



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Metodu İle Optimizasyonu

Emine ŞİRİN^{a,*}, Şenol ŞİRİN^a, Yakup TURGUT^b, İhsan KORKUT^b

^a Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gümüşova M.Y.O. Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: eminesirin@duzce.edu.tr

ÖZET

Yüzey kalitesi, birbiriyle etkileşim içinde olan makina ekipmanlarının çalışma verimini ve ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Kesici takım, işlenen malzeme, kesme parametreleri gibi yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok parametre vardır. Bu sebeple işleme parametrelerinin optimize edilerek, uygun işleme şartlarının ortaya konulması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, farklı sertliklerdeki AISI D2 soğuk iş takım çeliğine kuru işleme şartlarında, simetrik yüzey frezeleme yöntemi uygulanmıştır. İşleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülükleri araştırılarak, optimum işleme şartları tespit edilmiştir. Deneyler Taguchi L₉ dikey dizilimine göre yapılmış ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranları kullanılmıştır. Taguchi optimizasyonu ile, optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Kontrol faktörlerinin sonuçlara etkisi Varyans analizi (Anova) yardımıyla bulunmuştur. Anova sonuçlarına göre; yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme ve ilerleme hızı olduğu tespit edilmiştir. Doğrulama deneyleri yapılarak, optimizasyonun başarıyla uygulandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI D2, Yüzey pürüzlülüğü, Taguchi optimizasyonu

Optimization of Surface Roughness Using the Taguchi Method in Milling of AISI D2 Cold Work Tool Steel

ABSTRACT

Surface quality significantly affect to efficient and life of working machine parts that are contacted one another. There are important factors affecting to surface roughness such as cutting tool, processed material, cutting parameters. For this reason, appropriate processing conditions determined and the processing parameters must be optimized. In this study, AISI D2 cold work tool steel of different hardness was applied in dry machining conditions with symmetric milling method. Optimum processing conditions were determined and surface roughness were investigated depending on the cutting parameters. Experiments were carried out using Taguchi's L₉ orthogonal array and evaluation of experiment results have based on the signal/noise (S/N) rate. Optimal surface roughness values were determined using the Taguchi optimization. Analysis of variance (Anova) was used to determine the effects on the results of the control factors. According to the Anova results, the most significant variables affecting on surface roughness was determined cutting speed and feed rate respectively. Verification experiments made and optimization have been identified application of successfully.

Keywords: AISI D2, Surface roughness, Taguchi optimization

I. GİRİŞ

METAL işleme endüstrisinde; AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin istenen ölçüde malzeme sertlik değerine sahip olması, sertleştirme işlemi sonrası düşük deformasyonu ve yüksek yüzey aşınma direncine sahip olması sebebiyle; kalınlığı 6 mm'ye kadar soğuk sac kesme kalıpları, delme, zımbalama, kıvrırma, bükme, ezme, şişirme, şekillendirme kalıpları, boru ve profil haddeleme makaraları, sac kesme makinalarının kesici bıçakları, bağlantı elemanlarının soğuk şekil verme ve diş çekme kalıpları, ilaç, aşındırıcı tozların sıkıştırma kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, tel çekme haddeleri ve soğuk ekstrüzyon takımları, hassas kesme kalıpları, dilme bıçakları, kabartma takımları gibi kalıpların imalatında kullanılırlar [1,2,3]. Son yıllarda, özellikle otomotiv endüstrisinin gelişimiyle yüksek yakıt verimliliği, güvenlik ve daha az ağırlık gibi dizayn farklılıklarının tercih edilmesi sebebiyle, bu takım ve kalıp çeliklerine farklı yüzey işleme prosesleri uygulanmaktadır [4,5].

Temel metal işleme proseslerinden olan, yüzey frezeleme; imalat endüstrisinde, makina imalatında, otomotiv ve havacılık sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sebeple; metal işleme proseslerinden olan yüzey frezeleme yaygın olarak kullanılmaktadır [6,7]. Yüzey frezeleme sonucunda oluşan yüzey kalitesi, üretim maliyetlerini ve ürünün teknolojik kalitesini büyük ölçüde etkileyen önemli bir faktör olduğundan, bu çalışmada yüzey frezeleme prosesi tercih edilmiştir [8]. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalitesinin önemli bir göstergesi olmakla beraber, yüksek yüzey pürüzlülüğü makina ekipmanlarının ömürlerini de azaltmaktadır [9]. Yüzey pürüzlülüğü; takım tipi, deney malzemesi ve kesme parametreleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir [10].

Son yıllarda, Taguchi optimizasyon yönteminin yaygın olarak yüzey pürüzlülüğü üzerine uygulandığı birçok deneysel çalışma görülmektedir. Ti-6Al-4V alaşımlı malzeme, karbür takımlarla kuru şartlarda yüzey frezeleme yöntemiyle işlenmiştir. İşleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre bileşke kesme kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün ilerlemenin artmasıyla arttığı, kesme hızının artmasıyla ise azaldığı görülmüştür [11]. AISI H13 malzeme, titanyum kaplamalı kesici takımlarla freze tezgahında işlenerek taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Anova analizi ve deney sonuçlarına göre yüksek kesme hızı, düşük ilerleme ve düşük kesme derinliğinde iyi yüzey kalitesi ve düşük kesme kuvveti elde edilmiştir [12]. Hadfield çelik malzeme PVD ve CVD kaplamalı kesici takımlarla frezelenerek kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Anova analizi ve deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametre %82,38 oranıyla ilerleme olurken, yanak aşınması için ise %49,33 oranıyla kesme hızının en etkili parametre olduğu belirlenmiştir [13]. Al 7075 malzeme küresel uçlu parmak freze ile mikro frezeleme yöntemiyle işlenerek kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetleri üzerine etkileri Taguchi tabanlı Grey Relational Analysis (GRA) metoduyla optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametrelerin dış başına ilerleme ve takım aşınması olduğu belirlenmiştir. Kesme kuvvetlerine en fazla etki eden parametrenin ise devir sayısı olduğu görülmüştür. Anova analizleri sonucunda, yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin %78,124 oranla dış başına ilerleme olduğu tespit edilmiştir [14]. Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak, AA 7075'in frezeleme işleminde takım yolu deseni, kesme derinliği, kesme ve ilerleme hızı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri analiz ve ana etkiler grafiği ile değerlendirilmiş ve sistemin optimizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir [15]. Taguchi deney tasarımı kullanılarak, alüminyum malzeme yüzey frezeleme yöntemiyle işlenmiştir. Deneylerde frezeleme işlemi için yüzey pürüzlülüğüne devir ve ilerleme miktarının etkisinin, kesme derinliğinden daha büyük olduğu görülmüştür [8].

Yapılan bir diğer çalışmada, özellikle havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan, Alüminyum 2 serisi malzeme işlenerek, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri Taguchi ve yapay sinir ağları modelleriyle optimize edilmiştir. Deneylerde yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin diş başına ilerleme, kesme kuvveti için en etkili bileşenin F_x olduğu görülmüştür [16]. Ti6Al4V titanyum alaşımlı malzemeye, PVD kaplamalı takımlarla frezeleme işlemi uygulanmıştır. Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri Taguchi, genel algoritmalar ve yapay sinir ağları metotlarıyla optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin kesme hızı, en az etkili parametrenin ise kesme derinliği olduğu görülmüştür [17]. AISI D2 soğuk iş takım çeliği, freze tezgahında kaplamalı kesici takımlarla işlenerek, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım sehimi üzerine etkileri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin kesici takım diş başına ilerlemesi, ikinci etkili parametrenin ise kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Bu parametreleri sırasıyla kesme derinliği, talaş açısı, kesici takım ağız sayısı ve kesici takım çapı izlemiştir [18]. 1.2738 kalıp çeliğine, cep frezeleme işleminde, takım yollarının yüzey pürüzlülüğüne etkileri, Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tek yönlü ve arka-ön takım yollarında oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinin, spiral takım yollarında oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinden daha iyi olduğu görülmüştür [19]. Yapılan bir diğer çalışmada, yüksek alaşımlı beyaz dökme demirin (Ni-Hard) tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (F_c) modellenmiştir. Deney sonuçlarına göre F_c 'yi etkileyen en önemli parametrelerin sırasıyla, kesme derinliği ve ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir [20]. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demir (Ni-Hard) malzeme, seramik ve kübik-boron-nitrür takımlarla tornalanarak, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri, Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrelerin sırasıyla, kesme hızı ve ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir [21]. AISI 6061 T6 Alüminyum malzemeyi tornalamada, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve harcanan kesme gücüne etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin, %98,06 etki oranıyla ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir [22]. AISI 1030 çelik malzemeyi tornalamada, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri, Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre %48,54 oranla uç radüsü olurken, bunu %46,95 oranla ilerleme miktarı ve %3,39 oranla kesme derinliğinin takip ettiği görülmüştür [23]. 51 HRc sertlikteki AISI 4140 malzemeyi sert tornalamada, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün Ra ve Rz değerleri için en etkili parametreler sırasıyla ilerleme, kesme hızı ve kesme derinliği olmuştur [24]. Polytetrafluoroethylene (PTFE) malzemenin tornalanmasında, işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametreler ilerleme miktarı ve uç radüsü olurken, kesme kuvvetine etki eden en önemli parametreler ilerleme miktarı ve kesme derinliği olmuştur [25]. AISI 316 çelik malzemeyi tek ve çok katmanlı PVD kaplamalı kesici takımla delme işleminde, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti üzerine etkileri Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre %39,14 oranla kesici takım, itme kuvvetine etki eden en önemli parametre ise %82,77 oranla ilerleme miktarı olmuştur [26]. AISI 1050 malzemenin, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplarla delme işleminde, kesme parametrelerine bağlı performansları incelenmiştir. Optimum işleme şartlarının belirlenmesinde Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneylerde kaplamalı ve kaplamasız matkaplar üzerinde oluşan kesme kuvvetinin, ilerleme ve matkap çapı artışıyla belirgin bir şekilde artarken, kesme hızı artışıyla ise çok az da olsa bir artış gösterdiği tespit edilmiştir [27]. Görüldüğü üzere literatürde Taguchi yöntemiyle yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin optimizasyonu, başarılı bir şekilde yapılmıştır. Anova analizleriyle, deney faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Taguchi deney tasarımı metodu, en az sayıda deney ve az maliyetle işleme performansını artırarak optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır [28]. Taguchi, geliştirdiği dikey dizinler sayesinde deney sayılarını önemli ölçüde azaltarak, zaman ve maliyet kaybının artmasını engellemiştir. Taguchi metodunun en büyük avantajı, sonucu önceden tahmin edebilmesidir [29]. Taguchi metodu, çözümün sadece en az sayıda deneyle elde edilmesini sağlamakla kalmaz, yüksek kalitede proses ve ürün geliştirilmesini de her açıdan destekler. Prosesin veya ürünün üretim şartlarına ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı minimum hassasiyeti gösterir. Gerekli toleransların en düşük maliyetle sağlanması ve Taguchi kayıp fonksiyonu sayesinde ürünün toplumda yol açtığı kaybı en az seviyeye indirerek, yeni bir kalite maliyeti anlayışı geliştirir. Deney tasarımı ve analizi olarak Taguchi metodunun ana basamakları; 1-faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi, 2-her bir faktörün seviyelerinin belirlenmesi, 3-uygun dikey matrisin seçilmesi, 4-faktör ve etkileşimlerin dikey matrislerin sütunlarına aktarılması, 5-deneylerin yapılması, 6-verilerin analizi ve optimal seviyelerin belirlenmesi ve 7-doğrulama deneylerinin yapılmasıdır [30]. Dolayısıyla, Taguchi metoduyla gereksiz yapılacak deneylerden kaçınılmakta zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmaktadır [31].

Yüksek aşınma direnci, yüksek tokluğa sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği; kalıplar, zimbalar, makas bıçakları, çapak alma kalıpları gibi kırılmaya maruz kalan makina elemanlarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı ısı işlemler sonucunda sertleştirilen AISI D2 soğuk iş takım çeliği, parça geometrisine de bağlı olarak bir miktar çarpımalara maruz kalmaktadır. Isıl işlemler sonrası parçanın gerçek boyutlara getirilmesinde, taşlama işleminin her geometrideki malzemelere uygulanamamasından dolayı frezeleme, tornalama vb. işleme prosesleri tercih edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bu malzemelerde yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin optimizasyonu için birçok deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da işleme zamanını ve maliyeti önemli derecede arttırmaktadır.

Bu çalışmada; frezeleme işleminde, zaman ve maliyetten tasarruf sağlanması adına, Taguchi L₉ dikey dizilimi kullanılarak optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. İşleme koşullarından seçilen kontrol faktörlerinin (malzeme sertliği, ilerleme hızı, kesme hızı) yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri, doğrulama deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Anova (varyans) analizleriyle de tasarımıdaki tüm kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimleri tek tek hesaplanmıştır.

II. MATERYAL METOD VE VERİ ANALİZLERİ

A. DENEY MALZEMESİ

Deneylerde kullanılan AISI D2, yüksek karbon ve krom içermekte olup mikro yapısında yüksek miktarda karbür olması sebebiyle mükemmel aşınma direncine ve tokluğa sahiptir. Basınca dayanıklı, derinlemesine sertleşebilen, yüksek sıcaklıklarda sertlik kaybetmeye karşı yüksek dirence sahip ve ısı işlem esnasında oldukça iyi boyutsal kararlılık gösteren Ledeburitik yapıya sahip, soğuk iş takım çeliğidir [32]. AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal yapısı Tablo 1'de, fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

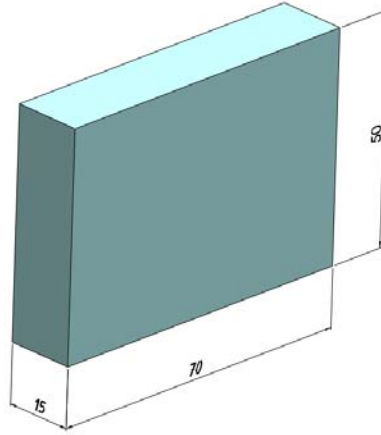
Tablo 1. AISI D2 soğuk iş takım çeliği kimyasal yapı % oranları

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
1.55	0.34	0.22	0.018	0.001	11.68	0.73	0.95	Diğer

Tablo 2. AISI D2 soğuk iş takım çeliği fiziksel özellikleri

Sıcaklık	Özgül Isı (J/kg°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl Genleşme Katsayısı	Isıl İletkenlik (W/m°C)	Elastisite Modülü (MPa)
20°C	460	7700	-	20	210000
200°C	-	2650	12.3*10 ⁻⁶ 11.2*10 ⁻⁶	21	200000
400°C	-	7600	12*10 ⁻⁶	23	180000

Deneylerde kullanılmak üzere 70x50x15 mm boyutlarında hazırlanan, üç grup deney malzemesi Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1) Deney malzeme boyutları

Bu malzemelerden herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış M1, önce sertleştirilmiş sonra 600 °C’de temperlenmiş M2, önce sertleştirilmiş sonra 400 °C’de temperlenmiş deney malzemeleri M3 olarak kodlanmıştır. Deney malzemelerine uygulanan ısıl işlemlerle ilgili detaylı bulgular, Tablo 3’te verilmiştir.

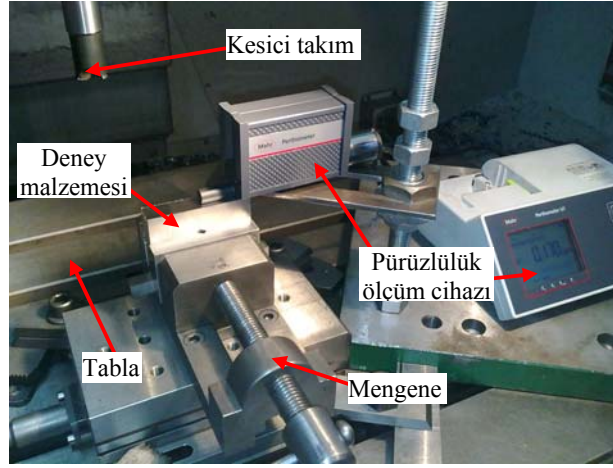
Tablo 3. Deney malzemelerinin ısıl işlem sıcaklıkları ve süreleri

Deney Malzemesi	Isıl İşlem Sıcaklığı	Isıl İşlem Süresi	Soğutucu Tipi	Temperleme Sıcaklığı	Temperleme Süresi	Sertlik Değeri
Malzeme 1 (M1)	-	-	-	-	-	21 HRc
Malzeme 2 (M2)	880 °C	2 saat	Yağda	600 °C	4 saat	48 HRc
Malzeme 3 (M3)	880 °C	2 saat	Yağda	400 °C	4 saat	56 HRc

Tablo 3'te görüldüğü gibi ısıt işlemler sonrası deney malzeme sertlikleri sırasıyla M1=21 HRc, M2=48 HRc ve M3=56 HRc sertliğe ulaşmıştır.

B. FREZELEME DENEYLERİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ

İşleme deneyleri, 10 Hp gücündeki Johnford VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde, kuru kesme şartlarında ve 0,5 mm sabit kesme derinliğinde yapılmıştır. Deneylerde Walter firmasından temin edilen, ADMT 120408R-F56 kodlu, WSP45 kalitesinde kesici takımlar ve 25 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda F4042.Z25.025.Z03.1101 kodlu takım tutucuyla tek ağız kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ile ilgili detaylar Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2) Deney düzeneği kurulumu ve yüzey pürüzlülük ölçümü

Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde, Mahr marka M1 model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). Standart tablolar yardımıyla örnekleme uzunluğu 0,8 mm, ölçme hızı 150 $\mu\text{m/s}$, ölçme kuvveti 0,7 mN, ölçüm uzunluğu 8 mm olarak alınmıştır. İşlenebilirlik kriterlerinden birisi olan ortalama yüzey pürüzlülük Ra değerleri, ISO 4287 [33] standardına göre, işlenmiş yüzeyler üzerindeki pürüzlülük profilindeki saptamaların aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir.

C. TAGUCHI METODU

Taguchi metodu; deney sayısını azaltması, üretim ve test maliyetlerini düşürmesi sebebiyle mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte optimum işleme koşullarının belirlenmesinde basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunar [13,24,34]. Taguchi optimizasyon metodu, kayıp fonksiyonu S/N oranına dönüştürerek, istenilen verilerle deney verileri arasındaki sapmayı hesaplar [13,35].

S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı *nominal en iyidir*, *en büyük en iyidir*, *en küçük en iyidir* metodları kullanılır [36]. Eş.1'de nominal en iyidir, Eş.2'de en büyük en iyidir, Eş.3'te en küçük en iyidir amaç fonksiyonu verilmiştir.

$$\text{Nominal en iyidir : } S / N = 10 \log \left(\bar{y} / S_y^2 \right) \quad (1)$$

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

$$\text{En küçük en iyidir : } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Eşitliklerdeki; \bar{y} gözlenen verilerin ortalamasını, S_y^2 ise y 'nin varyansını, n gözlem deney sayısını ve y gözlenen verileri ifade etmektedir [37]. Faktörlerin optimum seviyeleri belirlenirken, işleme verimliliğinin artırılması amacıyla, Ra değerlerinin en küçük olması gerekmektedir. Bu amaçla, S/N oranlarının hesaplanmasında performans karakteristiğinin *en küçük en iyidir* durumunda olan amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

C.1. DENEY TASARIMI

Çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin yüzey frezeleme işlemi sonrası oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) için kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Malzeme sertliği (M), ilerleme hızı (f) ve kesme hızı (Vc) değişken olarak seçilmiş, bu faktörlerin her biri için üç farklı seviye belirlenmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deneylerde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri

Sembol	Kontrol Faktörleri	Birim	Seviyeler			
			Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
A	Malzeme Sertlik	HRC	M	M1	M2	M3
B	İlerleme Hızı	mm/dev	f	0,05	0,10	0,15
C	Kesme Hızı	m/dak	Vc	70	90	110

Deney tasarımında, Taguchi yönteminin L_9 deney tasarımı kullanılmıştır. Deney dizileri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Taguchi L_9 deney tasarımı

Deney Numarası	Kontrol Faktörü		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Deney sonuçlarında, %95 ($\alpha=0,05$) güven düzeyinde Anova analizleri uygulanarak, yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde değişkenlerin etki seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi deney tasarımı ve Anova analizlerinin değerlendirilmesinde Minitab15 paket programı kullanılmıştır.

III. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI

A. S/N ORANLARININ ANALİZLERİ

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için kontrol faktörlerinin her kombinasyonu deney tasarımında ölçülür, kontrol faktörlerinin optimizasyonunda S/N oranları kullanılır. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, ürün kalitesi, maliyeti ve ömrü açısından büyük bir öneme sahiptir.

AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerinde, Taguchi'nin L_9 deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, elde edilen Ra değerleri ile hesaplanan S/N oranları, Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'ya göre yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması (T_{Ra}) 0,193 μm , Ra-S/N oranı aritmetik ortalaması (TRa) 14,485 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Deney sonuçları ve S/N değerleri

Deney Numarası	Kontrol Faktörü			Yüzey Pürüzlülük Ra (μm)	Ra - S/N oranı (dB)
	A	B	C		
1	1	1	1	0,140	17,0774
2	1	2	2	0,169	15,4423
3	1	3	3	0,263	11,6009
4	2	1	2	0,168	15,4938
5	2	2	3	0,230	12,7654
6	2	3	1	0,148	16,5948
7	3	1	3	0,199	14,0229
8	3	2	1	0,168	15,4938
9	3	3	2	0,255	11,8692

$$T_{Ra} \text{ (Ra aritmetik ortalaması)} = 0,193 \mu\text{m}$$
$$TRa \text{ (Ra-S/N aritmetik ortalaması)} = 14,485 \text{ dB}$$

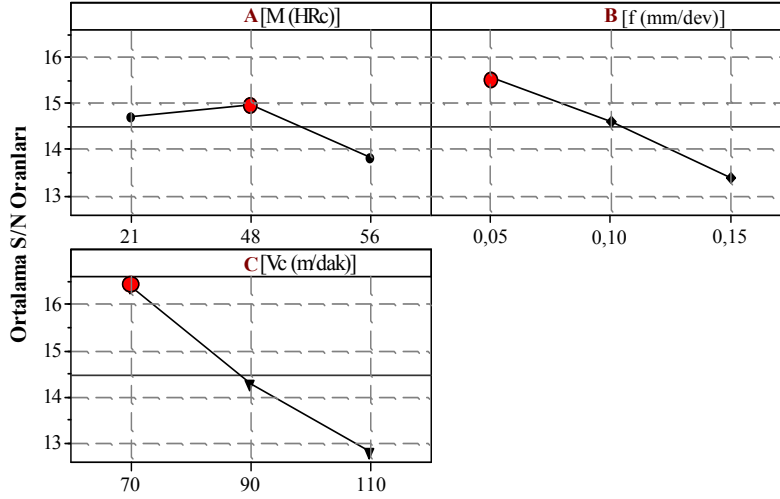
Analizlerde, yüzey pürüzlülüğüne kontrol faktörlerinin etkisi (M, f, Vc), Tablo 7'de verilmiştir. Kontrol faktörlerine ait optimum seviyelerin belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle oluşturulan S/N yanıt tablosu kullanılmaktadır. Taguchi teknikleri kullanılarak oluşturulan bu tablodaki en büyük S/N değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir.

Tablo 7. S/N yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri		
	Yüzey Pürüzlülük (Ra)		
	A	B	C
Seviye 1	14,71	15,53	16,39
Seviye 2	14,95	14,57	14,27
Seviye 3	1,16	13,35	12,80
Delta	1,16	2,18	3,59

Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörü optimum seviyeleri koyu ile gösterilmiştir

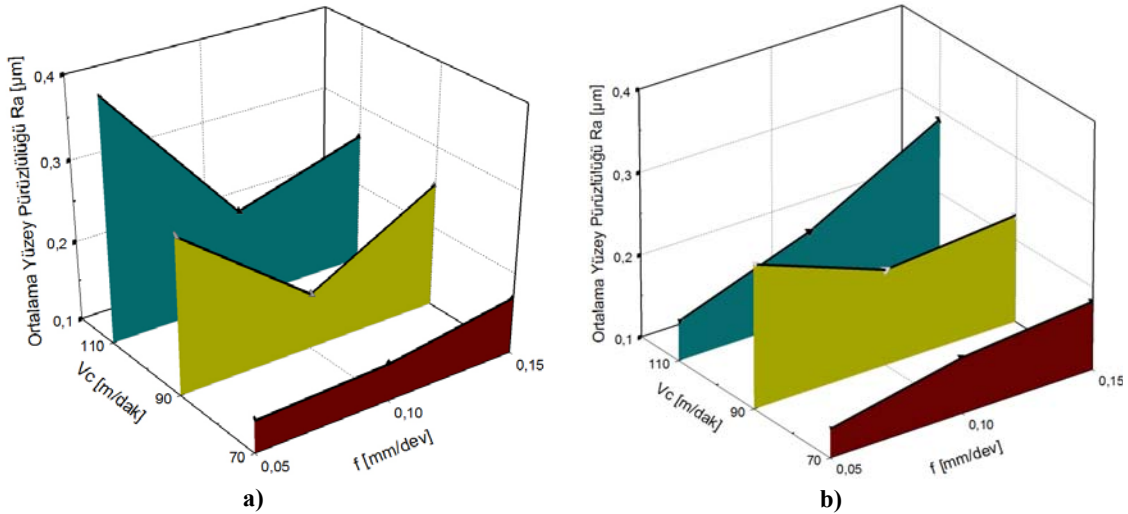
Taguchi yöntemiyle elde edilen kontrol faktörlerinin etkilerini gösteren S/N ana etki grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

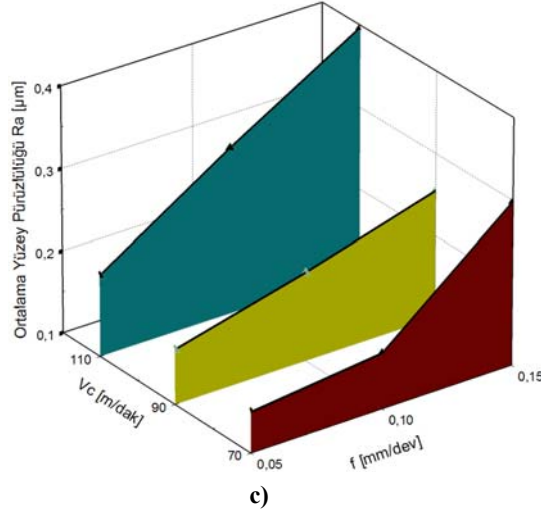


Şekil 3. S/N Oranları ana etki grafiği

B. DENEYLERDE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

S/N oranları ve seviyelere göre; R_a için A faktörü S/N=14,95, B faktörü S/N=15,39 ve C faktörü=16,39 optimum değerlerine sahiptir. Bir başka ifadeyle, R_a için; 48 HRc sertlikteki M2 deney malzemesi (A_2), 0,05 mm/dev f ilerleme hızı (B_1) ve 70 m/dak V_c kesme hızı (C_1) optimum değerleridir. Şekil 4'te farklı sertliklere sahip deney malzemelerinin (M1: 21 HRc, M2:48 HRc, M3:56 HRc), deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Taguchi L_9 deney tasarımı sonuçlarıyla deneyler sonucunda elde edilen veriler aynıdır.





Şekil 4. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri a)M1, b)M2, c)M3

Şekil 4 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü değeri en düşük Şekil 4-b’de 48 HRc sertlikteki deney malzemesinde, 70 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında olduğu görülmektedir ($R_a=0,135 \mu\text{m}$).

C. ANOVA SONUÇLARI

Deney tasarımında kullanılan tüm kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimlerinin belirlenmesinde, Anova yöntemi kullanılmıştır [37]. Tablo 8’de yüzey pürüzlülüğü için Anova sonuçları görülmektedir. Her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki anlamlılık düzeyini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi DF , kareler toplamı SS , kareler ortalaması MS , F değerleri ve yüzde etki oranları PCR görülmektedir [21]. Bu analiz %95 güvenirlilik ve %5 önem seviyeleriyle gerçekleştirilmiştir. Anova’daki kontrol faktörlerinin etkisi F değerlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenir. F değeri en büyük olan faktör, sonuca en fazla etki eden faktördür. Anova sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre %55,66 oranla kesme hızıdır (C). Anova sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden kontrol faktörleri sırasıyla; C (kesme hızı- V_c) %55,66, B (ilerleme hızı- f) %25,57 ve A (deney malzeme sertliği- M) %5,92 etki oranlarına sahiptir. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %12,85 etki oranında kalmıştır.

Tablo 8. Yüzey pürüzlülüğünün varyans analizi

Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi [DF]	Kareler Toplamı [SS]	Kareler Ortalaması [MS]	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı [PCR] (%)
A	2	0,000995	0,000497	0,46	0,685	5,92
B	2	0,004298	0,002149	1,99	0,335	25,57
C	2	0,009355	0,004677	4,33	0,188	55,66
Hata	2	0,002161	0,001080			12,85
Toplam	8	0,016808				100

D. OPTİMUM YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Taguchi optimizasyon tekniğiyle, doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi için optimum koşullar belirlenir [37]. Optimum yüzey pürüzlülüğü tahmini değerleri hesaplanmasında Eş.4 kullanılmıştır.

$$Ra_p = T_{Ra} + (A_2 - T_{Ra}) + (B_1 - T_{Ra}) + (C_1 - T_{Ra}) \quad (4)$$

Bu eşitlikte; A₂B₁C₁ optimum koşulu için yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması Ra_p Tablo 9'daki ve deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük aritmetik ortalaması T_{Ra} Tablo 6'daki veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörü ortalama tepki değerleri Tablo 9'da görülmektedir.

Tablo 9. Ortalama tepki tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörü		
	Yüzey Pürüzlülüğü		
	Ra (μm)		
	A	B	C
Seviye 1	0,1907	0,1690	0,1520
Seviye 2	0,1820	0,1890	0,1973
Seviye 3	0,2073	0,2220	0,2307
Delta	0,0253	0,0530	0,0787

Yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörü optimal seviyeleri koyu ile gösterilmiştir

Eş.4'te, Tablo 9 ve Tablo 6'dan alınan değerler yerlerine konulduğunda Ra_p= 0,117 μm olarak hesaplanır.

E. DOĞRULAMA DENEYLERİ

Taguchi metodunda, değişken seviyelerin optimal değerlerinin belirlenmesinden sonra yapılan doğrulama deneylerinde elde edilen sonuçlar, optimizasyon değerleri aralığında olmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü Ra için belirlenen değişken seviyelerin optimum değerleri (A₂B₁C₁) ve gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde, Eş.5 ve Eş.6'dan hesaplanan Güven Aralığı (CI) sonuçları dikkate alınır [38].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;f_e} x V_e x \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (5)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + [T_{dof}]} \quad (6)$$

Eş.5'te yer alan F_{α;1;f_e}, α önem seviyesini, f_e serbestlik derecesinin hatasını, V_e varyansın hatasını, n_{eff} gerçek tekrar sayısını ve r doğrulama deneyi tekrar sayısını göstermektedir. Eş.6'da ise N toplam deney sayısını ve T_{dof} ise serbestlik derecesinin ana faktörlerinin toplamını ifade etmektedir.

F_{0.05;1;2}= 18,5128 (F test tablosundan), V_e =0,001080 (Tablo 8), r =3, n_{eff} =3,857. Eş.5'te değerler yerlerine konulduğunda Güven Aralığı (CI) =±0,106 olarak bulunmuştur. %95 güvenirlikte tahmini ortalama optimal yüzey pürüzlülüğünün güven aralığı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$[Ra_p] - [CI] < Ra_d < [Ra_p] + [CI] \dots [0,117-0,109] < Ra_d < [0,117+0,109] = [0,008] < \mathbf{0,135} < [0,226]$$

Doğrulama deney sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülük değeri $R_{ad}=0,135 \mu\text{m}$, güven aralığı değerleri içinde yer aldığından, Taguchi yöntemiyle 0,05 anlamlılık düzeyinde optimizasyonun başarılı olduğu görülmüştür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çelik malzemelere, kuru işleme şartlarında simetrik yüzey frezeleme yöntemi uygulanmıştır. Optimal işleme şartlarının belirlenmesinde Taguchi optimizasyon metodu başarılı olmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analiz sonuçları için Anova kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin S/N oranları ile belirlenen yüzey pürüzlülüğünün optimum değerleri $A_2B_1C_1$ olarak belirlenmiştir [48 HRc sertlikteki M2 deney malzemesi (A_2), 0,05 mm/dev f ilerleme hızı (B_1) ve 70 m/dak V_c kesme hızı (C_1)].
- İstatistiksel analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne en etkili faktörün C (kesme hızı) %55,66 olduğu, bunu sırasıyla B (ilerleme hızı) %25,57 ve A (malzeme sertliği) % 5,92 takip ettiği görülmüştür.
- Doğrulama deneyi sonucunda elde edilen veriler, %95 güven aralığında yapılan doğrulama deneyleriyle optimizasyon başarıyla gerçekleştirilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] C. Maycoln Depianti, B. Antônio César, F. Jr Adonias Ribeiro, *Wear* **317** (2014) 188–193.
- [2] C.K.N. Oliveira, L.C. Casteletti, N. A. Lombardi, G.E.D. TOTTEN, S.C. Heck, *Vacuum* **84** (2010) 792–796.
- [3] E. Şirin, *AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2010).
- [4] K.T. Cho, K.Song, S. H. Oh, Y.-K. Lee, W. B. Lee, *Surface & Coatings Technology* **251** (2014) 115–121.
- [5] P. Hein, J. Wilsius, *Steel Research International*, **79(2)** (2008) 85–91.
- [6] T.S. Lee, Y.J. Lin, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* **16** (2000) 773–783.
- [7] Y. Altıntaş, *Int. J. Mach. Tool Manuf.* **34 (4)** (1994) 461–472.
- [8] J.Z. Zhang, J.C. Chen, E.D. Kirby, *J. Mater. Process. Technology* **184** (2007) 233–239.
- [9] P. Fabrício José, P. Anderson Paulo de, B. Pedro Paulo, F. João Roberto, S. Messias Borges da, *Expert Systems with Applications* **39** (2012) 7776–7787.
- [10] Y. Karpat, T. Özel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **35** (2008) 234–247.
- [11] M. Günay, A. Kaçal, Y. Turgut, *e-J. New World Sci. Acad. Eng. Sci.* **6 (1)** (2011) 428–440.
- [12] J.A. Ghani, I.A. Choudhury, H.H. Hassan, *J. Mater. Processing Technol.* **145** (2004) 84–92.
- [13] T. Kıvak, *Measurement* **50** (2014) 19–28.
- [14] E. Kuram, B. Özçelik, *Measurement* **46** (2013) 1849–1864.
- [15] A. M. Pınar, E. Atik, U. Çavdar, *AA 7075 alaşımının frezelemede kesme hızı, ilerleme oranı, işleme deseni ve talaş derinliği işlem parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki*

- etkilerinin incelenmesi*, **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir-Türkiye, (2010) 251.
- [16] P.G. Benardos, G.C. Vosniakos, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* **18** (2002) 343–354.
- [17] I.N. Tansel, S. Gülmez, M. Demetgül, S. Aykut, *Expert Systems with Applications* **38** (2011) 4780–4789.
- [18] B. Bakır, M. Kurt, G. Basmacı, O. Girit, *Frezelemede kesici takım çapı, ağız sayısı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sehimlerine etkileri*, **3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir-Türkiye (2012) 138.
- [19] C. Göloğlu, N. Sakarya, *J. Mater. Process. Technol.* **206** (2008) 7–15.
- [20] E. Yücel, M. Günay, *Yüksek alaşımli beyaz dökme demirlerin (Ni-Hard) tornalanmasında kesme kuvvetinin modellenmesi*, **3. Ulusal Talaş İmalat Sempozyumu**, Ankara- Türkiye (2012) 489-495.
- [21] M. Günay, E. Yücel, *Measurement* **46** (2013) 913–919.
- [22] C. Camposeco-Negrete, *Journal of Cleaner Production* **53** (2013) 195-203.
- [23] M. Nalbant, H. Gökkaya, G. Sur, *Materials and Design* **28** (2007) 1379–1385.
- [24] İ. Asiltürk, H. Akkuş, *Measurement* **44** (2011) 1697–1704.
- [25] C. Fetecau, F. Stan, *Measurement* **45** (2012) 1367–1379.
- [26] T. Kıvak, G. Samtaş, A. Çiçek, *Measurement* **45** (2012) 1547–1557.
- [27] G. Meral, M. Sarıkaya, H. Dilipak, *Erciyes Üniv. Fen Bilimleri Enst. Dergisi*, **27 (4)** (2011) 332-338.
- [28] İ. Asiltürk, S. Neşeli, *Measurement* **45** (2012) 785–794.
- [29] D. Taylan, *Taguchi deney tasarımı uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta-Türkiye, (2009).
- [30] Y. H. Chen, S. C. Tam, W. L. Chen, H. Y. Zheng, *International Journal of Materials & Product Technology* **11** (1996) 333-344.
- [31] M. Ay, A. Turhan, *Electronic Journal of Machine Technologies* **7** (2010) 55-67.
- [32] M. Erdoğan, *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri* 1. Cilt, Nobel Yayın Dağıtım, (2000).
- [33] ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters*, International Organization for Standardization, Geneva, (1997).
- [34] K. Palanikumar, *Measurement* **44** (2011) 2138–2148.
- [35] O. Köksoy, Z.F. Muluk, *Gazi University Journal of Science*. **17 (1)** (2004) 59–70.
- [36] N. Masmiahi, Ahmed A.D. Sarhan, *Measurement* **60** (2015) 267–275.
- [37] N. Mandal, B. Doloi, B. Mondal, R. Das, *Measurement* **44** (2011) 2149-2155.
- [38] P.J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill International Book Company, New York, (1996).