



Evaluation of tool wear for hard turning operations through response surface methodology

Dilek Murat¹ , Cihat Ensarioğlu² , Necmi Gürsakaç¹ , Ali Oral³ , M. Cemal Çakır²

¹Uludağ University, Department of Econometrics, 16059, Bursa, Turkey

²Uludağ University, Department of Mechanical Engineering, 16059, Bursa, Turkey

³Balıkesir University, Department of Mechanical Engineering, 10100, Balıkesir, Turkey

Highlights:

- Experimental investigation of the machinability of hard materials
- Modeling of the functional relationship between tool wear and cutting parameters
- Cutting parameter optimization for minimum tool wear

Keywords:

- Hard turning
- Tool wear
- Response Surface Methodology
- Central Composite Design

Article Info:

Received: 28.02.2017

Accepted: 21.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416427

Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Dilek Murat

e-mail:

dilekm@uludag.edu.tr

phone: +90 224 294 0732

Graphical/Tabular Abstract

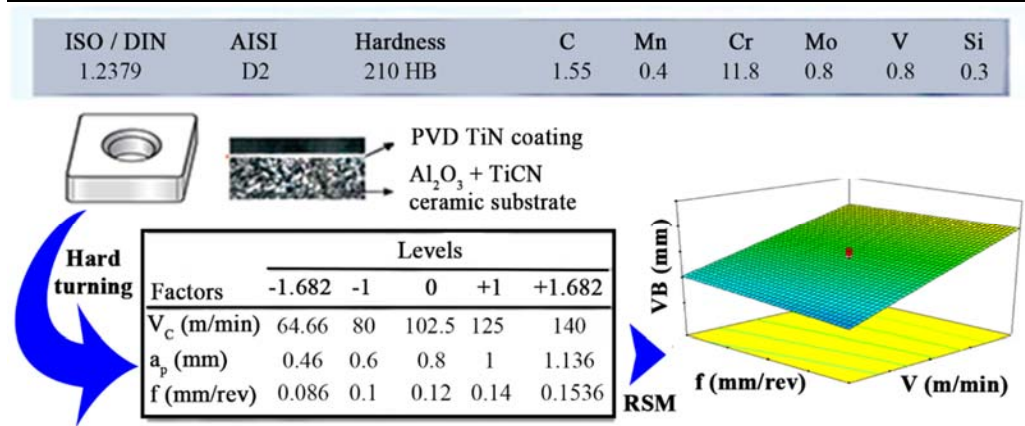


Figure A. Exploring the relationship between tool wear and the cutting parameters in hard turning by using RSM

Purpose:

The aim of the study was to investigate the relationship between tool wear and the cutting parameters (cutting speed, V_c ; feed, f ; depth of cut, a_p) in hard part turning operations of cold work tool steel AISI D2 (62 HRC) using ceramic inserts.

Theory and Methods:

Experimental modeling and analysis were performed after applying a Central Composite Design (CCD), an experimental design tool in Response Surface Methodology (RSM).

Results:

According to ANOVA results; main effects of V_c and f , and interaction of $V_c \cdot f$ were the significant factors. Cutting speed was the most significant factor, followed by the cutting speed – feed interaction, and feed, respectively.

Adjusted R-squared value calculated for the response surface model was found to be 0.9542, which means that the variance in tool wear could be explained by the significant factors determined.

Examining the response surfaces, it was observed that decreasing cutting speed and feed led to a lower wear. On the contrary, depth of cut was not significantly influential on tool wear.

Employing the generated model, the minimum wear was obtained as 0.077 mm. The levels of the cutting parameters giving this optimal value were $V_c=84.90$ m/min, $f=0.12$ mm/rev, and $a_p=0.60$ mm.

Conclusion:

As well as cutting speed being the most influential factor, decreases in cutting speed and feed were observed to minimize the tool wear. No significance of depth of cut on tool wear was encountered through the analysis. In the last part of the work; optimum tool wear values, as well as the cutting parameter values that give these optimum values were determined.



Sert malzemelerin tornalanmasında takım aşınmasının tepki yüzeyi metodolojisi ile incelenmesi

Dilek Murat^{1*}, Cihat Ensarioğlu², Necmi Gürsakal¹, Ali Oral³, M. Cemal Çakır²

¹Uludağ Üniversitesi, Ekonometri Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

²Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

³Bahkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10100, Bahkesir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sert malzemelerin işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi
- Takım aşınması ve kesme parametreleri arasındaki fonksiyonel ilişkinin modellenmesi
- Minimum takım aşınması için kesme parametresi optimizasyonu

Makale Bilgileri

Geliş: 28.02.2017

Kabul: 21.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416427

Anahtar Kelimeler:

Sert malzeme tornalama,
takım aşınması,
tepki yüzeyi metodolojisi,
merkezi bileşik tasarım

ÖZET

Bu çalışmada, çekirdeğine kadar 62 HRC sertliğine sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliği iş parçalarının (AISI D2) kaplamalı seramik takımlarla (CNGA 120404 KY4400) tornalanması işlemlerinde takım aşınması – kesme parametreleri (kesme hızı, V_c ; ilerleme, f ; kesme derinliği, a_p) ilişkisi incelenmiştir. Tepki Yüzeyi Metodolojisi'nde (TYM) kullanılan Merkezi Bileşik Tasarım (MBT) ile deney planlaması yapılarak, modelleme ve analiz gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı en etkili faktör olmak üzere; kesme hızı ve ilerlemedeki düşüşün, takım aşınmasını azaltacağı gözlenmiştir. Kesme derinliğinin ise, aşınma üzerinde anlamlı bir etkisine rastlanmamıştır. Çalışmanın sonunda, optimum takım aşınması değeri ve bu değere ulaşmak için gerekli kesme parametresi seviyeleri belirlenmiştir.

Evaluation of tool wear for hard turning operations through response surface methodology

H I G H L I G H T S

- Experimental investigation of the machinability of hard materials
- Modeling of the functional relationship between tool wear and cutting parameters
- Cutting parameter optimization for minimum tool wear

Article Info

Received: 28.02.2017

Accepted: 21.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416427

Keywords:

Hard turning,
tool wear,
response surface
methodology,
central composite design

ABSTRACT

In the present work, the relationship between tool wear and the cutting parameters (cutting speed, V_c ; feed, f ; depth of cut, a_p) was investigated in hard part turning operations of cold work tool steel (AISI D2) hardened to 62 HRC up to its core. Ceramic inserts (CNGA 120404 KY4400) were used in the operations. Experimental modeling and analysis were performed after applying a Central Composite Design (CCD), an experimental design tool in Response Surface Methodology (RSM). As well as cutting speed being the most influential factor, decreases in cutting speed and feed were observed to minimize the tool wear. No significance of a_p on tool wear was encountered through the analysis. In the last part of the work; optimum tool wear values, as well as the cutting parameter values that give these optimum values were determined.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sert malzemelerin tormalanması ($HRC > 45$); otomotiv, yataklama, kalıp, hidrolik gibi endüstrilerde büyük bir ilgiyle karşılanmıştır. Bunun en önemli sebebi; kaba talaş kaldırma – ısıl işlem – son taşlama aşamalarından oluşan geleneksel sürecin bertaraf edilmesi; bunun yerini, ısıl işlem görmüş hammaddenin direkt işlenmesi sürecinin almasıdır [1]. Karmaşık geometrilerin işlenebilmesi, tek bağlamada kaba ve ince işlemin yapılabilmesi [2], imalattaki değişikliklere karşı büyük esneklik sağlanması, yüksek talaş hacmi [3], taşlamaya yakın hatta bazen daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmesi, kuru kesme yapılabilmesiyle çevre dostu üretim [4]; bu yöntemin avantajları arasındadır. Bu yöntemle işlenebilen malzemeler arasında; sementasyon (yüzey sertleştirme) çelikleri, süper-alaşım, nitrürlenmiş çelikler, sert-krom kaplı çelikler [3], sertleştirilmiş alaşım çelikleri, takım çelikleri [5] ve ısıl işlem görmüş toz metalürjisi ürünleri [6] sayılabilir. Sert malzeme tormalama metoduna geçiş yönünde bir eğilim olsa da bazı sorunlardan dolayı bu geçiş beklendiği kadar hızlı olmamıştır. Yüzey ve yüzey-altı mikro-yapının değişmesi ve çeki yönlü yüksek kalıntı gerilmelerin oluşması dışında, (geometrik şekil ve yüzey pürüzlülüğü değerini de etkileyecek olan) hızlı takım aşınması, en önemli sorunlar arasında bulunmaktadır [7]. Bu işlemlerde çok-kristalli kübik bor nitrür (PCBN), çok-kristalli elmas (PCD) ve seramik gibi maliyeti yüksek takımların kullanılması; minimum takım aşınması ve minimum üretim maliyetini sağlayacak en uygun kesme parametresi değerlerinin belirlenmesini; bunun da minimum deney sayısı ile gerçekleştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu amaçla uygulanan süreç optimizasyonu, optimum kesme parametrelerinin düşük maliyetli matematiksel modellerle belirlenmesini içerir [8].

Aktif bir istatistiksel yöntem olan deney tasarımında, planlanan bir dizi deney kullanılarak, girdilerdeki değişime karşılık çıktılardaki değişimin gözlenmesiyle, sürecin iyileştirilmesine yardım edebilecek bilgiler üretilmesi sağlanır [9]. Bu yöntem, problem olan değişkenliğin birkaç temel nedenini belirleyerek neden-sonuç ilişkisi kurmaya yarar [10]. Doğrusal veya polinomial regresyon, yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi deneysel-tabanlı modelleme teknikleri yanında; bunları da içerebilen Tepki Yüzeyi Metodolojisi / TYM, Taguchi, genetik algoritma gibi optimizasyon teknikleri; sert parça tormalama işleminin incelenmesinde kullanılan yöntemlerdir [8]. Bu çalışmada; çekirdeğe dek sertleştirilmiş (62 HRC) soğuk iş takım çeliğinden numunelerin seramik kesici takımlarla tormalanması işleminde, kesme parametreleri – takım aşınması ilişkisinin belirlenmesi ve takım aşınmasının minimize edilmesi amacıyla TYM kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Sert malzemelerin tormalanması yönteminin önceki kısımda bahsi geçen potansiyel avantajları, bu yöntemin bilimsel çalışmalara konu olmasını beraberinde getirmiştir. Bununla

beraber, takım ömrü, üretim maliyeti ve verimlilik açısından talaşlı imalat endüstrisinde önemli yere sahip olan bir karakteristiktir [11]. Bu kapsamda; farklı deneysel tasarım ve analiz araçlarını kullanarak, kesme parametreleri ile (bir işlenebilirlik kriteri olan) takım aşınması arasındaki ilişkiyi inceleyen bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Taguchi'nin geliştirdiği Taguchi ortogonal dizileri, yüksek derecede kesirli deney planlarının oluşturulmasını sağlamaktadır. Böylece, deneysel çalışmanın süresi ve maliyeti düşmektedir [12]. TYM ise, incelenen süreç veya sistemin modellenmesinde ve optimizasyonunda kullanılmaktadır. Girdi değişkenlerinin eşzamanlı değiştiği, tepki değişkeni olarak adlandırılan bağımlı değişkenin tahmin edilmesi gerektiği durumlarda en iyi yaklaşım TYM'dir. Bu yöntemde, bağımlı değişkenin tepkisi bir yüzey şeklinde öngörülür [8].

Taguchi ortogonal dizileri ve TYM'nin kullanıldığı çalışmalarda, sert malzemelerin tormalanması yöntemi deneysel olarak analiz edilmiştir. Bensouilah vd. [13], Taguchi L_{16} ortogonal dizisi ile planlanan deneyler sonucunda; Taguchi metodu kapsamında optimizasyon, TYM kapsamında (regresyon ile) modelleme / analiz ve (ANOVA ile) anlamlılık testi gerçekleştirmişlerdir. Senthilkumar ve Tamizharasan [14], Taguchi L_{18} ortogonal dizisi ile planladıkları deneylerde, kesme parametreleri dışında, iş parçası malzemesi ve kesici uca ait geometrik faktörleri de (uç şekli gibi) girdi değişkenleri olarak ele almışlardır. Modellemede hem regresyon yöntemini hem de yapay sinir ağları yöntemini kullanmış; ikinci yöntemde ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında farkın daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Varaprasad vd. [15], takım aşınması için matematiksel modelleme yapmak ve elde edilen modelden yola çıkarak optimizasyon yapmak için TYM kullanmışlar ve minimum takım aşınması için optimum kesme parametreleri elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada, Das vd. [16], tam faktöriyel bir deney planı uygulamış; TYM ile elde edilen optimum kesme şartlarında maliyet analizi yapmışlardır. Aouici vd. [17] ise, TYM kullanarak, silici uçlar ile geleneksel uçları serbest yüzey aşınması için karşılaştırmışlardır.

Gri ilişkisel analizle Taguchi metodunun birlikte kullanımı, çok-amaçlı optimizasyon için etkili bir yoldur [8]. Kacal ve Yıldırım [2], Taguchi L_{32} ortogonal dizisine göre deneyler gerçekleştirmiş; gri ilişkisel analizi uygulayarak çok-amaçlı (takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve özgül kesme kuvveti) bir kesme parametresi optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Santhanakumar vd. [18] ise, Taguchi L_{27} ortogonal dizisi ile planlanan deneylerde, Gri Taguchi-tabanlı TYM yaklaşımıyla, minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve minimum serbest yüzey aşınması (VB) için optimum kesme parametresi değerlerine ulaşmışlardır.

Yapılan çalışmalarda, farklı aşınma mekanizmaları değerlendirilerek, baskın mekanizmalar tespit edilmiştir. Sahu ve Choudhury [19], taramalı elektron mikroskobu

(SEM) ile alınan aşınma görüntülerini değerlendirerek, tüm denemelerde baskın olan takım aşınması mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu gözlemlemişlerdir. (Takımlar: kaplamasız ve çok-katmanlı kaplamalı sinterlenmiş karbür, iş parçası: 45 HRC sertliğinde AISI 4340 çeliğidir). Aynı şekilde Das vd. [16], aşınma için en etkili mekanizmayı abrazif aşınma olarak belirlemişlerdir. (Takım: kaplamalı karma-seramik, iş parçası: 52 HRC AISI 4140 çeliğidir.) Sahoo ve Sahoo [20] ise, abrazif aşınma ve dökülmenin, baskın aşınma mekanizmaları olduğunu belirtmiş; uçlarda herhangi bir erken bozulmaya rastlamamışlardır. (Takım: seramik, CBN ve PCD takımlara göre düşük maliyetli olan kaplamalı sinterlenmiş karbür, iş parçası: 47 HRC AISI 4340 çeliğidir.) Kacal ve Yildirim [2], çok-amaçlı (takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve özgül kesme kuvveti) bir araştırma yapmış; en etkili aşınma tiplerini, serbest yüzey aşınması ve krater aşınması olarak; etkili aşınma mekanizmalarını ise, abrazif aşınma, difüzyon ve adezyon olarak gözlemişlerdir. (Takımlar: seramik ve CBN, iş parçası: 60 HRC AISI D6 soğuk iş takım çeliğidir).

Takım aşınması için en etkili işleme faktörleri de tespit edilmiştir. TYM kullanılarak, en etkili faktörü; Das vd. [16], kesme hızı (takım: kaplamalı karma-seramik uç, iş parçası: 52 HRC AISI 4140 çeliği); Aouici vd. [21], kesme süresi ve kesme hızı (takım: CBN, iş parçası: AISI H11 takım çeliği); Saini vd. [22], kesme hızı ve köşe yarıçapı (takım: seramik, iş parçası: AISI H11 takım çeliği) olarak bulmuşlardır. Sahoo ve Sahoo [20] ise, sadece varyans analizi (ANOVA) kullanarak, en etkili parametrelerin kesme hızı ve ilerleme olduğu sonucuna varmışlardır. (Takım: kaplamalı sinterlenmiş karbür, iş parçası: 47 HRC AISI 4340 çeliğidir.) Kacal ve Yildirim [2], çok-amaçlı araştırmalarında, ANOVA metoduyla; takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve özgül kesme kuvveti göz önüne alındığında en etkili parametrenin ilerleme olduğunu hesaplamışlardır. (Takımlar: seramik ve CBN, iş parçası: 60 HRC AISI D6 soğuk iş takım çeliğidir.) Varaprasad vd. [15] ise, ana etki grafiklerinden yola çıkarak, çalışmadaki deney şartlarında aşınma için en etkili parametreyi, kesme derinliği olarak belirtmişlerdir. Buna göre, rijitliğin zayıf olduğu sistemlerde kesme derinliğinin düşük tutulmasını tavsiye etmişlerdir. (Takım: Al_2O_3/TiC karma-seramik, iş parçası: AISI D3 sertleştirilmiş çeliktir).

Ürün kalitesi ve üretim maliyeti anlamında yapılan değerlendirmeler, sert malzemelerin tornalanması yönteminin yeterliliğini ortaya koymaktadır. Bensouilah vd. [13], (takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünü etkilediği

düşünüldüğünde) VB değeri 0,3 mm seviyesindeyken dahi R_a değerinin 1,8 μm değerini aşmadığını bulmuşlardır. (Takımlar: kaplamalı ve kaplamasız seramik, iş parçası: 63 HRC AISI D3 soğuk iş takım çeliğidir.) Das vd. [16] ise, elde ettikleri optimum kesme şartlarında maliyet analizi yaparak, sert malzeme tornalama işleminin, silindirik taşlama işlemine alternatif olabileceği sonucuna varmışlardır. (Takım: kaplamalı karma-seramik uç, iş parçası: 52 HRC AISI 4140 çeliğidir).

Literatürde, takım aşınmasına temel kesme parametrelerinin (V_c , f , a_p) etkisi dışında, diğer kesme faktörleri ile takım aşınması arasındaki ilişki de incelenmiştir. Kenar mikrojeometrisinin (köşe yarıçapı, takım talaş yüzeyi pürüzlülüğü, kesici kenar pürüzlülüğü [23], kesici kenar pahi [24]), kesici uç yüzeylerindeki sürtünmenin [25], takım-iş parçası arayüzündeki kesme sıcaklığının [26], iş parçasında bulunan ve Ca yönünden zengin kalıntıların [27], iş parçası sinterleme sıcaklığının [28], enerji tüketiminin [29], kaplama tabakasının (PCBN takımlarda [30], karma-seramik takımlarda [31]), nano-yağlamanın [32] takım aşınması ile ilişkisinin araştırıldığı çalışmalar, örnek olarak verilebilir.

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

3.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Tornalama deneyleri, 45 kW maks. güce, 4000 dev/dak maks. devir sayısına sahip bir Goodway GS200 tezgahta gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak, Kennametal ISO CNGA 120404 KY4400 kaplamalı karma-seramik uçlar kullanılmıştır. Bu uçlar, kompozit bir ana malzemeye (~1 μm boyutunda Al_2O_3 içerikli matris ve takviye unsuru olarak, tokluk özelliği de sağlayan TiCN parçacıkları) ve yaklaşık 1 μm kalınlığında PVD TiN kaplamaya sahiptir (Şekil 1).

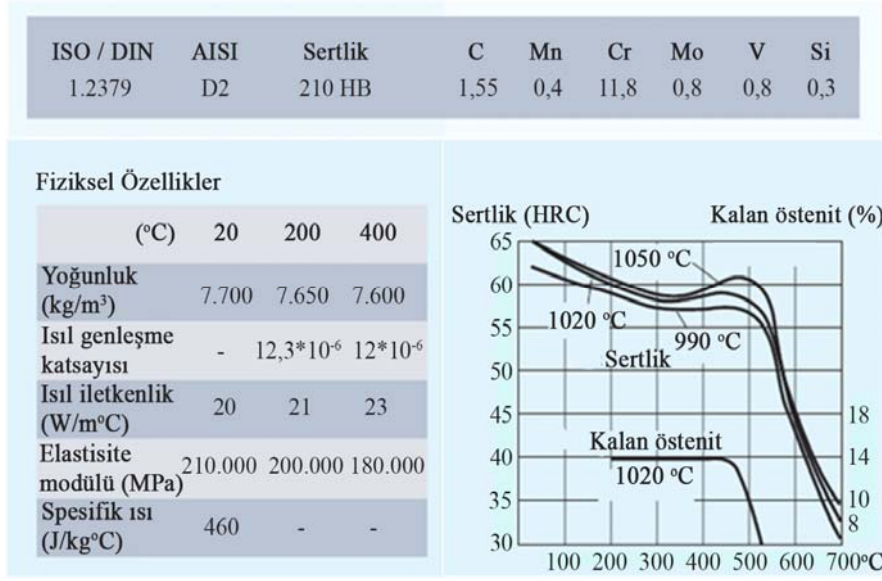
Çekirdeğine kadar sertleştirilmiş (62 HRC), $\Phi 90 \times 400$ mm boyutlarında DIN 1.2379 (AISI X153CrMV12) soğuk iş takım çeliği malzemeler (Şekil 2), kuru kesme ile tornalamaya tabi tutulmuştur. İş-parçaları, karşı punta kullanılarak merkezlenmiş ve desteklenmiştir. Takım aşınması değerleri, optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür.

3.2. İstatistiksel Metodoloji (Statistical Methodology)

Box ve Wilson [33] tarafından geliştirilen Tepki Yüzeyi Metodolojisi (TYM), ilk kez Amerika'da 1950'lerde kimya endüstrisinde uygulanmıştır [9]. Fizik, mühendislik



Şekil 1. Kullanılan karma-seramik uçlara ait tabakalar (Layers of the mixed ceramic inserts employed)



Şekil 2. Kullanılan iş parçası malzemesinin özellikleri (Properties of the work-piece material used)

bilimleri, sosyal bilimler, biyolojik ve klinik bilimler gibi çok çeşitli alanlarda uygulanabilen TYM, son 30 yıl içinde yarı iletkenler ve elektronik imalat sanayi, talaşlı imalat sanayi, metal kesme ve montaj süreçleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kapsamlı bir biçimde uygulama olanağı bulmaktadır. Ayrıca TYM, yeni bir ürün veya sürecin tasarımı ve geliştirilmesinde, performansın optimize edilmesinde kullanılmak üzere birçok personelin takım halinde çalışabildiği önemli bir katılımcı mühendislik aracı olarak kullanılır. TYM süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesi için kullanılan istatistiksel ve matematiksel teknikler bütünü olarak tanımlanabilir [34]. TYM'nin ardışık doğası sayesinde araştırmacı gereken yaklaşım fonksiyonunun tipi, optimum bölgenin konumu, uygun deneysel tasarımın seçimi, tepki veya süreç değişkenleri üzerinde transformasyonun gerekli olup olmadığı gibi soruların yanıtlarını bulabilir [34]. Söz konusu metodolojinin nihai amacı, sistem için optimum işletim koşullarını veya işletim spesifikasyonlarını tatmin eden faktör uzayı bölgesini belirlemektir. Bir ürün, süreç veya sistemin tepkisinin, kontrol edilebilen girdi değişkenlerine bağlı olması durumunda, bunlar arasındaki ilişki Eş. 1'de verildiği üzere,

$$\eta = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

şeklinde bir polinomial olarak tanımlanabileceği gibi, doğrusal bir fonksiyon olarak da tanımlanabilir. Eş. 1 ile verilen b_j doğrusal etkiyi, b_{ij} doğrusal etkileşim etkisini ve b_{jj} ise kuadratik etkiyi temsil etmektedir.

3.3. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

TYM kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, kesici takım malzemesi - iş parçası malzemesi ilişkisine bağlı olarak beş

farklı kesme hızı (V_c), ilerleme (f) ve kesme (talaş) derinliği (a_p) kullanılmıştır. Kullanılan işleme faktörlerinin düzeyleri Tablo 1'deki gibidir.

Çalışmada; 8 faktöriyel nokta, 6 eksenel nokta ve 6 merkez noktadan oluşan Merkezi Bileşik Tasarım (MBT) kullanılmıştır. 2 tekrarlı tasarımda toplam 40 deneme planlanmıştır. Kullanılan tasarımla beraber, gözlenen ve tahmin edilen tepki değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Bunlar, 300 mm işleme boyu sonundaki değerlerdir. Çalışmada ayrıca, işleme boyuna (L) göre aşınma (VB) gelişimi de incelenmiştir. Her 100 mm'de ölçülen aşınma değerleri kaydedilerek toplam 500 mm işlenmiştir. Bu değerlendirmede, iki kesme parametresi sabit tutulurken üçüncü kesme parametresi değiştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

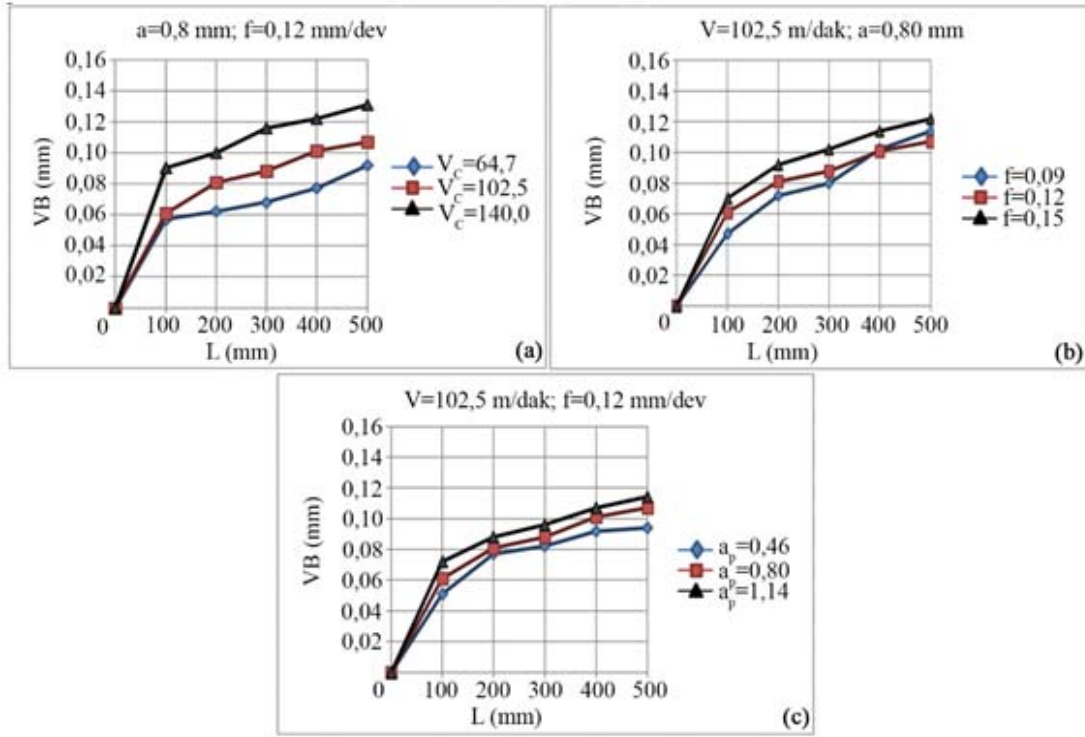
İşleme boyuna (L) göre aşınma (VB) gelişimi değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her üç kesme parametresinin de takım aşınması üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu görülmektedir. İstatistiksel yaklaşımla TYM kullanılarak gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar, daha önce Tablo 2'de verilmiştir. Verilerin analizi sonucu elde edilen alternatif tahmin modellerine ilişkin bulgular ise Tablo 3'te görülmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, düzeltilmiş R-kare ve tahmin edilen R-kare değeri maksimum ve tahmin hata kareler toplamı (PRESS) değeri minimum olan modelin önerildiği görülmektedir. Söz konusu model, ana etkiler ve etkileşim etkilerinin içerildiği modeldir. İndirgenmiş tepki yüzeyi modeline ilişkin ANOVA bulguları Tablo 4'ten izlenebilir. Tablo 4'te sunulan model için 271,73 olarak hesaplanan F istatistiği, modelin genel olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Tabloda anlamsız parametrelerin elimine edilmesiyle ulaşılan indirgenmiş model bulguları verilmiştir.

Tablo 1. İşleme faktörü düzeyleri (Levels of machining factors)

Faktör	Semboller		Düzeyler				
	Kodlanmamış	Kodlanmış	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Kesme hızı (m/dak)	V_c	A	64,66	80	102,5	125	140
Kesme derinliği (mm)	a_p	B	0,46	0,6	0,8	1	1,136
İlerleme (mm/dev)	f	C	0,086	0,1	0,12	0,14	0,1536

Tablo 2. Deneysel tasarım ve gözlenen - tahmin edilen tepkiler (Experimental design and observed – predicted responses)

Deneme	Faktörler			Tepki (VB (mm))	
	V_c (m/dak)	a_p (mm)	f (mm/dev)	Gözlenen	Tahmin edilen
1	102,5	0,80	0,12	0,089	0,087
2	102,5	0,80	0,09	0,086	0,085
3	102,5	0,80	0,15	0,089	0,089
4	102,5	0,80	0,12	0,088	0,087
5	102,5	0,80	0,12	0,085	0,087
6	80,0	1,00	0,14	0,079	0,075
7	102,5	1,14	0,12	0,085	0,086
8	102,5	0,80	0,12	0,090	0,087
9	102,5	0,80	0,12	0,090	0,087
10	102,5	0,46	0,12	0,091	0,088
11	102,5	0,80	0,12	0,087	0,087
12	102,5	0,80	0,12	0,087	0,087
13	80,0	1,00	0,14	0,077	0,075
14	80,0	0,60	0,14	0,078	0,076
15	102,5	0,80	0,12	0,086	0,087
16	80,0	0,60	0,10	0,069	0,074
17	102,5	0,80	0,15	0,087	0,089
18	102,5	0,80	0,12	0,090	0,087
19	80,0	1,00	0,10	0,075	0,073
20	102,5	1,14	0,12	0,086	0,086
21	80,0	0,60	0,10	0,074	0,074
22	64,7	0,80	0,12	0,064	0,066
23	125,0	0,60	0,14	0,098	0,101
24	102,5	0,80	0,09	0,084	0,085
25	125,0	0,60	0,10	0,101	0,099
26	80,0	1,00	0,10	0,070	0,073
27	102,5	0,80	0,12	0,087	0,087
28	125,0	1,00	0,14	0,103	0,101
29	64,7	0,80	0,12	0,066	0,066
30	140,3	0,80	0,12	0,113	0,108
31	102,5	0,80	0,12	0,084	0,087
32	102,5	0,80	0,12	0,088	0,087
33	80,0	0,60	0,14	0,078	0,076
34	125,0	1,00	0,14	0,095	0,101
35	102,5	0,46	0,12	0,084	0,088
36	125,0	1,00	0,10	0,097	0,098
37	125,0	1,00	0,10	0,097	0,098
38	125,0	0,60	0,14	0,098	0,101
39	140,3	0,80	0,12	0,109	0,108
40	125,0	0,60	0,10	0,101	0,099



Şekil 3. İşleme boyu (L) – Serbest yüzey aşınması (VB) ilişkisi (Cutting length (L) vs flank wear (VB))

Tablo 3. Model istatistikleri (Model statistics)

Kaynak	Std. Sapma	R-kare	Düzeltilmiş R-kare	Tahmin R-kare	PRESS	
Doğrusal	2,548E-003	0,9495	0,9453	0,9355	2,982E-004	
2FI	2,358E-003	0,9603	0,9531	0,9357	2,974E-004	Önerilen
Kuadratik	2,407E-003	0,9624	0,9512	0,9273	3,364E-004	
Kübik	2,374E-003	0,9695	0,9525	0,9042	4,431E-004	

Tablo 4. İndirgenmiş tepki yüzeyi 2FI modeli için ANOVA (ANOVA for response surface reduced 2FI model)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Ortalama Kare	F value	p-value	Prob>F
Model	4,431E-003	3	1,477E-003	271,73	<0,0001	Anlamlı
A-V _c	4,351E-003	1	4,351E-003	800,48	<0,0001	
C-f	3,770E-005	1	3,770E-005	6,94	0,0124	
AC	4,225E-005	1	4,225E-005	7,77	0,0084	
Kalıntı	1,957E-004	36	5,435E-006			
Uyum eksikliği	5,475E-005	11	4,977E-006	0,88	0,5678	Anlamsız
Pür hata	1,409E-004	25	5,637E-006			
Toplam	4,626E-003	39				

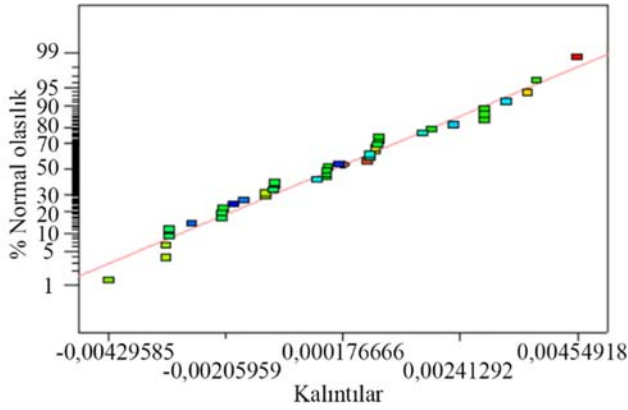
Tablodaki p-value değerleri incelendiğinde, indirgenmiş modelin tüm parametrelerinin 0,05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Bir başka ifade ile V_c, f ve V_c*f değişkenlerine ait parametreler anlamlıdır. Kesme hızı (V_c) en önemli parametredir, bunu kesme hızı ve ilerleme etkileşimi (V_c*f) ve ilerleme (f) izlemektedir. Tahmin modeline ilişkin uyum eksikliği istatistiği bulguları, sıfır hipotezinin reddedilemeyeceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla modelin verileri iyi bir biçimde temsil ettiği anlaşılmaktadır. İndirgenmiş tepki yüzeyi modeli için hesaplanan birtakım istatistikler Tablo 5'te yer almaktadır. Tablo 5'e göre 0,9542 olarak hesaplanan

düzeltilmiş R-kare değeri, takım aşınması değişkenindeki varyansın yaklaşık %95,42'sinin kesme parametreleri (V_c, f, V_c*f) tarafından açıklanabildiği, %4,58'lik kısmın ise açıklanamadığını ifade etmektedir. Düzeltilmiş R-kare değeri ile tahmin R-kare değerinin birbirine ve 1'e oldukça yakın olmaları modelin uygunluğuna işaret etmektedir. Yeterli kesinlik değeri, sinyal gürültü oranını ölçer ve bu oranın 4'ün üstünde olması istenir. Çalışmada 57,582 olarak hesaplanan yeterli kesinlik değeri, sinyalin yeterli olduğu ve modelin tasarım uzayında gezinmek için kullanılabilceği anlamına gelmektedir. Tahmin edilen tepki yüzeyi modeli, kodlanmış faktörlerle Eş. 2'deki gibi ifade edilir.

$$VB = 0,087 + 0,013 * A + 1,175E - 0,03 * C - 1,625E - 0,03 * A * C \quad (2)$$

Tahmin edilen tepki yüzeyi modeli kodlanmamış faktörlerle ise Eş. 3'deki gibi ifade edilebilir.

$$VB = -0,021836 + 9,94264E - 0,04 * V_c + 0,42888 * f - 3,61111E - 0,03 * V_c * f \quad (3)$$



Şekil 4. Kalıntıların normal grafiği (Normal plot of residuals)

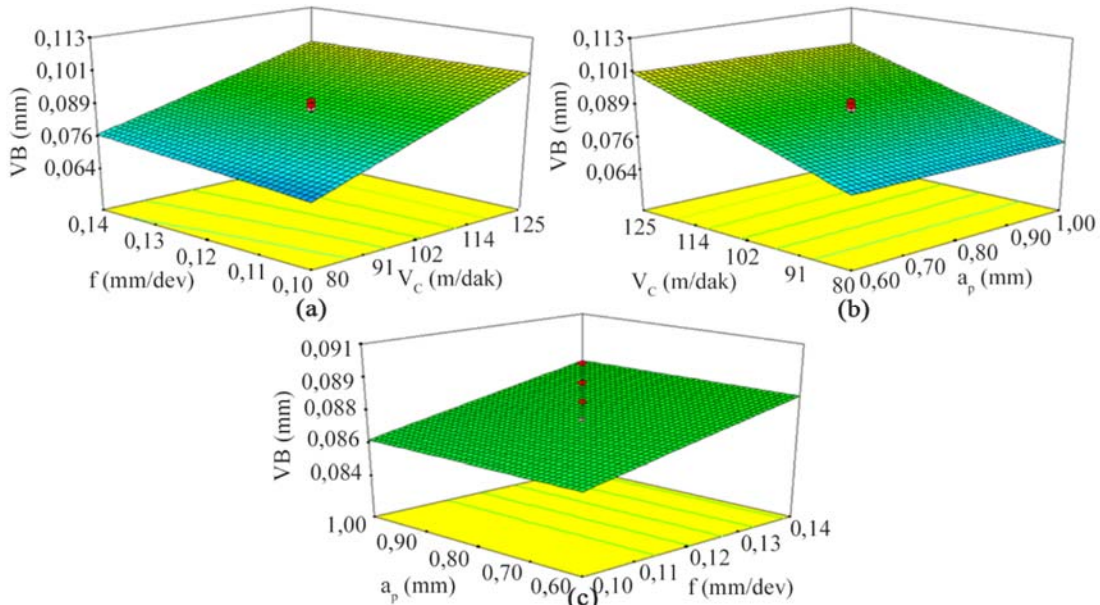
Kalıntıların normal grafiğinde (Şekil 4), kalıntıların doğru etrafındaki saçılımları normal dağılımlarına işaret

etmektedir. Ayrıca yapılan Anderson-Darling testi sonucu (AD=0,333; p=0,502) verilerin normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir. Tepki değişkeni olarak kabul edilen kesici takım aşınmasının kesme parametrelerine bağlı değişimi, Şekil 5'te üç boyutlu yüzey grafikleri ile gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kesme hızı ve ilerlemedeki düşüşle birlikte aşınma değerinin de azalacağı görülebilir. Kesme derinliğinin ise belirgin bir etkisi görülmemektedir.

Öncelikle kesme hızı (V_c) ve sonra ilerlemenin (f), serbest yüzey aşınması üzerinde en önemli parametreler olması, Das vd. [16] ve Sahoo ve Sahoo'nun [20] sonuçları ile uyumludur. Bilindiği gibi, serbest yüzey aşınması abrazif bir aşınma mekanizmasından kaynaklanır. Her sürtünme olayında olduğu gibi, burada da iki yüzey arasındaki bağlı hız, yüzeydeki bozulmada en etkili faktör olmaktadır [3]. Bunun dışında, kesme hızı - ilerleme etkileşiminin de ($V_c * f$) ilerlemenin ana etkisine yakın düzeyde bir etkiye bulunduğu görülmektedir. Astakhov [35], bu etkileşimi, kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkla açıklamıştır. Buna göre, optimum kesme sıcaklığının altında çalışıldığında ilerleme değerindeki artış takım aşınma hızını azaltmaktadır. Kesme hızının belirli bir değerin üzerine çıkması sonucu optimum kesme sıcaklığının üzerinde çalışılmaya başlandığında ise, ilerleme değerindeki artış takım aşınma hızında artışa sebep olmaktadır. Bu etkileşimin ($V_c * f$) sebebi, kesme bölgesi sıcaklığının da ölçüleceği ve optimum kesme sıcaklığının aranacağı daha sonraki çalışmalarda incelenebilir.

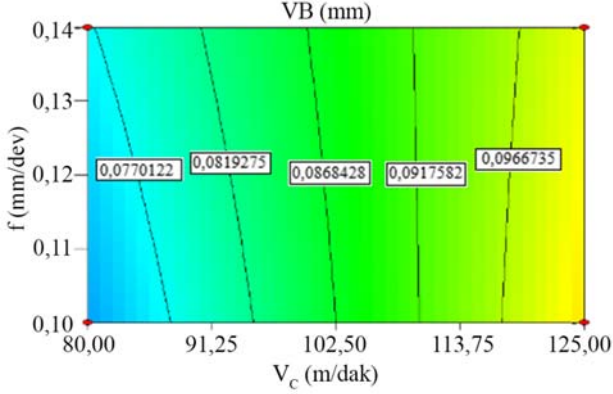
Tablo 5. İndirgenmiş tepki yüzeyi 2FI modeli için katsayı değerleri (Values of coefficients for the response surface reduced 2FI model)

Regresyon katsayısı	Değer	Regresyon katsayısı	Değer
Standart Sapma	2,331E-003	Düzeltilmiş R-kare	0,9542
Ortalama	0,087	Tahmin R-kare	0,9467
Varyasyon katsayısı %	2,68	Tahmin hata kareler toplamı	2,47E-01
R-kare	0,9577	Yeterli kesinlik	57,582



Şekil 5. Takım aşınmasının kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği ile değişimine ilişkin yüzey grafiği (Surface plots of tool wear vs cutting speed, feed and depth of cut)

Minimum takım aşınması değerinin elde edilmesi amacıyla, tahmin edilen tepki yüzeyi modelinin optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen aşınma değerleri Şekil 6'daki grafikten izlenebilir. Minimum aşınma değeri 0,077 mm ve bu değeri sağlayan kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği kombinasyonu ise, sırası ile 84,90 m/dak, 0,12 mm/dev ve 0,60 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Takım aşınması için tepki optimizasyon grafiği
(Response optimization plot for tool wear)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Metal, yüksek hız, sıcaklık ve basıncın bir arada bulunduğu talaş kaldırma işlemi sürecinde, metallerin difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar; takımın aşınması, yüzey pürüzlülüğü, tolerans dışı imalat, takımın veya iş parçasının zarar görmesi gibi problemlere ve sonuç olarak da, kaçınılmaz maliyetlere yol açmaktadır. Kesici takım maliyeti, üretim maliyeti içindeki payı çok küçük olmasına rağmen, diğer maliyetleri etkilemesi açısından çok önemlidir. Dolayısıyla takım aşınması, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ile beraber, talaşlı imalat süreçlerinin en önemli iki kalite karakteristiği olarak kabul edilir.

Bu çalışmada, çekirdeğe dek sertleştirilmiş (62 HRC) soğuk iş takım çeliği malzemeden numunelerin kaplamalı seramik kesici takımlarla tornalanması işleminde kesme parametreleri – takım aşınması ilişkisi TYM ile modellenmiş ve takım aşınması optimize edilmeye çalışılmıştır. Tahmin edilen tepki yüzeyi modelinden yola çıkarak; kesme hızı (V_c), ilerleme (f), kesme hızı – ilerleme etkileşiminin ($V_c \cdot f$), takım aşınması üzerinde etkili faktörler olduğu tespit edilmiştir. Kesme derinliği (a_p) ise, aşınma üzerinde etkili bir faktör olmamıştır. V_c ve f değerlerinin azalması, takım aşınması değerini azaltacaktır. Aşınma üzerinde en etkili faktör, V_c olmuştur. Tepki yüzeyi modelinin optimizasyonu sonucunda, minimum takım aşınması değeri 0,077 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değeri; 84,90 m/dak kesme hızı, 0,12 mm/dev ilerleme ve 0,60 mm kesme derinliği kombinasyonu vermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Chinchankar S., Choudhury S.K., Machining of hardened steel—Experimental investigations,

performance modeling and cooling techniques: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 89, 95-109, 2015.

2. Kacal A., Yildirim F., 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), 1566-1576, 2012.
3. Astakhov V.P., Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications, Machining of Hard Materials, Editör: Davim J.P., Springer Science & Business Media, 1-32, 2011.
4. Brahim F., Berkani S., Yallese M.A., Boutabbab S., Rigal J-F, Daffri S., Analysis of technological parameters through response surface methodology in machining hardened X38CrMoV5-1 using whisker ceramic tool (Al_2O_3+SiC), Estonian Journal of Engineering, 18 (1), 26–41, 2012.
5. Bartarya G., Choudhury S.K., State of the art in hard turning, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 53, 1–14, 2012.
6. Kacal A., Yildirim F., Determining the effects of CBN cutting insert's cutting performance on surface roughness and tool wear at turning of PMD 23 steel, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (1), 181-189, 2016.
7. Hosseini S.B., Beno T., Klement U., Kaminski J., Rytberg K., Cutting temperatures during hard turning—Measurements and effects on white layer formation in AISI 52100, Journal of Materials Processing Technology, 214, 1293–1300, 2014.
8. Dureja J.S., Gupta V.K., Sharma V.S., Dogra M., Bhatti M.S., A review of empirical modeling techniques to optimize machining parameters for hard turning applications, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 230(3), 389–404, 2016.
9. Montgomery D.C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & Sons, Inc., 4th Edition, New York, 2001.
10. Gürsakan N., Altı Sigma Müşteri Odaklı Yönetim, Nobel Yayın Dağıtım, Bursa, 2005.
11. Uzun İ., Aslantaş K., Taşgetiren S., Gök K., Investigation of tool performance in turning of austempered ductile iron with cemented carbide cutting tool, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (4), 739-744, 2007.
12. Kayır Y., Aslan S., Aytürk A., Analyzing the effects of cutting tools geometry on the turning of AISI 316Ti stainless steel with Taguchi method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (2), 363-372, 2013.
13. Bensouilah H., Aouici H., Meddour I., Yallese M.A., Mabrouki T., Girardin F., Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process, Measurement, 82, 1–18, 2016.
14. Senthilkumar N., Tamizharasan T., Flank wear and surface roughness prediction in hard turning via artificial neural network and multiple regressions,

- Australian Journal of Mechanical Engineering, 13 (1), 31-45, 2015.
15. Varaprasad Bh., Srinivasa Rao Ch., Vinay P.V., Effect of machining parameters on tool wear in hard turning of AISI D3 steel, *Procedia Engineering*, 97, 338 – 345, 2014.
 16. Das S.R., Dhupal D., Kumar A., Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts, *Journal of Mechanical Science and Technology* 29 (10), 4329-4340, 2015.
 17. Aouici H., Elbah M., Yallese M.A., Fnides B., Meddour I., Benlahmidi S., Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: Analysis of machining forces and flank wear, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 2221–2244, 2016.
 18. Santhanakumar M., Adalarasan R., Siddharth S., Velayudham A., An investigation on surface finish and flank wear in hard machining of solution treated and aged 18 % Ni maraging steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1-14, 2016.
 19. Sahu S., Choudhury B.B, Optimization of Surface Roughness using Taguchi Methodology & Prediction of Tool Wear in Hard Turning Tools, *Materials Today: Proceedings*, 2, 2615 – 2623, 2015.
 20. Sahoo A.K., Sahoo B., Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-I (An experimental approach), *Measurement*, 46, 2854–2867, 2013.
 21. Aouici H., Yallese M.A., Fnides B., Chaoui K., Mabrouki T., Modeling and optimization of hard turning of X38CrMoV5-1 steel with CBN tool: Machining parameters effects on flank wear and surface roughness, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (11), 2843-2851, 2011.
 22. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S., Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13 (8), 1295-1302, 2012.
 23. Karpuschewski B., Schmidt K., Beňo J., Maňková I., Frohmüller R., Prilukova J., An approach to the microscopic study of wear mechanisms during hard turning with coated ceramics, *Wear*, 342-343, 222–233, 2015.
 24. Ventura C.E.H., Köhler J., Denkena B., Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning, *Journal of Manufacturing Processes*, 19, 129–134, 2015.
 25. Grzesik W., Denkena B., Žak K., Grove T., Bergmann B., Correlation between friction and wear of Cubic Borone Nitride cutting tools in precision hard machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138 (3), 2015.
 26. Dosbaeva G.K., El Hakim M.A., Shalaby M.A., Krzanowski J.E., Veldhuis S.C., Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50, 1–8, 2015.
 27. Ånmark N., Björk T., Effects of the composition of Ca-rich inclusions on tool wear mechanisms during the hard-turning of steels for transmission components, *Wear*, 368-369, 173–182, 2016.
 28. Erçetin A., Aslantaş K., Peçin M., Micro milling of tungsten-copper composite materials produced through powder metallurgy method: Effect of composition and sintering temperature, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2018. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416434>
 29. Grzesik W., Denkena B., Zak B., Grove T. Bergmann, B., Energy consumption characterization in precision hard machining using CBN cutting tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 2839–2845, 2016.
 30. Uhlmann E., Oyanedel Fuentes J. A., Gerstenberger R., Frank H., nc-AlTiN/a-Si₃N₄ and nc-AlCrN/a-Si₃N₄ nanocomposite coatings as protection layer for PCBN tools in hard machining, *Surface & Coatings Technology*, 237, 142–148, 2013.
 31. Kumar C.S., Patel S.K., Experimental and numerical investigations on the effect of varying AlTiN coating thickness on hard machining performance of Al₂O₃-TiCN mixed ceramic inserts, *Surface & Coatings Technology*, 309, 266–281, 2017.
 32. Sayuti M., Sarhan A.A.D., Salem F., Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption, *Journal of Cleaner Production*, 67, 265-276, 2014.
 33. Box G.E.P., Wilson K.B., On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of Royal Statistical Society*, 13 (1), 1-45, 1951.
 34. Myers R.H., Montgomery D.C. & Anderson-Cook C.M., *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, Inc., 3th Edition, New Jersey, 2009.
 35. Astakhov V.P., Effects of the cutting feed, depth of cut, and workpiece (bore) diameter on the tool wear rate, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34 (7-8), 631-640, 2007.