

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu

Mustafa KARABATAK¹ Fuat KARA*²

¹Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

²Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

(Geliş / Received : 14.01.2016 ; Kabul / Accepted : 24.02.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme parametrelerinin performansları araştırılmış ve optimum işleme şartları tespit edilmiştir. Tornalama deneyleri Taguchi L₉ orthogonal (dikey) dizinine göre yapılmış, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınmıştır. Taguchi metodu kullanılarak optimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerini veren kontrol faktörleri belirlenmiştir. Kontrol faktörleri olarak üç farklı kesme hızı (50, 100, 150 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,08, 0,16, 0,24 mm/dev) ve üç farklı kesme derinliği (0,25, 0,50, 0,75 mm) seçilmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak yapılan Varyans analizi (ANOVA) ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki seviyeleri belirlenmiştir. Son olarak doğrulama deneyleri yapılmış ve optimizasyonun başarıyla uygulandığı görülmüştür. Taguchi analizi sonucu, 100 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme hızı ve 0,25 mm kesme derinliği değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Bu kesme şartları için hesaplamalar ve doğrulama deneyleri sonucu Ra değerleri sırasıyla 0,280 µm ve 0,245 µm olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: AISI D2, Sert tornalama, Taguchi yöntemi, Varyans analizi, Yüzey pürüzlülüğü

Experimental Optimization of Surface Roughness in Hard Turning of AISI D2 Cold Work Tool Steel

ABSTRACT

In this study, performance of the cutting parameters that used in hard turning process of AISI D2 cold work tool steel have been researched and the optimum machining conditions have been identified. Experiments have been made according to Taguchi L₉ orthogonal array. The evaluation of the experimental results was based on the signal/noise (S/N) ratio. Control factors that given optimum surface roughness values were determined by using the Taguchi method. Three different cutting speeds (50, 100, 150 m/min), feed rates (0.08, 0.16, 0.24 mm/rev) and depth of cuts (0.25, 0.50, 0.75 mm) as control factors have been selected. The effect levels on the surface roughness of the control factors with analysis of variance (ANOVA) performed using the experimental results were determined. Finally, the confirmation tests were performed and showed that the optimization is successfully implemented. As a result Taguchi analysis, it was found the optimum results for surface roughness in cutting speed of 100 m/min, feed rate of 0.08 mm/rev and depth of cut 0.25 mm. The results of calculations and confirmation tests, the Ra values were found as 0.280 µm and 0.245 µm, respectively.

Keywords: AISI D2, Hard turning, Taguchi method, Analysis of variance, Surface roughness

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Soğuk iş takım çelikleri; 200°C'nin altında çalışan metalleri, şekillendirmek ve kesmek için üretilen kalıpların ve takımların imalatında kullanılan malzeme grubudur. Yüksek aşınma direnci, yüksek çatlama direnci, yüksek tokluğa ve yüksek sertleştirilme kabiliyetine sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği işlenebilirliği ve şekillendirilmesi kolay olduğundan imalatta çok kullanılan bir malzemedir [1]. AISI D2 soğuk iş takım çeliği genel olarak plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve delme takımları, derin çekme ve ekstrüzyon takımları, ölçme takımları, soğuk çekme makaraları,

makas bıçakları, ağaç bıçakları, kesme bıçakları, diş tarakları, çapak alma kalıpları gibi kırılmaya maruz kalan elemanların imalatında kullanılır. Bu parçaların imalatında, ısıl işlemde meydana gelen kusurlar dikkate alınarak ısıl işlemde sonra alınmak üzere bir miktar işleme payı bırakılmaktadır [2]. Bırakılan bu paylar çoğu zaman taşlama ve tornalama gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmektedir. Taşlama işleminin yüksek maliyeti ve birçok geometriye uygulanmasındaki sınırlamalar, sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde tornalama işlemini ön plana çıkarmıştır.

Sert tornalama işlemi, genellikle 40 ila 62 HRC arasında sertliktaki demir esaslı iş parçaları için düşük maliyetli, pozitif ekolojik etkilere sahip, yüksek verimlilikli bir örnek imalat sürecidir. Bu süreç dişliler, miller,

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: fuatkara@düzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 349-355

rulmanlar, kamlar, kalıp malzemeleri ve çeşitli motor ekipmanlarının imalatında popüler bir teknik haline gelmiştir [3]. Sert tornalama işlemi ile silindirik taşlama işlemi sonrasında elde edilen yüzey kalitesine ulaşmak mümkündür [4-6]. Bu tornalama işleminde taşlama kalitesinde bir yüzey pürüzlülüğünü yakalayabilmek için kesme parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Deneysel olarak optimum şartları belirlemek için çok fazla işleme yapmak gerekir ve bu da hem zaman hem maliyet açısından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, az sayıda deney ile optimum işleme şartlarını belirlemek için deneysel sonuçlara Taguchi, Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks), Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology) Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) gibi farklı optimizasyon teknikleri uygulanmaktadır [7-9]. Bu tekniklerden biri olan Taguchi metodu; deney sayısını azaltması, üretim ve test maliyetlerini düşürmesinin yanı sıra optimum işleme koşullarının belirlenmesinde az sayıda deney ile maliyeti olabildiğince düşürerek minimum zaman aralığında basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır [10-12]. Literatürde Taguchi metodunu içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [13-16].

Yücel ve Günay [17], sert tornalama işleminde oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerleri için kesme şartlarını optimize etmişlerdir. Sert tornalama deneyleri Taguchi L_{18} dikey dizilimi ile dizayn edilmiştir. Kesme şartları (kontrol faktörleri) olarak kesici takım malzemesi (CBN, seramik), kesme hızı (50, 100, 150 m/dak), ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) ve kesme derinliği (0,25, 0,50, 0,75 mm) seçilmiştir. Kesme şartlarının optimum seviyeleri en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan sinyal/gürültü (S/N) oranları kullanılarak belirlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri CBN takım ile elde edilmiştir. Asıl kesme kuvveti için optimum kesme şartları A1 (seramik takım), B1 (V=50 m/dak), C1 (f=0,05 mm/dev) ve D1 (a=0,25 mm) olarak, ortalama yüzey pürüzlülüğü için ise A2 (CBN takım), B1 (V=50 m/dak), C3 (f=0,1 mm/dev) ve D1 (a=0,25 mm) olarak tespit edilmiştir. Kesme kuvveti üzerindeki en etkili parametre %74,50'lik oran ile kesme derinliği olurken, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametre ise %75,78 ile ilerleme hızı olmuştur. Şirin vd., [18] farklı sertlikteki (21, 48, 56 HRC) AISI D2 soğuk iş takım çeliğine, farklı kesme parametrelerinde (ilerleme hızı: 0,05, 0,10, 0,15 mm/dev; kesme hızı: 70, 90, 110 m/dak) simetrik yüzey frezeleme işlemi uygulamışlardır. Deneyler, Taguchi L_9 dikey dizilimine göre gerçekleştirilerek deney sonuçlarının değerlendirilmesinde S/N oranları kullanılmıştır. Taguchi optimizasyonu ile optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri, 48 HRC sertliğindeki iş parçasının 0,05 mm/dev ilerleme hızında ve 70 m/dak kesme hızında işlenmesine karşılık gelen A2B1C1 seviyelerinde elde edilmiştir. ANOVA

analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili faktörün %55,66 ile kesme hızı olduğu, bunu sırasıyla %25,57 ile ilerleme hızı ve %5,92'lik oran ile malzeme sertliğinin takip ettiği görülmüştür. Yapılan doğrulama deneyleriyle optimizasyonun %95 güven aralığında başa-riyle uygulandığı görülmüştür. Sahoo [19], sertleştirilmiş AISI D2 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerine Taguchi ve regresyon analizi uygulamıştır. Yüzey pürüzlülüğünün tahmini için oluşturulan model L_{27} ortogonal dizine göre tasarlanmıştır. Çalışma-da ayrıca, kesme parametrelerinin etki oranlarını belirlemek için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu görülmüştür. Regresyon modelinde korelasyon katsayısı (R^2) 0,98 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, D2 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için geliştirilen modelin % 95 güven aralığında olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada Sharma vd., [20], farklı kesme hızı (51, 78, 123 m/dak), ilerleme (0,10, 0,15, 0,20 mm/dev) ve hava basıncı (5, 6, 7 bar) parametrelerinde AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin iki farklı minimum miktarda yağlama (MQL) tekniği ile tornalanmasındaki yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Soğutma sıvısı olarak nano sıvılı (nanofluids) MQL ve standart MQL tekniği uygulanmıştır. Deney sayıları Taguchi L_{18} ortogonal dizinine göre 18 deney şeklinde belirlenmiştir. Deneysel optimizasyon sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri; nano sıvılı MQL tekniğinde, 78 m/dak kesme hızı, 0,10 mm/dev ilerleme ve 6 bar basınçta yapılan deneyde ortalama 0,86 μ m olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, kalıp imalatında yaygın olarak kullanılan AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla deneyler Taguchi L_9 ortogonal dizinine göre tasarlanmış, yapılan optimizasyonla en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimal kesme parametresi değerleri belirlenmiştir. Bununla birlikte varyans analizi ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Son olarak yapılan doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Deney Numunesi ve Deney Düzenegi (Test Specimen and Experimental Setup)

Bu çalışmada, geleneksel ısıl işlem uygulanmış AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kuru kesme şartları altında tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılarak optimum işleme şartlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deneylerde kullanılan AISI D2 soğuk iş takım çeliği $\varnothing 61 \times 300$ mm ölçülerinde imal edilmiş olup kimyasal

Çizelge 1. AISI D2 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) (Chemical composition of AISI D2 steel)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1,575	0,32	0,30	0,024	0,0020	11,70	0,74	0,960

bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Numunelerin ısıtma işlemi; öncelikle 450 °C’de 30 dk., 650 °C’de 60 dk., 850 °C’de 30 dk. ön ısıtma, 1030 °C’de 60 dk. östenitleme, vakumlu fırında 4 Bar basınçta azotta soğutma, 200 °C’de 180 dk. birinci temperleme ve son olarak 350 °C’de 180 dk. ikinci temperleme işlemine tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ısıtma işlemi sonrasında numuneler 60-62 HRC sertlik değerine getirilmiştir.

Deneylerde kullanılan CNC torna tezgahı GOODWAY GLS-1500 marka olup motor gücü 7,5 KW’dır. Sert tornalama deneylerinde, TaeguTec firmasından temin edilen SNGA120408 AB30 kodlu kaplamasız seramik kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar, PSBNR 2020K12M kodlu takım tutucu ile torna tezgahına rijit bir şekilde bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

İşlenebilirlik çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir. İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Tablo 2’de teknik özellikleri verilen Taylor Hobson Surtronic 25 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. İşlenen yüzeylerden üç defa yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve bunların ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

analiz edebilmek için S/N oranı olarak bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılır. Deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/N) çevrilerek değerlendirme yapılır. S/N oranındaki S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir. Sinyal faktörü sistemden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılmayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir [21]. S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı nominal en iyidir, en büyük en iyidir ve en küçük en iyidir metotları kullanılır [22]. Bu çalışmadaki S/N değerlerinin belirlenmesinde, işleme verimliliği bakımından Ra değerinin en küçük olması istenildiği için Eşitlik 1’de verilen “en küçük en iyi” prensibine karşılık gelen formül kullanılmıştır.

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

Burada; y_i ölçülen yüzey pürüzlülük değerini, n ise yapılan deney sayısını ifade etmektedir. Kesme parametreleri, kesme hızı (V), ilerleme miktarı (f) ve kesme derinliği (a) olarak seçilmiştir. AISI D2 soğuk iş

Çizelge 2. Yüzey pürüzlülük cihazına ait teknik özellikler (Technical specifications of surface roughness measurement device)

Ölçüm aralığı Z-X eksen	350µm – 25mm
Sürücü ünitesi hızı	Ölçüm 0,25 mm/s; 0,5 mm/s Geri hareket: 0,8 mm/s
Tarama metodu	Diferansiyel indüksiyon
Parametreler	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr , A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Rvk, Mr 1, Mr 2, Vo
Örnekleme uzunluğu	Ic: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm fl: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm fh: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm
Büyütme özelliği	Dikey: 10-100.000 Yatay: 1-1.000
Yazıcı	Termal yazıcı
Ölçüm hızları	0,05mm/s, 0,1mm/s, 0,5mm/s, 1mm/s
Ağırlık	1,2kg
Ölçüm verileri	Hafıza kartı ile 50 ölçüme kadar kayıt özelliği - Yazılım programı ile verileri bilgisayara aktarabilme ve eğri form yüzeylerinde ölçüm yapabilme özelliği
Ekstra özellikler	- Ölçme esnasında probun uyguladığı kuvveti görebilme - Dokunmatik ekran

belirlenmiştir.

2.2. Taguchi Deney Tasarımı (Taguchi Experimental Design)

Deneyisel çalışmalarda doğru sonuca ulaşabilmek için doğru deney tasarımının yapılması gerekmektedir. Yapılan çalışmada, deney tasarım ve analiz yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yaklaşımda, sonuçları

kontrol çeliğinin sert tornalanmasında kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3’de verilmiştir. Deney sonuçlarına %95 güven aralığında Varyans Analizi (ANOVA) uygulanarak Ra üzerinde değişkenlerin etki seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi metoduna göre yapılan deney tasarımı ve istatistiksel analizler Minitab 15 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and levels)

Sembol	Kontrol faktörleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kesme hızı - V (m/dak)	50	100	150
B	İlerleme hızı - f (mm/dev)	0,08	0,16	0,24
C	Kesme derinliği - a (mm)	0,25	0,50	0,75

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu (Optimization of Surface Roughness)

AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerinde, Taguchi L₉ deney tasarımına göre gerçekleştirilen sert tornalama deneyleri sonucunda elde edilen Ra değerleri ile hesaplanan S/N oranları, Tablo 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Deney tasarımı, Ra ve S/N oranları (Experimental design, Ra and S/N ratios)

Deney numarası	(A) Kesme hızı (m/dak)	(B) İlerleme hızı (mm/dev)	(C) Kesme derinliği (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Ra - S/N oranı (dB)
1	1	1	1	0,424	7,452
2	1	2	2	2,433	-7,722
3	1	3	3	3,410	-10,655
4	2	1	2	0,320	9,897
5	2	2	3	1,442	-3,179
6	2	3	1	2,040	-6,192
7	3	1	3	0,462	6,707
8	3	2	1	1,040	-0,340
9	3	3	2	2,353	-7,432

Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (yüzey pürüzlülüğü) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanının belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/N yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tabloda en büyük S/N değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/N yanıt tablosu Tablo 5'te verilmiştir.

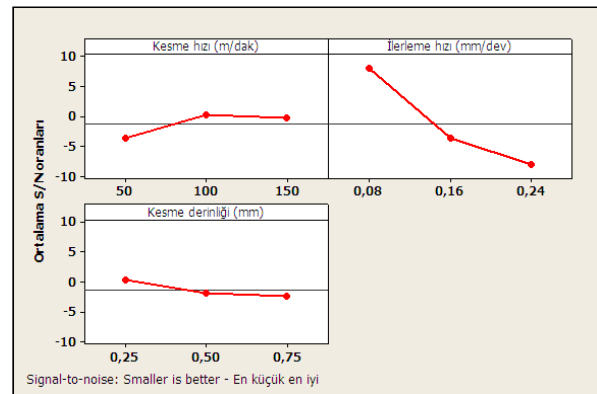
Çizelge 5. S/N yanıt tablosu (S/N response tables)

Seviyeler	Kontrol faktörleri		
	A	B	C
Seviye 1	-3,641	8,018	0,306
Seviye 2	0,175	-3,747	-1,752
Seviye 3	-0,355	-8,093	-2,375
Delta	3,816	16,112	2,682

Sıralama	2	1	3
----------	---	---	---

Tablo 5 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörlerin sırasıyla ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmıştır. Bununla birlikte AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında optimum yüzey pürüzlülüğü; kesme hızının üçüncü seviyesinde (A2), ilerleme hızının birinci seviyesinde

(B1) ve kesme derinliğinin birinci seviyesinde (C1) elde edilmiştir.

**Şekil 1.** S/N oranları için ana etki grafiği (Main effects plot for S/N ratios)

Kontrol faktörlerinin yani kesme parametrelerinin optimum değerlerini gösteren ana etki grafiği Şekil 1’de verilmiştir. S/N yanıt tablosunda olduğu gibi ana etki grafiğinde de en büyük S/N değerleri, o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Buna göre kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği için sırasıyla optimum değerler 100 m/dak, 0,08 mm/dev ve 0,25 mm olarak belirlenmiştir.

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

Deney tasarımında kullanılan tüm kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimleri, performans karakteristiği üzerinde nasıl bir etki meydana getirdiği ve parametrelerin farklı seviyelerinin performans karakteristiğinde ne gibi değişimlere sebep olduğunun belirlenebilmesi için varyans analizi yapılmaktadır [21]. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde, kontrol faktörlerinin etki seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Burada, her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları (Percentage Contribution Ratio-PCR) görülmektedir. Bu analiz %95 güvenirlilik ve %5 önem seviyeleriyle gerçekleştirilmiştir. Kontrol faktörlerinin etkisi F değerlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenir. F değeri en büyük olan faktör, sonuca en fazla etki eden faktördür.

ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin %77,88’lik oranla

Taguchi optimizasyon metodunu kullanarak, yapılan deneysel çalışma da yüzey pürüzlülüğü değerlerinin optimal sonuçları elde edilmiş ve ANOVA analizleri yapılarak sonuç üzerinde etkisi olan parametrelerin yüzde dağılımları belirlenmiştir. Optimizasyon işleminin son adımı, doğrulama deneylerinin yapılması ve optimizasyon işleminin geçerliliğinin test edilmesidir. Taguchi optimizasyonu sonucunda optimal yüzey pürüzlülüğü değerini veren parametre grubu bazen mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen ise yapılan deneylerin haricinde bir deney olabilmektedir. Yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü için optimum sonuca mevcut deneylerden farklı olarak A2B1C1 deney şartlarında ulaşılmıştır. Bu yüzden doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taguchi tarafından belirlenen optimum kesme şartlarındaki yüzey pürüzlülüğü değerinin hesaplanmasında Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 kullanılmıştır [23]. Bu eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, optimum şartlar için yüzey pürüzlülüğü değeri 0,280 µm olarak bulunmuştur.

$$\eta_G = \bar{\eta}_G + (\bar{A}_2 - \bar{\eta}_G) + (\bar{B}_1 - \bar{\eta}_G) + (\bar{C}_1 - \bar{\eta}_G) \quad (2)$$

$$Ra_{cal} = 10^{-\eta_G / 20} \quad (3)$$

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, yapılan optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır. Hesaplanan optimum tahmini yüzey pürüzlülüğü değerleri ve doğrulama deneyleri sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Çizelge 6. ANOVA tablosu (ANOVA table)

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F	P	PCR (%)
A	2	1,3219	0,6609	14,10	0,066	14,12
B	2	7,2908	3,6454	77,79	0,013	77,88
C	2	0,6450	0,3270	6,98	0,125	6,89
Hata	2	0,0937	0,0469			1,00
Toplam	8	9,3604				100

ilerleme hızı (Faktör B) olduğu görülmüştür. Kesme hızı ise %14,12’lük oranla ilerleme hızından sonra en etkili olan parametredir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en az etkiye sahip parametrenin %6,89’luk oranla kesme

Doğrulama deneyi sonucunda optimum şartlar için yüzey pürüzlülüğü değeri 0,245 µm olarak ölçülmüştür. Tablo 7’deki pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında, doğrulama deneyi sonuçları ile Taguchi yaklaşımından

Çizelge 7. Hesaplanan ve doğrulama deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of confirmation tests results to calculated values)

Hesaplanan değerler		Doğrulama deneyi sonuçları		Farklar	
Ra _{cal} (µm)	S/N _{cal} (dB)	Ra (µm)	S/N (dB)	Ra (µm)	S/N (dB)
0,280	11,048	0,245	12,216	0,011	1,168

derinliği olduğu görülmüştür. Yapılan varyans analizi ile Tablo 5’teki S/N yanıt tablosu ve Şekil 1’deki ana etki grafiği sonuçları doğrulanmıştır.

3.3. Doğrulama Deneyleri (Confirmation Tests)

elde edilen sonuçlar arasındaki farkın göz ardı edilebilecek bir seviyede olduğu dikkati çekmektedir. Bu sonuçlara dayanarak, Taguchi optimizasyonunun 0,05 anlamlılık düzeyinde başarıyla uygulandığını söylemek mümkündür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geleneksel ısıtma işlem görmüş AISI D2 (60-62 HRC) soğuk iş takım çeliğinin farklı kesme parametrelerinde kaplamasız seramik takım ile işlenmesi için bir dizi sert tornalama deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler Taguchi L₉ ortogonal dizinine göre tasarlanarak 27 deney yerine 9 deney ile optimal yüzey pürüzlülüğü değerlerine daha kısa sürede ulaşılmış, bu sayede zaman ve maliyetten kazanımlar elde edilmiştir. Bununla birlikte varyans analizi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Taguchi analizi sonucu, ortalama S/N oranlarının en yüksek değerlerinin alınmasıyla elde edilen optimum değerler incelendiğinde; kesme hızının ikinci seviyesi olan 100 m/dak, ilerleme hızının birinci seviyesi olan 0,08 mm/dev ve kesme derinliğinin birinci seviyesi olan 0,25 mm değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonucu verdiği görülmüştür.
- ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı (%77,88), daha sonra sırasıyla kesme hızı (%14,12) ve kesme derinliği (%6,89) olduğu görülmüştür.
- Optimum kesme şartlarındaki yüzey pürüzlülüğü sırasıyla hesaplamalar ve doğrulama deneyleri sonucu 0,280 µm ve 0,245 µm olarak bulunmuştur.
- Doğrulama deneyleri sonucunda Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığı görülmüştür.

Bu sonuçlara göre, AISI D2 çeliğinin sert tornalama işlemindeki optimum yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde, Taguchi deneysel tasarım metodunun başarılı bir şekilde uygulanabileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmayı 2015.07.04.388 nolu BAP projesiyle destekleyen Düzce Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunar. Bu makale, Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumunda (UMAS 2015) sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çiçek A., Ekici E., Uygur İ., Akıncıoğlu S. ve Kıvık T., "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması", *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 4(1): 1-9, (2012).
2. Şirin E., Turgut Y. ve Korkut İ., "Farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi", *Politeknik Dergisi*, 15(1): 9-14, (2012).
3. Töenshoff H. K., Arendt C. and Ben Amor R., "Cutting of Hardened Steel", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 49(2): 547-566, (2000).
4. Lima J. G., Avila R. F., Abrao A. M., Faustino M. and Davim J.P., "Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 388-395, (2005).
5. Agrawal A., Goel S., Rashid W. B. and Price M., "Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC)", *Applied Soft Computing*, 30: 279-286, (2015).
6. Dosbaeva G. K., El Hakim M. A., Shalaby M. A., Krzanowski J. E. and Veldhuis S. C., "Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50: 1-8, (2015).
7. Özel T., Karpat Y., Figueira L., and Paulo Davim J., "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts", *Journal of Materials Processing Technology*, 189: 192-198, (2007).
8. Göloğlu C. and Arslan Y., "Zig zag machining surface roughness modelling using evolutionary approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20: 203-210, (2009).
9. Çiçek A., Kıvık T. and Ekici E., "Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26: 295-305, (2015).
10. Taguchi G., Chowdhury S. and Wu Y., "Taguchi's Quality Engineering Handbook", *John Wiley&Sons Inc.*, New Jersey, USA, (2005).
11. Palanikumar K., "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites", *Measurement*, 44: 2138-2148, (2011).
12. Yücel E. ve Günay, M., "Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerin (Ni-Hard) tornalanmasında kesme kuvvetinin modellenmesi", *3. Ulusal Talah İşletim Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 489-495, (2012).
13. Kasman Ş., "Lazerle derin oyma tekniğinde EN 7075 alüminyum alaşımı için işlem parametrelerinin etkilerinin Taguchi methodu kullanılarak incelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2): 41-54, (2011).

14. Pınar A. M., Fırat K., Pınar A. F. ve Filiz S., “Kanal torna kaleminin yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu”, **3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu**, Ankara, Türkiye, 240-250, (2012).
15. Günay M. and Yücel E., “Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron”, *Measurement*, 46: 913-919, (2013).
16. Pınar A. M., Filiz S. and Ünlü B. K., “A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi:10.1007/s00170-015-7666-1.
17. Yücel E. and Günay M., “Modelling and optimization of the cutting conditions in hard turning of high-alloy white cast iron (Ni-Hard)”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(10): 2280-2290, (2013).
18. Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y. ve Korkut İ., “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3: 132-144, (2015).
19. Sahoo, A. K., “Application of Taguchi and regression analysis on surface roughness in machining hardened AISI D2 steel”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 5: 295–304, (2014).
20. Sharma, P., Singh Sidhu, B. and Sharma, J., “Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication”, *Journal of Cleaner Production*, 108: 72–79, (2015).
21. Turgut E. and Dikici A., “Optimization of design parameters of Co-axial heat exchanger with Taguchi method”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, Elazığ, Turkey, 278-281, (2011).
22. Masmiaati N. and Sarhan Ahmed A. D., “Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach”, *Measurement*, 60: 267–275, (2015).
23. Yücel E. and Saruhan H., “Design optimization of rotor-bearing system considering critical speed using Taguchi method”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, doi:10.1177/095440891557858.