



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



AISI 4340 çeliğinin ısı destekli tornalanmasının boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin deneysel ve istatistiksel incelenmesi

Experimental and statistical investigation of the effects of heat-assisted turning of aisi 4340 steel on dimensional stability and surface roughness

Yazar(lar) (Author(s)): Atakan UĞRAŞ¹, Fırat KAFKAS²

ORCID¹: 0000-0002-8934-6125

ORCID²: 0000-0003-3257-7413

To cite to this article: Uğraş A., Kafkas F., “AISI 4340 Çeliğinin Isı Destekli Tornalanmasının Boyutsal Kararlılık ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel ve İstatistiksel İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(6): 2151-2159, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Uğraş A., Kafkas F., “AISI 4340 Çeliğinin Isı Destekli Tornalanmasının Boyutsal Kararlılık ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel ve İstatistiksel İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(6): 2151-2159, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1409419

AISI 4340 Çeliğinin Isı Destekli Tornalanmasının Boyutsal Kararlılık ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel ve İstatistiksel İncelenmesi

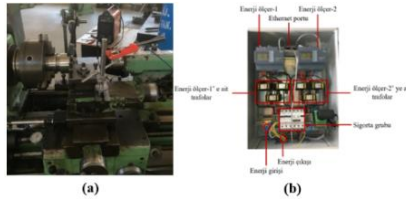
Experimental and Statistical Investigation of The Effects of Heat-Assisted Turning of AISI 4340 Steel on Dimensional Stability and Surface Roughness

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ IDİ yönteminin boyutsal kararlılığa etkisi / Effect of HAM on dimensional stability
- ❖ IDİ yönteminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi / Effect of HAM method on surface roughness
- ❖ Ön ısıtma için TIG tekniğinin kullanılması / Using TIG technique for preheating
- ❖ ANOVA ile en etkili parametrenin belirlenmesi / Determining the most effective parameter by ANOVA

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada TIG esaslı IDİ yönteminin boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. / In this study, the effects of TIG-based HAM method on dimensional stability and surface roughness were examined.



Şekil. Deneysel düzeneği (a) ve enerji ölçer sistemi (b) / Figure. Experimental setup (a) and, energy meter system (b)

Amaç (Aim)

IDİ yönteminin boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. / It is aimed to investigate the effects of the HAM method on dimensional stability and surface roughness.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kesme için harcanan güç (P_c), iş malzemesi sıcaklığı (T_{mr}), çap ölçüsündeki sapma (ÇÖS) ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Sonuçların analizinde ANOVA tablolarından ve etki grafiklerinden yararlanılmıştır. / Power consumed for cutting (P_c), work material temperature (T_{mr}), dimensional deviation value (DDV) and surface roughness values were measured. ANOVA tables and effect graphs were used to analyze the results.

Özgünlük (Originality)

IDİ yöntemin boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri belirlenmiştir. Bu çalışmada ön ısıtma için enerji kaynağı olarak TIG tekniği kullanılmıştır. / The effects of the HAM method on dimensional stability and surface roughness were determined. In this study, TIG technique was used as the energy source for preheating.

Bulgular (Findings)

ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğüne sırasıyla ilerleme oranı (f), IDİ yöntemi ve kesme hızı (V) etki etmektedir. Bir gün sonra yapılan ölçümlerde numune çaplarının genleşme nedeniyle 7-27 μm arasında küçüldüğü belirlenmiştir. / Feed rate (f), HAM method and cutting speed (V) effect DDV and surface roughness, respectively. In the measurements made one day later, it was determined that the sample diameters decreased by 7-27 μm due to expansion.

Sonuç (Conclusion)

IDİ yöntemi boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesini sağlar. Genleşme nedeniyle hassas boyutsal toleranslara sahip parçaların işlenmesi zordur. / The HAM method provides improvement of dimensional stability and surface roughness. Parts with precise dimensional tolerances are difficult to machine due to expansion.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

AISI 4340 Çeliğinin Isı Destekli Tornalanmasının Boyutsal Kararlılık Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel ve İstatistiksel İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Atakan UĞRAŞ^{1*}, Fırat KAFKAS²

¹Porsuk Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 25.12.2023 ; Kabul/Accepted : 09.02.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 11.03.2024)

ÖZ

Bu çalışmada iş malzemesinin boyutsal kararlılığını ve yüzey kalitesini iyileştirmek için ısı destekli işleme (IDİ) yöntemi kullanılmıştır. Çevrimiçi ölçümlerde kesme için harcanan güç (P_c , kW) ve iş malzemesi sıcaklığı (T_{mr} , °C) belirlenmiştir. Çevrimdışı ölçümlerde çap ölçüsündeki sapma (ÇÖS, μm) değeri ve yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) kontrol edilmiştir. IDİ yöntemi kesme için harcanan güç (P_c) değerinde maksimum %14,43 azalma sağlamıştır. Aynı kesme şartlarında ÇÖS değeri konvansiyonel işlemede 80 μm olarak gerçekleşirken, IDİ yönteminde 50 μm ' a düşmektedir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) konvansiyonel işlemede 2,66 μm olarak gerçekleşirken, IDİ yönteminde 2,42 μm ' a düşmektedir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden işlem parametresi ilerleme oranıdır (f). Ancak IDİ yönteminin her ikisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. TIG esaslı IDİ yönteminde ön ısıtma, kesme ile eş zamanlı yapılamadığı için üretilen ısı iş malzemesi hacminde genleşmeye neden olmaktadır. Bu olumsuz durum hassas boyutsal toleransların elde edilmesini zorlaştırır.

Anahtar Kelimeler: Isı destekli işleme, boyutsal sapma, yüzey pürüzlülüğü, TIG, AISI 4340.

Experimental and Statistical Investigation of The Effects of Heat-Assisted Turning of AISI 4340 Steel on Dimensional Stability and Surface Roughness

ABSTRACT

In this paper, heat-assisted machining (HAM) method was used to improve the dimensional stability and surface quality of the work material. In online measurements, power consumed for cutting (P_c , kW) and work material temperature (T_{mr} , °C) were determined. In offline measurements, dimensional deviation value (DDV, μm) and surface roughness (R_a , μm) were checked. The HAM method provided a maximum reduction of 14.43% in the P_c value. While the DDV value is 80 μm in conventional machining in the same cutting conditions, it decreases to 50 μm in the HAM method. While the surface roughness (R_a , μm) value is 2,66 μm in conventional machining, it decreases to 2,42 μm in the HAM method. According to the statistical analysis results, the process parameter that has the most impact on DDV and surface roughness is the feed rate (f). It is followed by the processing method. The HAM method was found to have a significant effect on both. Since preheating cannot be done simultaneously with cutting, the heat produced causes expansion in the volume of the work material in the TIG-based HAM method. This disadvantage makes it difficult to achieve precise dimensional tolerances.

Keywords: Heat-assisted machining, dimensional deviation, surface roughness, TIG, AISI 4340.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Boyutsal toleranslar ve yüzey kalitesi bitmiş ürünün en önemli kalite bileşenleridir. Bu bileşenleri geliştirmek için konvansiyonel yöntemlerin sunduğu çözümler sınırlıdır. Kesme parametrelerini düşük seviyelerde tutmak ya da taşlama gibi ilave operasyonlar [1] yapmak gerekebilir. Konvansiyonel yöntemlerde iş miline bağlı hatalar [2,3], kesici takım ve iş parçasındaki sehimler [4], kesme parametreleri [5] ve iş parçasının şekli [6,7] boyutsal kararlılığa etki eder. Ayrıca ölçü hassasiyeti yüksek parçalar için maliyetleri yüksek olsa da modern üretim yöntemlerinden [8,9] yararlanılır. Yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden kesme parametresi

ilerleme oranıdır (f) [10]. Bunun yanında uygulanan soğutma yöntemi ve kesici takım kaplaması yüzey pürüzlülüğüne önemli derecede etki eder [11]. Soğutma yöntemleri gibi Isı Destekli İşleme (IDİ) yöntemi de yüzey kalitesini geliştirmek için kullanılabilir [12–14]. IDİ uzun yıllardır uygulanan bir yöntemdir [15]. Ön ısıtma sayesinde takım tezgâhının güç tüketimi düşer [16], kesme kuvvetleri [17] ve takım aşınması azalır [18]. Ön ısıtmanın sağladığı olumlu etki talaş kaldırma oranının (TKO) artmasını sağlar [19]. IDİ yönteminde sertleştirilmiş parçalar karbür kesici takımlar ile işlenebilir [12] ve taşlama gibi ilave operasyonlara gerek kalmayabilir [1]. IDİ yönteminde lazer [19,20],

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : atakanugras@eskisehir.edu.tr

plazma[13], indüksiyon akımı [21] ve oksı-gaz alevi [22] enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmaların pek çoğunda başlıca enerji kaynağının lazer olduğu görülmektedir. Fakat lazer ilk yatırım maliyeti yüksek bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada lazere ve diğer enerji kaynaklarına alternatif olarak Tungsten Inert Gase (TIG) tekniği kullanılmıştır [23]. Diğerlerine kıyasla TIG kaynak makinesi daha ekonomiktir ve ona ulaşmak daha kolaydır. Ayrıca onu takım tezgahına entegre etmek daha basittir [24–26]. Literatürde IDİ yönteminin yüzey kalitesini iyileştirdiğini gösteren pek çok çalışmaya rastlanırken, boyutsal kararlılık üzerine etkilerinin araştırılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada IDİ yönteminin boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar ana etki grafikleri ve varyans analizi (ANOVA) ile analiz edilmiştir [27,28]. Deney numuneleri AISI 4340 ıslah çeliğinden hazırlanmış, kesme için kaplamalı karbür kesici takım kullanılmıştır. Aynı kesme şartlarında hem konvansiyonel hem de IDİ deneyleri yapılmıştır. Deneyler esnasında kesme için harcanan güç (P_c , kW) ve iş malzemesi sıcaklığı (T_{mr} , °C) ölçülmüştür. Numune çapları ölçülerek IDİ yönteminin çap ölçüsündeki sapmalara etkisi (ÇÖS, μm) araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri (R_a , μm) ölçülerek TIG esaslı IDİ yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmıştır. Kesme için harcanan güç (P_c) ve iş malzemesi sıcaklığının (T_{mr}) ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi incelenmiştir. Deneyler ve istatistiksel analiz göstermiştir ki IDİ yöntemi ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini geliştirmek için kullanılabilir. TIG esaslı IDİ yönteminde ön ısıtma, kesme ile eş zamanlı gerçekleştirilememiştir. İşlemeden hemen sonra yapılan ölçümlere kıyasla, işlemeden bir gün sonra yapılan ölçümlerde parça çaplarının genleşme nedeniyle küçüldüğü görülmüştür. Bu durum TIG esaslı IDİ yönteminin hassas toleranslara sahip parçaların işlenmesine uygun olmadığını gösterir. Ancak orta ve kaba düzeyde yapılan işlemlerde iyi sonuçlar alınabilir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İş Malzemesi, Kesici Takım, Takım Tezgâhı ve TIG Esaslı Ön Isıtma Sistemi (Work Material, Cutting Tool, Machine Tool and TIG Based Preheating System)

İş malzemesi olarak endüstride yaygın bir kullanım alanına sahip olan AISI 4340 ıslah çeliği kullanılmıştır. AISI 4340 çeliği tavlanmış olarak temin edilmiş olup, sertliği max. 250 HB' dir. Malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 1' de verilmiştir. Deneylerde Sandvik tarafından tedarik edilen SNMG 120408-QM 4225 kod numaralı CVD kaplamalı karbür kesici takım ve PSBNR2525M12 kodlu torna kateri kullanılmıştır. Kesme hızı (V) değerleri, kesici takım katalog değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bunun için 90,5-100-110mm çapında numuneler hazırlanmıştır. İlerleme oranı (f) değerleri ısı girdisini artırmak için [29] düşük belirlenmiştir. Kesme derinliği (a_p) sabit 1 mm alınmıştır. Deneyler ayna devir

sayısı max. 1000 dev/dak olan, 7 kW gücündeki üniversal torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. IDİ deneylerinde ön ısıtma için max. 200 Amper akım şiddetinde çalışan hava soğutmalı TIG kaynak makinesi kullanılmıştır.

IDİ deneylerinde TIG kaynak makinesi 150 Amper akım şiddetinde sabit olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çalışma parametreleri Çizelge 2' de verilmiştir. TIG esaslı IDİ sistemi Şekil 1' de gösterilmiştir.

Çizelge 1. AISI 4340 çeliği kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of AISI 4340 steel) [30]

Alaşım elementleri (%)					
C	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
0,40	0,70	0,80	0,25	1,80	95,20 (min)

Çizelge 2. İşlem parametreleri ve seviyeleri (Process parameters and levels)

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı (V, m/dak)	275	305	335
İlerleme oranı (f, mm/dev)	0,11	0,18	0,24
İşleme yönt.	Konv.	IDİ	-



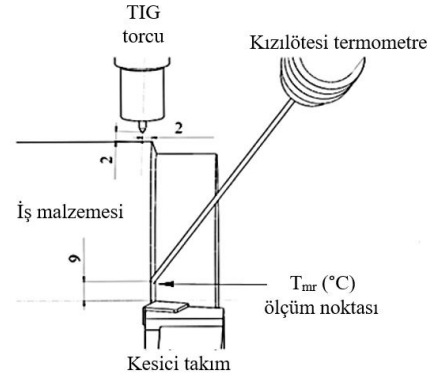
Şekil 1. TIG esaslı IDİ yöntemi deney düzeneği (TIG based HAM method experimental setup)

2.2. Deney Planı (Experimental Plan)

Deney planı tam faktöriyel yaklaşımına göre hazırlanmıştır. Kesme işleminin performansını değerlendirmek için talaş kaldırma oranından (TKO) yararlanılmıştır. TKO (cm^3/dak), kesme parametrelerinin (V, f, a_p) çarpımı ile belirlenmiştir. Çizelge 3' de deney planı ve TKO değerleri verilmiştir. Çizelge 3' e göre önce konvansiyonel işleme deneyleri ardından IDİ deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3. Konvansiyonel işleme ve İDİ için deney planı
(Experimental plan for conventional machining and HAM)

Deney Nu.	V (m/dak)	f (mm/dev)	TKO (cm ³ /dak)
1	275	0,11	30,25
2	275	0,18	49,50
3	275	0,24	66,00
4	305	0,11	33,55
5	305	0,18	54,90
6	305	0,24	73,20
7	335	0,11	36,85
8	335	0,18	60,30
9	335	0,24	80,40



Şekil 2. TIG esaslı İDİ yöntemi şematik gösterimi (Schematic representation of the TIG-based HAM method)

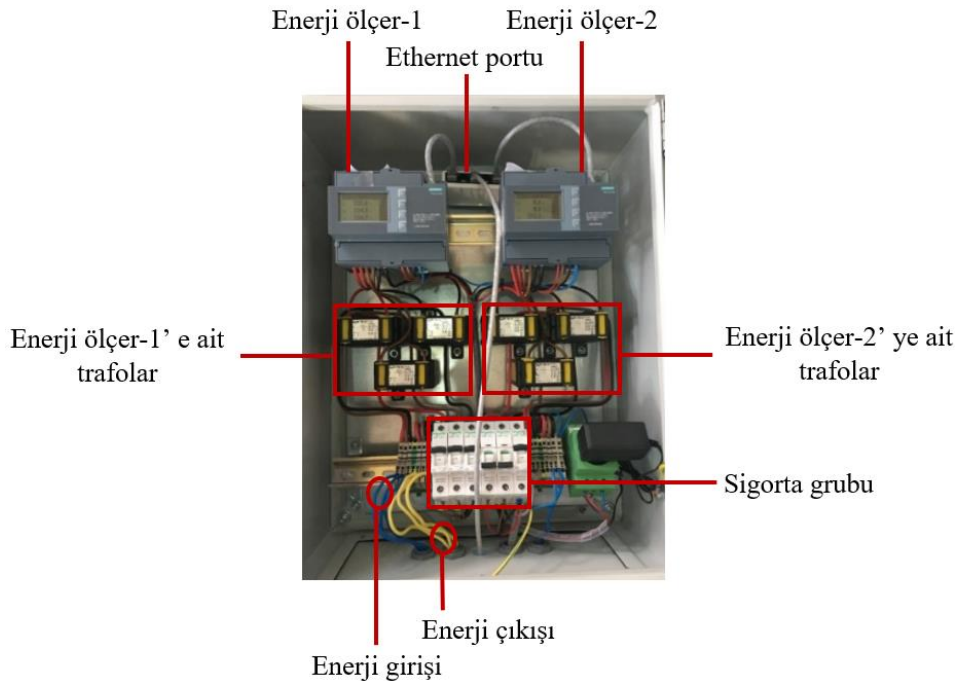
2.3. Çevrimiçi Ölçümler (Online Measurements)

İş malzemesi sıcaklığını (T_{mr}) ölçmek için Raytek MI3 kızıl ötesi termometre kullanılmıştır. Sıcaklık verileri cihaza ait orijinal yazılım kullanılarak bilgisayara kaydedilmiştir. İş parçası ve TIG elektrotu arasındaki ark mesafesi 2 mm alınmıştır. Kesme anında yığılan talaşın kısa devreye neden olmaması için tungsten elektrot kesilen kenardan 2 mm önde konumlandırılmıştır. Kesme anında çıkan talaşın termometrenin önüne gelerek sıcaklık ölçümünde hatalara neden olmasını önlemek için doğrudan kesme bölgesi sıcaklığı ölçülmemiştir. T_{mr} ölçümü kesme bölgesinden yaklaşık 9 mm üstte yapılmıştır. Kesici takım, kızılötesi termometre ve TIG torcunun birbirlerine göre konumu Şekil 2' de gösterilmiştir. Güç ölçümleri için Şekil 3' de gösterilen Siemens firmasının PAC2200 model dijital ekranlı üç fazlı enerji ölçerleri kullanılmıştır. Enerji ölçere ait yazılım sayesinde saniyede bir güç verisi alınmıştır. Elde edilen güç verileri .xlsx uzantılı dosyalar halinde bilgisayara kaydedilmiştir.

Torna tezgâhı kesme öncesinde başlayan ayna devri, otomatik ilerleme ve soğutma sisteminin çalışması gibi hareketler için önemli miktarda güç harcamaktadır. Kesici takım kesmeye başladığında torna tezgâhı ilave bir güce ihtiyaç duyar. Bu güç kesme için harcanan güç (P_c) ifade etmektedir. P_c , kesme zamanında ölçülen güçten kesmeye başlamadan önce ölçülen gücün çıkarılması ile belirlenmiştir. Şekil 4' deki grafikte kesme için harcanan gücün (P_c) nasıl belirlendiği gösterilmektedir. P_c , grafikteki stabil 5 verinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.

2.4. Çevrimdışı Ölçümler (Offline Measurements)

Boyutsal ölçümler 0,01 mm hassasiyetinde mikrometre kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler işlemeden hemen sonra Şekil 5' de gösterildiği gibi, iş malzemesi üzerinde belirlenmiş bir düzlem üzerinde üç noktadan eşit aralıklarla yapılmış ve güvenilirliği artırmak için üç kez tekrar edilmiştir.



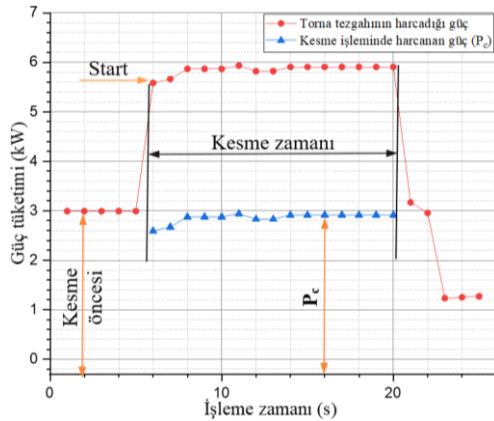
Şekil 3. Enerji ölçer sistemi pano görünümü (Energy meter system panel view)

Çizelge 4. Deney sonuçları (Experiment results)

Deney Nu.	TKO (cm ³ /dak)	İşleme Yöntemi	P _c (kW)	T _{mr} (°C)	İşlemeden Hemen Sonra ÇÖS (µm)	İşlemeden 1 Gün Sonra ÇÖS (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)
1	30,25	Konv.	1,92	388	10	10	0,871
2	30,25	IDİ	1,82	463	0	0	0,805
3	49,50	Konv.	2,91	265	40	40	1,412
4	49,50	IDİ	2,71	453	30	30	1,294
5	66,00	Konv.	3,81	257	80	80	2,655
6	66,00	IDİ	3,63	394	50	50	2,416
7	33,55	Konv.	2,25	386	10	10	0,827
8	33,55	IDİ	2,18	447	10	10	0,763
9	54,90	Konv.	3,16	263	40	40	1,404
10	54,90	IDİ	3,01	441	20	30	1,273
11	73,20	Konv.	4,33	255	80	80	2,542
12	73,20	IDİ	3,94	387	60	50	2,406
13	36,85	Konv.	2,57	383	10	10	0,817
14	36,85	IDİ	2,4	435	10	10	0,745
15	60,30	Konv.	3,5	261	30	30	1,380
16	60,30	IDİ	3,42	428	20	20	1,270
17	80,40	Konv.	4,85	253	80	80	2,429
18	80,40	IDİ	4,15	360	50	50	2,381

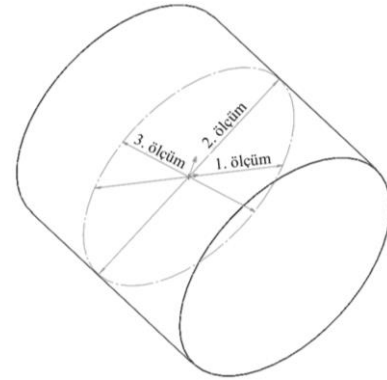
Ölçümler işlemeden 1 gün sonra tekrar edilmiştir. Değişimi araştırılan ÇÖS değeri üç noktadan yapılan ölçümlerde elde edilen en büyük ölçüden (EBÖ) en küçük ölçü (EKÖ) çıkarılarak belirlenmiştir. ÇÖS değerini belirlemek için Eşitlik (1) kullanılmıştır. Okunabilirliği kolaylaştırmak için ÇÖS sonuçları mikron (µm) cinsinden verilmiştir.

$$EBÖ - EKÖ = \text{ÇÖS} (\mu\text{m}) \quad (1)$$



Şekil 4. Güç ölçümü (Power measurement)

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo firmasının SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra, µm) değeri kullanılmıştır. Ölçümler iş parçasının işlenmiş yüzeyinden rastgele seçilmiş altı farklı noktadan yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınmıştır. Çalışmada ayrıca işlem parametrelerindeki değişimin kesme işlemine etkilerini değerlendirmek için talaş oluşumları incelenmiştir.

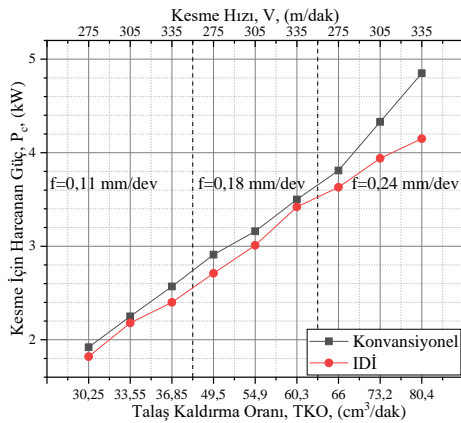


Şekil 5. Boyutsal ölçümler (Dimensional measurements)

3. DENEY SONUÇLARI, ANALİZ VE TARTIŞMA (EXPERIMENT RESULTS, ANALYSIS AND DISCUSSION)

Deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4' de verilmiştir. IDİ yönteminde kesme için harcanan güç (P_c) konvansiyonel işlemeye göre daha düşük gerçekleşmiştir. 80,40 cm³/dak TKO değerinde yapılan konvansiyonel işlemede iş malzemesi sıcaklığı (T_{mr}) 253°C ölçülürken IDİ yönteminde bu değer 360°C' ye yükselmiştir. Bu sıcaklık artışı ile birlikte, konvansiyonel işlemede 4,85 kW gerçekleşen P_c değeri IDİ yönteminde 4,15 kW' a düşmektedir. IDİ yöntemi ile P_c değerindemax. %14,43 azalma sağlanmıştır. Konvansiyonel işlemede 80,40 cm³/dak TKO değerinde ÇÖS 80 µm olarak gerçekleşirken, aynı kesme şartlarında IDİ yöntemi kullanıldığında ÇÖS 50 µm' a düşmektedir. TIG tekniği ile noktasal ısıtmanın yapılması ve iş malzemesi boyutlarının büyük olması nedeniyle işlemeden hemen sonra ve işlemeden 1 gün sonra yapılan ölçümlerde ÇÖS değerlerinde belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. TIG esaslı IDİ yönteminde TIG

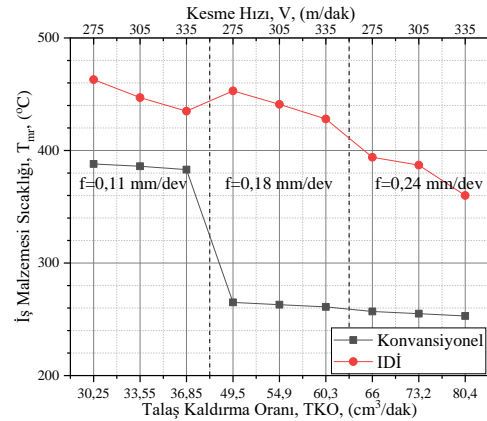
torcu kesici takımdan 2 mm önde hareket ettiği için ön ısıtma kesme işlemi ile eş zamanlı yapılamamıştır. Ön ısıtma sırasında iş malzemesi hacmine dağılan ısı genişlemeye neden olmuştur. Buna bağlı olarak bir gün sonra yapılan ölçümlerde numune çaplarının 7-27 µm arasında düştüğü tespit edilmiştir. Bu değişim, düşük ilerleme oranlarında (f) ısı girdisi fazla olduğu için daha yüksektir. Tüm IDİ deneylerinde konvansiyonel işlemeyle kıyasla daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. IDİ yöntemi sayesinde yüzey pürüzlülüğünde max. %9,33 (TKO: 54,90 cm³/dak) iyileşme sağlanmıştır. Şekil 6' da kesme parametrelerindeki (V, f) dolayısıyla TKO' daki artışın fiziksel bir sonucu olarak, P_c değerinin arttığı görülmektedir. IDİ yöntemi daha düşük P_c değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu fark, IDİ yöntemi sayesinde birincil kayma bölgesindeki sıcaklığın artması ve iş malzemesi kesme direncinin [31] azalması nedeniyle beklenen bir durumdur.



Şekil 6. Kesme için harcanan güç, P_c, kW (Power consumed for cutting, P_c, kW)

Şekil 7 işlem parametrelerine bağlı olarak T_{mr} (°C) değerindeki değişimi göstermektedir. Konvansiyonel işlemedeki T_{mr} (°C) değerleri değerlendirilecek olursa kesme hızı (V) arttıkça T_{mr} değeri bir miktar azalmaktadır. Sıcaklıktaki bu azalma TKO artışına bağlanabilir. Bu da talaş tarafından daha fazla ısının taşınmasına ve dolayısıyla iş parçasına daha az ısı iletilmesine neden olur [32]. Konvansiyonel işlemede 0,18 mm/dev ve 0,24 mm/dev ilerleme oranlarında (f) yapılan işlemlerde T_{mr} değerinin radikal bir şekilde düştüğü görülmektedir. İlerleme oranı (f) arttıkça açığa çıkan ısı talaşla birlikte atılmaktadır bu nedenle iş malzemesi yüzeyinden ölçülen T_{mr} değeri düşmektedir. Belirtilen ilerleme oranı (f) değerlerinde, Şekil 8' de görüldüğü gibi talaş uzun-sürekli formdan kısa-kopuk talaş formuna geçmektedir. Konvansiyonel işlemede sıcaklığın bu kadar düşmesi konvansiyonel işleme-IDİ arasındaki sıcaklık farkının artmasına neden olmaktadır. IDİ yönteminde sağlanan ilave ısı girdisinin doğal bir sonucu olarak T_{mr} değeri artmaktadır.

Kesme parametreleri (V, f) dolayısıyla TKO arttıkça T_{mr} değeri düşmektedir. Enerji kaynağının ya da iş malzemesinin hızı artırılırsa iş malzemesine birim zamanda giren ısı miktarı azalır [29]. Şekil 8' deki talaş fotoğrafları, ilerleme oranındaki (f) değişimin ve IDİ yönteminin talaş oluşumu üzerindeki etkilerini göstermektedir. İlerleme oranındaki (f) artış talaş üzerinde doğal bir talaş kırıcı etkisi oluşturmaktadır. İlerleme oranı (f) arttıkça kesici takımın, talaş kırıcı formu devreye girmekte, talaş kırma özelliği artmaktadır. Ayrıca ilerleme oranının (f) artmasıyla birlikte talaşın kalınlığı artmakta ve talaş daha fazla plastik deformasyona uğramaktadır. 0,11 mm/dev ilerleme oranındaki (f) talaş oluşumu incelendiğinde, talaşın düz ve sürekli bir formda oluştuğu görülmektedir. 0,18 mm/dev ilerleme oranında (f) talaş kısmen sürekli şekilde akmış ve kesici ucun talaş kırıcı formu etkisini göstermeye başlamıştır. 0,24 mm/dev ilerleme oranında (f) ise talaşın kısa ve süreksiz bir şekilde geldiği görülmektedir.

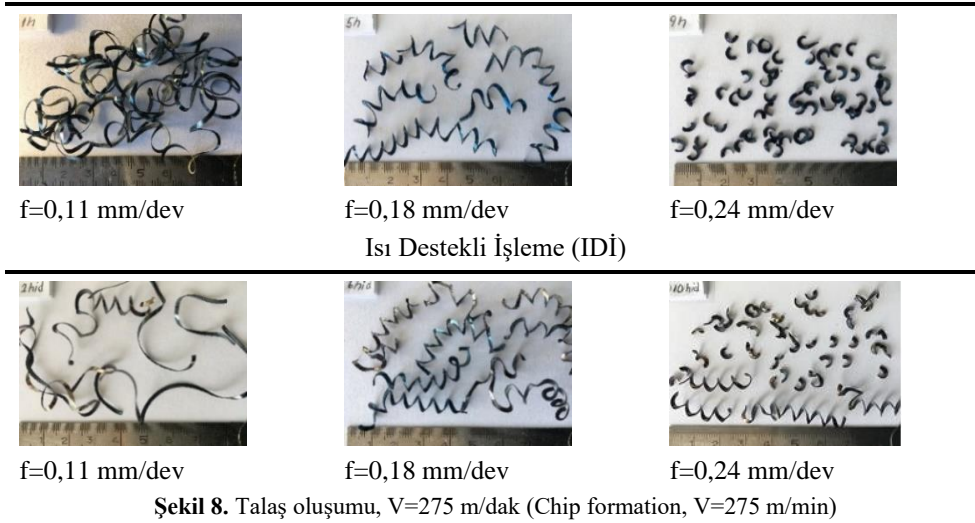


Şekil 7. İş malzemesi sıcaklığı, T_{mr}, °C (Work material temperature, T_{mr}, °C)

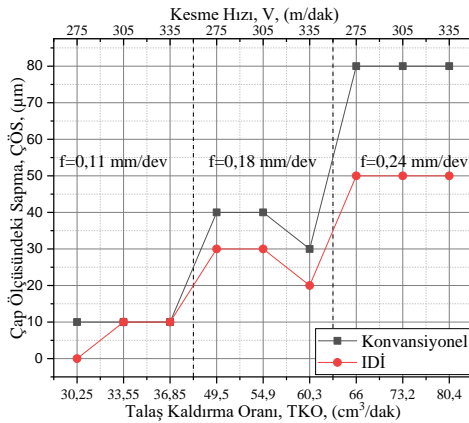
IDİ yönteminin talaş oluşumuna etkisi değerlendirilecek olursa ön ısıtmanın etkisiyle talaş düzleşmekte ve sürekli hale gelmektedir. IDİ yönteminde iş malzemesi sıcaklığının (T_{mr}) ön ısıtma ile yükseltilmesi nedeniyle talaşa daha homojen ısı geçişi sağlanmış, metal atomları arasındaki bağ kuvveti zayıflamış, dolayısıyla kesme işlemi kolaylaşmıştır.

Şekil 9 işlem parametrelerine bağlı olarak ÇÖS (µm) değerindeki değişimi göstermektedir. IDİ yöntemi daha düşük ÇÖS değerleri elde edilmesini sağlamıştır. ÇÖS değerlerindeki değişimi diğer deney sonuçları ile açıklamak mümkündür. IDİ yöntemi sayesinde iş malzemesi sıcaklığında (T_{mr}) artış sağlanmakta böylece kesme için harcanan güç (P_c) düşmektedir. P_c değerinin düşmesi kesme işleminin kolaylaştığının bir göstergesidir. IDİ yönteminde ÇÖS değerinin azalması; ön ısıtma sayesinde kesme işleminde harcanan gücün (P_c) düşmesi ve buna bağlı olarak kesici takım ve iş malzemesi sehimlerinin azalması ile de açıklanabilir [33].

Konvansiyonel

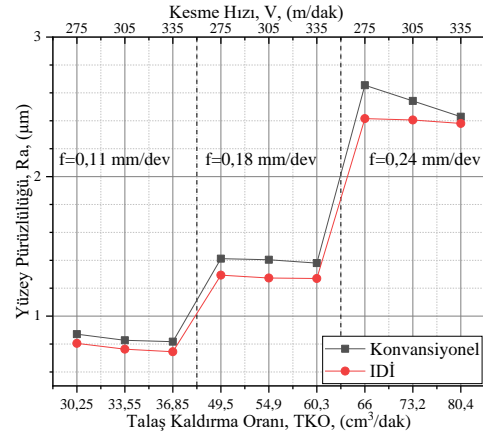
Şekil 8. Talaş oluşumu, $V=275$ m/dak (Chip formation, $V=275$ m/min)

Her iki işleme yöntemi incelendiğinde kesme hızının (V) bir etkisi görülmezken, düşük ilerleme oranı (f) değerlerinde ÇÖS değerinin düşük olduğu, ilerleme oranı (f) arttıkça ÇÖS değerinin büyüdüğü görülmektedir. Buna karşılık IDİ yönteminde sağlanan termal yumuşamanın yüksek ilerleme oranı (f) değerlerinde daha çok etki ettiği ve ÇÖS değerlerini düşürdüğü görülmektedir.

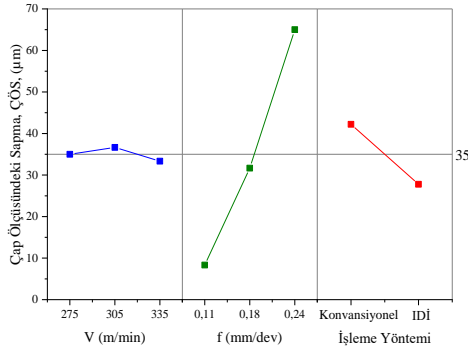
Şekil 9. Çap ölçüsündeki sapma, ÇÖS, μm (Dimensional deviation value, DDV, μm)

Şekil 10 işlem parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) değerindeki değişimi göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğünün en çok ilerleme oranından (f) etkilendiği görülmektedir. En düşük R_a değerleri 0,11 mm/dev ilerleme oranı (f) değerinde elde edilmiştir. İlerleme oranındaki (f) artış kesme kuvvetlerini dolayısıyla kesme için harcanan gücü (P_c) artırmakta, talaşın plastik deformasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu yüzden ilerleme oranı (f) arttıkça R_a değeri yükselmektedir. IDİ yöntemi yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlamıştır. Ön ısıtmanın etkisiyle iş malzemesinin mekanik özellikleri zayıflatılmış ve talaşın plastik deformasyonu kolaylaşmıştır.

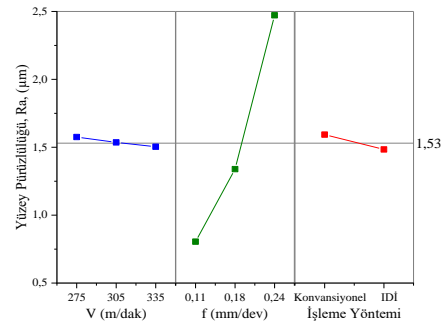
Daha yüksek T_{mr} ($^{\circ}\text{C}$) değerlerine çıkılması durumunda IDİ yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılacağı ve R_a (μm) değerinin konvansiyonel işlemeyle kıyasla daha fazla düşeceği değerlendirilmektedir. Bu çalışmada istatistiksel analiz için Varyans Analizi (ANOVA) Tablolarından ve Etki Grafiklerinden yararlanılmıştır.

Şekil 10. Yüzey pürüzlülüğü, R_a , μm (Surface roughness, R_a , μm)

ANOVA, deney sonuçları üzerindeki en etkili işlem parametresinin belirlenmesinde kullanılan istatistiksel bir yaklaşımdır. ANOVA Tablolarında verilen hata oranı (%) ve anlamlılık değeri (P-Değeri) elde edilen bulguların doğruluğunun bir göstergesidir. Etki grafikleri ise işlem parametresindeki değişimin ÇÖS (μm) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) üzerindeki olumlu ya da olumsuz etkisini göstermektedir. Şekil 11' de verilen etki grafiğinde kesme hızındaki (V) artışın ÇÖS üzerinde önemli bir etkisi görülmezken, ilerleme oranı (f) arttıkça ÇÖS değerinin arttığı görülmektedir. IDİ yöntemi ÇÖS değeri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. IDİ yöntemini kullanmak ÇÖS değerinin düşmesini sağlamaktadır.



Şekil 11. ÇÖS ana etki grafiği (DDV main effect plot)



Şekil 12. Yüzey pürüzlülüğü için ana etki grafiği (Main effect plot for surface roughness)

Çizelge 5’deki ANOVA sonuçlarına göre kesme hızının (V) ÇÖS üzerine belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bu durumun kesme hızı (V) değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [34]. ÇÖS üzerinde en etkili (%85,01) işlem parametresi ilerleme oranıdır (f). İşleme yöntemi ÇÖS üzerinde anlamlı ve önemli bir etkiye (%8,20) sahiptir.

Şekil 12’de verilen etki grafiğinde kesme hızındaki (V) artışın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir [35]. İlerleme oranı (f) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili işlem parametresidir. IDİ yöntemi, kesme hızına (V) kıyasla yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir. IDİ yöntemini kullanmak yüzey pürüzlülüğü değerinin düşmesini sağlamaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden kesme parametresinin ilerleme oranı (f) olduğu bilinmektedir. Çizelge 6’da ilerleme oranının (f) çok yüksek bir oranda (%98,89) en etkili işlem parametresi çıkması bu tespiti doğrulamaktadır. Kesme hızının (V) yüzey pürüzlülüğü üzerine belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bu duruma, ÇÖS değerinde olduğu gibi birbirine yakın kesme hızı (V) değerlerinin neden olduğu değerlendirilmektedir. İşleme yöntemi yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızına (V) göre daha anlamlı ve önemli bir etkiye (%0,61) sahiptir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada TIG esaslı IDİ yönteminin boyutsal kararlılık ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneylerde kesme için harcanan güç (P_c), iş malzemesi sıcaklığı (T_{mr}), numune çapları ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. İşlem parametrelerinin çap ölçüsündeki sapma (ÇÖS, μm) ve yüzey pürüzlülük değeri (R_a , μm) üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Varyans Analizi (ANOVA) ve Etki Grafiklerinden yararlanılmıştır. Aşağıda bu araştırmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

- TIG esaslı IDİ yönteminde iş malzemesi sıcaklığının (T_{mr}) yükselmesi, kesme için harcanan güç (P_c) değerinin düşmesini sağlar ve talaşın plastik deformasyonu kolaylaştırır.
- Deney sonuçları ve istatistiksel analize göre ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğü üzerine en az etki eden işlem parametresi kesme hızıdır (V). Bu durumun deneylerde kullanılan kesme hızı (V) değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
- Hem ÇÖS hem de yüzey pürüzlülüğü üzerine en çok etki eden işlem parametresi ilerleme oranıdır (f).

Çizelge 5. ÇÖS için ANOVA tablosu (ANOVA table for DDV)

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Kesme Hızı (V)	2	33,30	16,67	0,27	0,7689	0,29%
İlerleme Oranı (f)	2	9733,30	4866,67	78,45	0,0000	85,01%
İşleme Yöntemi (Konvansiyonel & IDİ)	1	938,90	938,89	15,13	0,0021	8,20%
Hata	12	744,40	62,04			6,50%
Toplam	17	11449,90				100,00%

Çizelge 6. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu (ANOVA table for surface roughness)

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Kesme Hızı (V)	2	0,02	0,01	4,80	0,0293	0,18%
İlerleme Oranı (f)	2	8,69	4,35	2687,88	0,0000	98,99%
İşleme Yöntemi (Konvansiyonel & IDİ)	1	0,05	0,05	33,26	0,0001	0,61%
Hata	12	0,02	0,00			0,22%
Toplam	17	8,78				100,00%

İlerleme oranı arttıkça ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğü değerleri yükselmektedir.

- Deneyler IDİ yönteminin ÇÖS ve yüzey pürüzlülüğünü düşürebileceğini göstermiştir. İstatistiksel analize göre IDİ yöntemi hem ÇÖS hem de yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı ve önemli bir etkiye sahiptir.
- IDİ yöntemini yüksek ilerleme oranlarında (f) kullanmak ÇÖS değerine daha çok etki etmektedir. Bu açıdan bakıldığında yüksek ilerleme oranları (f) kullanılan işlemlerde IDİ yöntemi ile daha dairesel parçalar üretilmesi mümkündür.
- Bir gün sonra yapılan boyutsal ölçümlerde, işlemeden hemen sonra yapılan ölçümlere kıyasla numune çaplarının küçüldüğü, dolayısıyla iş malzemesi hacminde genleşme olduğu belirlenmiştir. Genleşme düşük ilerleme oranlarında (f) daha yüksek çıkmıştır. Bu durum TIG esaslı IDİ yöntemi ile hassas boyutsal toleranslara sahip parçaların üretimini zorlaştırır. Ancak genleşmenin yüksek ilerleme oranlarında (f) düşük çıkması TIG esaslı IDİ yönteminin orta ve kaba düzeyde işlemlerde uygun olabileceğini gösterir.
- Su soğutmalı TIG kaynak makinesi kullanılarak daha yüksek akım şiddeti (Amper) değerlerinde daha yüksek T_{mr} değerlerine ulaşılabilir. Böylece farklı sıcaklık değerlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Yapılan çalışma, işlenmesi zor malzemelerin işlenmesinde ve yüksek TKO değerlerinde yapılan işlemlerde uygulanarak genişletilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZAR KATKILARININ BEYANI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Atakan UĞRAŞ: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Fırat KAFKAS: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ding H, Shin YC. "Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis", *International Journal of Machine tools and manufacture*, 50:106114, (2010).
- [2] Zhao C, Xia Y, Chen X, Jiang Y, He Y, Pan S.

"Thermal error detection and compensation technology for spindle of horizontal CNC machine tool with large torque", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107:85–96, (2020).

- [3] Zahoor S, Mufti NA, Saleem MQ, Mughal MP, Qureshi MAM. "Effect of machine tool's spindle forced vibrations on surface roughness, dimensional accuracy, and tool wear in vertical milling of AISI P20", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89:3671–3679, (2016).
- [4] Pandey P, Gupta VK. "Duplex machining: An innovative approach for better dimensional accuracy and surface finish", *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 10:153–167, (2011).
- [5] Ali SHR, Mohamd OM. "Dimensional and geometrical form accuracy of circular pockets manufactured for aluminum, copper and steel materials on CNC milling machine using CMM", *International Journal of Engineering Research in Africa*, 17:64–73, (2015).
- [6] Tian A, Du X, Liu S, Jin S. "Characterization of Dimensional Variations in Turning Process for Multistep Rotary Shaft of High-Speed Motorized Spindle", *Machines*, 11:561, (2023).
- [7] Manikandan H, Chandra Bera T. "Modelling of dimensional and geometric error prediction in turning of thin-walled components", *Precision Engineering*, 72:382–396, (2021).
- [8] Dhale SR, Deshmukh BB. "WEDM with different diameter wire electrodes on Inconel 718: Improved dimensional deviation, wire consumption and surface quality", *Materials Today: Proceedings*, 72:896–903, (2023).
- [9] Zahoor S, Azam HA, Mughal MP, Ahmed N, Rehman M, Hussain A. "WEDM of complex profile of IN718: multi-objective GA-based optimization of surface roughness, dimensional deviation, and cutting speed", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114:2289–2307, (2021).
- [10] Şahinoğlu A, Güllü A, "CuZn39Pb3 malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde oluşan akım, ses şiddeti, titreşim ve yüzey pürüzlülük değeri arasındaki ilişkinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 23:615–624, (2020).
- [11] Dongre G, Rajurkar A, Patil S, Raut R, Joseph N, Mote V, "Effect of cooling technique and tool material on Ti6Al4V alloy", *Materials Today: Proceedings*, 80:1567–1572, (2023).
- [12] Ahmadi Khatir F, Hossein Sadeghi M, Akar S. "Investigation of surface roughness in laser-assisted hard turning of AISI 4340", *Materials Today: Proceedings*, 38:3085–3090, (2020).

- [13] Rao TB. "Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20:1020–1034, (2022).
- [14] Ke J, Chen X, Liu C, Xu G, She Z, Zhang J, "Ultra-precision cutting characteristics of binderless tungsten carbide by in-heat-process laser-assisted diamond machining", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 115:106311, (2023).
- [15] Kainth, G. S., Chaturvedi MN. "Theoretical investigation of temperature in hot machining", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 156:241–256, (1975).
- [16] Hameed S, Rojas HAG, Benavides JIP, Alberro AN, Egea AJ. "Influence of the regime of electropulsing-assisted machining on the plastic deformation of the layer being cut", *Materials*, 11:1–11, (2018).
- [17] Kukliński M, Przystacki D, Bartkowska A, Kieruj P, Radek N. "Conventional and laser-assisted machining of laser-borided Monel 400 alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126:5677–5687, (2023).
- [18] Rao TB. "Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20:1020–1034, (2020).
- [19] Wei C, Guo W, Pratomo ES, Li Q, Wang D, Whitehead D. "High speed, high power density laser-assisted machining of Al-SiC metal matrix composite with significant increase in productivity and surface quality", *Journal of Materials Processing Technology*, 285:116784, (2020).
- [20] Hedberg GK, Shin YC, Xu L. "Laser-assisted milling of Ti-6Al-4V with the consideration of surface integrity", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79:1645–1658, (2015).
- [21] Olsson M, Akujärvi V, Ståhl JE, Bushlya V. "Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 97:105520, (2021).
- [22] Parida AK, Maity K. "Study of machinability in heat-assisted machining of nickel-base alloy", *Measurement*, 170:108682, (2021).
- [23] Çelebi A. "Deformation and Microstructural Analysis of Fiber Laser and TIG Welding of Thin Ti6Al4V Sheet by Coordinate Measurement Machine (CMM)", *Politeknik Dergisi*, 23:1183–1188, (2020).
- [24] Uğraş A, Kafkas F. "Isı destekli işlemede TIG tekniğinin uygulanabilirliği", *10 th Int. Congr. Mach.*, Antalya, 69–75(2019).
- [25] Uğraş A, Kafkas F. "AISI 4340 çeliğinin ısı destekli işlenmesinde TIG tekniğinin uygulanabilirliği", *11th Int. Congr. Mach.*, Virtual, 245–252 (2021).
- [26] Uğraş A, Kafkas F. "Sertleştirilmiş AISI 4340 çeliğin ısı -destekli işlenmesinde TIG tekniğinin uygulanabilirliği", *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1:40–48(2020).
- [27] Akdulum A, Kayır Y. "Investigation of the Effect of U Drills with Different Properties on Thrust Force, Torque and Spindle Load", *Politeknik Dergisi*, 26:387–400, (2023).
- [28] Erdemir F, Özkan MT. "Application of Taguchi Method for Optimization of Design Parameters in Enhancement The Robust of "C" Type Snap-fits", *Politeknik Dergisi*, 25:1385–1395, (2022).
- [29] Venkatesh KM, Kuppan P, Senthil KA, Ramesh KK, John RJ. "Effect of laser scan speed on surface temperature, cutting forces and tool wear during laser assisted machining of alumina", *Procedia Engineering*, 97:1647–1656, (2014).
- [30] Callister WD, Rethwisch DG. "Materials Science and Engineering an Introduction", Eighth Edition, *Wiley*, USA, A29, (2007).
- [31] Karpuschewski B, Kundrák J, Varga G, Deszpoth I, Borysenko D. "Determination of specific cutting force components and exponents when applying high feed rates", *Procedia CIRP*, 77:30–33, (2018).
- [32] O'Sullivan D, Cotterell M. "Temperature measurement in single point turning", *Journal of materials processing technology*, 118:301–308, (2001).
- [33] Carrino L, Giorleo G, Polini W, Prisco U. "Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part I: Three-dimensional theory", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42:1517–1515, (2002).
- [34] Boothroyd G, Knight WA. "Fundamentals of Machining and Machine Tool", 3rd edition, *CRC Press*, USA, 82, (2006).
- [35] Erdem S, Özdemir M, Rafiği M, Yavuz M. "1.2367 Sıcak İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Kesme Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetleri Üzerinde Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 26:1071–1077, (2023).