

## Rene 41 Süper Alaşımının Tornalama Yöntemiyle İşlenebilirliğinin Araştırılması

Fatih MEYDANERİ<sup>1,\*</sup> , Gültekin UZUN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 08.08.2022

**Kabul:** 26.08.2022

#### Anahtar Kelimeler:

İşlenebilirlik

Rene 41

Takım aşınması

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kuvveti

### ÖZET

Süper alaşımlar yüksek sıcaklığa karşı direnci olan ve yüksek sürünme dayanımları ile korozyona karşı direncinin yüksek olması sebebiyle uzay ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması değerlendirilmiştir. Kesici takım olarak Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi ile TiAlN kaplanmış sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Çalışmada kesme parametreleri olarak beş farklı kesme hızı (15, 20, 30, 40, 45 ve 60 m/dak), sabit kesme derinliği (1 mm) ve sabit ilerleme hızı (0.10 mm/dev) seçilmiştir. Çalışma neticesinde artan kesme hızlarının kesme kuvvetini düşürdüğü görülmüştür. En yüksek kesme kuvvetleri ( $F_c$ ) ve ilerleme kuvveti ( $F_f$ ) için 20 m/dak kesme hızında oluşurken, radyal kuvvet ( $F_r$ ) için 15 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Üç kuvvette de 45 m/dak kesme hızına kadar kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En iyi yüzey pürüzlülük değeri en düşük kesme hızında elde edilmiştir. 15 m/dak kesme hızında ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değeri 0.996  $\mu\text{m}$  ölçülürken, 60 m/dak kesme hızında %98 artış göstererek 1.97  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. Genel eğilime bakılacak olursa 15 m/dak kesme hızından 45 m/dak kesme hızına kadar %31'lik artışın olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinde de olduğu gibi kesme hızının 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile yüzey pürüzlülüğünün aşırı artması söz konusu olmuştur.

## Investigation Machinability of Rene 41 Superalloy in Turning Method

### ARTICLE INFO

**Received:** 08.08.2022

**Accepted:** 26.08.2022

#### Keywords:

Machinability

Rene 41

Tool wear

Surface roughness

Cutting force

### ABSTRACT

Superalloys are widely used in the aerospace industry due to their high temperature resistance, high frictional strength and high corrosion resistance. In this study, the cutting forces, surface roughness and tool wear obtained as a result of turning of Nickel-based Rene 41 super alloy were evaluated. TiAlN coated cemented carbide cutting tools were used as cutting tools. Five different cutting speeds (15, 20, 30, 40, 45 and 60 m/min), constant cutting depth (1 mm) and constant feed rate (0.10 mm/rev) were selected as cutting parameters in the study. As a result of the study, it was observed that increasing cutting speeds decreased the cutting force. While the highest cutting forces occurred at 20 m/min cutting speed for  $F_c$  and  $F_f$ , it was measured at 15 m/min cutting speed for  $F_r$ . It is seen that the forces exhibit a decreasing trend up to 45 m/min cutting speed in all three forces. The best surface roughness value was obtained at the lowest cutting speed. While the average surface roughness  $R_a$  value was measured as 0.996  $\mu\text{m}$  at a cutting speed of 15 m/min, it was measured as 1.97  $\mu\text{m}$  with an increase of 98% at a cutting speed of 60 m/min. If we look at the general trend, it is seen that there is a 31% increase from 15 m/min cutting speed to 45 m/min cutting speed. As with the cutting forces, the surface roughness increased excessively with the increase of the cutting speed to 60 m/min.

\*Sorumlu yazar, e-posta: fatih.meydaneri@gmail.com

To cite this article: F. Meydaneri, G. Uzun, Investigation Machinability of Rene 41 Superalloy in Turning Method, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 32-38, 2022.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1159336>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sıcaklık, korozyon ve yoğun aşınma mekanizmalarının mevcut olduğu şartlarda metal ve metal alaşımlarının, istenilen özellikleri sağlayamadığı noktalarda farklı malzeme grupları tercih edilmektedir. Süper alaşımlar ise bu grupların başında gelmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte; uygun teknik özelliklere sahip ve ekonomik olarak tercih edilebilir düzeyde olan malzemelerin elde edilmesi için mekanik özellikler açısından yüksek performans sergileyebilen, yüksek sıcaklıkta aşınma ve korozyona dayanıklı süper alaşımların üretimine ihtiyaç duyulmuştur. Malzeme bilimindeki gelişmeler havacılık ve uzay alanında uçuş menziline önemli oranda artış sağlamıştır. Mekanik ve termal gereksinimler sonucu, uçak motorunda kullanılan parçalar için nikel, titanyum, kobalt ve demir esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Nikel esaslı alaşımlar havacılık ve uzay uygulamalarında en çok tercih edilen malzemeler arasındadır. Jet motorlarında kullanılan sıcak bölge elemanları gibi yüksek sıcaklıklarda ciddi ölçüde gerilmelere maruz kalan malzemelerde yaygın olarak kullanılan çökelme sertleşmeli bir nikel esaslı süper alaşımı olan Rene 41, General Electric firması tarafından geliştirilmiştir. Bu alaşımın 980 °C'ye kadar varan yanma gazlarına çok iyi direnç sağlaması aşınmaya ve oksidasyona oldukça dirençli bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Uçak motorlarında türbin gövdeleri, tekerlekler, türbin kanatları, artçıl yakıcı (afterburner) parçaları, civatalar ve bağlantı elemanları malzemesi olarak tercih edilmektedir. Rene 41 her ne kadar yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler ve yüksek kimyasal kararlılığa sahip olsa da işlenebilirlik açısından zor bir malzemedir. Talaşlı imalat işlemlerinde yüksek yüzey kalitesi elde etmek amacıyla ısıl işlem uygulanmış veya yaşlandırma operasyonu gerçekleştirilmiş alaşımlar tercih edilir. Rene 41 alaşımı işleme açısından Inconel 718'le benzer özelliklere sahiptir fakat işlenebilirlik özellikleri Inconel 718 alaşımına kıyasla daha zordur [1,2].

Nikel esaslı süper alaşımlar kalite ve üretim gereksinimlerini sağlayabilmek bakımından işlenebilirliği en zor süper alaşımlardandır. Kötü işlenebilirlik özelliğinin nedenleri yüksek ısıl sertlik, deformasyon sertleşmesi, sert karbür taneli yapı, yüksek difüzyon aşınma oranı, talaş yapışması, sürekli talaş oluşumu ve ısıl iletkenliğin düşük olması gibi sıralanabilir [3,4]. Tüm bu sebepler nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kullanılacak kesici takım malzemelerinin işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesini mecburi kılmaktadır.

Sementit karbür takımlar nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takımlar tornalama, delme gibi sürekli talaş kaldırma işlemlerinde yoğun olarak tercih edilmektedir. Kesici takım teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, bazı seramik takım malzemeleri ( $Al_2O_3-TiC$ ),  $Si_3N_4$  silikon nitrit esaslı seramikler ve whisker takviyeli alüminyum oksit seramikler (%25 SiCw kapsarlar), nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde karbür takımlara nazaran daha çok kullanılmaktadırlar [5,6].

Kısa takım ömrü ve iş parçasının sert olması nikel esaslı süper alaşımların işlenebilirliğinde en önemli iki faktördür. Talaş kaldırma işlemi sırasında yüzeyde gerilim değişimleri meydana gelebilir ve bu da işlenen malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinin (gerilme-korozyon gibi) değişmesine neden olur. Dolayısıyla işlenen parçanın yüzey bütünlüğünün korunması büyük önem arz etmektedir. Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde oldukça düşük takım ömürleri ile karşılaşmaktadır. Yeterli takım ömrü elde edebilmek amacıyla işleme yöntemi, takım malzemesi, takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği gibi parametrelerin uygun seçilmesi gerekmektedir [3].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Inconel 718 talaşlı imalat özellikleri açısından havacılık ve uzay alanında %75, jet motorlarında ise %50 oranında ortalama kullanım değerleri ile daha çok tercih edilen bir malzemedir [7]. Son yıllarda ise Rene 41 süper alaşım kullanımı kayda değer miktarda artmış olup, etkin üretim yöntemlerinin oluşturulması için işleme özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Tali ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Rene 41 malzemesinin tornalanması sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını incelemiştir. Deneylerde kesme ve ilerleme hızı, değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak; yüzey pürüzlülüğünde ilk olarak ilerleme hızının büyük bir etken olduğu ve yüksek ilerleme hızı değerlerinin yüzey kalitesinde düşmeye neden olduğunu belirtmiştir. Kesme hızının, yüzey

pürüzlülüğünü belirlemede etken bir faktörü olduğunu ve kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinde azalma ihtimali olduğunu öngörmüşlerdir. Kesici takımın aşınma mekanizmasının, kesme ve ilerleme hızının artmasıyla doğru orantılı olduğunu vurgulamışlardır [8].

Yapılan literatür incelemesi sonucunda Rene 41 malzemesinin mikro yapısı, aşınma direnci, kaynakla birleştirilebilmesi gibi özellikleri üzerine çalışmaların daha yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir [9-11]. Nikel esaslı süper alaşımlar üzerine çalışmaların çoğunluğunun Inconel 718 üzerine olduğu görülmüştür [12-14]. Rene 41 süper alaşımının işlenebilirliği hakkında çalışmaların çok az olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, Rene 41 süper alaşımının tornalanması işleminde, iş parçasının yüzey kalitesi, kesme kuvveti ve kesici takımın aşınma davranışı incelenmektedir. Malzemenin işlenebilirlik davranışını ve Takım ömrünü etkileyen parametre olması nedeniyle [15-17] kesme hızı değişken parametre olarak kullanılmış olup, etkileri tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda Rene 41 malzemesinin işlenebilirlik parametrelerinin kesme hızına bağlı değişiminin irdelenmesi hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme (Material)

Deneylerimizde, endüstride yaygın olarak uygulanan bir Rene 41 süper alaşımı kullanılmıştır. Ø50 × 400 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler ile ilgili olarak, bunlar Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Yüksek sertlikleri nedeniyle, bu malzemelerin işlenmesi çok zordur, bu da onları havacılık, otomotiv ve askeri alanlar gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun hale getirir.

Tablo 1. Rene 41 süper alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Rene 41 super alloy)

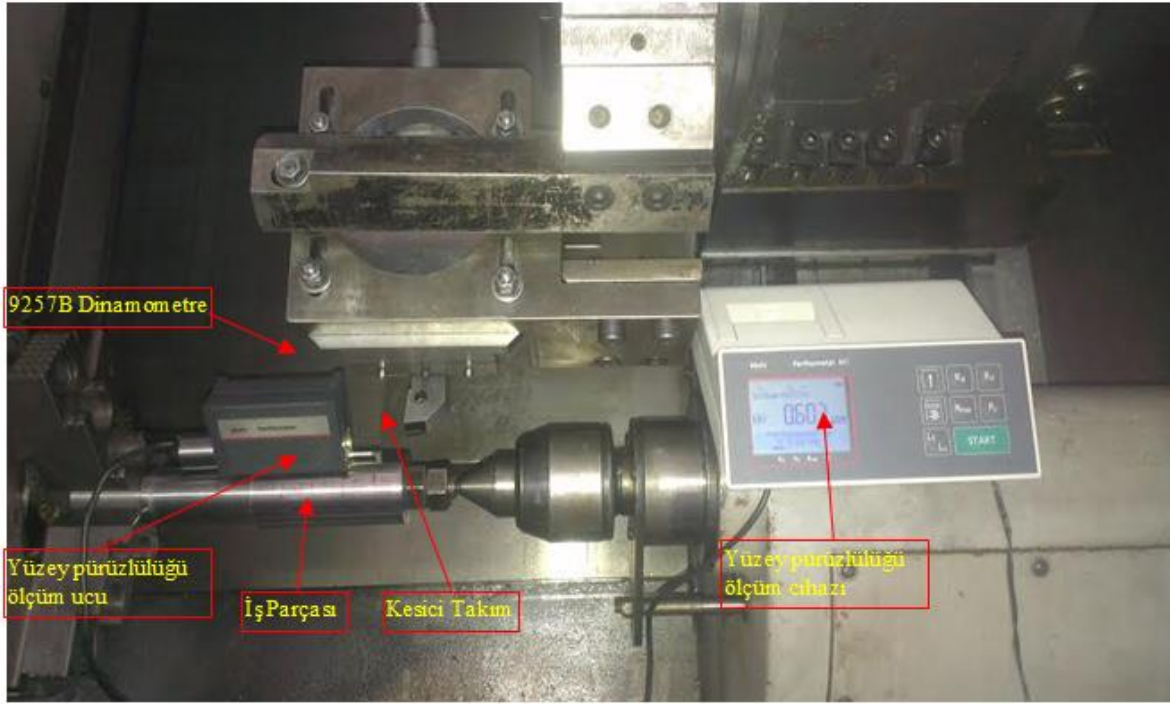
Element %	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	Al	C
	53.86%	18.53%	10.52%	9.53%	3.24%	2.37%	1.53%	0.062%
	Si	Zr	Mn	B				
0.05%	0.03%	0.01%	0.006%					

Tablo 2. Rene 41 süper alaşımının teknik özellikleri (Technical characteristics of Rene 41 super alloy)

Özellik	Birim	Rene 41
Yoğunluk (20°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	8.25 g/cm <sup>3</sup>
Erieme sıcaklığı	(°C)	1345°C
Brinel sertlik değeri	(HB)	334
Akma gerilmesi	(MPa)	579.2 MPa
Çekme gerilmesi	(MPa)	710.2
Elastikiyet modülü	(GPa)	1.65 x10 <sup>5</sup>
Uzama katsayısı	%	11
Termal Genleşme Katsayısı	µm / m°C	15.5 µm
Termal İletkenlik	kcal / (hr.m. °C)	121.4

### 2.2. Takım Tezgahı ve Ölçüm Cihazları (Machine Tool and Measuring Device)

Talaşlı imalat testleri, maksimum gücü 10 kW'a eşit olan ve devir sayısı 50 ile 3500 dev/dk arasında olan JOHNFORD T35 endüstriyel tip CNC torna tezgâhında yapılmıştır (Şekil 1). Kuru kesme işlemi sırasında, üç ortogonal kesme kuvvetini (Fx, Fy, Fz) ölçmek için uygun yük yükseltici ile takım tutucu altındaki Kistler marka 9257B tipi üç bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Bu, üç kesme kuvvetinin doğrudan ve sürekli olarak kaydedilmesini ve eşzamanlı grafik olarak görselleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 1). Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için "MahrPerthometer M1" yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kesici takımların takım aşınması resimleri, 50X büyütme oranında AM413ZT Polarize Dijital Mikroskop kullanılarak çekilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

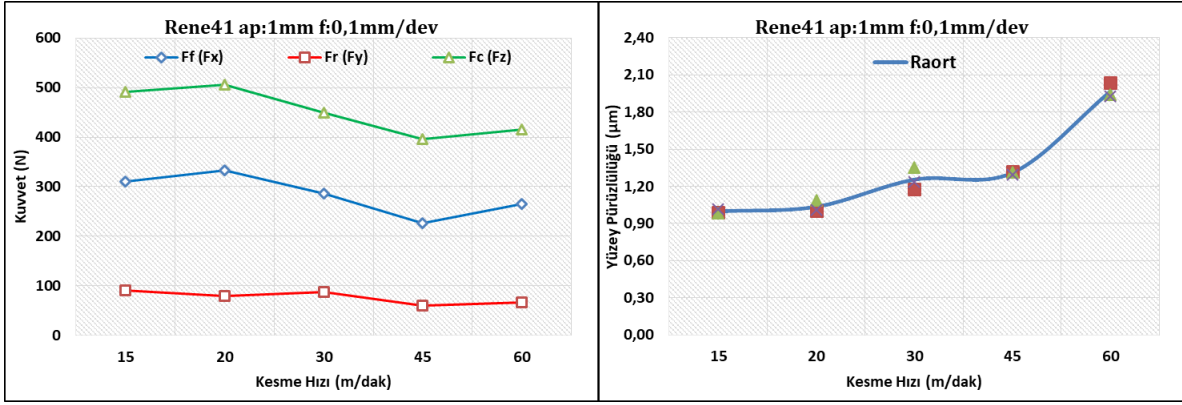
### 2.3. Kesme Parametreleri ve Kesici Takım (Cutting Parameters and Cutting Tool)

İşleme parametreleri ile ilgili olarak kesme hızları 15, 20, 30, 45 ve 60 m/dak, kesme derinliği sabit 1 mm, ilerleme hızı 0.10 mm/dev de 20 mm kesme boyunda gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, üretici firmalar tarafından tavsiye edilen ISO 3685 standardı dikkate alınarak seçilmiştir. Kesme işlemi sırasında, işleme testleri, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemi ile TiAlN kaplanmış KCU10 kalite CNMG 120404 MS kodlu kesici takım ile gerçekleştirilmiştir. Takım tutucu olarak DCLNR 2525 M12 kodlu kater kullanılmıştır.

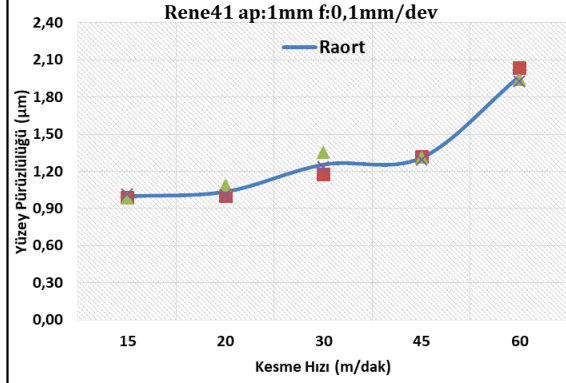
## 2. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması için kritik kesme hızı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kesme hızına bağlı olarak kesme kuvveti değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde kesme teorisine göre bir kuvvet oluşumu gözlenmektedir. Radyal kuvvet  $F_r$  en düşük kuvvet bileşeni olarak oluşurken, ilerleme kuvveti  $F_f$  yaklaşık olarak  $F_r$  kuvvetinin üç katı olarak oluşmuştur.  $F_r$ 'ye göre esas kesme kuvveti ise yaklaşık beş katı olarak ölçülmüştür. Bu durum talaş kesitine bağlı olarak değişebilmektedir.

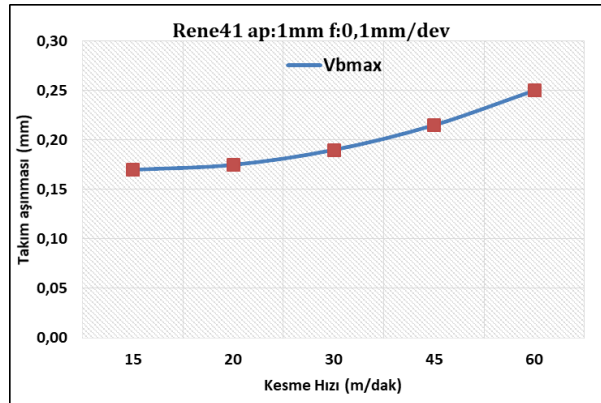
Kesme hızının artışı ile genel olarak bütün kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En yüksek kesme kuvvetleri  $F_c$  ve  $F_f$  için 20 m/dak kesme hızında oluşurken,  $F_r$  için 15 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Üç kuvvette de 45 m/dak kesme hızına kadar kuvvetlerin düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu durum kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın kesme işlemi rahatlatması ile açıklanabilir [11]. 45 m/dak kesme hızından 60 m/dak kesme hızına geçildiğinde ise  $F_r$  de %12,  $F_f$  de %16 ve  $F_c$  de ise %4 lük artış görülmektedir. Kesme hızının artışı ile sıcaklığın aşırı artışı kesici takımın hızlı bir şekilde aşınma eğilimine girmesine sebep olmuş ve bu durumun kesme kuvvetlerinin artış göstermesine neden olduğu kanısına varılmıştır. Bu durum takım resimlerindeki aşınma eğilimi farkları ile anlaşılmaktadır (Şekil 5). Kesme hızı artışı ile yan yüzeydeki ve kesici üst yüzeyinde oluşan abrasif aşınmanın arttığı gözlemlenmiştir.



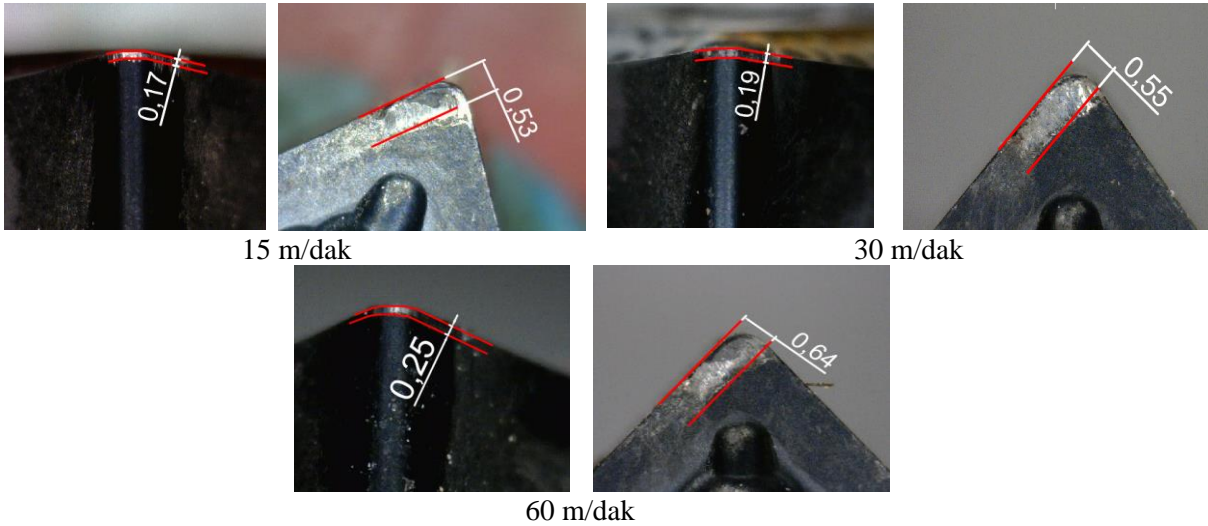
Şekil 2. Kesme hızı-Kesme kuvvetleri grafiği (Graphic of cutting speed-Cutting force)



Şekil 3. Kesme hızı-Yüzey pürüzlülüğü grafiği (Graphic of cutting speed-Surface roughness)



Şekil 4. Kesme hızı-Takım aşınması grafiği (Graphic of cutting speed-Tool wear)



Şekil 5. Takım aşınması resimleri (50X) (Tool wear pictures (50X))

Şekil 3'te kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları verilmiştir. Her deneyde üç ölçüm alınmış olup bu ölçümlerin ortalamaları genel eğilim grafiği oluşturulmuştur. Kesme hızının artışı ile yüzey pürüzlülük değerinin kötüleştiği tespit edilmiştir. 15 m/dak kesme hızında ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri 0,996 µm ölçülürken, 60 m/dak kesme hızında %98 artış göstererek 1,97 ölçülmüştür. Genel eğilime bakılacak olursa 15 m/dak kesme hızından 45 m/dak kesme hızına kadar %31'lik artışın olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetlerinde de olduğu gibi kesme hızının 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile yüzey pürüzlülüğünün aşırı artması söz konusu olmuştur. Bu durum takım aşınması artışının yüzey kalitesini olumsuz etkilediğini göstermektedir.



Kesici takımındaki aşınmanın artması ile birlikte işlenen parça yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana gelir. Bu durum yüksek sertliğe sahip malzemelerde daha çok görülmektedir [18-19].

Şekil 4'te kesme hızına bağlı olarak takım aşınması grafiği verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi kesme hızına bağlı olarak takım aşınmasının arttığı belirlenmiştir. En düşük aşınma değeri 15 m/dak kesme hızında oluşurken, 20 m/dak kesme hızında %3 lük bir artış tespit edilmiştir. Kesme hızının 30 m/dak kesme hızına çıkışı ile %12, 45 m/dak kesme hızına çıkışı ile %26 ve 60 m/dak kesme hızına çıkışı ile %47'lik bir artış görülmüştür. Bu durum kesme bölgesinde kesme hızına bağlı olarak oluşan sıcaklığın takım aşınmasına neden olması ile açıklanabilir. Takım aşınma oranı yoğun kuvvet ve sıcaklığın olduğu alanlarda daha yüksektir. Artan sıcaklık kobalt bağlayıcılardan oluşan karbür takımları negatif etkiler [13].

Bütün grafikleri işlenebilirlik açısından yorumlamak gerekirse 20 ile 45 m/dak kesme hızı aralığında Rene 41 malzemesinin işlenebileceği görülmektedir. Süper alaşımların kesme dirençlerinin yüksek oluşu bu malzemelerde yüksek kesme hızlarının kullanımını engellediği görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma ile Nikel esaslı Rene 41 süper alaşımının tornalanması sonucunda kesme hızına bağlı olarak elde edilen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınması sonuçları kısaca aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının artışı ile kesme kuvvetlerinin %14 ile %25 arasında düştüğü, yüzey pürüzlülüğünün %97 ve takım aşınmasının ise % 47 arttığı tespit edilmiştir.
- Kesme kuvvetlerin esas kesme kuvveti en yüksek oluşurken, esas kesme kuvvetine göre ilerleme kuvveti ikinci sırada %36 daha düşük ve radyal kuvvet ise %82 ile en düşük kuvvet olarak tespit edilmiştir.
- 45 m/dak kesme hızı, yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından kritik bir hız sınırı olarak belirlenmiştir.
- Takım aşınması olarak takımın yan yüzeyinde ve üst yüzeyinde abrasif aşınma tipi görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. D. Tali, H. Gaşan, M. Güleşen, S. Gürgen, M.C. Kuşhan, Nikel esaslı süperalaşım Rene 41'in tornalama işlemi, The IIER International Conference Czech Republic, Prague, 2017.
2. E. O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, Journal of Materials Processing Technology, 134(2): 233-253, 2003.
3. E. O. Ezugwu, Z.M. Wang, A.R. Machado, The machinability of nickel-based alloys: a review, Journal of Materials Processing Technology, 86(1-3): 1-16, 1999.
4. A. Güllü, Ş. Karabulut, Dynamic chip breaker design for Inconel 718 using positive angle tool holder, Materials Manufacturing Processes, 23(8): 852-857, 2008.
5. N. Richards, D. Aspinwall, Use of ceramic tools for machining nickel-based alloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 294: 575-588, 1989.
6. A. Altın, M. Nalbant, A. Taskesen, The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools, Materials and Design, 28(9): 2518-2522, 2007.
7. D.G. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45(5-6): 421-429, 2009.
8. D. Tali, Rene 41 süperalaşımının işlenebilirliğinin farklı torna parametrelerinde incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2016.
9. E.J. Vermilyea, E.D. Green, W.L. Carr, Fabricability of Materials R-235, L-605, Rene 41, M-252 and J-1650 as Pertaining to Part No. 8-26054. General Dynamics/Convair San Diego Calif, 1961.
10. Z. Norman, M. Field, V.A. Tipnis, R.C. Garrison, J.D. Christopher, Establishment of Production Machinability Data. Metcut Research Associates Inc. Cincinnati Ohio, 1975.

11. H.P. Hack, Mechanical, Corrosion and Fatigue Properties of 15-5 PH, Inconel 718, and Rene 41 Weldments, David W. Taylor Naval Ship Research And Development Center Bethesda Md., 1975.
12. S.R. Singh, R.G. Mote, S.K. Mishra, The effect of microstructures and precipitates ( $\gamma'$ ,  $\gamma''$ ,  $\delta$ ) on machinability of Inconel-718 nickel-based superalloy in turning process, Journal of Manufacturing Processes, 82:374-389, 2022.
13. D. Palanisamy, K. Lakshmikala, D. Umapathi, Machinability studies on nickel based super alloys using cryo-treated tungsten carbide inserts, Materials Today: Proceedings, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.017>
14. C. Djordje, D. Kramar, Machinability investigation and sustainability analysis of high-pressure coolant assisted turning of the nickel-based superalloy Inconel 718, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022. <https://doi:10.1177/09544054221092939>
15. G. Uzun, S. Yağmur, İ. Korkut, U. Şeker, Hastelloy X süper alaşımının tornalanmasında kriyojenik işlem uygulanan PVD ve CVD kaplamalı takımın performansının incelenmesi, Tasarım ve Teknoloji, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 5(2): 231–239, 2017.
16. G. Uzun, S.A. Yaşar, İ. Korkut, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(2): 469–475, 2017.
17. F. Okay, S. Islak, Y. Turgut, Investigation of machinability properties of aluminium matrix hybrid composites, Journal of Manufacturing Processes, 68: 85-94, 2021.
18. Y. Özçatalbaş, Kesici takım aşınması ve iş malzemesi mekanik özelliklerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisi, Politeknik Dergisi, 4: 47-52, 2002.
19. E. Kaya, B. Akyüz, Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys, Open Engineering, 7: 330–342, 2017.