arkadaşları toz yatak füzyon birleştirme yöntemi (PBF) ile Invar 36 alaşımının üretiminde TiAl parçacıklarının eklenmesinin mikroyapısal ve mekanik özellik etkisini araştırmışlardır [25]. Sonuç olarak, TiAl parçacıklarının eklenmesi ile nano boyutlu oksit ve intermetalik fazların oluştuğunu ve buna bağlı olarak termal genleşme özelliklerinin iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca TiAl takviyeli Invar 36 alaşımının, düşük sıcaklıklarda önemli ölçüde geliştirilmiş mukavemet, iyi süneklik ve düşük termal genleşme katsayıları sergilediğini ve bu nedenle yapısal bir malzeme olarak kullanılabilirliğini bildirmişlerdir.

Literatür araştırması, bir Demir-Nikel alaşımı olan Invar 36 alaşımının talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesiyle ilgili çalışmaların oldukça kısıtlı olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, bu çalışmada Invar 36 alaşımının tornalama yöntemiyle işlenmesinde kesme parametrelerinin, kesme kuvveti bileşenleri olan; esas kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Ff), pasif kuvvet (Fp) ve yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) üzerinde etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı kesme şartlarında CNC torna tezgahında işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti bileşenlerinin (Fc, Ff ve Fp) ölçülmesinde, Kistler 9257B tipi dinamometre ve

ekipmanları kullanılmıştır. Ayrıca, varyans analizi (Anova) ile Fc, Ff ve Fp ve Ra üzerinde kesme parametrelerinin etki düzeyleri belirlenmiştir. Son olarak, deneysel çalışmalar ile elde edilen Fc, Ff ve Fp ve Ra değerlerine göre Invar 36 süperalaşımının işlenebilirliği değerlendirilmiştir.

## II. DENEYSEL METOT

### A. İş Parçası Malzemesi

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak demir esaslı bir ısıl dirençli alaşım olan Invar 36 alaşımı kullanılmıştır. Deney numuneleri 25,4 mm çapında ve 200 mm boyunda hazırlanmıştır. Tablo 1’de deney malzemesinin kimyasal bileşimi ve Tablo 2’de fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir [26].

**Tablo 1.** Invar 36 alaşımının % kimyasal bileşimi.

Fe	Ni	Mn	Si	C
63,13	36,14	0,27	0,2	0,025

**Tablo 2.** Invar 36 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	8,11
Akma gerilmesi	MPa	240
Çekme gerilmesi	MPa	490
Elastikiyet modülü	GPa	140
Ergime noktası	°C	1430
Isıl iletkenlik (20°C’de)	W/m°C	10
Isıl genleşme	10 <sup>-6</sup> /°C	1,5 (20-100°C) 10,1(20-500°C)

### B. Takım Tezgahı ve Kesme Şartları

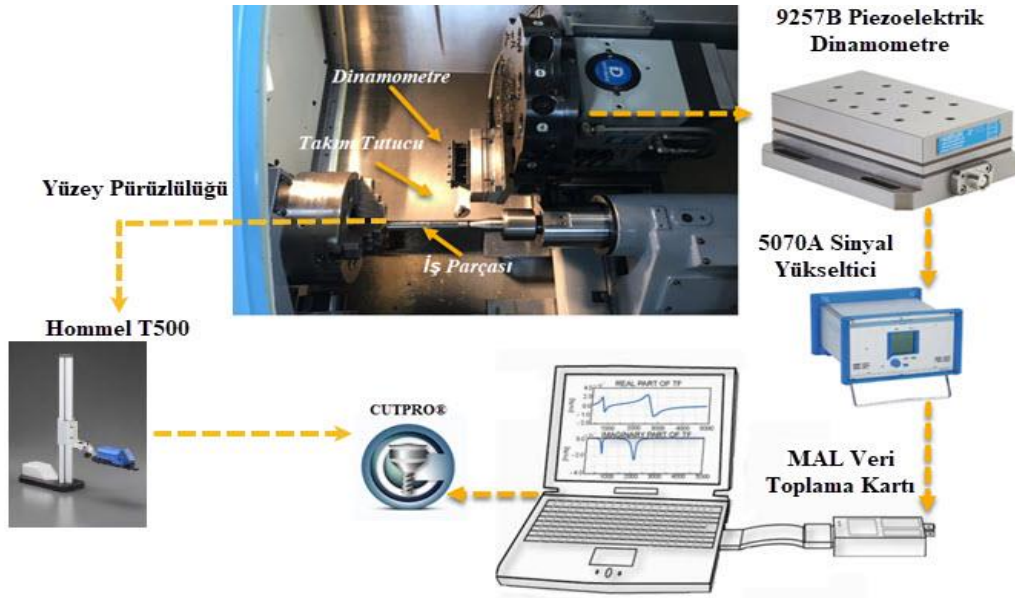
Tornalama deneyleri ALEX TECH ANL-75T, C eksenli CNC torna tezgahında kuru kesme şartlarında 20 mm kesme uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Tezgahın iş mili motor gücü 15 KW olup, değişken kademesiz hıza sahip iş mili en yüksek 3500 dev/dak hıza çıkabilmektedir. İşleme deneylerinde, Kennametal firması tarafından KY4400 kalitesinde ve CNGA1204T01020 formunda temin edilen seramik kesici takımlar tercih edilmiştir. Kesici takım seçiminde ve kesme parametrelerinin seviyelerinin belirlenmesinde üretici firma tavsiyeleridikkate alınmıştır. İşleme parametreleri Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 3.** İşleme parametreleri.

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviye				
		I	II	III	IV	V
Vc	Kesme hızı (m/dak)	120	150	180	210	240
f	İlerleme miktarı (mm/dev)	0,12	0,18	0,24	-	-
a	Kesme derinliği (mm)	0,6	1,2	1,8	-	-

### C. Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Kesme kuvvetlerinin ölçümü için KISTLER 9257B tipi piezoelektrik dinamometre, Kistler 5070 yükseltici, veri toplama kartı ve ayrıca, toplanan kesme kuvveti sinyallerinin işlenmesi için CUTPRO® yazılımı kullanılmıştır. Şekil 1’de deney düzeneği şematik olarak görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde HOMMEL Tester T 500 cihazı kullanılmıştır. Ölçümler iş parçası eksenine paralel olacak şekilde işlenmiş yüzey üzerinde üç farklı noktada yapılmıştır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, “FEI QUANTA FEG 250” taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kesici takımlarda meydana gelen aşınma mekanizmaları incelenmiştir.

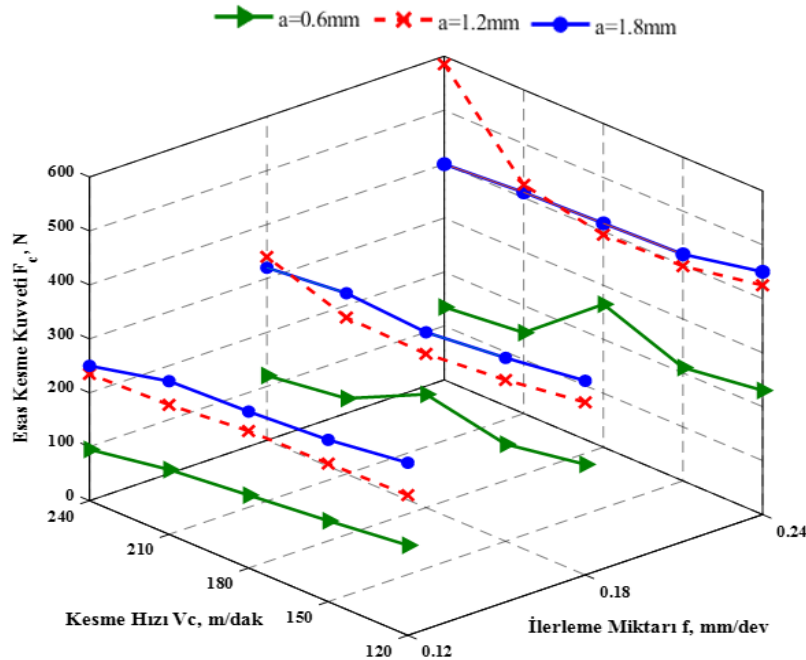


Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

### III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### A. Esas Kesme Kuvvetinin Değerlendirilmesi

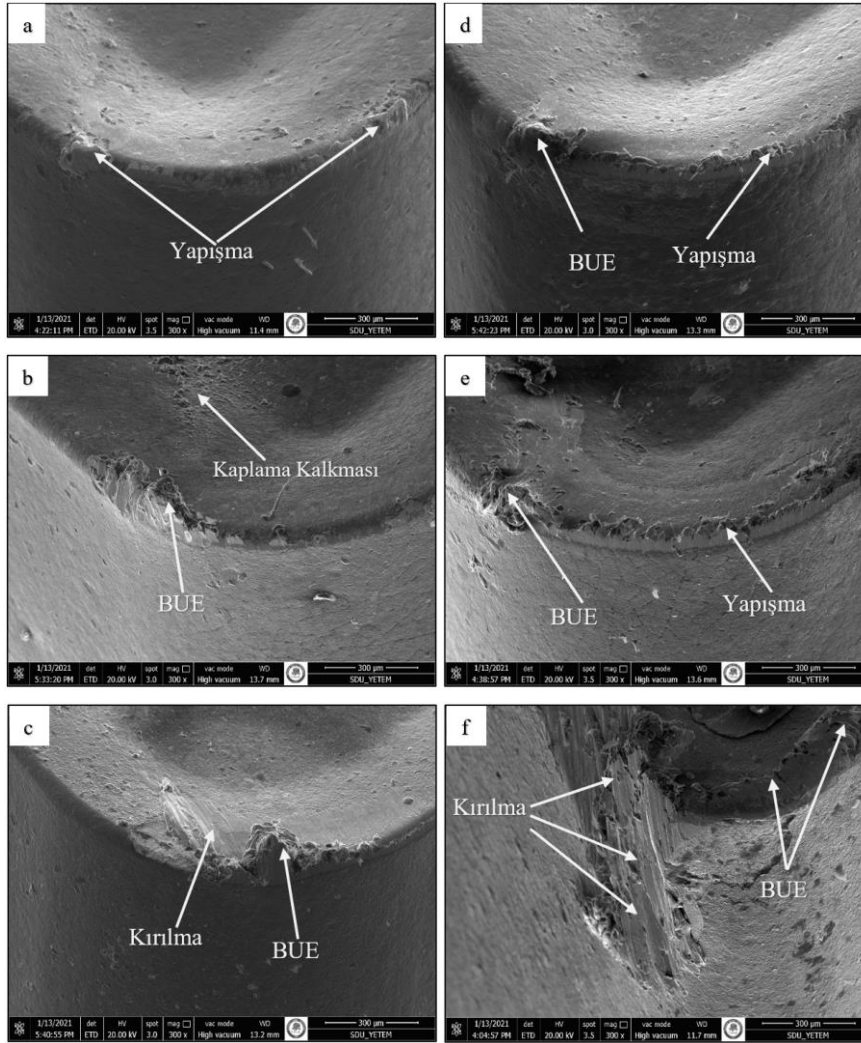
Kesme kuvvetlerinin analizinde, talaşlı imalat işlemlerinde enerji tüketimi açısından birincil düzeyde önemli olan esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) değerleri öncelikle dikkate alınmıştır. Şekil 2 esas kesme kuvvetinin kesme parametrelerinin seviyelerine göre değişimini göstermektedir.



Şekil 2. Esas kesme kuvvetinin kesme parametrelerine bağlı olarak değişimi.

Grafik incelendiğinde, ilerleme miktarı ve talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak esas kesme kuvvetinin arttığı ancak kesme hızındaki artışa bağlı olarak bir miktar azaldığı görülmektedir. İlerleme miktarının ( $f$ ) 0,12 mm/dev'den 0,18 mm/dev'e artırılması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) yaklaşık olarak %23 artar

iken ilerleme miktarının 0,18 mm/dev'den 0,24 mm/dev'e artırılması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvveti yaklaşık olarak %32 artmıştır. Esas kesme kuvvetindeki artış trendi talaş derinliğinde de görülmektedir. Talaş derinliğinin 0,6 mm'den 1,2 mm'ye artırılması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvveti yaklaşık olarak %88 artar iken talaş derinliğinin 1,2 mm'den 1,8 mm'ye artırılması ile yapılan deneylerde esas kesme kuvveti yaklaşık olarak %14 artmıştır. Diğer yandan, kesme hızındaki artışa bağlı olarak  $F_c$ 'nin 180 m/dak  $V_c$ 'e kadar azaldığı ve bu seviye geçildiğinde düzensizleştiği görülmektedir. Literatürde, metal kesme işlemlerinde kesme hızındaki artışa bağlı olarak genellikle kesme kuvvetinin azaldığı bildirilmiştir [27-30]. Bu durum, kesme hızındaki artış ile deformasyon bölgesinde oluşan sıcaklığın artmasıyla, takım-talaş temas yüzeyinde yapışan malzemenin kayma dayanımının azalması ile açıklanabilir [31]. Ancak, gözlenen bu eğilimin aksine Invar 36 alaşımının tornalanmasında kesme hızının artması ile belirli bir seviye kadar esas kesme kuvvetinin azaldığı ancak yüksek kesme hızlarında arttığı belirlenmiştir. Bu duruma Invar 36 alaşımının düşük termal iletim katsayısının neden olduğu düşünülmektedir, çünkü yüksek kesme hızlarında yapılan tornalama deneylerinde Invar 36 alaşımının düşük termal iletim katsayısından dolayı, kesme bölgesinde oluşan yüksek ısının kesici takıma daha fazla geçiyle birlikte kesici takım hızlı aşınmaya maruz kalmıştır. Dahası, Şekil 3'te kesici takımlarda meydana gelen aşınma görüntüleri verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, yüksek kesme hızlarında takım aşınmasının arttığı ve ayrıca, kesici takım uçunda küçük kırılmaların (chipping) meydana geldiği görülmektedir.

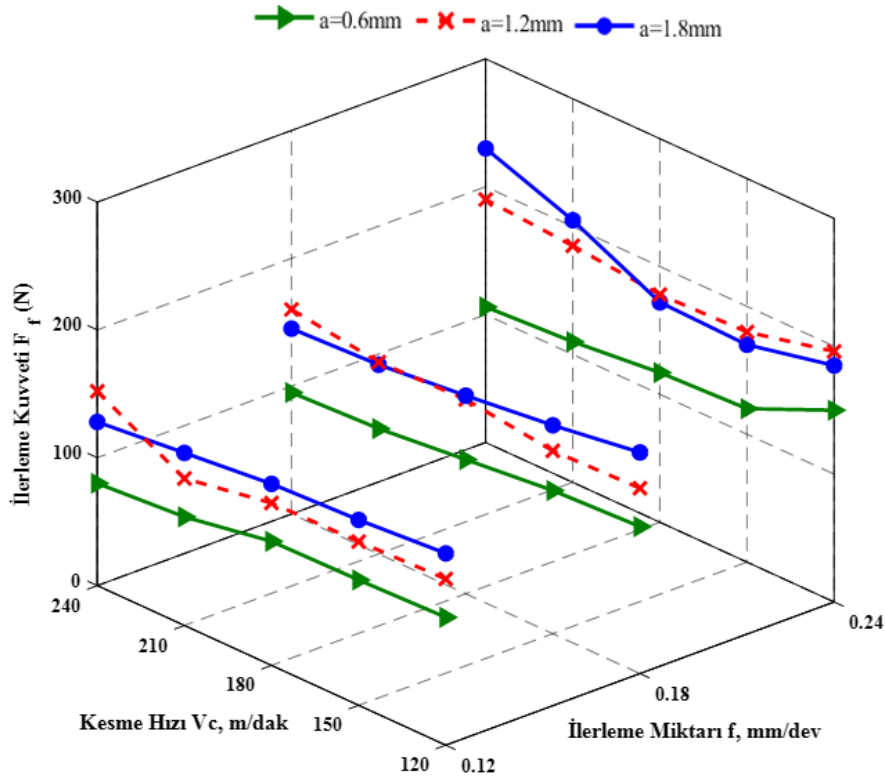


**Şekil 3.** Kesici takımlara ait SEM görüntüleri: a) 210 m/dak, 0,12 mm/dev b) 210 m/dak, 0,18 mm/dev c) 210 m/dak, 0,24 mm/dev. d) 240 m/dak, 0,12 mm/dev e) 240 m/dak, 0,18 mm/dev f) 240 m/dak, 0,24 mm/dev.

### B. İlerleme Kuvvetinin Değerlendirilmesi

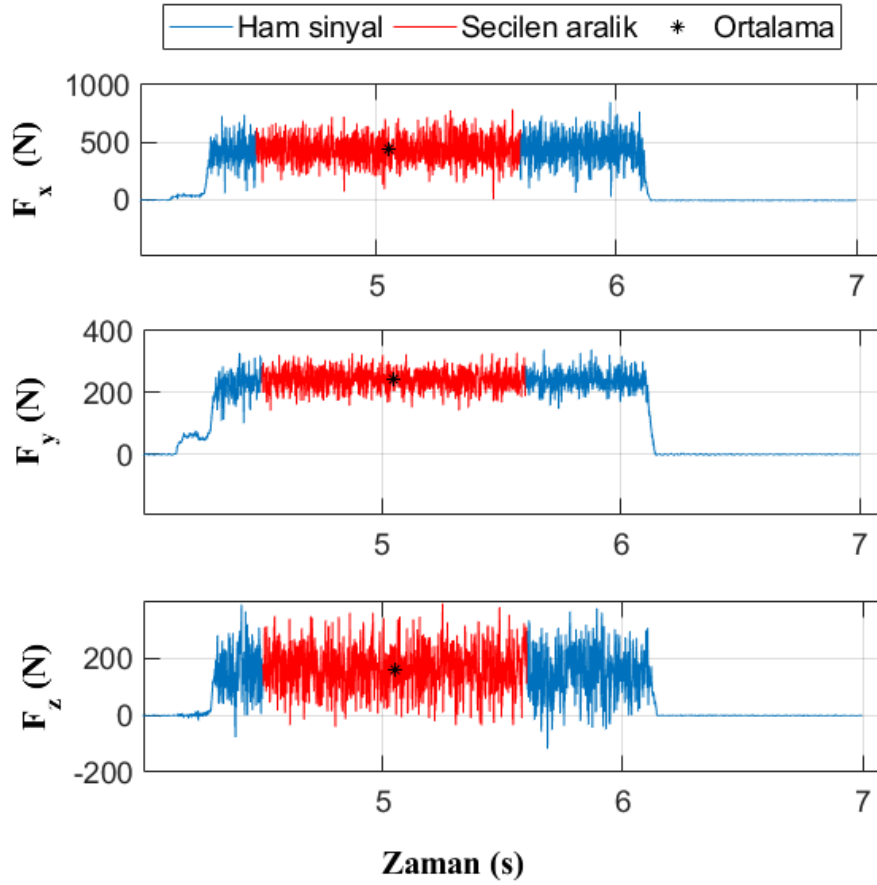
İlerleme yönüne paralel olan ilerleme kuvveti ( $F_f$ ), teorik hesaplamalarda esas kesme kuvvetinin ( $F_c$ ) bağlı olarak yaklaşık olarak Eş. 1’de yer alan bağıntı ile hesaplanır. Ancak, ampirik çalışmalar ile oluşturulan bu bağıntının yanı sıra ilerleme kuvveti deneysel olarak bir dinamometre aracılığıyla da belirlenebilmektedir [32]. İlerleme kuvveti, esas kesme kuvvetinden sonra kesme kuvvetleri arasında ikinci derecede öneme sahiptir. Şekil 4’te kesme parametrelerinin seviyelerine bağlı olarak ilerleme kuvvetindeki değişimler görülmektedir.

$$F_f \approx (0,2 - 0,3)F_c \quad (1)$$



Şekil 4. İlerleme kuvvetinin kesme parametrelerinin bağlı olarak değişimi.

Şekil 4 incelendiğinde, her bir talaş derinliğinde kesme hızındaki artışa bağlı olarak, ilerleme kuvvetinin bir miktar azaldığı ancak ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak ilerleme kuvvetinin arttığı görülmektedir.  $f$ 'in 0,12 mm/dev'den 0,18 mm/dev'e arttırılması ile yapılan deneylerde ilerleme kuvveti ( $F_f$ ) yaklaşık olarak %11 artar iken  $f$ 'in 0,18 mm/dev'den 0,24 mm/dev'e arttırılması ile yapılan deneylerde ilerleme kuvveti yaklaşık olarak %35 artmıştır. Talaş derinliğinin 0,6 mm'den 1,2 mm'ye arttırılması ile yapılan deneylerde ilerleme kuvveti yaklaşık olarak %30 artar iken talaş derinliğinin 1,2 mm'den 1,8 mm'ye arttırılması ile yapılan deneylerde ilerleme kuvveti yaklaşık olarak %12 artmıştır. Diğer yandan, kesme hızındaki artışa bağlı olarak ilerleme kuvvetinin azaldığı ama bu azalmanın çok küçük miktarda olduğu görülmektedir. Ancak, yüksek kesme hızlarında ilerleme kuvvetinin ani bir artış eğilimine girdiği görülmekte ve bu duruma yüksek kesme hızlarında takım tezgahında meydana gelen titreşimin neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 5'te kuvvetin grafiği yer almaktadır. Şekil 5 incelendiğinde, kuvvet genliğindeki yüksek sapsmalar titreşimin oluştuğunun bir göstergesidir.



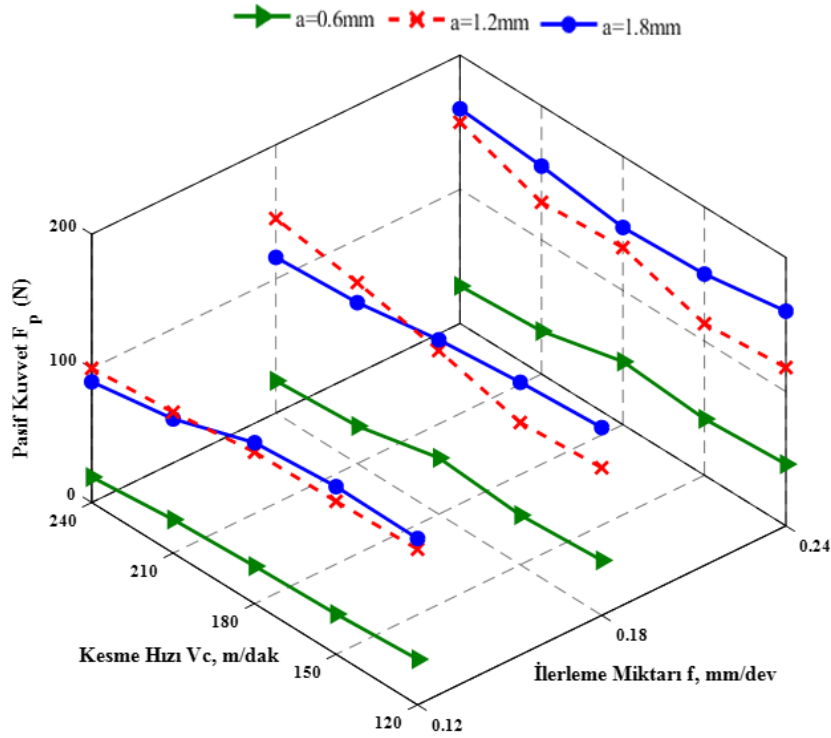
Şekil 5. Kesme kuvvet grafiği:240 m/dak (Vc), 0,24 mm/dev (f) ve 1,2 mm (a).

En düşük ilerleme kuvveti, 240 m/dak (Vc), 0,12 mm/dev (f) ve 0,6 mm (a) de yapılan deneylerde 80 N olarak ölçülür iken en yüksek ilerleme kuvveti ise 240 m/dak (Vc), 0,24 mm/dev (f) ve 1,8 mm (a) değerlerinde yapılan deneylerde 230 N olarak ölçülmüştür.

### C. Pasif Kuvvetin Değerlendirilmesi

Genellikle, silindirik tornalama işleminde kesme kuvveti bileşenleri içerisinde pasif kuvvet en düşük olan kuvvettir [33]. Pasif kuvvet teorik olarak Eş. 2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, bu bileşen bir dinamometre aracılığıyla da belirlenebilmekte ve deneysel çalışmalarda genellikle bu yol tercih edilir. Şekil 6'da kesme parametrelerinin seviyelerine bağlı olarak pasif kuvvetteki değişimler görülmektedir.

$$F_p \approx (0,1 - 0,2)F_c \quad (2)$$



Şekil 6. Pasif kuvvetin kesme parametrelerinin bağlı olarak değişimi.

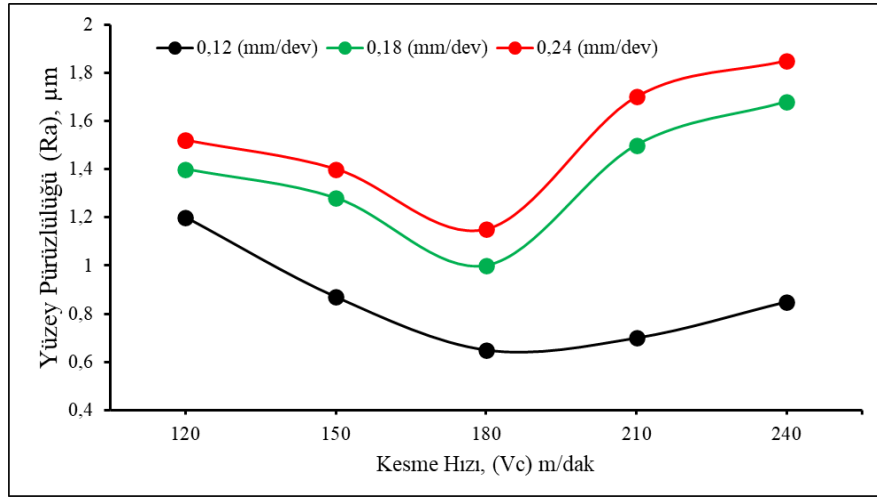
Her bir talaş derinliğinde kesme hızının ve ilerleme miktarının farklı seviyelerinde yapılan tormalama deneylerinde ölçülen pasif kuvvetler, esas kesme kuvvetlerinde ve ilerleme kuvvetlerinden daha düşüktür. Bunun ana nedeni pasif kuvvetin takım geometrisinden etkilenmesidir. Bu durum dikkate alınarak kesici takım uç yarıçapı 0,4 mm belirlenmiştir ve en düşük talaş derinliği (0,6 mm) uç yarıçapının altında seçilmediği için pasif kuvvet diğer kesme kuvveti bileşenlerine göre daha küçük ölçülmüştür. Şekil 6 incelendiğinde, ilerleme miktarı ve talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak pasif kuvvetin arttığı belirlenmiştir.  $f$ 'in 0,12 mm/dev'den 0,18 mm/dev'e artırılması ile yapılan deneylerde pasif kuvvet ( $F_p$ ) yaklaşık olarak %4 artar iken  $f$ 'in 0,18 mm/dev'den 0,24 mm/dev'e artırılması ile yapılan deneylerde pasif kuvvet yaklaşık olarak %7 artmıştır. Talaş derinliğinin 0,6 mm'den 1,2 mm'ye artırılması ile yapılan deneylerde pasif kuvvet yaklaşık olarak %300 artar iken talaş derinliğinin 1,2 mm'den 1,8 mm'ye artırılması ile yapılan deneylerde pasif kuvvet yaklaşık olarak %6 artmıştır. Diğer yandan, en düşük pasif kuvvet değeri, 240 m/dak ( $V_c$ ), 0,12 mm/dev ( $f$ ) ve 0,6 mm ( $a$ ) de yapılan deneylerde 20 N olarak ölçülür iken en yüksek  $F_p$  değeri ise 240 m/dak ( $V_c$ ), 0,24 mm/dev ( $f$ ) ve 1,8 mm ( $a$ ) de yapılan deneylerde 160 N olarak ölçülmüştür.

#### D. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

İmalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü bir iş parçasının yüzey kalitesini tanımlamada önemli göstergelerden birisidir. Özellikle, bir bileşenin sürtünmesine sebep olan temas, ısı iletimi, kaplama, yağ tutumu yanı sıra yorulma dayanımı, korozyon direnci gibi çeşitli tribolojik özelliklerini etkilemektedir [34]. Şekil 7'de kesme parametrelerinin seviyelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişimler görülmektedir.

Şekil 7 incelendiğinde bütün kesme hızı seviyelerinde  $f$ 'in artması ile  $R_a$  değerlerinin artış eğiliminde görülmektedir. 120 m/dak ( $V_c$ ), 1 mm ( $a$ ) ve 0,12 mm/dev ( $f$ ) değerlerinde yapılan tormalama deneyinde  $R_a$  1,25  $\mu$ m ölçülmüştür.  $f$ 'in düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılması ile yapılan tormalama deneylerinde yüzey pürüzlülüğü değerinde sırasıyla yaklaşık olarak %41 ve %145 oranlarında bir artış olmuştur. Bu durum, ilerleme miktarındaki artış ile takımda meydana gelen gerilmelerin artması ile açıklanabilir [35]. Varyans analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarının %89,53 katkı oranı ile baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Tablo 4).

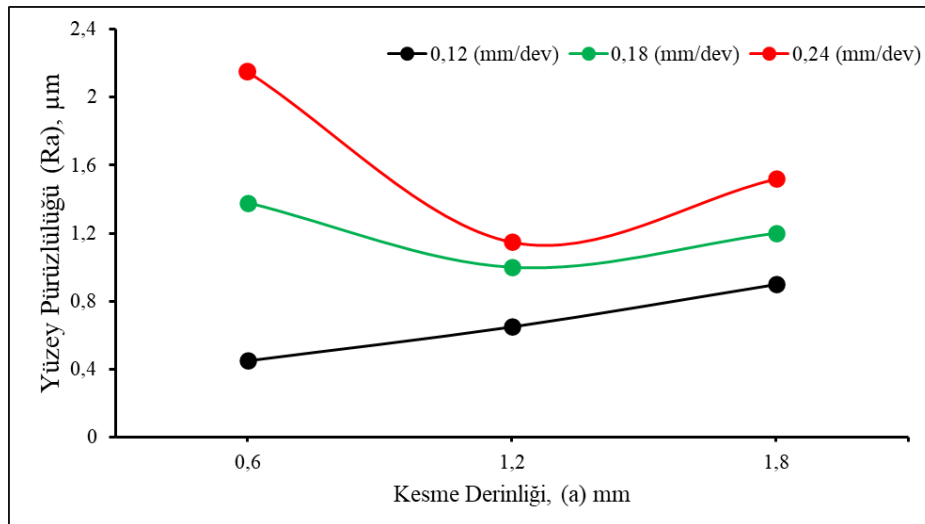




Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğünün (Ra) kesme hızına ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişimi.

Şekil 7'ye göre 0,12 mm/dev (f), Vc 120 m/dak'dan 180 m/dak'ya artırılması ile yapılan deneylerde Ra'nın yaklaşık olarak %46 (0,65 µm) azaldığı belirlenmiştir. Ancak, kesme hızının 180 m/dak Vc'den, 210 m/dak ve 240 m/dak artırılmasıyla yapılan deneylerde Ra'nın arttığı elde edilmiştir. Bu duruma, yüksek kesme hızlarında yapılan tornalama deneylerinde kesme bölgesinde oluşan yüksek ısının ve Invar 36 alaşımının düşük termal iletim katsayısından dolayı kesme bölgesinde oluşan ısının kesici takıma daha fazla geçiyle birlikte takımın kesme performansını erken yitirmesinin neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 3). Literatürde, birçok çalışmada tornalama deneylerinde Vc'nin belirli bir seviyeye kadar artırılması ile Ra değerinin azalması bildirilmiştir [36-38]. Ancak, kesme hızının daha fazla artırılması ile takımın aşınma sürecine daha erken girmesi ve takımın ömrünü yitirmesi yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemektedir.

Şekil 8'de 180 m/dak kesme hızında, 0,6 mm, 1,2 mm ve 1,8 mm kesme derinliklerinde ve üç farklı ilerleme miktarında yapılan deneyler sonrası ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişimi görülmektedir. Her bir talaş derinliğinde ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır. Her bir ilerleme miktarında ise talaş derinliğinin 0,6mm'den 1,2 mm'ye artırılması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri bir miktar azalır iken 1,2 mm'den 1,8 mm artırılması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri artış eğilimine girdiği görülmektedir. Literatüre göre düşük talaş derinliğinde, talaş kesitinin azalmasıyla talaşın deforme edilmesi için gerekli olan enerjinin azalması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalması beklenmektedir. Ancak, düşük talaş derinliğinde, yüksek ilerleme miktarında ve yüksek kesme hızlarından kaynaklı yüksek iş mili devir sayılarında takım tezgahında meydana gelen titreşimin neden olduğu düşünülmektedir [39].



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğünün (Ra) talaş derinliğine ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişimi.

Sonuç olarak, en düşük Ra değeri 180 m/dak (Vc), 0,6 mm (a) ve 0,12 mm/dev (f) değerlerinde yapılan tornalama deneyinde 0,452 µm olarak ölçülmüştür.

#### E. Varyans Analizi Sonuçları

Kesme parametrelerinin Fc, Fr, Fp ve Ra üzerindeki etkilerini belirlemek için %95 güven seviyesinde varyans (Anova) analizi yapılmıştır. Varyans analizinde önem seviyesi (P) ve katkı oranı (F) değerleri dikkate alınmıştır. Çıktı parametreleri üzerinde girdi parametrelerinin etkili olabilmesi için önem seviyesi değerinin 0,05'ten küçük olması beklenmekte ve ayrıca F değeri en fazla olan faktör en etkili faktördür [30]. Tablo 4'te varyans analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 4'e göre, ilerleme miktarının %79,78, %86,53 ve %89,53 katkı oranları ile sırasıyla Fc, Ff ve Ra üzerinde en etkili parametre olduğunu talaş derinliğinin ise %84,55 katkı oranı ile Fp üzerinde en etkili kesme parametresi olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<b>Fc</b>						
Vc (m/dak)	2	4039	2019	1,70	0,370	5,25
f (mm/dev)	2	<b>61406</b>	<b>30703</b>	<b>25,89</b>	<b>0,037</b>	<b>79,78</b>
a (mm)	2	9156	4578	3,86	0,206	11,89
Hata	2	2372	1186			3,08
Total	8	76972				100
<b>Ff</b>						
Vc (m/dak)	2	353,56	176,78	16,40	0,05	7,29
f (mm/dev)	2	<b>4197,56</b>	<b>2098,78</b>	<b>194,73</b>	<b>0,005</b>	<b>86,53</b>
a (mm)	2	278,56	139,11	12,91	0,072	5,74
Hata	2	21,56	10,78			0,44
Total	8	4850,89				100
<b>Fp</b>						
Vc (m/dak)	2	1058,7	529,3	4,26	0,19	10,16
f (mm/dev)	2	302	151	1,21	0,452	2,90
a (mm)	2	<b>8808,7</b>	<b>4404,3</b>	<b>35,42</b>	<b>0,027</b>	<b>84,55</b>
Hata	2	248,7	124,3			2,39
Total	8	10418				100
<b>Ra</b>						
Vc (m/dak)	2	0,16016	0,080078	21,39	0,045	9,23
f (mm/dev)	2	<b>1,55402</b>	<b>0,777011</b>	<b>207,51</b>	<b>0,005</b>	<b>89,53</b>
a (mm)	2	0,01446	0,007078	1,89	0,346	0,82
Hata	2	0,00749	0,003744			0,43
Total	8	1,73582				100

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, seramik kesici takımlar ile Invar 36 alaşımının işlenmesinde kesme kuvveti bileşenleri (Fc, Ff ve Fp) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) bakımından Invar 36 alaşımının işlenebilirliği deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular analiz edilerek, özetlenen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- İlerleme miktarı (f) ve talaş derinliğindeki (a) artışa bağlı olarak hem kesme kuvveti bileşenleri hem de yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır.
- Varyans analizi sonuçlarına göre, ilerleme miktarı esas kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Fr) ve Ra üzerinde sırasıyla, %79,78, %86,53 ve %89,53 katkı oranları en etkili parametre iken talaş derinliği ise pasif kuvvet (Fp) üzerinde %84,55 katkı oranı ile en etkili kesme parametresidir.
- Kesme kuvveti bileşenleri olan esas kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Fr) ve pasif kuvvetin (Fp) için en düşük değerler 240 m/dak (Vc), 0,12 mm/dev (f) ve 0,6 mm (a) değerlerinde yapılan deneylerde sırasıyla, 95N, 80 N ve 20 N olarak ölçülmüştür.
- Esas kesme kuvveti (Fc) için maksimum değer 240 m/dak (Vc), 0,24 mm/dev (f) ve 1,2 mm (a) değerlerinde yapılan deneyde 595 N olarak ölçülmüştür.

- İlerleme miktarındaki artışla birlikte Ra değerlerinde belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Kesme hızı ve talaş derinliğinin Ra üzerinde etkisi ilerleme miktarının etkisinden daha azdır ve ayrıca kesme hızının artması ile Ra değerlerinin azalış trendinde girdiği görülmüştür.
- En düşük Ra değeri 180 m/dak (Vc), 0,12 mm/dev (f) ve 0,6 mm (a) değerlerinde yapılan deneyler sonucunda 0,452 µm olarak elde edilmiştir.
- SEM incelemesinde, kesici takımlarda kırılma, yığıntı talaş (BUE) ve küçük kırılmaların (chipping) meydana geldiği görülmüştür.
- Yüksek kesme hızlarında kesici takımlarda meydana gelen aşınmaların yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin artmasında etkili olduğu görülmüştür.
- Invar 36 alaşımı gibi düşük termal iletim katsayısına sahip malzemelerin yüksek kesme hızlarında işlenmesinde kesici takım kesme bölgesinde oluşan ısıdan daha fazla etkilenmektedir. Bu yüzden, bu tür malzemelerin işlenmesinde yüksek yüzey kalitesi elde etmek için kesme parametrelerinin orta seviyelerinin seçilmesi önerilmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Guillaume, C. (1920). Invar and Elinvar. Nobel Lectures Physics. 1901-1921, 444-473.
- [2] Davis, J. R. (2001). Alloying: Understanding the Basics. ASM International, Materials Park, Ohio, 587-594.
- [3] Rosenberg, S.J. (1968). Nickel and its alloys, National Bureau of Standards Monograph. Washington, D.C., A.B.D 106, 1-9.
- [4] Nickel-Iron Alloys. (2021). <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/nilo-nilomag/nilo-and-nilomag-alloys.pdf>.
- [5] Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Yang, X., Xie, H., Qu, Z., & Fang, D. (2020). Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138799.
- [6] Nagayama, T., Yamamoto, T., & Nakamura, T. (2017). Electrodeposition of invar Fe-Ni alloy/SiC particle composite. *ECS Transactions*, 75(37), 69.
- [7] Nagayama, T., Yamamoto, T., & Nakamura, T. (2016). Thermal expansions and mechanical properties of electrodeposited Fe-Ni alloys in the Invar composition range. *Electrochimica Acta*, 205, 178-187.
- [8] Nan, J.M., Li, G.X., Xu, K.W., Wang, H.W., Song, L.J., & Dou, X.Y. (2001). Elevated Temperature Deformation Behaviour and Mechanical Characteristics of Invar Alloy Used for Shadow Mask. *J. Mater. Eng.* 1(1), 19-21.
- [9] Li, X.F., Chen, N.N., Li, J.J., He, X.T., Liu, H.B., Zheng, X.W., & Chen, J. (2017). Effect of Temperature and Strain Rate on Deformation Behavior of Invar 36 Alloy. *Acta Metall. Sin.*, 53(8), 968-974.
- [10] Ratnayake, D., & Walsh, K.M. (2016). Invar Thin Films for MEMS Bistable Devices. In Southeastcon 2016, 30 March-3 April, Norfolk, VA, USA, 1-4.
- [11] Corbacho, J. L., Suárez, J. C., & Molleda, F. (1998). Welding of invar Fe-36Ni alloy for tooling of composite materials. *Welding international*, 12(12), 966-971.
- [12] Hidalgo, J., Jiménez-Morales, A., Barriere, T., Gelin, J. C., & Torralba, J. M. (2014). Mechanical and functional properties of Invar alloy for µ-MIM. *Powder Metallurgy*, 57(2), 127-136.
- [13] Asgari, H., Salarian, M., Ma, H., Olubamiji, A., & Vlasea, M. (2018). On thermal expansion behavior of invar alloy fabricated by modulated laser powder bed fusion. *Materials & Design*, 160, 895-905.
- [14] Khanna, N., Gandhi, A., Nakum, B., & Srivastava, A. (2018). Optimization and analysis of surface roughness for INVAR-36 in end milling operations. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5281-5288.
- [15] Basmacı, G., Kırbaş, İ., & Mustafa, A. Y. (2021). Modelling of cutting parameters for Nilo 36 superalloy with machine learning methods and developing an interactive interface. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(1), 79-86.

- [16] Porwal, R. K., Yadava, V., & Ramkumar, J. (2013). Multi-Objective optimization of hole drilling electrical discharge micromachining process using grey relational analysis coupled with principal component analysis. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 94(4), 317-325.
- [17] Zheng, X. W., Ying, G. F., Chen, Y., & Fu, Y. C. (2015). The Effects of Cutting Parameters on Work-Hardening of Milling Invar 36. In *Advanced Materials Research*, 1089, 373-376.
- [18] Ramakrishnan, A., & Dinda, G.P. (2019). Direct Laser Metal Deposition of Inconel 738. *Materials Science and Engineering: A*, 740, 1-13.
- [19] Zhou, Q., Hayat, M. D., Chen, G., Cai, S., Qu, X., Tang, H., & Cao, P. (2019). Selective electron beam melting of NiTi: Microstructure, phase transformation and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 744, 290-298.
- [20] Wei, K., Zeng, X., Wang, Z., Deng, J., Liu, M., Huang, G., & Yuan, X. (2019). Selective laser melting of Mg-Zn binary alloys: effects of Zn content on densification behavior, microstructure, and mechanical property. *Materials Science and Engineering: A*, 756, 226-236.
- [21] Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018). A study of thermal expansion coefficients and microstructure during selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Additive Manufacturing*, 24, 405-418.
- [22] Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Yang, X., Xie, H., Qu, Z., & Fang, D. (2020). Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138799.
- [23] Kim, S.H., Choi, S.G., Choi, W.K., & Lee, E.S. (2017). Surface Characteristics of Invar Alloy According to Micro-Pulse Electrochemical Machining. *Materiali in Technologije*, 51, 745-749.
- [24] Khanna, N., Mistry, S., Rashid, R. R., & Gupta, M. K. (2019). Investigations on density and surface roughness characteristics during selective laser sintering of Invar-36 alloy. *Materials Research Express*, 6(8), 086541.
- [25] Qiu, C., Liu, Y., & Liu, H. (2021). Influence of addition of TiAl particles on microstructural and mechanical property development in Invar 36 processed by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 48, 102457.
- [26] Nickel-Iron Alloys. (2021). <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/nilo-alloys.pdf>.
- [27] Özlü, B., Demir, H., Türkmen, M., & Gündüz, S. (2021). Examining the machinability of 38MnVS6 microalloyed steel, cooled in different mediums after hot forging with the coated carbide and ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 0954406220984498.
- [28] Demir, H., Gündüz, S., & Erden, M.A. (2018). Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of AISI H13 Hot Work Tool Steel. *Int J Adv Manuf Technol*, 95, 2951-2958.
- [29] Çiftçi, İ. (2005). 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.
- [30] Trent, E.M. (1989). *Metal Cutting*. Butterworths Press, London.
- [31] Akgün, M., & Demir, H. (2021). Estimation of Surface Roughness and Flank Wear in Milling of Inconel 625 Superalloy. *Surface Review and Letters*, 28(04), 2150011.
- [32] Günay, M., & Şeker, U. (2005). Investigation of the Effect of Cutting Tool Rake Angle on Feed Force. *Journal of Polytechnic*, 8 (4), 323-328.
- [33] Korkmaz, M.E., & Günay, M. (2018). Experimental and Statistical Analysis on Machinability Of Nimonic 80A Superalloy with Pvd Coated Carbide. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1139-1150.
- [34] Arık, İ. (2010). The Effect Of Milling Cutter Having Differential Pitched Cutting Edges On Chatter Vibrations, Selcuk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis.

- [35] Çiftçi, İ. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39 (6), 565–569.
- [36] Akkuş, H., & Yaka, H. (2021). Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy. *Measurement*, 167, 108465.
- [37] Akgün, M., & Demir, H. (2021). Optimization of Cutting Parameters Affecting Surface Roughness in Turning of Inconel 625 Superalloy by Cryogenically Treated Tungsten Carbide Inserts. *SN Applied Sciences*, 3, 277.
- [38] Gürbüz, H., Şeker, U., & Kafkas, F. (202). Effects of Cutting Tool Forms on the Surface Integrity in Turning of AISI 316L Stainless Steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 225-240.
- [39] Akgün, M., Demir, H., & Çiftçi, İ. (2018). Mg<sub>2</sub>Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 645-650.