

AISI 52100 Rulman Çeliğinin Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Havva Demirpolat¹ , Kübra Kaya¹ , Rüstem Binalı^{1,*} , Mustafa Kuntoğlu¹ 

¹Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.11.2023

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları

Cilt: 4, No: 3, 2023 (179-189)

Araştırma Makalesi

e-ISSN: 2717-7475

Takım ucu sıcaklığı

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvveti

ÖZET

AISI 52100 malzemesi esas olarak rulman endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu çelikler yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve boyutsal stabilite sunar. Daha yüksek mukavemet olması, özellikle otomotiv endüstrisinde rulman uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Bu çalışmada AISI 52100 çeliğinin işlenebilirlik özellikleri iki farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğine göre kuru kesme koşullarında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti üzerindeki etkileri, tam faktöriyel deneysel tasarım olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada TiC kaplı kesme kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek kesme hızlarında rulman çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük ilerleme oranında işleme koşullarında kesme kuvveti değeri azalmıştır. Bu da daha düşük güç tüketimi ile işleme verimliliğini arttırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün ilerleme miktarı olduğu, ardından talaş derinliğinin olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerinin artmasında ise en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu sonucuna varılmıştır.

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.11.2023

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları

Cilt: 4, No: 3, 2023 (179-189)

Araştırma Makalesi

e-ISSN: 2717-7475

Takım ucu sıcaklığı

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvveti

Keywords:

AISI 52100

Machinability

Tool tip temperature

Surface roughness

Cutting force

ÖZET

AISI 52100 malzemesi esas olarak rulman endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu çelikler yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve boyutsal stabilite sunar. Daha yüksek mukavemet olması, özellikle otomotiv endüstrisinde rulman uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Bu çalışmada AISI 52100 çeliğinin işlenebilirlik özellikleri iki farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğine göre kuru kesme koşullarında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti üzerindeki etkileri, tam faktöriyel deneysel tasarım olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada TiC kaplı kesme kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek kesme hızlarında rulman çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük ilerleme oranında işleme koşullarında kesme kuvveti değeri azalmıştır. Bu da daha düşük güç tüketimi ile işleme verimliliğini arttırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün ilerleme miktarı olduğu, ardından talaş derinliğinin olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerinin artmasında ise en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu sonucuna varılmıştır.

Investigation of the Effects of Machining Parameters on Surface Roughness, Cutting Temperature and Cutting Force in Turning AISI 52100 Bearing Steel

ARTICLE INFO

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Received: 20.11.2023

Accepted: 25.12.2023

Keywords:

AISI 52100

Machinability

Tool tip temperature

Surface roughness

Cutting force

ABSTRACT

AISI 52100 material is mainly used in the bearing industry. These steels offer high hardness, excellent wear resistance and dimensional stability. The high strength and high wear resistance, especially in the automotive industry, make them suitable for bearing applications. In this study, the machinability properties of AISI 52100 steel were evaluated according to the turning process under dry cutting conditions at two different cutting speeds, feed rates and depths of cut. Machinability output parameters include cutting force, tool tip temperature and surface roughness. The machinability experiments were carried out using a full factorial design. A TiC coated cutting tool was used in the study. As a result of the study, high cutting speed generally caused less surface roughness than lower cutting speed parameters under the same environmental cutting conditions. It was also found that cutting force was better achieved under low feed machining conditions. It was observed that the most effective factor on surface roughness was feed rate, followed by depth of cut. It was concluded that the most

*Sorumlu yazar, e-posta: rstmbinali@grn.kcu.edu.tr
To cite this article: H. Demirpolat, K. Kaya, R. Binalı, M. Kuntoğlu, Investigation of the Effects of Machining Parameters on Surface Roughness, Cutting Temperature and Cutting Force in Turning AISI 52100 Bearing Steel, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 179-189, 2023. <https://doi.org/10.52795/mateca.1393430>

pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkisini araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır [1, 2]. AISI 52100 çeliğinin işlenmesi, sertliği, yüksek aşınma direnci ve zayıf yüzey kalitesi nedeniyle zorlu bir iştir. Ayrıca takım/iş arayüzünde oluşan yüksek sıcaklıklar, işlenen ürünün yüzey bütünlüğüne ve takım ömrüne zarar verebilir [3]. İşleme prosesi parametrelerinin işlenebilirlik performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. İki veya daha fazla kayıtlı yanıt için ideal deneme konfigürasyonunu elde etmek amacıyla çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilebilir. Bu çok kriterli karar modeli, süreç parametrelerini optimize etmek amacıyla birden fazla yanıtı birleştirilmiş bir yanıt halinde birleştirmek için kullanılabilir [4]. Spesifik yanıtlar için araştırmacılar en uygun kesme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır [5, 6]. Sonuç olarak, süreç modelleme ve girdi parametreleri ile süreç çıktısı arasında optimum ilişkilerin sağlanması, bitmiş ürünün kalitesinin değerlendirilmesi, üretkenliğin ve genel süreç verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir [7]. Bouacha vd. [8] AISI 52100 çeliğinin işlenmesi sırasında hem takım kuvvetlerini hem de yüzey bütünlüğünü tahmin etmek için bir model oluşturmak amacıyla tepki yüzey metodolojisini kullanmışlardır. Kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş azalması, AISI 52100 işleme prosesi sırasında çok amaçlı Taguchi ve gri ilişki analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sankar and Umamaheswararao [9], Taguchi yöntemini kullanarak tornalama işleminin rulman çeliği üzerindeki etkisini araştırdı. Kesme derinliği ve ardından kesme hızı ve ilerleme hızı ana işleme parametresi olarak tanımlanmıştır. Ramakrishnan vd. [10], çeşitli çalışma koşulları altında rulman çeliğinin CNC tornalama işleminden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için Taguchi parametre tasarımının kullanımını araştırmışlardır. AISI 52100 alaşımlı çelik malzemenin (55 HRC) sert tornalama işleminde azaltılmış yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için ideal kesme koşulları, CBN kesici uç takımı kullanılarak Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Mane ve Kumar [11], AISI 52100 sertleştirilmiş alaşımının işlenmesinde model oluşturmak için istatistiksel deneysel tasarım tekniğini ve en küçük kareler uydurma yöntemini kullanmışlardır. Deneysel tasarım için merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılmış ve 'Design Expert' yazılımında tam faktöriyel tasarım kullanılarak yapılandırılmıştır. Çalışmada, kesme parametrelerinin ve bunların yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileşimlerinin karşılaştırmalı önemini belirlemek için varyans analizini (ANOVA) kullanıldı. Sonuçlar, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu ve ardından kesme hızının geldiğini, kesme derinliğinin ise önemli bir etkisinin olmadığını gösterdi. Vijaykumar vd. [12] kesme sıvısı olmadan sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğinin tornalanması için optimum işlem parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi tekniğini kullanmışlardır. Kesme hızı, ilerleme ve derinlik gibi işleme parametrelerinin performansını araştırmak için Minitab v.16.2.0 yazılımı kullanılarak L9 ortogonal dizi, sinyal-gürültü (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Çalışmada malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü dikkate alınmıştır. Gerekli yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum parametreler, 450 dev/dak kesme hızı, 0.05 mm/dev ilerleme hızı ve 0.4 mm kesme derinliğiydi. Alok ve Das [13], istatistiksel deney tasarımına dayalı olarak sertliği 55 HRC olan AISI 52100 çeliği üzerinde bir tornalama deneyi gerçekleştirmişlerdir. İşlenebilirlik özelliklerini etkileyen kesme hızı (Vc), ilerleme hızı (f) ve kesme derinliği (ap) gibi farklı kesme parametrelerinin etkisini, ana kesme kuvveti (Fc), radyal kuvvet (Fp), ilerleme kuvveti (Ff), maksimum yan yüzey aşınması (VBmax) ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne (Ra) göre analiz etmişlerdir. Yıldız ve ark.[14] AISI 52100 rulman çeliğinin tornalanmasında minimum sıcaklık ve güç tüketimine etki eden kesme parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Bunun için yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan deneysel sistemlerde en düşük deney sayısı için kullanılan Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Sıcaklık ve güç tüketimi değişkenleri, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı olmak üzere her üç parametreden de etkilendiği belirtilmiştir. Minimum sıcaklık ve güç tüketimi için kesme koşulları; 162.427 m/dak kesme hızı, 1.395 mm kesme derinliği ve 0.247 mm/dev ilerleme oranı olarak belirtmişlerdir. Ayrıca, ilerleme oranının hem sıcaklığı hem de güç tüketimini en çok etkileyen parametre olduğu tespit edilmiştir. Şahinoğlu ve ark.[15] iki farklı sertlik değerine sahip AISI52100 çeliği değişen kesme parametreleri ile üç farklı soğutma koşulu (kuru, soğutma sıvısı ve MQL) altında tornalanmasının yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve titreşime etkisini incelemişlerdir.

Kesme hızındaki artışa bağlı olarak güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünde azalma tespit edilirken aklık güç tüketimi ve titreşim artmıştır. En iyi kesme performansı yüksek sertlikteki iş parçasının MQL ortamında yüksek hızlarda tormalanmasında tespit etmişlerdir. Rafighi ve ark.[16] kuru işleme ortamında AISI 52100 çeliğin tormalanmasında sertlik ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini 2 ve 3 seviyeli karma bir Taguchi metoduyla dizayn ettikleri tormalama deneyleri ile araştırmışlardır. Sonuçlar, ilerlemenin %96.3'lük bir katkı ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde baskın bir sonuca sahip olduğunu ve aynı zamanda %13.8'lik bir katkı ile kesme kuvvetini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Literatür araştırmasından kuru işlemenin birçok çelik bileşen türü için uygun maliyetli bir işleme prosesi olduğu sonucunun çıkarılması mümkündür. Ayrıca, kuru işlemeyle ilgili literatür taraması, istatistiksel yaklaşımın, farklı girdi koşullarında işleme süreçlerinin çoklu yanıtlarını yüksek doğrulukla tahmin ederek modelleme teorisini geliştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada işleme operasyonunu tanımlayan üç temel parametrenin etkilerini araştırmak için deneyler yapılmıştır. AISI 52100 rulman çeliğinin sürdürülebilir işleme hedefleri bağlamında kuru kesme ortamında net ve objektif bir değerlendirmesini sağlamak için kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızının sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetine etkileri incelenmiştir. Deneyler tam faktöriyel tasarım metodu ile üç faktörün iki seviyede olası kombinasyonları ile dizayn edilmiştir. Kesme sıvısı gerektirmeyen en temiz üretim tekniği olarak kabul edilen kuru işleme ortamında AISI 52100 rulman çeliğinin tormalanmasında yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetini ve takım ucu sıcaklığını etkileyen kesme parametrelerinin etkileri profesyonellere ve literatüre sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

AISI 52100 kalite yüksek karbonlu krom alaşımlı çelik iş parçasının kimyasal bileşimi, bu deneysel çalışmanın odak noktası olarak Tablo 1'de sunulmaktadır. Çapı 30 mm ve uzunluğu 100 mm deney numunesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Kesme derinliği, kesme hızları ve ilerleme oranları, işleme deneyleri için tam faktöriyel yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanması için kullanılan tam faktöriyel deneysel tasarım yaklaşımı optimum bir yaklaşım olarak kabul edilir, çünkü faktörlerin farklı seviyelerinin olası tüm kombinasyonları değerlendirilir[17]. Bu tür tasarımlarda, her faktörün her seviyesinden eşit sayıda sonuç alınır ve birbirleriyle karşılaştırılır. Bu yöntem yalnızca çok az sayıda faktör söz konusu olduğunda kullanılabilir. Gerekli deney sayısı, faktör sayısı ve etkileri ile birlikte hızla artar. Bu sebeple, ana etkilerin ve etkileşimlerin tahmin edilmesine olanak tanıyan basit bir sistematik tasarım kullanılarak iş parçası üzerinde toplam 8 deney gerçekleştirilmiştir. Tepkiyi etkileyebilecek kesme faktörlerinin belirlenmesi deneyin tasarlanmasındaki ilk adım olarak uygulanmıştır. Her faktörün en az iki düzeyi vardır ve düzeyler, bu çalışmanın özellikleriyle ilgili ve makul olana göre seçilmiştir. Faktörler ve seviyeler belirlendikten sonra, her faktör için olası tüm seviye kombinasyonlarını içeren bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Bir sonraki adım, her faktör seviyesi kombinasyonuna test noktaları atamak olmuştur. Bu sayede birden fazla faktör aynı anda test edilerek deneyin sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada tam faktöriyel tasarım yöntemi kullanılarak ana etkiler ve etkileşimler belirlenmiştir.

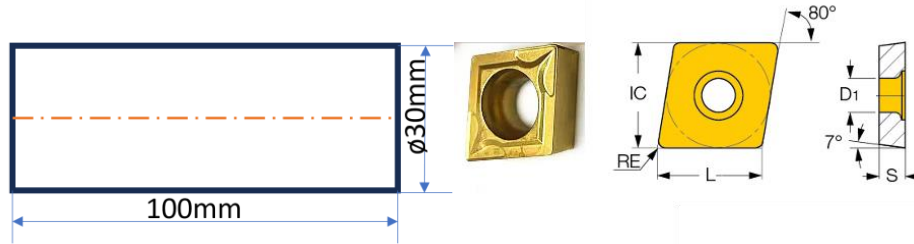
Tablo 1. AISI 52100 çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical compounds of the AISI 52100 steel)

Element (% ağırlık)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
AISI 52100	0.98-1.10	0.15-0.30	0.25-0.45	1.35-1.60	0.10	0.25	0.30	Kalan

Tablo 2. AISI 52100 çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Mechanical and physical properties of AISI 52100 steel)

Yoğunluk (gr/cm ³)	7.80
Sertlik (HRC)	60-66
Çekme dayanımı (MPa)	520
Akma dayanımı (MPa)	415
Kopma uzaması (%)	2.7
Elastisitemodülü (GPa)	80
Isıl iletkenlik (W/m.°K)	42.4

Kesici takım ve takım tutucu, pratik uygulamalara ve imalatçıların tavsiyelerine göre seçilmiştir. TiC kaplı CCMT 09T308-304 serisi kesici takım, ISO 3685'e uygun olarak kullanılmıştır[18]. Kesici takımlara ilişkin fiziksel detaylar Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca iş parçası ve kesici takım geometrileri Şekil 1'de verilmiştir. Kesici takımlar her test periyodundan sonra değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 1. İş parçası ve kesici takım geometrileri (Workpiece and cutting tool geometries)

Tablo 3. Kesici takım özellikleri (Cutting tool properties)

Kesici takım	Boşluk açısı	Kesme kenarı uzunluğu	Kesici uç kalınlığı	Köşe radyüsü
CCMT-09T308-304	7	9mm	3.97mm	0.8mm

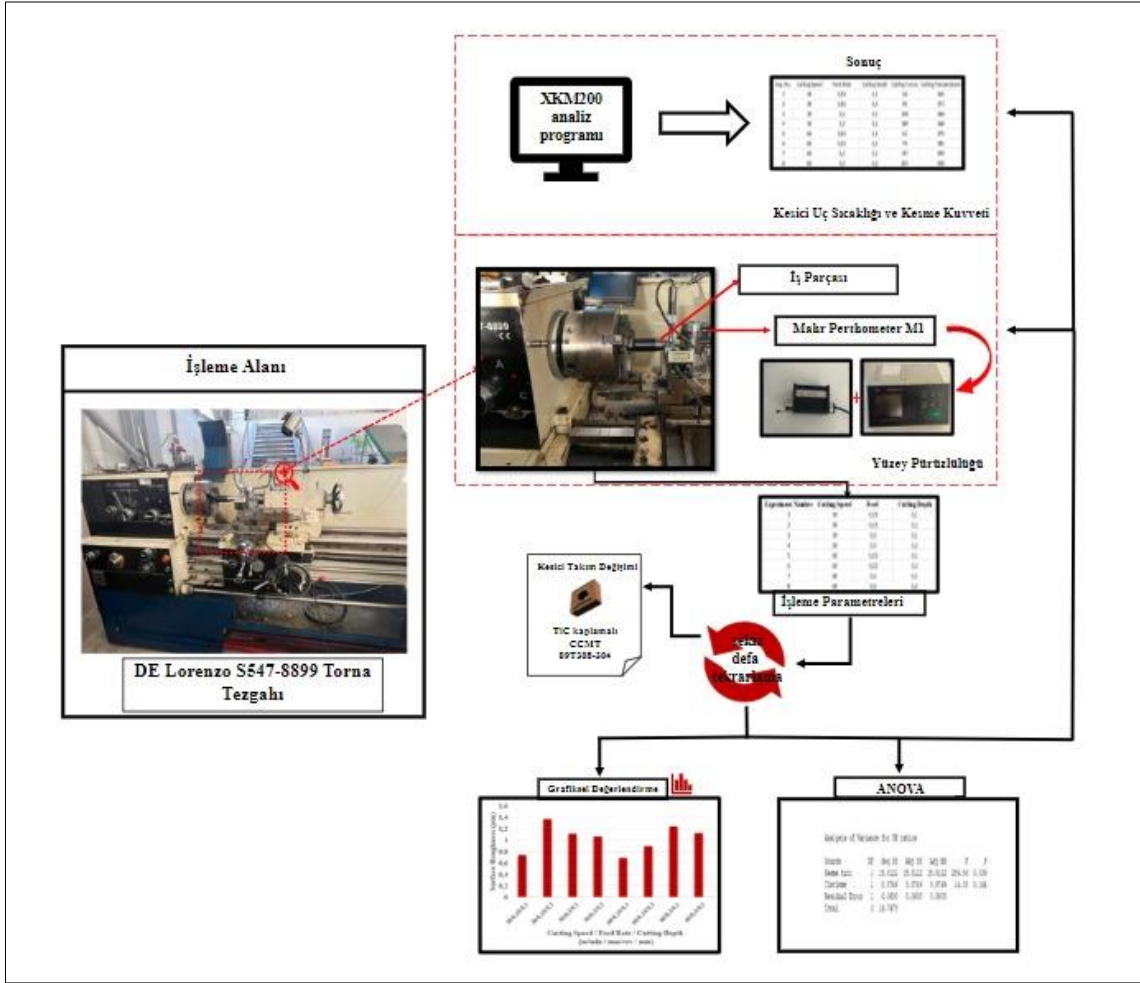
Tablo 4. Deney parametreleri (Experiment parameters)

Deney No	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)
1	30	0.15	0.1
2	30	0.15	0.2
3	30	0.3	0.1
4	30	0.3	0.2
5	60	0.15	0.1
6	60	0.15	0.2
7	60	0.3	0.1
8	60	0.3	0.2

2.2. İşleme deneyleri (Machining Experiments)

İşleme denemeleri kuru kesme ortamı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma bazında üç farklı parametre iki farklı seviyede, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetine etkisi tornalama imalat yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri Tablo 4'te verilmektedir. Kesme kuvvetleri Kistler 9275 dinamometre ile ölçülmüş ve sinyaller bilgisayara kaydedilmiştir. Her deneyin sonucunda işlenen yüzeyin farklı noktalarından yüzey pürüzlülüğü değerleri Mahr Perthometer M1 cihazı kullanılarak ölçülerek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Pürüzlülük değeri, ölçümlerden en yüksek ve en düşük değerlerin çıkarılması ve üç değer ortalamasının alınmasıyla belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, kesme sıcaklığı bir InGaAs radyasyon sensörü (Telc, Almanya) ile ölçülmüş ve sensörden elde edilen termometre sinyalleri bilgisayara aktararak değerlendirilmiştir. Kesme işlemi sırasında anlık

olarak akım ve gerilim hesaplanarak %0.1 doğrulukla yüksek hassasiyetli ölçümler elde etmek mümkün olmaktadır. Bununla beraber deneylerin hepsinin bitiminde kullanılan kesici takım yenisiyle değiştirilerek kesici takımdan kaynaklanabilen ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyebilecek değişiklikler minimuma indirilmiştir. Şekil 2’de çalışma kapsamında ele alınan işleme süreci verilmektedir.



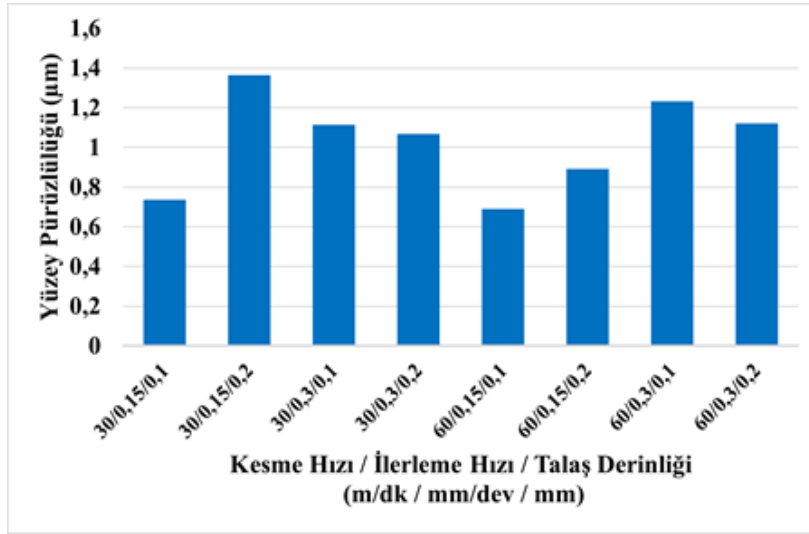
Şekil 2. Deneysel düzenek (Experimental setup)

3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 3’de kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü kesme hızının, ilerlemenin ve kesme derinliğinin sırasıyla 60 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm değerleri seçilen deneyde elde edilmiştir. İlerleme oranının 0.15 mm/dev’ den 0.3 mm/dev’ e çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermektedir. İlerlemenin artması ilerleme kuvvetine ve yüzeyden kaldırılan talaş hacminin artış göstermesine neden olmaktadır [19]. Bahsedilen durumlar yüzey kalitesini negatif etkilediğinden dolayı yüzey pürüzlülüğünde artış gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. Kesme hızının nispeten düşük olduğu işleme durumunda ilerleme oranının atışı ve kesme derinliğinin azalması ile yüzey pürüzlülük değerinde %15 bir azalma ölçülmüştür. Ancak bu etki daha yüksek kesme hızı değerinde gözlenmemiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki azalma eğiliminin kesme hızının artması ile azaldığı ancak ilerlemenin artmasıyla pürüzlülük değerinin düşük kesme hızlarında azaldığı yine açıkça görülmektedir. Sebebi malzemenin düşük ilerlemede sürülmesi olabilir [20]. Düşük kesme hızı değerinde 0.1mm kesme derinliği kesme koşulunda, ilerlemenin artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerinde yaklaşık %33 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Kesme hızının 30 m/dak seçildiği deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri, (1.07 μm) elde edilmiştir. 60 m/dak kesme hızında bu değer (0.983 μm) olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi bir sonuç elde edilmesi için kesme hızının artırılması geçmiş çalışmalarda en çok başvurulan yöntemlerdendir [21, 22]. Kesme hızının artışı, takımın parçaya olan temasının azalması ve yüksek sıcaklıklarda oluşan akma bölgesinden dolayı yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamaktadır [23]. Deneylerin sonunda literatürdeki çalışmaların doğrulandığı görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde ilerleme oranının 0.15 mm/dev olduğu deneylerde kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artarken, ilerleme oranının 0.3 mm/dev olduğu deneyler için tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Bu bağlamda kesme derinliği ve ilerleme hızının yüzey kalitesi açısından önemli rol oynadığı düşüncesi yanlış değildir. Belirtilen bu rolün önemi, kesme bölgesinin derinliğinin fazla olmasıyla beraber deney süresi uzadığında yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması sonucuna bağlanabilir.

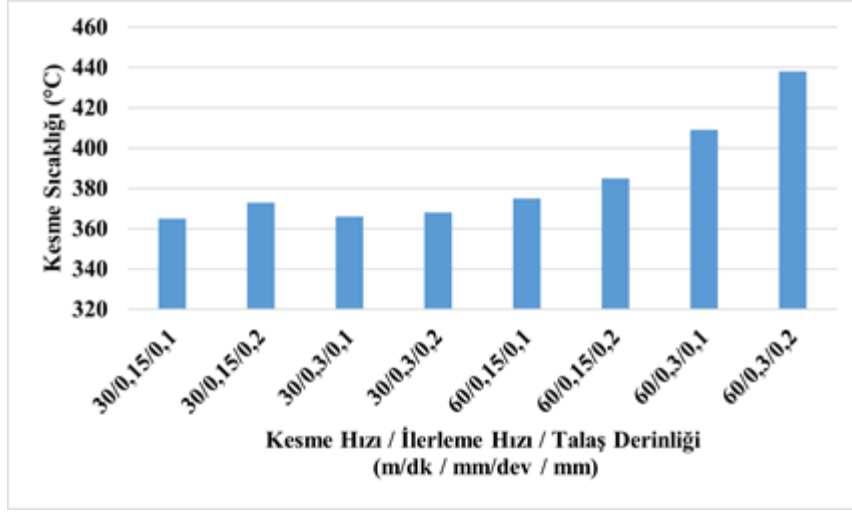


Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Surface roughness change according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

3.2. Kesme Sıcaklığı (Cutting Temperature)

Kullanılan işleme yöntemi olan tornalama, talaşlı imalat yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. Talaşlı imalatta kesme bölgesinde ortaya çıkan sıcaklığın minimuma indirilmesi geçmişten günümüze halen en büyük istem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple deneylerde takım ve yüzey arasında meydana gelen sıcaklık yorumlamaları ve gözlemleri önem arz etmektedir. Takım ucunda meydana gelen sıcaklık takım ömrü ve takım aşınmasını etkileyen en önemli özelliklerdendir ve işlem esnasında takım yönüne doğru gerçekleşen ısı akışından kaynaklanmaktadır [24]. Takım aşınmasının yüzey işlemede meydana getirdiği negatif sonuçlar göz önüne alınırsa kesme sıcaklığı değerlendirmesi göz ardı edilemeyecek kadar önem arz eden konulardandır. Aşırı aşınma işlenen yüzey ve takım arasında yüzey temasını arttırdığı için takım ucu sıcaklığında da yükselmeye sebep olur. Ayrıca kesme hızı artışıyla ısının kesme bölgesinde dağıtım süresini azalması da takım ucu sıcaklığının artmasına neden olan bir diğer faktördür [25]. Şekil 4'te çalışma bazında gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen takım ucu sıcaklık değişim grafiği verilmektedir. Optimum kesme sıcaklığı için ele alınan üç parametrenin de düşük seviyelerde olması gerekmektedir. Bu çalışma içinde optimum kesme sıcaklığı 30 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm parametre değerlerinin seçildiği deneyde görülmektedir. Parametrelerin yüksek değerlerde kullanılmasıyla maksimum takım ucu kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Literatürde kesme hızının artmasıyla takım ucu sıcaklığının artış gösterdiği sonucu verilmektedir [26, 27]. Kesme sıcaklığı değişim periyodu tüm parametrelerin artması ile artan bir eğilim göstermektedir.

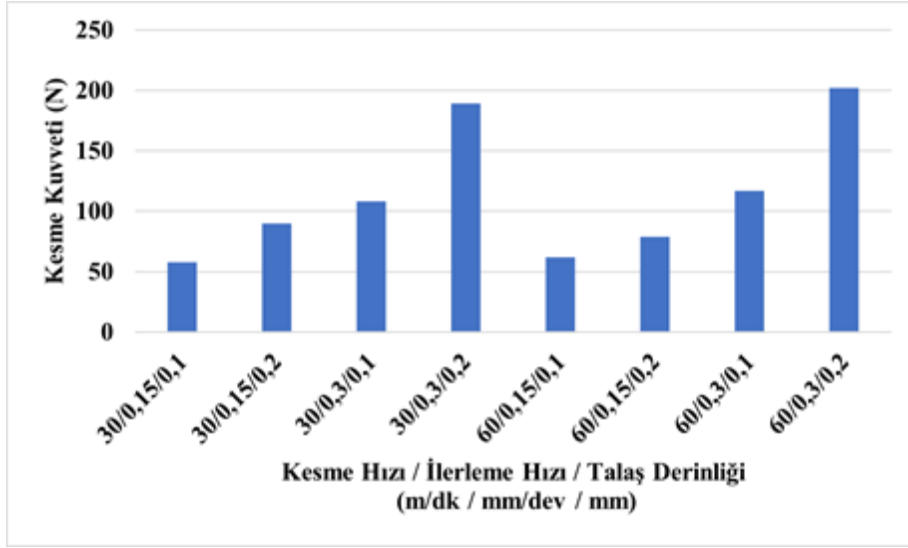
Kesme hızının ve kesme derinliğinin kademeli olarak artması, AISI 52100 malzemenin işlenmesinde sıcaklığı artırmaktadır. Ancak sıcaklık değerindeki en belirgin artış her üç kesme parametresinin de yüksek olduğu durumda elde edilmiştir.



Şekil 4. Takım ucu sıcaklığının kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Tool-tip temperature variations according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

3.3. Kesme Kuvveti (Cutting Force)

AISI 52100 yüksek mukavemet özelliklerine sahip rulman çeliği olarak bilinmektedir. Bu özelliği sahip olması malzemenin işleme esnasında daha yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyacı olduğu gerçeğini yanında getirmektedir. Bu amaçla çalışmaya kesme kuvveti analizi de eklenmiştir. Şekil 5'te ele alınan işleme parametrelerine göre kesme kuvveti değişim grafiği verilmektedir. Maksimum kesme kuvveti yüksek kesme hızı, yüksek ilerleme oranı ve düşük kesme derinliğinde elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde kesme derinliğinin değişimiyle kesme kuvvetinin büyük ölçüde etkilendiği görülmektedir. Yüksek kesme derinlikleri ve ilerleme oranı kesmeye karşı daha yüksek direnç göstermesinden kaynaklı olarak kesme için daha fazla kuvvet gereksinimi ortaya çıkarmaktadır [2]. Kesme hızının artış göstermesi kesme kuvvetinde çok fazla değişime sebep olmamıştır. Her iki kesme hızı değerinde de artan ilerleme ve kesme derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetindeki artış eğilimi benzerlik göstermektedir. Kesme hızında artışa bağlı olarak aynı parametre değerlerinde kesme kuvvetinde bir azalma gözlenmektedir. Bu eğilim etkisini yüksek kesme derinliği ve ilerleme değerinde kaybetmektedir [28]. Bu durum kesme kuvvetinin optimizasyonu için öncelikli olarak kesme hızı parametresinin göz önüne alınamayabileceği sonucunu doğrulamaktadır. İlerleme miktarı yukarıda da bahsedildiği üzere kesmeye karşı gösterilen dirençle ilişkili olduğundan düşük ilerleme değerleri kesme kuvvetinde pozitif sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Optimum kesme kuvveti 30 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm parametre seçiminin gerçekleştiği deneyde elde edilmiştir. Düşük kesme hızı değerinde kesme derinliğinde artışa bağlı olarak kesme kuvveti %35.55 oranında artmaktadır. İlerleme oranındaki artışa bağlı olarak kesme kuvvetindeki artış %46.29 oranında olmaktadır.



Şekil 5. Kesme kuvvetinin kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Cutting force variations according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

3.3. Kesme Kuvveti İçin İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis for Cutting Force)

AISI 52100 malzemesinin yüksek mukavemet özelliklerine sahip olduğu ve işlenmesi sırasında yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç duyduğu yukarıda belirtilmiştir. Bununla beraber kesme kuvveti yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ucu sıcaklığında önemli ölçüde rol oynadığı için çalışma kapsamında sadece kesme kuvvetine ANOVA analizi yapılarak en önemli parametre belirlenmiştir. Tablo 5’de istatistiksel analiz sonuçları verilmektedir. ANOVA analizi bağımsız değişkenin bağımlı değişkenler üzerinde anlamlı etkisinin olup olmadığı durumunu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir [29]. F değerlerinden en yükseği ele alınan değişkeni en fazla etkileyen parametre olarak yorumlanmaktadır. Tablo 5 incelendiğinde kesme kuvveti için en önemli parametre %63.5’lik yüzdesel oranla ilerleme oranı olarak görülmektedir. Önem sırasında ilerleme oranını kesme derinliği ve kesme hızı takip etmektedir. Aynı zamanda analiz sonucunda R^2 değeri %91.09 olarak elde edilmiştir. Buradan deney sonuçlarının yüksek bir doğruluk payına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Kesme kuvveti için ANOVA (ANOVA results for cutting force)

Parametre	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Kesme hızı	1	28.1	28.1	0.06	0.819	0.133
İlerleme oranı	1	13366.1	13366.1	28.49	0.006	63.5
Kesme derinliği	1	5778.1	5778.1	12.32	0.025	27.451
Hata	4	1876.5	469.1	-	-	8.915
Toplam	7	21048.9	-	-	-	100

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Bu çalışma kapsamında AISI 52100 rulman çeliğinin kuru kesme ortamında tornalanması yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti değerlendirilmiştir. Deneylerin sonucunda elde edilen veriler grafikselleştirilerek görselleştirilmiş ve en son olarak da kesme kuvveti için ANOVA analizi yapılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuç ve gözlemler çıkarılabilir.

- İlerleme 0.15 mm/dev'e ve kesme derinliği 0.1 mm'ye sabitlendiğinde ve kesme hızı 30 m/dak' dan 60 m/dak'ya çıkarıldığında yüzey pürüzlülüğündeki azalış miktarı %6.25 şeklinde elde edilmektedir. Kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0,1 mm olarak ele alındığı ve ilerleme oranının 0.15 mm/dev'den 0.3 mm/dev'e çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğünde %33.87'lik bir artış meydana gelmiştir. İlerleme 0,15 mm/dev ve kesme hızı 30 m/dak'ta gerçekleştirilen deneylerde kesme derinliğinin 0.1 mm'den 0.2 mm'e çıkarılmasıyla da yüzey pürüzlülüğünde %46'luk bir artış gözlemlenmiştir. Kesme hızının artış göstermesi yüzey pürüzlülüğünü azaltırken ilerleme ve kesme derinliğinde artış olması yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.
- Kesme hızının 30 m/dak ve ilerlemenin 0.15 mm/dev olarak seçildiği deneylerde 0,1 mm kesme derinliğinden 0.2 mm kesme derinliğine artış meydana geldiğinde kesme kuvvetinde %35.55'lik bir yükselme, ilerlemenin 0.15 ve kesme derinliğinin 0.1 mm değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde kesme hızının 30 m/dak'tan 60 m/dak'a çıkarılmasıyla %6.45'lik kesme kuvvetinde artış ve kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0.1 değerlerinde sabitlendiği ve ilerlemenin 0.15 mm/dev' den 0.3mm/dev' e çıkarılmasıyla kesme kuvvetinde %46.29'luk artış meydana gelmiştir. Buradan her üç parametrenin yükselmesinin kesme kuvvetini arttıracak fakat en az kesme hızı parametresinin etkileyeceği sonucu görülmektedir.
- Takım ucu sıcaklık analizi için kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0.1 mm olduğu deneylerde ilerlemenin arttırılmasıyla %0.27 kadar çok az yüzdesel artış gerçekleşmiştir. İlerlemenin 0.15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0.1 mm olarak kabul edildiği deneylerde kesme hızının iki katına çıkarılmasıyla takım ucu sıcaklığında %2.66'lık bir artış meydana gelmiştir. Kesme hızı 30 m/dak ve ilerleme 0.15 mm/dev ile gerçekleştirilen deneylerde kesme derinliğinin 0.1 mm'den 0.2 mm'ye çıkarılmasıyla takım ucu sıcaklığında %2.14'lük bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlardan takım ucu sıcaklığının en fazla ilerleme oranından etkilendiği ve üç parametrenin arttırılmasıyla takım ucu sıcaklığının yükseldiği sonucuna varılmaktadır.
- Yüzey pürüzlülüğü için optimum koşullar kesme hızının 60 m/dak, ilerlemenin 0.15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0.1 mm olarak seçildiği deneylerde elde edilmiştir. Kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı için optimum koşullar ise kesme hızı 30 m/dak, ilerleme 0.15 mm/dev ve kesme derinliği 0.1 mm olarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir.
- Kesme kuvvetine yapılan ANOVA analizi sonucunda parametrelerin etki sıralaması ilerleme oranı, kesme derinliği ve kesme hızı olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Panda, A.K. Sahoo, R. Kumar, R.K. Das, A review on machinability aspects for AISI 52100 bearing steel, *Materials Today: Proceedings*, 23:617-621, 2020.
2. H. Demirpolat, R. Binali, A. D. Patange, S. S. Pardeshi, S. Gnanasekaran, Comparison of tool wear, surface roughness, cutting forces, tool tip temperature, and chip shape during sustainable turning of bearing steel, *Materials*, 16 (12): 4408, 2023.
3. U.M.R. Paturi, A. Yash, S.T. Palakurthy, N. Reddy, Modeling and optimization of machining parameters for minimizing surface roughness and tool wear during AISI 52100 steel dry turning, *Materials Today: Proceedings*, 50:1164-1172, 2022.
4. A. Kentli, A. Kar, A satisfaction function and distance measure based multi-criteria robot selection procedure, *International Journal of Production Research*, 49(19):5821-5832, 2011.
5. P. Sivaiah, U. Bodicherla, Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101:85-95, 2020.
6. M. Jamil, N. He, W. Zhao, A.M. Khan, H. Xiang, M.K. Gupta, A. Iqbal, A novel low-pressure hybrid dry ice blasting system for improving the tribological and machining characteristics of AISI-52100 tool steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 80:152-160, 2022.

7. O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in Manufacturing*, 3:42-53, 2015.
8. K. Bouacha, M.A. Yallese, T. Mabrouki, J.-F. Rigal, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3): 349-361, 2010.
9. B.R. Sankar, P. Umamaheswar rao, Analysis of forces during hard turning of AISI 52100 steel using Taguchi method, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2):2114-2118, 2017.
10. T. Ramakrishnan, K. Sathish, P. Sampath, S. Anandkumar, Experimental investigation and optimization of surface roughness of AISI 52100 alloy steel material by using Taguchi method, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 10(6):130-138, 2016.
11. S. Mane, S. Kumar, Analysis of surface roughness during turning of AISI 52100 hardened alloy steel using minimal cutting fluid application, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1):138-149, 2022.
12. H. Vijaykumar, A. Siddiq, M. Sinan, Optimization of turning parameters using Taguchi technique for MRR and surface roughness of hardened AISI 52100 steel, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (5):39-44, 2014.
13. A. Alok, M. Das, Multi-objective optimization of cutting parameters during sustainable dry hard turning of AISI 52100 steel with newly develop HSN2-coated carbide insert, *Measurement*, 133:288-302, 2019.
14. A. Yıldız, L. Uğur, İ.E. Parlak, Optimization of the cutting parameters affecting the turning of AISI 52100 bearing steel using the Box-Behnken experimental design method, *Applied Sciences*, 13(1): 3, 2022.
15. A. Şahinoğlu, Investigation of the effects of MQL and material hardness on energy consumption, vibration, and surface roughness in hard turning of AISI 52100 steel for a sustainable manufacturing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, p. 09544089231173257, 2023.
16. M. Rafighi, M. Özdemir, A. Şahinoğlu, R. Kumar, S.R. Das, Experimental assessment and topsis optimization of cutting force, surface roughness, and sound intensity in hard turning of AISI 52100 Steel, *Surface Review and Letters*, 29(11): 2250150, 2022.
17. J. D. Kechagias, K.-E. Aslani, N. A. Fountas, N. M. Vaxevanidis, D. E. Manolakos, A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy, *Measurement*, 151: 107213, 2020.
18. ISO 3685: tool-life testing with single-point turning tools, International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1993.
19. Ş. Karabulut, A. Güllü, Farklı yavaşlama açıları ile vermiküler grafitli dökme demirin frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin araştırılması ve analitik modellenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28, 1, 2013.
20. G. Bartarya, S. Choudhury, Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel, *Procedia CIRP*, 1: 651-656, 2012.
21. M.C. Shaw, J. Cookson, *Metal cutting principles*, Oxford university press, New York, 2005.
22. G. Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*, CRC Press, 1988.
23. H. Başak, Ş. Baday, Küreselleştirilmiş orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin regresyon analizi ile modellenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4):253-258, 2016.
24. F. Jiang, Z. Liu, Y. Wan, Z. Shi, Analytical modeling and experimental investigation of tool and workpiece temperatures for interrupted cutting 1045 steel by inverse heat conduction method, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6): 887-894, 2013.
25. G.C. Behera, J. Thrinadh, S. Datta, Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825, *Materials Today: Proceedings*, 38:2664-2670, 2021.
26. H. Sağlam, S. Yaldiz, F. Unsacar, The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature, *Materials & Design*, 28(1): 101-111, 2007.
27. M. Pal, S. Dasmahapatra, Estimation of cutting forces and tool tip temperature in turning operation with help of artificial neural network, *Materials Today: Proceedings*, 66:1623-1632, 2022.

28. S. Rajarajan, C. Ramesh Kannan, M.S. Dennison, A comparative study on the machining characteristics on turning AISI 52100 alloy steel in dry and microlubrication condition, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(2): 360-371, 2022.
29. J. Nevalainen, H. Oja, SAS/IML macros for a multivariate analysis of variance based on spatial signs, *Journal of Statistical Software*, 16:1-17, 2006.