



Analysis of The Effect of Tool Geometry and Machining Parameters on Surface Integrity Properties in Turning of AISI 316L Stainless Steel by Taguchi Method

Fırat KAFKAS^{1,*}  Hüseyin GÜRBÜZ²  Ulvi ŞEKER¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

²Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 27.07.2022

Revision: 06.08.2022

Accepted: 09.08.2022

Highlights

- Surface integrity in turning AISI 316L stainless steel
- Effect of turning parameters on the surface integrity
- Determination of optimal turning condition for surface integrity based on the Taguchi approach

Keywords

Stainless Steel
Cutting Tools
Surface Roughness
Surface Residual Stresses
Strain Hardening
Taguchi Method

In this study, an optimal combination of cutting parameters were investigated which could be used for optimum surface integrity properties in turning of the AISI 316L stainless steel.

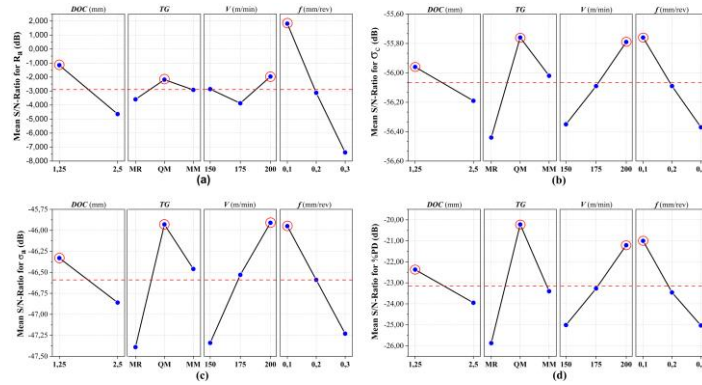


Figure A. Main effect plots of SN ratio: (a) average surface roughness, R_a ; (b) circumferential surface residual stress, σ_c ; (c) axial surface residual stress; σ_a ; (d) degree of strain hardening, %PD

Purpose: In this study, it was aimed to determine the effect of the turning parameters on the surface integrity properties in turning of AISI 316L stainless steel.

Theory and methods: In this study, the Taguchi method has been applied to evaluate the surface integrity features of AISI 316L by using coated carbide inserts with three different tool geometry under dry turning conditions. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effects of the machining parameters on average surface roughness, circumferential and axial surface residual stresses and degree of strain hardening. The depth of cut, cutting tool geometry, cutting speed and feed rate were selected as machining parameters.

Results: It was observed that the processing parameters had different effects on the quality properties as seen in figure A. The depth of cut was a relatively efficient parameter on the average surface roughness. Tool geometry had a greater effect on the degree of strain hardening, and the circumferential and axial surface residual stresses, respectively. Cutting speed had a more significant effect on the axial and circumferential surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively. Feed rate was the most effective parameter on the average surface roughness. However, feed rate also had a significant effect on the circumferential and axial surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively.

Conclusion: It was determined that a combination of minimum depth of cut, minimum feed rate, maximum cutting speed and QM tool geometry should be used for minimum surface integrity properties. It was confirmed that the determined optimal combination condition provided an improvement of 53.90% in degree of strain hardening, 20.39% in average surface roughness, 5.61% in axial surface residual stress and 1.89% in circumferential surface residual stress.



Analysis of The Effect of Tool Geometry and Machining Parameters on Surface Integrity Properties in Turning of AISI 316L Stainless Steel by Taguchi Method

Fırat KAFKAS^{1,*} Hüseyin GÜRBÜZ² Ulvi ŞEKER¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

²Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

Abstract

In this study, the Taguchi method has been applied to evaluate the surface integrity features of AISI 316L by using CVD TiAlN/Al₂O₃/TiCN coated carbide inserts with three different tool geometry under dry turning conditions. Experiments were conducted using the L₁₈ (2¹×3³), an experimental design with an orthogonal array, on a CNC turning. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effects of the machining parameters on average surface roughness, circumferential and axial surface residual stresses and degree of strain hardening. The depth of cut, cutting tool geometry, cutting speed and feed rate were selected as machining parameters. It was observed that the processing parameters had different effects on the quality properties. The depth of cut was a relatively efficient parameter on the average surface roughness and had no significant effect on other quality properties. Tool geometry did not affect the average surface roughness, but it had a greater effect on the degree of hardening, and the circumferential and axial surface residual stresses, respectively. Cutting speed was found to have a more significant effect on the axial and circumferential surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively. Feed rate was the most effective parameter on the average surface roughness. However, feed rate also had a significant effect on the circumferential and axial surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27.07.2022
Düzeltilme: 06.08.2022
Kabul: 09.08.2022

Keywords

Stainless Steel
Cutting Tools
Surface Roughness
Surface Residual Stresse
Strain Hardening
Taguchi Method

Anahtar Kelimeler

Paslanmaz Çelik
Kesici Takımlar
Yüzey Pürüzlülüğü
Yüzey Kalıntı Gerilmeleri
Pekleşme
Taguchi Metodu

AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğü Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi

Öz

Bu çalışmada, kuru tornalama koşullarında üç farklı takım geometrisine sahip CVD TiAlN/Al₂O₃/TiCN kaplı karbür uçlar kullanılarak AISI 316L'nin yüzey bütünlük özelliklerini değerlendirmek için Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Bir CNC tornada ortogonal dizili bir deneysel tasarım olan L₁₈ (2¹×3³) kullanılarak deneyler yapılmıştır. İşleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi üzerindeki etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. İşleme parametreleri olarak kesme derinliği, kesici takım geometrisi, kesme hızı ve ilerleme oranı seçilmiştir. İşleme parametrelerinin kalite özellikleri üzerinde farklı etkileri olduğu görülmüştür. Kesme derinliği, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde nispeten etkili bir parametredir ve diğer kalite özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Takım geometrisi ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilememiştir, ancak sırasıyla sertleşme derecesi ve çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmuştur. Kesme hızının sırasıyla eksenel ve çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre ilerleme hızıdır. Bununla birlikte, besleme hızı sırasıyla çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri ve sertleşme derecesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek işleme sertleştirmeleri, yüksek süneklikleri ve toklukları, düşük ısı iletkenlikleri ve yığılmaya meyilli olmaları nedeniyle işlenmesi en zor malzemelerden biridir. Ayrıca sertlik seviyesi, karbon içeriği ve nikel içeriği gibi faktörler de işleme zorluğunu etkileyen diğer faktörler olarak kabul edilebilir [1, 2]. Bir östenitik paslanmaz çelik işlenirken, talaşları kırmak için talaş kırıcı geometrisine sahip kesici ucun seçimi ve kesici takımında yığıma kenar oluşumunu (BUE) önlemek için kaplanmış kaliteler gibi çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Talaş kaldırmada talaş kırıcı geometrisi ve yüksek ilerleme oranı talaşın kırılması için önemlidir. Ayrıca, muhtemel tırlamaların üstesinden gelmek için kesici takımın yeterince rijit olması gerekir [3].

Kesme işleminde talaş oluşumu, talaş kırıcı geometrisine göre değişiklikler gösteren birincil deformasyon bölgesinde oluşan ısı ve gerilme ile meydana geldiğinden, talaş kırıcı geometrisi talaşlı imalatla talaş oluşumunu etkileyen önemli bir faktördür. Uygun talaş kırıcı geometrisine sahip kesici takımlar, metalin plastik deformasyonunun daha kısa bir kesme düzleminde gerçekleşmesine yardımcı olur. Bu nedenle, takım/talaş temas alanı ne kadar kısa olursa, deformasyon nedeniyle kesme alanında oluşan ısı ve gerilim o kadar düşük olur. Bu nedenle, talaş kırıcı geometrisi plastik deformasyondan kaynaklanan kalıntı gerilmeler, mikrosertlik ve mikroyapısal değişiklikler gibi özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olan termal ve mekanik etkilerin azaltılmasına yardımcı olduğu için, işlenen iş parçalarının yüzey bütünlüğü üzerinde olumlu bir etki sağlar [4, 5]. Yüzey bütünlüğü işlemeden sonra ürüne ait yüzey pürüzlülüğü, boyut ve biçim doğruluğu, mikrosertlik ve mikroyapısal değişiklikler ve kalıntı gerilmeler gibi bileşenleri içerir [6, 7]. Talaş oluşumu sırasında genellikle iş parçası ile kısa etkileşim süresi (~0,1 ms) içinde ortaya çıkan yüksek gerilmeler, yüksek gerinim hızları ve yüksek sıcaklıklar, işleme sürecini belirgin bir şekilde karakterize eder ve yüzey bütünlüğü ile ilgili özellikler üzerinde önemli değişikliklere neden olur. Bu etkileşimlerin bir sonucu olarak yüzey bütünlüğü, özellikle ürün performansı ve ürün kalitesi açısından son bitirme işlemlerinde kritik bir öneme sahiptir [8, 9].

Tornalama işleminde, bitmiş bileşenin performansını ve kalitesini belirleyen yüzey bütünlüğü özellikleri, işleme sırasında dikkate alınan parametrelere (süreç, iş parçası ve takım ile ilgili) büyük ölçüde bağlıdır. Kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği ve takım geometrisi, yüzey bütünlüğü ile ilgili performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyen tornalama parametreleridir [10–13]. Proses parametreleri genellikle üreticilerin deneyimine veya önerilen yönergelere göre seçilir. Bu seçim prosedüründe, makinelerin optimal ve ekonomik olarak etkin kullanımı ve üretilen yüzeyin kalitesi dikkate alınmaz. Bu durumda Taguchi ortogonal dizisine dayalı bilimsel yöntemlerin kullanılması faydalı olabilir. Taguchi yöntemi, belirli bir bağımsız parametre seti ve bir yanıt değişkeni için optimum parametreleri analiz edebilir ve belirleyebilir. Taguchi yönteminde, aynı bağımsız parametre seti birden fazla yanıt değişkenine sahipse, metodoloji her bir yanıt değişkeni için ayrı bir optimum çalışma koşulları kombinasyonu sağlar. Örneğin, yüzey kalıntı gerilmelerini en aza indirmek için optimum koşulun, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için gerekli optimum koşulla aynı olması gerekmez. Bu gibi durumlarda, mümkün olan en düşük yüzey kalıntı gerilmelerinde mümkün olan en iyi yüzey kalitesini sağlayabilecek bir çözüm elde etmek gerekir.

Östenitik paslanmaz çelik, savunma ve havacılık, nükleer güç, kimyasal ve petrokimya, ısıl işlem, sıfır altı ve denizcilik bileşenlerinde kullanılan nikel esaslı yüksek mukavemetli bir alaşımdır. Daha yüksek pekleşme eğilimi, daha yüksek tokluk ve süneklik, zayıf termal yayılım gibi özellikler, bu alaşımın işlenmesindeki zorluğun ana nedenidir. Bunlar, daha yüksek kesme kuvvetleri, yüksek oranda pekleşme, uzun-süreklili formda talaşlar ve aşırı takım aşınması üretir, sonuç olarak da yüzeyden yüzey altı seviyelere uzanan yüzey hasarlarına neden olur. Ayrıca, farklı işleme operasyonları, kesici takım ve iş malzemesi ile ilgili parametreler işleme sırasında karmaşık etkileşimlere sahiptir. Genel olarak, tüm bu etkiler bu alaşımın işlenebilirliğini zorlaştırır. Bu nedenle, girdi değişkenleri (işleme koşulları/parametreleri) ile çıktı değişkenleri (yanıtlar/kalite özellikleri) arasında karmaşık bir ilişki vardır ve işleme sırasında en iyi yüzey bütünlüğünü sağlayan en uygun işleme koşullarını seçmek gerçekten zor bir iştir [3, 10–17].

Bu makale, ortalama yüzey pürüzlülüğünü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerini ve pekleşme derecesini en aza indirmek için Taguchi yaklaşımını kullanarak AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalama işleminin optimizasyonunu sunar. En iyi parametre kombinasyonunu belirlemek için Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulan on sekiz deney yapılmıştır. Parametre seviyeleri ortalama yüzey pürüzlülüğü,

çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi olmak üzere dört tepki değişkenine göre değerlendirilmiştir. İşleme parametrelerinin bu tepki değişkenleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. İŞLEME PARAMETRELERİ VE TAGUCHI ANALİZİ (MACHINING PARAMETERS AND TAGUCHI ANALYSIS)

Ortogonal dizinin tasarımı, işleme parametrelerinin en iyi seviyelerini belirlemek için kullanılmıştır. Yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin seçimi ve ortogonal dizinin seçimi, ortogonal tasarımın ana adımlarıdır. Ayrıca, en önemli değişkenleri belirlemek için varyans analizi kullanılır. İşleme parametreleri, literatürdeki açıklayıcı–tamamlayıcı bilgilerden ve yazarların geçmiş deneyimlerine dayanarak seçilmiştir [4, 5]. Mevcut çalışmada, talaş kaldırma deneyleri farklı talaş kırıcı geometrilerine ve dolayısıyla farklı talaş açlarına ve kesme kenarı özelliklerine sahip kesici takımlar (MM, QM ve MM olarak kodlanmıştır) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, talaş kırıcı geometrilerinin etkisini net bir şekilde belirlemek mümkün olur. Tornalama işlemlerinde kesme işlemlerinin performansı, kontrol edilebilir faktörler olarak kabul edilen kesme hızı (V), ilerleme oranı (f), talaş kırıcı geometrisi (TG) ve kesme derinliği (DOC) gibi kesme parametreleri ile yakından ilişkilidir. Seçilen çalışma parametreleri ve bunların seviye değerleri Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1. Deneysel parametreler ve seviyeleri

Sembol	Parametre	Seviye		
		1	2	3
DOC	Kesme Derinliği (mm)	1.25*	2.5	–
TG	Takım Geometrisi	MR*	QM	MM
V	Kesme Hızı (m/dak)	150*	175	200
f	İlerleme Oranı (mm/dev)	0.1*	0.2	0.3

*başlangıç kesme şartları

Seçilebilecek ortogonal dizi için serbestlik derecesi (DOF), çalışma parametrelerinin toplam DOF’inden büyük veya ona eşit olmalıdır [18]. Bu çalışmada 2 seviyeli 1 parametre ve 3 seviyeli 3 parametre bulunmaktadır. Parametreler arasındaki etkileşim ihmal edilirse toplam serbestlik derecesi 7’dir. Bu nedenle, bu çalışma için bir L18 (2¹×3³) ortogonal dizi planlaması düşünülmüştür. Deneysel düzen Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Deneysel çalışmaların L₁₈ (2¹×3³) ortogonal dizisi

Kodlu değerler					Kodsuz değerler				
No	DOC	TG	V	f	No	DOC	TG	V	f
1	1	1	1	1	1	1.25	MR	150	0.1
2	1	1	2	2	2	1.25	MR	175	0.2
3	1	1	3	3	3	1.25	MR	200	0.3
4	1	2	1	1	4	1.25	QM	150	0.1
5	1	2	2	2	5	1.25	QM	175	0.2
6	1	2	3	3	6	1.25	QM	200	0.3
7	1	3	1	2	7	1.25	MM	150	0.2
8	1	3	2	3	8	1.25	MM	175	0.3
9	1	3	3	1	9	1.25	MM	200	0.1
10	2	1	1	3	10	2.50	MR	150	0.3
11	2	1	2	1	11	2.50	MR	175	0.1
12	2	1	3	2	12	2.50	MR	200	0.2
13	2	2	1	2	13	2.50	QM	150	0.2
14	2	2	2	3	14	2.50	QM	175	0.3
15	2	2	3	1	15	2.50	QM	200	0.1
16	2	3	1	3	16	2.50	MM	150	0.3
17	2	3	2	1	17	2.50	MM	175	0.1
18	2	3	3	2	18	2.50	MM	200	0.2

Bu çalışmada, yüzey bütünlüğünün bir ölçüsü olarak birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılan dört yanıt değişkeni dikkate alınmıştır. Bu amaçla, yanıt değişkenleri olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel ve eksenel çekme yüzey kalıntı gerilme bileşenleri (σ_c ve σ_a) ve pekleşme derecesi (%PD) seçilmiştir. Tipik olarak, AISI 316L'nin tornalama işlemlerinde tüm yanıt değişkenlerinin en düşük değerleri arzu edilir. Bu nedenle, dikkate alınan yanıt değişkenlerinin analizinde, denklem (1) ile tanımlanan amacımıza en uygun özelliği ifade eden “ne kadar düşük–o kadar iyi” kalite karakteristik terimi kullanılmıştır.

Parametre tasarımı ve deneysel planlama için kullanılan Taguchi yöntemi basit ve etkili çözümler sunar [18]. Minimum çabayla maksimum bilgiyi elde etmek için, ortogonal dizilere dayalı deneyler tasarlamak için Taguchi yöntemi kullanılır [19]. Taguchi yönteminde kalite (performans) özelliğini temsil eden S/N oranı etkili bir analitik araçtır ve S/N oranının maksimum değeri, proses parametrelerinin tercih edilen seviyesini sembolize eder [20]. Amaca bağlı olarak Taguchi yönteminde S/N oranını hesaplamak için üç farklı yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel ve eksenel çekme yüzey kalıntı gerilmeleri (σ_c ve σ_a) ve pekleşme derecesi (%PD) gibi yüzey bütünlüğünü karakterize eden özelliklerin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, dikkate alınan kalite özelliklerinin S/N oranını hesaplamak için aşağıda denklem (1)'de gösterildiği gibi daha düşük–daha iyi kalite karakteristiği kullanılmıştır:

$$SN_{ij} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad 1$$

burada y_{ij} , i. deneysel çalışma için gözlemlenen j. kalite karakteristiğinin ölçülen değeridir ve n , tekrarlanan deney sayısıdır [21].

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Malzeme (Material)

AISI 316L östenitik paslanmaz çelik, endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan yüksek nitelikli bir malzemedir. AISI 316L'nin kimyasal bileşimi ağırlıkça %0.023 C, %16.17 Cr, %10.10 Ni, %2.13 Mo, %1.27 Mn, %0.45 Cu, %0.44 Si, %0.16 Co, %0.043N, %0.021S ve %0.034 P elementlerinden oluşur. AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin akma gerilimi 509 MPa, kopma uzaması %50 ve sertliği 202 ± 3 HV_{0.5} (~190–195 BSD) tir. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak $\emptyset 25 \times 125$ mm boyutlarında AISI 316L östenitik paslanmaz çelik silindirik çubuk kullanılmıştır.

3.2. Deneysel Tezgâhı ve Kesici Takımlar (Machine Tool and Cutting Tools)

Deneysel çalışmalar, FANUC kontrol ünitesine, 10 kW güce ve maksimum 4000 dev/dak devir hızına sahip TC-35 JOHNFORD CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesici takımlar, iş parçası malzemesine uygun ISO M25 kalitesine eşdeğer, CVD kullanılarak üç katmanlı olarak kaplanmış (TiN–Al₂O₃–TiCN) kalitesinde SNMG 120408 MR/QM/MM formunda üç farklı talaş kırıcı geometrisine sahip değiştirilebilir uç kesici takım olarak belirlenmiştir. Bu kesici uçlar için 75° yaklaşma açılı PSBNR 2525 M12 kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan farklı talaş kırıcı geometrisine ve takım tutucuya sahip kesici takımların özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan kesici takım ve takım tutucu. Onların geometrik özellikleri

		Talaş Kırıcı Geometrik Özellikler					
		Esas kesici kenarda			Kesici kenar ucunda		
Kesici Takım	Takım Geometrisi	α_1 (°)	α_2 (°)	L_1 (mm)	α_1 (°)	α_2 (°)	L_1 (mm)
SNMG 120408	MR	6	22	0.33	8	22	0.32
	QM	0	15	0.23	9	15	0.20
	MM	9	20	0.30	12	22	0.29

Takım Tutucu Geometrik Özellikleri			
Takım Tutucu	λ_s (°)	γ (°)	κ_r (°)
PSBNR 2525 M12	-6	-6	75

α_1 : Kesici uç talaş açısı, α_2 : Talaş kırıcı açısı, L_1 : Talaş yüzeyinin uzunluğu

λ_s : Eğim açısı, γ : Talaş açısı, κ_r : Yaklaşma açısı

3.3. Yüzey Bütünlüğü Ölçümleri (Measurements of Surface Integrity)

İşlenen iş parçalarının yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için 9633 seri numaralı Mahr Perthometer M1 yüzey profilometresi kullanılmıştır. İşlenmiş iş parçasının yüzeyinde rastgele çevresel olarak seçilen farklı noktalardan örnekleme uzunluğu 5.6 mm olacak şekilde yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Hem çevresel hem de eksenel doğrultuda yüzey kalıntı gerilmeleri $\sin^2 \psi$ yöntemi kullanılarak X-ışını kırınımı tekniği yardımıyla ölçülmüştür. İşlenen iş parçalarının yüzeyinden 5 μm derinliğe kadar oluşan yüzey kalıntı gerilmelerini ölçmek için Cr-K α radyasyon kaynağına sahip X-ışını kırınım ölçüm cihazı (SEIFERT XRD 3003 PTS) kullanılmıştır. Tornalama işleminden sonra numunelerde meydana gelen yüzey sertliğindeki değişimleri belirlemek için SHIMADZU HMV2 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik deneyleri, Vickers sertlik ölçüm yöntemi ile 0.5 kgf (4.903 N) yük altında ve 5 sn bekletilerek yapılmıştır. Talaşlı imalat sonrası çalışma yüzeylerinde ve alt yüzeylerde sertleşmeye neden olan süreç pekleşme olarak bilinir ve sertleşmedeki değişimin oranı yüzde pekleşme derecesi (%PD) ile tanımlanabilir [10]. %PD, iş malzemesinin işlenerek sertleşme davranışını temsil eder ve işlenmiş yüzeylerin nicel bir bütünlük ölçüsünü tanımlamak için kullanılır ve %PD, Liu ve Barash tarafından şu şekilde tanımlanır [22]:

$$\%PD = \frac{MH_s - MH_b}{MH_b} \times 100 \quad 2$$

burada, MH_s ve MH_b, sırasıyla işlenmiş yüzey ve ham malzemenin mikrosertliğidir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Taguchi deney tasarımı yoluyla elde edilen deneysel veriler üzerinde çeşitli istatistiksel analizler yapılmıştır. Çalışma parametrelerinin yanıt değişkenleri üzerindeki etkisini belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Bu çalışmanın ana odak noktası, proses parametrelerinin her bir kalite karakteristiği üzerindeki etkisini detaylı olarak analiz etmektir.

4.1. Yüzey Bütünlüğü İçin Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı Yaklaşımı (Signal/Noise (S/N) Ratio Approach for Surface Integrity)

Talaşlı imalat deneyleri yukarıda Tablo 2’de verilen Taguchi L₁₈ ortogonal dizisine göre yapılmıştır. Takım geometrisi (TG), kesme hızı (V), ilerleme oranı (f) ve kesme derinliği (DOC) parametreleri, yüzey bütünlüğü araştırması için işleme parametreleri olarak kabul edilir. Bu parametrelerin seviyeleri Tablo 1’de listelenmiştir. Taguchi yöntemine göre, sinyal gürültü (S/N) oranı hesaplanarak optimum işleme parametreleri tahmin edilebilir [23]. Bu analizin amacı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalıntı gerilme bileşenleri

ve pekleşme derecesi gibi yüzey bütünlüğü özelliklerini minimumda tutmaktır. Sonuç olarak, tüm kalite karakteristikleri için sinyal-gürültü (S/N) oranını hesaplamak için *daha düşük-daha iyi kalite karakteristiği* kullanılır.

Tablo 4, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel (σ_c) ve eksenel (σ_a) yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi (%PD) özellikleri için elde edilen deneysel sonuçların değerlerini ve hesaplanmış S/N oranlarını listeler. AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde yapılan 18 tornalama testinden Ra, σ_c , σ_a ve %PD için elde edilen sonuçlarının ortalama değerleri, sırasıyla 1.565 μm , 637.22 MPa, 215.13 MPa ve %15.46 olarak belirlenmiştir. Bu arada, Ra, σ_c , σ_a ve %PD için hesaplanan S/N oranlarının ortalama değerleri, sırasıyla -2.899 dB, -56.07 dB, -46.59 ve -23.16 dB olarak hesaplanmıştır. Her bir işleme parametresinin (DOC, TG, V, f) Ra, σ_c , σ_a ve %PD gibi yüzey bütünlüğü özellikleri üzerindeki etkisinin analizine ait "S/N yanıt tablosu" ise Tablo 5'te gösterilmiştir.

Taguchi yaklaşımına göre Ra, σ_c , σ_a ve %PD'yi minimize edecek işleme parametrelerinin optimal seviyeleri Tablo 5'den ve Şekil 1'deki grafiklerden kolaylıkla belirlenebilir. En büyük S/N oranına sahip işleme parametresi seviyesi, ilgili işleme parametresi için en iyi seviyeyi gösterir. Bu açıklamaya istinaden, en iyi Ra değeri için işleme parametrelerinin seviyeleri ve S/N oranları DOC (Seviye 1, S/N=-1.152), TG (Seviye 2, S/N=-2.187), V (Seviye 3, S/N=-1,965) ve f (Seviye 1, S/N= 1.815) olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde; σ_c için optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-55.96), TG (Seviye 2, S/N=-55.76), V (Seviye 3, S/N=-55.79) ve f (Seviye 1, S/N=-55.76) olur, σ_a için optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-46.33), TG (Seviye 2, S/N=-45.93), V (Seviye 3, S/N=-45.91) ve f (Seviye 1, S/N=-45.95) şeklinde tanımlanır, %PD için ise optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-22.37), TG (Seviye 2, S/N=-20.22), V (Seviye 3, S/N=-21.21) ve f (Seviye 1, S/N=-21.00) dir.

Tablo 4. Deneysel sonuçlar ve S/N oranlarının değerleri

Deneysel Sonuçlar					S/N Oranları				
No	Ra (μm)	σ_c (MPa)	σ_a (MPa)	%PD (%)	No	Ra (dB)	σ_c (dB)	σ_a (dB)	%PD (dB)
1	0.698	651.90	228.10	17.99	1	3.123	-56.28	-47.16	-25.10
2	1.320	656.37	223.07	18.15	2	-2.411	-56.34	-46.97	-25.18
3	2.092	658.44	228.02	18.98	3	-6.411	-56.37	-47.16	-25.56
4	0.519	604.20	193.00	8.91	4	5.697	-55.62	-45.71	-19.00
5	1.202	612.66	192.14	8.91	5	-1.598	-55.74	-45.67	-19.00
6	1.910	603.82	190.27	9.41	6	-5.621	-55.62	-45.59	-19.47
7	1.452	644.18	223.37	17.33	7	-3.239	-56.18	-46.98	-24.77
8	2.123	645.81	218.82	17.33	8	-6.539	-56.20	-46.80	-24.77
9	0.466	581.40	176.10	8.42	9	6.632	-55.29	-44.92	-18.50
10	2.880	724.00	289.00	29.21	10	-9.188	-57.19	-49.22	-29.31
11	1.399	646.13	222.25	17.82	11	-2.916	-56.21	-46.94	-25.02
12	1.540	649.56	220.95	17.82	12	-3.750	-56.25	-46.89	-25.02
13	1.694	638.85	224.15	16.34	13	-4.578	-56.11	-47.01	-24.26
14	2.390	643.40	216.30	14.85	14	-7.568	-56.17	-46.70	-23.44
15	0.939	582.05	175.23	6.44	15	0.547	-55.30	-44.87	-16.17
16	2.812	683.20	249.20	24.09	16	-8.980	-56.69	-47.93	-27.64
17	1.287	620.81	201.68	12.87	17	-2.192	-55.86	-46.09	-22.19
18	1.443	623.19	200.69	13.37	18	-3.185	-55.89	-46.05	-22.52
Ortalama	1.565	637.22	215.13	15.46		-2.899	-56.07	-46.59	-23.16

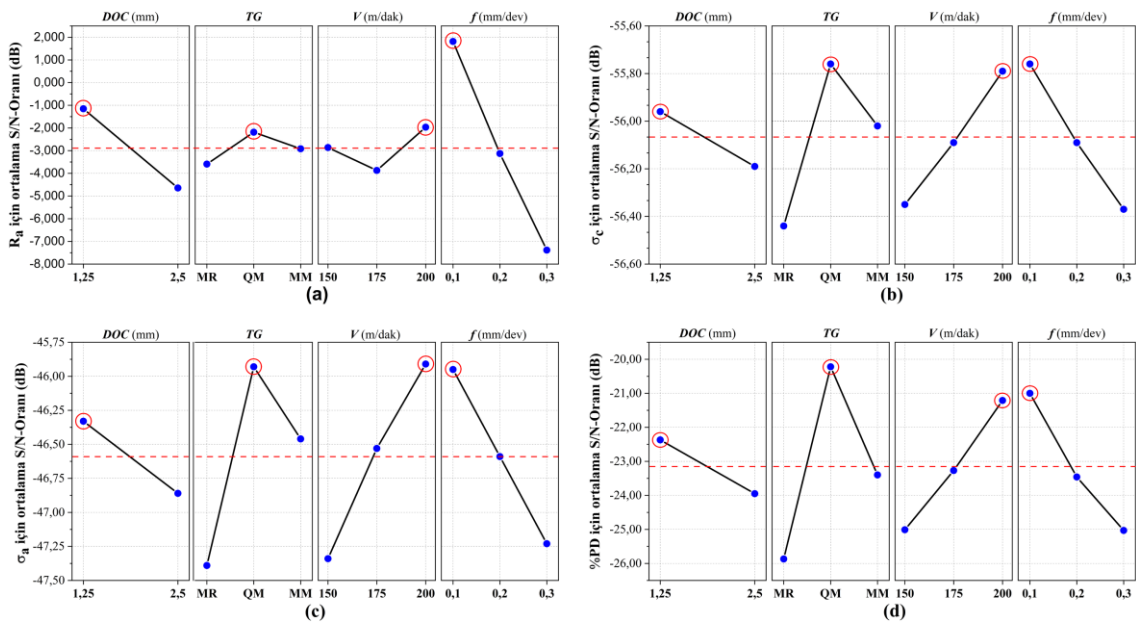
Tablo 5 ve Şekil 1'de verilen S/N yanıt tablosundan ve ana etki grafiklerinden, Ra, σ_c , σ_a ve %PD için optimum bir değer için 1.25 mm kesme derinliğinde (DOC1), QM tip takım geometrisine sahip kesici takımla (TG2), 200 m/dak'lık kesme hızında (V3) ve 0.1 mm/dev ilerleme oranında (f1) elde edilebileceği net olarak

görülmektedir. R_a , σ_c , σ_a ve %PD için söylenen bu optimum değerler Şekil 1’de kırmızı renkle işaretlenerek gösterilmiştir.

Tablo 5. R_a , σ_c , σ_a ve %PD gibi yüzey bütünlüğü özellikleri için S/N yanıt tablosu

İşleme Parametreleri	Seviye			Mak–Min	Sıra
	1	2	3		
R_a					
DOC	-1.152	-4.646		3.494	2
TG	-3.592	-2.187	-2.917	1.405	4
V	-2.861	-3.871	-1.965	1.906	3
f	1.815	-3.127	-7.385	9.2	1
σ_c					
DOC	-55.96	-56.19		0.22	4
TG	-56.44	-55.76	-56.02	0.68	1
V	-56.35	-56.09	-55.79	0.56	3
f	-55.76	-56.09	-56.37	0.61	2
σ_a					
DOC	-46.33	-46.86		0.53	4
TG	-47.39	-45.93	-46.46	1.46	1
V	-47.34	-46.53	-45.91	1.42	2
f	-45.95	-46.59	-47.23	1.28	3
%PD					
DOC	-22.37	-23.95		1.58	4
TG	-25.87	-20.22	-23.40	5.64	1
V	-25.01	-23.27	-21.21	3.81	3
f	-21.00	-23.46	-25.03	4.03	2

Koyu renk işaretlenmiş değerler işleme parametrelerinin optimal seviyelerini gösterir



Şekil 1. SN oranının ana etki grafiği: (a) yüzey pürüzlülüğü, R_a ; (b) çevresel yüzey kalıntı gerilime, σ_c ; (c) eksenel yüzey kalıntı gerilime; σ_a ; (d) pekleşme derecesi, %PD

4.2. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Takım geometrisi, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme oranının R_a , σ_c , σ_a ve %PD üzerindeki etkilerini analiz etmek için bu çalışmada ANOVA kullanılmıştır. Bu analiz, farklı parametrelerin göreceli etkisini açıklamak için daha objektif bir karar yöntemi sağlar. Analizler %5 anlamlılık düzeyinde ve %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6–8, sırasıyla, R_a , σ_c ve σ_a , ve %PD için ANOVA sonuçlarını göstermektedir. ANOVA sonuç tablolarında yer alan katkı oranları değerlerine göre, kesme derinliği (DOC), takım geometrisi (TG), kesme hızı (V) ve ilerleme oranının (f) tüm performans özelliklerini etkileyen ana süreç parametreleri olduğu açıktır. Ancak bu parametrelerin kalite özellikleri üzerindeki etki dereceleri farklıdır ve aşağıdaki ilgili alt bölümlerde ele alınmıştır.

4.3. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkileri (Effects of Machining Parameters on Surface Roughness)

Tablo 6'ya göre, işleme parametrelerinin yüzde katkı oranları incelendiğinde DOC , TG , V ve f parametrelerinin R_a üzerine olan yüzde katkı oranlarının, sırasıyla, %13.91, %1.71, %3.06 ve %79.60 olduğu görülmektedir. %79.60 katkı oranıyla f , R_a 'yı etkileyen en önemli parametredir ve bunu %13.91 katkıyla DOC takip eder. TG ve V 'nin R_a 'ya katkısı önem açısından düşüktür.

Tablo 6. Ortalama yüzey pürüzlülüğü, R_a , için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
DOC	1	1.177	1.177	81.42	0.0000	13.91
TG	2	0.145	0.072	5.01	0.0310	1.71
V	2	0.259	0.129	8.95	0.0060	3.06
f	2	6.735	3.368	233.05	0.0000	79.60
Hata	10	0.145	0.014			1.71
Toplam	17	8.461				100.00

F-Oranı tablo değeri: $F_{0.05;1;10} = 4.96$, $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Şekil 1a'daki grafik ve Tablo 5'te R_a için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kesme derinliği ve ilerleme oranı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Kesme hızının artmasının da BUE oluşumunu azaltarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği iyi bilinmektedir [24, 25]. Ana etki grafiğinden (Şekil 1a) talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmektedir. Bunun nedeni, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak artan talaş kesimine bağlanmaktadır. Tornalama işleminde ilerleme oranı değerlerindeki artışın yüzey pürüzlülüğünü kötüleştirdiği iyi bilinmektedir. Tornalama sırasında, ilerleme oranının artmasıyla kesici takım aşınmasına neden olan ısı üretimi miktarı artar [26, 27]. Ayrıca, ilerleme oranındaki bir artış tırlama etkisini de artırır. Sonuç olarak, yüksek ilerleme oranı ile artan tırlama ve takım aşınması olasılığı kötü bir yüzey pürüzlülüğüne yol açar [26]. En iyi yüzey pürüzlülük değerleri QM formuna sahip kesici takım ile en kötü yüzey pürüzlülüğü ise MR formuna sahip kesici takım ile elde edilmiştir. QM tipi takım geometrisi, negatif bir etkin talaş açısına ve daha küçük bir talaş temas uzunluğuna sahiptir (bkz. Tablo 3). Bu, QM tipi takım geometrisinin takım aşınmasına karşı daha güçlü bir kenar geometrisine sahip olduğu ve tırlamaya karşı daha dirençli olduğu anlamına gelir. Ayrıca, oluşan talaşların kesme bölgesinden hızla uzaklaştırılması, takım sıcaklığını ve BUE oluşumunu önemli ölçüde azaltacaktır. Sonuç olarak daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri veren QM tipi kesici takım geometrisinin daha etkin talaş kırma kabiliyetine sahip olduğu söylenebilir.

4.4. İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalıntı Gerilmeleri Üzerine Etkisi (Effect of Machining Parameters on Surface Residual Stresses)

Tablo 7, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerine (σ_c ve σ_a) ait ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Tablo çevresel yüzey kalıntı gerilmeler (σ_c) için incelendiğinde, DOC , TG , V ve f parametrelerinin çevresel

yüzey kalıntı gerilmesine yüzde katkı oranları, sırasıyla %6.29, %37.67, %24.97 ve %30.11 olarak belirlenmiştir. % 37.67 katkı oranına sahip *TG*, çevresel yüzey kalıntı gerilmesini etkileyen en önemli parametredir ve bunu, sırasıyla *f* ve *V* parametreleri izlemektedir. Diğer yandan, *DOC*'nin çevresel yüzey kalıntı gerilmesi üzerinde düşük bir etkisi vardır. *DOC*, *TG*, *V* ve *f* faktörlerinin eksenel yüzey kalıntı gerilmesi (σ_a) üzerine yüzde katkı oranları ise, sırasıyla %7.17, %33.48, %31.77 ve %25.69 olarak bulunmuştur. Eksenel yüzey kalıntı gerilmeyi etkileyen en önemli parametre %33.48 katkı oranı ile *TG*'dir ve bunu sırasıyla *V* ve *f* parametreleri izlemektedir. Benzer şekilde, *DOC*'nin eksenel yüzey kalıntı gerilmesi üzerindeki etkisi düşük seviyededir.

Şekil 1b ve c, işleme parametrelerinin, sırasıyla çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerindeki etkisini gösterir. Şekil 1b ve c'deki grafikler incelendiğinde, hem çevresel hem de eksenel yüzey kalıntı gerilmelerindeki eğilimlerin aynı olmasına rağmen büyüklük değerleri farklıdır. Ayrıca her iki grafikten de çevresel yüzey kalıntı gerilme değerlerinin büyüklüğünün eksenel yüzey kalıntı gerilme değerlerinden daha büyük olduğu görülebilir.

Tablo 7. Çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeler, σ_c ve σ_a , için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
Çevresel yüzey kalıntı gerilme, σ_c						
<i>DOC</i>	1	1290.49	1290.49	65.33	0.0000	6.29
<i>TG</i>	2	7724.10	3862.05	195.52	0.0000	37.67
<i>V</i>	2	5120.82	2560.41	129.62	0.0000	24.97
<i>f</i>	2	6174.05	3087.02	156.28	0.0000	30.11
Hata	10	197.53	19.75			0.96
Toplam	17	20506.99				100.00
Eksenel yüzey kalıntı gerilme, σ_a						
<i>DOC</i>	1	889.86	889.86	38.08	0.0000	7.17
<i>TG</i>	2	4153.75	2076.88	88.88	0.0000	33.48
<i>V</i>	2	3940.40	1970.20	84.32	0.0000	31.77
<i>f</i>	2	3187.15	1593.58	68.20	0.0000	25.69
Hata	10	233.67	23.37			1.88
Toplam	17	12404.83				100.00

F-Oranı tablo değeri: $F_{0.05;1;10} = 4.96$, $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Grafiklerden gözlemlenen etkiler, zayıf termal iletkenliğe sahip AISI 316L paslanmaz çeliğin işlenmesinde deformasyonun karakterini belirleyen ısı yayılım miktarının anlaşılmasıyla açıklanabilir [10, 28]. Düşük kesme hızlarında, hacimsel talaş kaldırma hızı azalır ve talaş tarafından yayılan ısı oranı da azalır. Aksine, yüksek kesme hızlarında, hacimsel talaş kaldırma hızı ve talaş tarafından karşılık gelen ısı yayma hızı artar. Bu nedenle, düşük kesme hızlarında talaşlar, yüksek kesme hızına göre nispeten daha uzun bir süre kesme bölgesinde kalır. Bunun karşılığında düşük hızlar, işlenmiş yüzeyde yüzey çekme kalıntı gerilmelerinin daha yüksek değerlerde meydana gelmesine yol açar [28]. 150 m/dak kesme hızında hacimsel talaş kaldırma hızı daha düşük olduğundan, talaşta biriken ısı daha fazla ve ısıyı dağıtma yetenekleri daha azdır, çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin değeri yükselir. Tersine, 200 m/dak kesme hızında, talaşta biriken ısı daha az olmakla birlikte, hacimsel talaş kaldırma hızı yüksek olduğu için ısıyı dağıtma yetenekleri de yüksektir ve çekme yüzey kalıntı gerilme değerleri düşüktür. İlerleme oranı 0.1 den 0.3 mm/dev aralığına doğru arttırıldığında, çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğünde bir artış olur. İlerleme oranının yanı sıra kesme hızındaki bir artış, hacimsel talaş kaldırma hızında bir artışa neden olur. Bu nedenle, ilerleme oranındaki bir azalma, talaşın ısıyı işleme bölgesinden uzaklaştırma yeteneğini arttırmada daha etkilidir. Kesme derinliği 1.25 mm'den 2.5 mm'ye değiştiğinde, yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü çekme yönünde değişir ve kesme derinliğinin 2,50 mm'ye artmasıyla artar. Kesme derinliğinin en yüksek olması koşulu, talaşla ısı dağılımının nispeten daha yüksek olduğunu gösterir. Talaş kaldırma işlemi sırasında ısı oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri takım/talaş temas uzunluğudur. Kısa takım/talaş temas

uzunluğunun sürtünme kuvvetini ve dolayısıyla ısı oluşumunu azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle, iş parçasının yüzeyi ısıdan daha az etkilenir ve yüzeyde oluşabilecek çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü azalır [29–34]. En düşük çekme yüzey kalıntı gerilmeleri, sırasıyla QM–MM–MR tipi takım geometrilerine sahip kesici takımlarla işlenen iş parçasının yüzeylerinde meydana gelmiştir (Şekil 1b, c).

4.5. İşleme Parametrelerinin Pekleşme Derecesi Üzerine Etkisi (Effect of Machining Parameters on Degree of Strain Hardening)

Araştırmacılar, en yüksek sertliğin işlenen yüzeye en yakın bölgede oluşmasının nedeninin talaşlı imalat sonrası plastik deformasyona bağlı pekleşme olduğunu vurgulamışlar ve işlenen yüzeydeki deformasyona yanıt olarak işleme ile pekleşmiş bir tabakanın kolayca oluşturulabileceğini bildirmişlerdir [17, 35]. Çalışmada kullanılan AISI 316L östenitik paslanmaz çelik malzemenin sertliği yaklaşık $202 \pm 3 \text{ HV}_{0.5}$ 'dir ve %PD denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. %PD, işlem görmüş yüzeyin mikrosertliğinde ana malzemenin mikrosertliğine kıyasla bir değişiklik olup olmadığını ifade eder. Tablo 8'e göre *DOC*, *TG*, *V* ve *f* parametrelerinin %PD üzerine yüzde katkıları sırasıyla %7.27, %44.17, %22.95 ve %24.96 olarak bulunmuştur. %44.17 katkı oranı ile *TG*, %PD'ni etkileyen en önemli parametre olup, bunu sırasıyla *f* ve *V* parametreleri izlemektedir. Bunun yanında, *DOC*'nin %PD üzerindeki etkisi düşüktür.

Tablo 8. Pekleşme Derecesi, %PD, için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>DOC</i>	1	41.69	41.69	112.47	0.0000	7.27
<i>TG</i>	2	253.25	126.63	341.64	0.0000	44.17
<i>V</i>	2	131.59	65.79	177.51	0.0000	22.95
<i>f</i>	2	143.13	71.57	193.09	0.0000	24.96
Hata	10	3.71	0.37			0.65
Toplam	17	573.37				100.00

F– Oranı tablo değeri: $F_{0.05;1;10} = 4.96$, $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Şekil 1d'deki grafikten genel olarak *DOC* ve *f* arttığında %PD'nin arttığı; ancak, *V*'nin artışla %PD'nin azaldığı görülür. Talaşlı imalat sırasında ısı oluşumunda kesme hızının önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir [35]. Kesme hızı, talaşı uzaklaştırmak için gerekli enerjiyi tanımladığı için, kesme işlemi sırasında oluşan ısı miktarı ile doğrudan ilişkilidir. İşlemede yüksek kesme hızları kullanıldığında, iş parçasına aktarılan ısı miktarı azalır [4, 5], bu da yüzey katmanında düşük mikrosertlik değişimlerine ve dolayısıyla düşük %PD'ne yol açabilir. En yüksek %PD, MR tip takım geometrisi ile elde edilirken, en düşük %PD, QM tip takım geometrisi ile elde edilmiştir. QM tip takım geometrisi, talaş yüzeyinin en küçük düzlüğüne sahip olduğundan (bkz. tablo 3), QM tipi en düşük %PD değerleriyle sonuçlanmıştır. Talaş yüzünün düz kısmının daha büyük uzunluğu takım/talaş temas alanını artırırken, talaş yüzünün düz kısmının daha küçük uzunluğu takım/talaş temas alanını azaltır. Bu nedenle, takım/talaş temas uzunluğundaki bir azalma, kesme kuvvetlerinin ve ısı oluşumunun azaltılmasına yardımcı olur. Bunun bir sonucu olarak, talaş yüzünün düz kısmının daha küçük uzunluğu, deformasyondan etkilenen alanın ve iş parçası yüzeyindeki termo–mekanik etkilerin azalmasına yol açar.

Ana etki grafiklerini ve ANOVA'dan elde edilen sonuçları kalite özelliklerine göre genel olarak değerlendirdiğimizde, proses parametrelerinin kalite özellikleri üzerinde farklı seviyelerde etkileri olduğunu açıkça görebiliriz. Bu açıdan *DOC*, *Ra* üzerinde nispeten verimli bir parametredir ve diğer kalite özellikleri üzerinde önemli bir etkisi yoktur. *TG* *Ra*'yı etkilemez, ancak sırasıyla %PD, σ_c ve σ_a üzerinde daha etkilidir. *V* sırasıyla σ_a , σ_c ve %PD üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir. *f* *Ra* üzerinde çok yüksek bir etkiye sahipken, sırasıyla σ_c , σ_a ve %PD üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir.

4.6. Doğrulama Testleri (Confirmation Tests)

Taguchi optimizasyon tekniğinde optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir [21]. Ayrıca optimum kalite özelliklerinin tahmininde doğrulama testinden elde

edilen değerlerin güven aralığında olup olmadığı da belirlenmelidir. Sistemin optimizasyonu yeterince doğru bir şekilde gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, istatistiksel yaklaşımla tanımlanan referans denklemler (denklem (3) ve (4)) kullanılarak tahmini kalite özellikleri için güven aralığının belirlenmesi yapılabilir [19, 36].

Yanıt değişkenlerin optimum değeri, kesme derinliği (*DOC*), Takım Geometrisi (*TG*), Kesme hızı (*V*) ve İlerleme oranı (*f*) olarak halihazırda seçilmiş olan önemli parametrelerin optimal seviyelerinde tahmin edilir. Optimal koşulda bir cevap karakteristiğinin tahmini ortalaması şu şekilde belirlenebilir [23, 37]

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad 3$$

burada η_m ilgili cevap karakteristiği için elde edilen değerlerin ortalaması, k ilgili parametre, η_i her bir i . parametrenin optimal seviyedeki sonuçlarının ortalamasıdır.

Sistemin optimal şartların yeterince doğru gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin değerlendirilmesi gerekir. Bu amaçla, tahmini cevap değişkeni için güven aralığının (CI_{CE}) belirlenmesinde aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [19, 23, 37]:

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

ve

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + T_{DOF}}$$

burada $F_{(\alpha, 1, f_e)}$ %95 güvenle F- oranıdır, α anlamlılık düzeyidir, f_e hata serbestlik derecesidir, V_e hata varyansdır, n_{eff} etkin tekrar sayısıdır, R doğrulama deneyleri için tekrar sayısı, N toplam deney sayısıdır ve T_{DOF} toplam ana faktör serbestlik derecesidir.

Tablo 9, tüm kalite özellikleri için ortalama yanıt sonuçlarını göstermektedir. Bu tabloya göre “*DOC1, TG2, V3, f1*” kombinasyonu tüm kalite özelliklerinin optimum ortalama değerlerini temsil etmektedir ve Tablo 9’da verilen ortalama tepki sonuçları, Tablo 5’te verilen S/N tepki sonuçları ile tutarlıdır.

Bu çalışmada, optimal koşullar dikkate alınarak parametre etkilerinin tekrarlanabilirliğini doğrulamak için üç doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 6–8’de verilen ANOVA sonuçları ve Tablo 9’da gösterilen deneysel çalışmadan elde edilen değerlerin ortalama sonuçları dikkate alındığında, optimal koşullar altında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinden beklenen değerlerin %95 güven aralığında olduğu söylenebilir. Optimal koşullar altında tahmin edilen sonuçlar ile, optimal koşulun %95 güven aralığı ve doğrulama testleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 10’da gösterilmiştir. Tüm kalite karakteristikleri için optimum işleme koşullarında doğrulama amacıyla yapılan üç test sonucunda R_a , σ_c , σ_a ve %PD’nin ortalama değerleri, sırasıyla 0.371 μm , 570.4 MPa 165.4 MPa ve %2.97 olarak elde edilmiştir. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, parametre etkilerinin güven aralığı sınırları içinde kaldığını ve tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir. Üstelik bu sonuçlar, deney sonuçlarının da güvenilmeye değer olduğu anlamına gelir. Böylece R_a , σ_c , σ_a ve %PD için sistem optimizasyonu Taguchi yöntemi kullanılarak %95 güven aralığında gerçekleştirilebilir.

Optimal koşullar için yapılan doğrulama testinin sonuçları, deneysel çalışmada en iyi sonucu veren rastgele bir kombinasyon ile karşılaştırılmıştır. Tablo 11, Taguchi yöntemiyle elde edilen tahmin edilen değerlerin doğrulama testi sonuçlarıyla karşılaştırmasını göstermektedir. Tahmin edilen değerler ile deneysel değerler arasındaki hatanın %10’dan az olması yapılan istatistiksel analizin güvenilirliğinin bir göstergesidir ve bu değerler kabul edilebilir sınırlar içindedir [37, 38]. Dolayısıyla doğrulama testi sonuçlarından başarılı bir optimizasyon yapıldığı söylenebilir. Optimum koşullar altında R_a ve %PD sırasıyla %20.39 ve %53.90’lık bir iyileşmeye sahiptir. σ_a ’daki iyileşme %5.61 iken, σ_c için elde edilen iyileşme ise sadece %1.89’dur.

Tablo 9. Kalite özellikleri için ortalama yanıt tablosu

İşleme Parametreleri	Seviye			Mak–Min	Sıra
	1	2	3		
Ra (µm)					
DOC	1.309	1.82		0.511	2
TG	1.655	1.442	1.597	0.213	4
V	1.676	1.62	1.398	0.278	3
f	0.885	1.442	2.368	1.483	1
σ_c (MPa)					
DOC	628.75	645.69		16.93	4
TG	664.4	614.16	633.1	50.24	1
V	657.72	637.53	616.41	41.31	3
f	614.42	637.47	659.78	45.36	2
σ_a (MPa)					
DOC	208.1	222.16		14.06	4
TG	235.23	198.51	211.64	36.72	1
V	234.47	212.38	198.54	35.93	2
f	199.39	214.06	231.94	32.54	3
%PD					
DOC	13.93	16.98		3.04	4
TG	19.99	10.81	15.57	9.19	1
V	18.98	14.99	12.4	6.57	3
f	12.07	15.32	18.98	6.9	2

Koyu renk işaretli değerler işleme parametresinin optimal seviyesidir

$\eta_{Ra} = 1.565 \mu\text{m}$ $\eta_{\sigma_c} = 637.22 \text{ MPa}$ $\eta_{\sigma_a} = 215.13 \text{ MPa}$ $\eta_{\%PD} = 15.46\%$

Tablo 10. Doğrulama testinin sonuçları

	Cevap değişkeni				
	Ra (µm)	σ _c (MPa)	σ _a (MPa)	%PD	
Optimal şartlar altında Tahmin edilen değer	0.34	562.08	159.15	2.84	
Hata varyansı	0.014	19.75	23.37	0.371	
% 95 güven aralığı	± 0.236	± 8.73	± 9.5	± 1.2	
% 95 güven aralığının	alt sınırı	0.104	553.349	149.658	1.645
	üst sınırı	0.576	570.806	168.648	4.037
Doğrulama test sonuçları	1	0.409	575.11	173.23	2.99
	2	0.33	567.37	141.99	3.11
	3	0.374	568.72	180.98	2.8
Doğrulama testlerinin ortalaması	0.371	570.4	165.4	2.97	
Hata oranı (%)	8.33	1.46	3.77	3.89	

Tablo 11. Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre ve Seviyeleri	Taguchi Metodu için			İyileşme (%)
	DeneySEL Veriler	Tahmin Verileri	Hata (%)	
Ra (µm)				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	0.371	0.340	8.33	20.39
DOC1TG3V3f1 (deneysel)*	0.466	0.495	6.22	
σ_c (Mpa)				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	570.40	562.08	1.46	1.89
DOC1TG3V3f1 (deneysel)*	581.40	597.95	2.85	
σ_a (Mpa)				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	165.40	159.15	3.78	5.61
DOC2TG2V3F1 (deneysel)*	175.23	173.22	1.15	
%PD				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	2.97	2.84	4.24	53.90
DOC2TG2V3F1 (deneysel)*	6.44	5.89	8.48	

*Deneylerden elde edilen en iyi sonuçların kombinasyonu seçilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makale, yüzey pürüzlülüğünü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerini ve pekleşme derecesini en aza indirmek için Taguchi yaklaşımını kullanarak AISI 316L tornalama işleminin optimizasyonunu sunar. En iyi parametre kombinasyonunu belirlemek için Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulan deneyler yapılmıştır. İşleme parametrelerinin bu tepki değişkenleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur:

1. Varyans analizi (ANOVA), ilerleme oranının %79.60 oranında ortalama yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen parametredir. Düşük ilerleme oranları ortalama yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir.
2. Çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde en etkili parametreler, sırasıyla %37.67 oranla takım geometrisi, % 30.11 oranla ilerleme oranı ve %24.97 kesme hızıdır. QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu çevresel yüzey kalıntı gerilmelerinin daha düşük oluşmasını sağlamıştır.
3. Eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde en etkili parametreler, sırasıyla %33.48 oranla takım geometrisi, %31.77 kesme hızı ve % 25.69 oranla ilerleme oranı etkili olur. Eksenel yüzey kalıntı gerilmelerinin azaltılmasında QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu daha etkili olmuştur.
4. Pekleşme derecesi üzerine %44.17 oranla takım geometrisi, %24.96 oranla ilerleme oranı ve %22.95 ile kesme hızı etkilidir. QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu pekleşme derecesinin daha düşük elde edilmesini sağlamıştır.
5. Kesme derinliği, dikkate alınan cevap değişkenleri için düşük bir etkiye sahip olmasına rağmen, daha düşük kesme derinliği tüm cevap değişkenlerini olumlu etkilemiştir.
6. Takım temas uzunluğunu etkileyen tüm parametreler yüzey bütünlüğünü de etkiler. Özellikle, yüzey kalıntı gerilme bileşenleri ve pekleşme derecesi takım temas uzunluğunu etkileyen takım geometrisi, ilerleme ve kesme hızı gibi parametrelerden daha çok etkilenmiştir.
7. Çalışmadan elde edilen en iyi kombinasyon dikkate alınarak yapılan doğrulama test sonuçları, çalışmanın güvenilirliğini ortaya koymuş ve %95 güven aralığı içerisinde en iyi kombinasyon şartının pekleşme derecesinde %53.90, ortalama yüzey pürüzlülüğünde % 20.39, eksenel yüzey kalıntı gerilmesinde %5.61 ve çevresel yüzey kalıntı gerilmesinde % 1.89 iyileşme sağladığını teyit etmiştir.

8. Daha düşük çevresel ve aksenal yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi elde etmek için takım talaş temas uzunluğu kısa takım geometrileri seçilmeli, bununla beraber, düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları tercih edilmelidir.
9. İşleme performansını ve yüzey bütünlüğünü etkileyen başka faktörler dikkate alınarak çalışmanın devamı sağlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, “Gazi Üniversitesi – Bilimsel Araştırma Projeleri” kapsamında 07/2009–33 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, destekleri için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri’ ne teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaladhar, M., Subbaiah, K. V. & Rao C. H. S. (2012). Machining of austenitic stainless steels – a review. *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 12 (1/2), 178–192. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2012.048564>.
- [2] Gandarias, A., De Lacalle, L. N. L., Aizpitarte, X. & Lamikiz, A. (2008). Study of the performance of the turning and drilling of austenitic stainless steels using two coolant techniques. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3 (1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2008.017621>.
- [3] Youssef, H. A. (2016). *Machining of stainless steels and super alloys traditional and non-traditional techniques*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Gürbüz, H. (2012). *AISI 316L Çeliğin İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisi Ve Kaplama Tiplerinin Yüzey Bütünlüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] Gürbüz, H., Şeker, U. & Kafkas, F. (2017). Investigation of effects of cutting insert rake face forms on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 90, 3507–3522. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9652-7>.
- [6] Arunachalam, R. M., Manan, M. A. & Spowage, A. C. (2004). Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, 44, 1481–1491. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.005>.
- [7] Lucca, D. A, Brinksmeier, E. & Goch, G. (1998). Progress in assessing surface and subsurface integrity. *Annals of the CIRP*, 47 (2), 669–693. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63248-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63248-X).
- [8] Saini, S., Ahuja, I. S. & Sharma, V. S. (2012). The effect of cutting parameters on surface integrity in hard turning. *Applied Mechanics and Materials*, 110 (116), 751–757. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.751>.
- [9] Chou, Y. K. (2002). Surface hardening of AISI 4340 steel by machining: a preliminary investigation. *J. Mater. Process. Technol.*, 124, 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00132-2).
- [10] Pawade, R. S. & Joshi, S. S. (2011). Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 56, 47–62 <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3183-z>.
- [11] Memiş, F. & Turgut, Y. (2020). AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin cnc torna tezgahında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1 (1), 22–33. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/54121/724337>.

- [12] Şirin, E & Şirin, Ş. (2021). Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2 (1), 75–84. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/62181/901460>.
- [13] Günay, M. (2014). AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3), <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6704/89106>.
- [14] Günay, M. (2022). Modeling and multiple optimization in face milling of hardfacing welding applied steel: force, roughness, power. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.*, 236 (12), 6652–6664, <https://doi.org/10.1177/09544062211065998>.
- [15] Yücel, A. & Yıldırım, Ç. V. (2020). AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1 (3), 18–32, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/58430/824996>.
- [16] Kacal, A. & Yıldırım, F. (2013). Application of grey relational analysis in high-speed machining of hardened AISI D6 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227 (7), pp. 1566–1576. <https://doi.org/10.1177/0954406212466792>.
- [17] Pawade, R. S., Joshi, S. S. & Brahmanekar, P. K. (2008). Effect of cutting edge geometry and machining parameters on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. *Int J Mach Tools Manuf*, 48 (1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004>.
- [18] Lu, H. S., Chang, C. K., Hwang, N. C., & Chung, C. T. (2009). Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8), 3808–3817. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.030>.
- [19] Kıvık, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, pp.19–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.017>.
- [20] Gupta, A., Singh, H. & Aggarwal, A. (2011). Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel, *Expert Systems with Applications*, 38 (6), pp. 6822–6828. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.057>.
- [21] Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B. & Das, R. (2011). Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis. *Measurement*, 44 (10), 2149–2155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.022>.
- [22] Liu, C. R. & Barash, M. M. (1976). The mechanical state of the sub layer of a surface generated by chip-removal process Part 1: Cutting with a sharp tool. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 98(4), 1192–1201. <https://doi.org/10.1115/1.3439081>.
- [23] Roy, K. R. (1990). *A Primer on the Taguchi Method*, Competitive Manufacturing Series, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [24] Çiftçi, İ. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribol Int*, 39, 565–569. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.05.005>.
- [25] De Garmo, E. P., Black, J. T. & Kohser, R. A. (1997). *Materials and processes in manufacturing*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 214–652.

- [26] Gupta, M. & Kumar, S. (2015). Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD–GFRP using PCA and Taguchi method. *Eng. Sci. Technol. & Int. J.*, 18, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.09.006>.
- [27] Suresh, R. & Basavarajappa, S. (2014). Effect of process parameters on tool wear and surface roughness during turning of hardened steel with coated ceramic tool. *Procedia Mater Sci.*, 5, 1450–1459. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.464>.
- [28] Halverstadt, R. D. (1959). How to minimize and control residual machining stresses. *American Machinist*, 103 (22) 138.
- [29] Outeiro, J. C., Dias, A. M., Lebrun, J. L. & Astakhov, V. (2002). Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters. *Mach. Sci. Technol.*, 6 (2), 251–270. <https://doi.org/10.1081/MST-120005959>.
- [30] Shih, A. J. (1996). Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal cutting. *Int. J. Mech. Sci.*, 38(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00036-W](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00036-W).
- [31] Moufki, A., Molinari, A. & Dudzinski, D. (1998). Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. *J. Mech. Phys. Solids*, 46 (10), 2103–2138. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(98\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00032-5).
- [32] Sağlam, H., Ünsaçar, F. & Yaldiz, S. (2006). Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002>.
- [33] Outeiro, J. C., Umbrello, D. & M'Saoubi, R. (2006). Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46 (14), 1786–1794. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.11.013>.
- [34] Günay, M., Korkut, İ., Aslan, E. & Şeker, U. (2005). Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. *J. Mater. Process. Technol.*, 166, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.092>.
- [35] Ulutan, D. & Ozel, T. (2011), Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 51, 250–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>.
- [36] Dvivedi, A. & Kumar, P. (2007). Surface quality evaluation in ultrasonic drilling through the Taguchi technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34, 131–140. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0586-3>.
- [37] Sudhakara, D. & Prasanthi, G. (2014). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in wire electric discharge machining of P/M cold worked tool steel (Vanadis-4E). *Procedia Engineering*, 97, 1565–1576. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.440>.
- [38] Çetin, M. H., Özçelik, B., Kuram, E. & Demirbas, E. (2011). Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *J. Cleaner Prod.*, 19, 2049–2056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013>.