



Makale / Research Paper

Tornalama İşleminde Kesme kuvveti ve Talaş Oluşumu Üzerinde Kesme Parametrelerinin Etkisinin Deneysel ve Nümerik Analizi

Mahir AKGÜN^{1a}, Halil DEMİR^{2b}

¹Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, 68100 Aksaray/Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük/Türkiye
mahirakgun@aksaray.edu.tr

Received/Geliş: 07.03.2021

Accepted/Kabul: 10.05.2021

Öz: Bu çalışmada, kaplamasız kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 süperalaşımının tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (Fc) üzerinde kesme parametrelerinin etkisi deneysel ve nümerik analizler ile değerlendirilmiştir. Tornalama deneyleri, beş farklı kesme hızında (60, 90, 120, 150 ve 180 m/dak), üç farklı ilerleme miktarında (0,12 0,18 ve 0,24 mm/dev) ve üç farklı talaş derinliğinde (0,5 1 ve 1,5 mm) kuru kesme şartlarında CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Esas Kesme kuvvetinin (Fc) ölçülmesinde, Kistler 9257B tipi dinamometre ve ekipmanları kullanılmıştır. Esas kesme kuvvetinin (Fc) sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi Deform 3D yazılımı kullanılarak yapılmıştır. En düşük esas kesme kuvveti değeri, 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve 0,5 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde 120 N olarak ölçülmüştür. Deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel olarak ölçülen Fc değerleri ile nümerik analizler sonucu elde edile Fc değerleri arasında yaklaşık olarak %12 oranında bir sapma tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Inconel 625, tornalama, kesme kuvveti, sonlu elemanlar analizi.

Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Cutting Parameters on Cutting Force and Chip Formation in Turning Process

Abstract: In this study, the influences of cutting parameters on the main cutting force (Fc) and the chip morphology in turning of the Inconel 625 superalloy by using uncoated cutting tools are evaluated by experimental and numerical analysis. The turning tests were performed without coolant on a CNC lathe at five different cutting speeds (60, 90, 120 and 180 m/min), three different feed rates (0.12 0.18 and 0.24 mm/rev) and three different depth of cut (0.5, 1 and 1.5 mm). Kistler 9257B type dynamometer and equipment's were used to measure the main cutting force (Fc). Finite element modelling of the cutting forces have been performed using Deform 3D software. The lowest main cutting force value was measured as 120 N in the experiments conducted at 180 m/min cutting speed, 0.12 mm/rev feed rate and 0.5 mm depth of cut. Comparing experimental and numerical analysis results, it was found that there is a deviation of approximately 12% between the experimental and numerical results of the main cutting force (Fc).

Keywords: Inconel 625, turning, cutting forces, finite element analysis.

1. Giriş

Buhar motorunun icadı, takım tezgâhları ve kesici takım endüstrisinin günümüz gelişiminde başlangıç noktası ve itici bir güç olarak kabul edilmektedir [1]. Geçmişten günümüze farklı özelliklere sahip yeni bir malzeme ve alaşımın geliştirilmesi ve düşük işleme maliyetlerine duyulan ihtiyaçtan dolayı, araştırmacıların ilgisini “işlenebilirlik sorunu” çekmiştir ve hala üzerine çalışılan

Bu makaleye atıf yapmak için

Akgün, M., Demir, H., “Tornalama İşleminde Kesme kuvveti ve Talaş Oluşumu Üzerinde Kesme Parametrelerinin Etkisinin Deneysel ve Nümerik Analizi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 897-908.

How to cite this article

Akgün, M., Demir, H., “Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Cutting Parameters on Cutting Force and Chip Formation in Turning Process” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 897-908.

ORCID ID: 0000-0002-4522-066X, 0000-0002-9802-083

önemli bir araştırma alanıdır [2-4]. Dahası, günümüz üretim şartlarında, havacılık, savunma, otomotiv, enerji ve petrokimya gibi çok çeşitli imalat endüstrilerinin ihtiyaç duyduğu mekanik parçaların çoğuna nihai şekiller, metal kesme yöntemleriyle (tornalama, frezeleme ve delme) verilmektedir. İstenilen son geometri, bir takım tezgahında keskin bir kesici takımın hareketi ile iş parçası üzerinde bulunan fazla malzemenin talaş şeklinde çıkarılarak uzaklaştırılmasıyla oluşturulur [5-7].

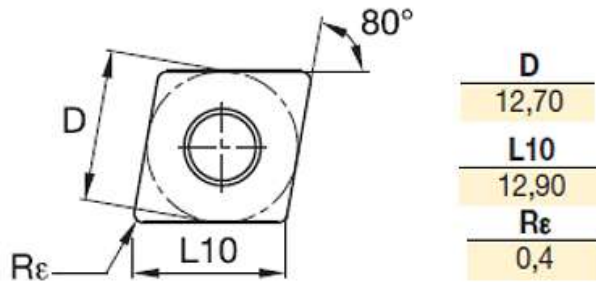
Sonlu elemanlar analizi, çoğunlukla mühendislik problemlerine çözüm elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntem olarak bilinmektedir [8-10]. Son yıllarda, dövme, haddeleme, derin çekme ve talaşlı imalat gibi plastik deformasyon süreçlerinin modellenmesinde kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Özellikle, talaşlı imalat yöntemlerinde kesme mekaniğinin anlaşılmasına, takım geometrilerinin tasarlanmasına ve kesme koşullarının iyileştirilmesine büyük katkılar sunmaktadır. Deneysel çalışmalar ile belirlenmesi zor ve maliyetli olan kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri, oluşan gerilmelerin ve takım aşınmaları gibi önemli kesme işlemi faktörlerinin tahminine olanak sağlamaktadır. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, oldukça karmaşık ve farklı bilim dallarını (ısı transferi, termodinamik, malzeme bilimi gibi) bir araya getiren kesme mekaniğinin anlaşılması için deneysel olarak her bir olguyu belirlemenin mümkün olmadığı görülmektedir [11]. Bu nedenle genellikle çalışmalarda deneysel olarak ölçülmesi nispeten daha kolay olan (kesme kuvveti gibi) bir çıktı üzerinden yola çıkılarak nümerik analizler ile kıyaslamalar yapılarak, talaş oluşumuna konu olan diğer hususlar (takım-talaş temas boyu, kesme sıcaklığı, gerilme ve takım aşınması) tahmin edilebilmektedir [12-17].

Bu çalışmada, mühendislik malzemelerinin işlenmesinde farklı yaklaşımlar ile izah edilmeye çalışılan kesme parametreleri ile kesme kuvveti ve talaş oluşumu arasındaki ilişki sonlu elemanlar analizi yardımı ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu sayede, işlenebilirlik çalışmalarında genellikle kabul gören “ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetleri artar” gibi kavramların sonlu elemanlar analizi ile izahı amaçlanmıştır. Sunulan bu çalışmanın kesme mekaniğinin daha iyi anlaşılmasına önemli bilgi desteği sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal Metot

2.1. İş Parçası Malzemesi ve Kesme Şartları

Bu çalışmada Inconel 625 süper alaşımı deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Inconel 625 süper alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. İşleme deneylerinde, kesici takım olarak Kennametal firması tarafından K68, kesici takım kalitesi olarak kodlanan ve CNMG120404B formunda temin edilen kaplamasız karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Şekil 1’de kesici takım geometri bilgileri görülmektedir [18]. Kesici takımlar, PCLNR 2525M-12 kodlu takım tutucuya rijit bir şekilde mekanik olarak bağlanmıştır. Tornalama deneyleri, kuru kesme şartlarında beş farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme miktarı ve talaş derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri Tablo 2’de yer almaktadır.



Şekil 1. Kesici takım geometri bilgileri.

Tablo 1. Inconel 625 süper alaşımının % kimyasal bileşimi.

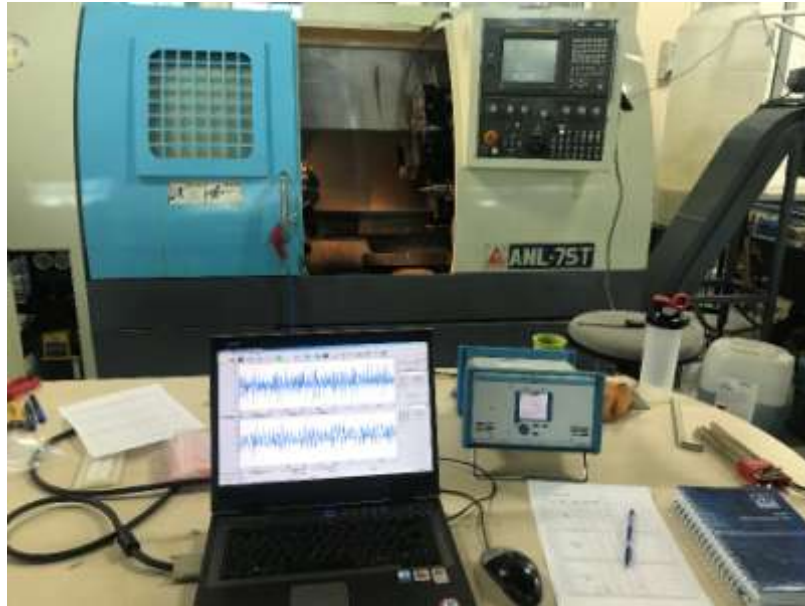
Ni+Co	C	S	Mn	P	Si	Cr	Mo	Ti	Al	Diğerleri
58	0.1	0.015	0.46	0.002	<0.5	20-23	8-10	<0.4	<0.4	<0.5

Tablo 2. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviye				
		I	II	III	IV	V
Vc	Kesme hızı (m/dak)	60	90	120	150	180
f	İlerleme miktarı (mm/dev)	0,12	0,18	0,24	-	-
a	Talaş derinliği (mm)	0,5	0,1	1,5	-	-

2.2. Kesme Kuvveti Ölçümü

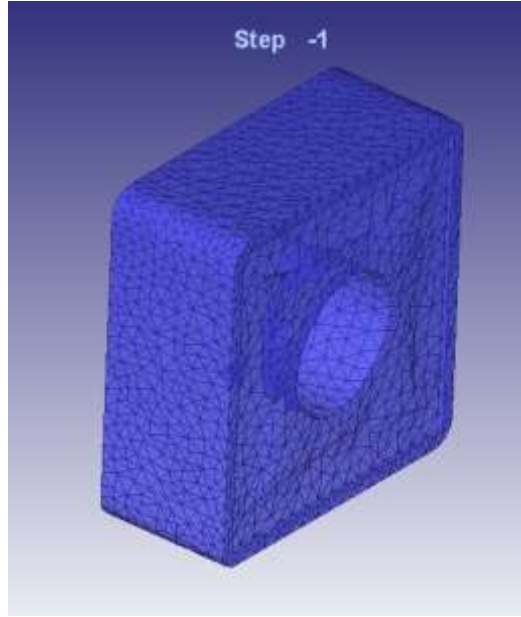
Deney malzemelerinin tornalama metoduyla işlenmesinde oluşan üç kuvvet bileşeni; esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r), KISTLER 9257B tipi piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüştür. Kuvvet ölçüm sistemi; dinamometre, Kistler 5070 yükseltici, veri toplama kartı ve kesme kuvveti sinyallerinin toplanması için CUTPRO® yazılımından oluşmaktadır. Şekil 2’de CNC torna tezgâhı ve test düzeneği görülmektedir.

**Şekil 2.** CNC torna tezgâhı ve kesme kuvveti ölçüm düzeneği.

2.3. Nümerik Analiz

Nümerik analizler, Deform programında 3d ve 2d tornalama simülasyonları kullanılarak yapılmıştır. Nümerik analizlerde kesme kuvvetlerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Nümerik analizlerde çözüm aşamasından önce iş parçası malzemesinin, kesici takım malzemesinin, ağ yapılarının ve işleme parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu yüzden, öncelikle, kesici takım geometri bilgileri tanımlanmıştır. Kesici takım formunun oluşturulmasında kesici takım kataloğundan (Dxf uzantısından) ve optik tarama cihazından yararlanılmıştır. Kesici takım geometrisi Siemens NX Unigraphics programı kullanılarak oluşturulmuştur. STL dosya uzantısı içerisinde kesici takım formuna (talaş açısı, uç yarıçapı, yanaşma açısı gibi) ait bütün bilgiler Deform 3D programına

aktarılmıştır. Kesici takıma ait katı model oluşturulduktan sonra kesici takım malzeme kütüphanesinden yararlanılarak kesici takım malzemesi tungsten karbür (WC) belirlenmiştir. Şekil 3'de kesici takım formu ve ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3. Kesici takım formu ve ağ yapısı.

İş parçası malzemesinin tanımlanmasında, yüksek gerinim hızı deformasyonlarının modellenmesinde kullanılan, Eşitlik 1'de yer alan Johnson-Cook malzeme yapısal denklemi kullanılmıştır [19]. Kullanılan malzeme modeli sabitleri literatür taraması sonucu belirlenmiştir. Belirlenen malzeme modeli sabitlerinin uygunluğu ön tornalama simülasyonu ile analiz edilmiştir. Tablo 3'de Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri verilmiştir [20,21].

$$\sigma^0 = (A + B(\epsilon^p)^n) \left(1 + C \log\left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (1)$$

Burada

A: akma gerilmesi

n: gerinim sertleşme sabiti

ϵ^p : plastik gerinme oranı

T_m : erime sıcaklığı

B: gerinim sertleşmesi

m: ısıl yumuşama sabiti

ϵ_0 : referans gerinim oranı

T: referans sıcaklığıdır.

C: gerinim hızı sabiti

ϵ^p : eşdeğer plastik gerinim

T_r : oda sıcaklığı

Tablo 3. Inconel 625 süper alaşımı için Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri.

A	B	n	C	m	T_{ref} (°C)	T_m (°C)	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
558.8	2201.3	0.8	0.000209	1.146	23	1350	1670

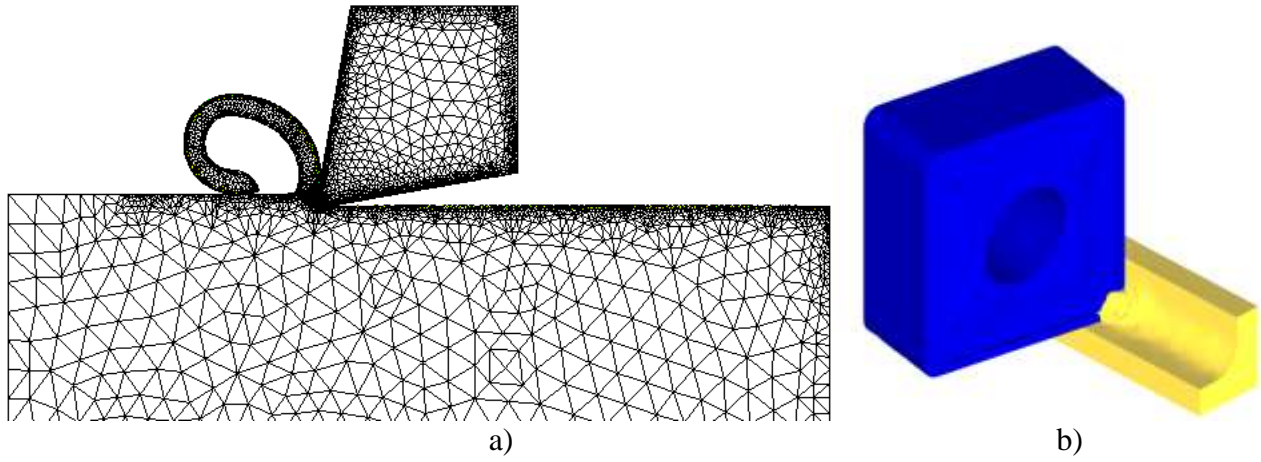
Inconel 625 süper alaşımının tanımlanmasında literatürde yapılan çeşitli çalışmalardan, üretici firma tarafından sunulan mekanik özelliklerden ve programın iş parçası kütüphanesinden yararlanılmıştır. Tablo 4'de simülasyonlarda kullanılan çeşitli malzeme özellikleri yer almaktadır [22-24].

Her bir tornalama simülasyonunda iş parçası ve kesici takımın üç boyutlu ağ yapısı (mesh) tanımlanmasında Lagrangian Incremental mesh modeli kullanılmıştır. Kesici takım-iş parçası ağ yapısı, minimum eleman boyutu 0,2 mm tanımlanarak kesici takımların uç kısmında daha yoğun 43532 elemandan ve diğer bölgelerinde daha seyrek olacak şekilde oluşmuştur. İş parçası ise 21680 elemandan oluşmuştur.

Tablo 4. İş parçası malzeme özellikleri.

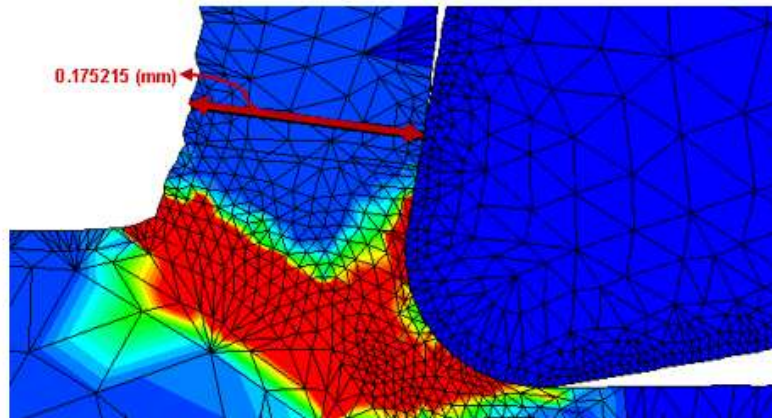
Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	8,44
Elastikiyet modülü (kN/mm^2)	205,8
Poisson oranı	0,278
Isıl genleşme (10^{-6})	13,3
Özgül ısı ($\text{Btu/lb} \times ^\circ\text{F}$)	0,098
Isıl iletkenlik (W/m K)	9,8

Son olarak, deneysel çalışmada kullanılan kesme parametrelerinde simülasyon süreci tamamlanarak, çözüm aşamasına geçilmiştir. Şekil 4’de a) 2d ve b) 3d tormalama simülasyonu görülmektedir.

**Şekil 4.** a) 2d ve b) 3d kesme simülasyonları.

2.4 Nümerik Analizlerde Talaş Kalınlığı Ölçümü

Farklı kesme parametrelerinde gerçekleştirilen nümerik analizler sonrasında talaş kalınlığının değişimi araştırılmıştır.

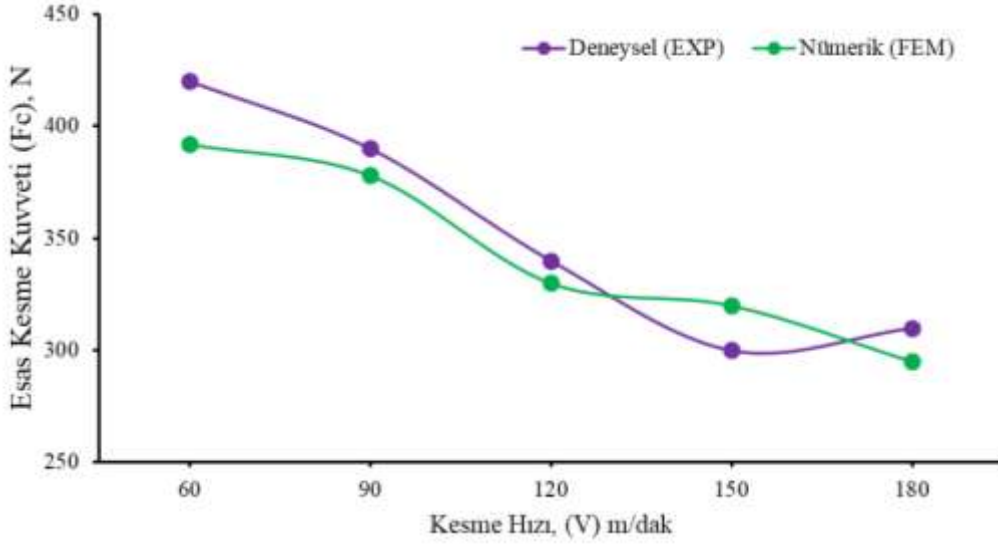
**Şekil 5.** Talaş kalınlığı ölçümü.

Nümerik analizlerde tormalama simülasyonlarında çözümlene sonrası ölçülen talaş kalınlığı ile kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği arasındaki ilişki irdelenmiştir. Şekil 5’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve 180 m/dak kesme hızında nümerik analiz sonucunda talaş kalınlığı ölçümü görülmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

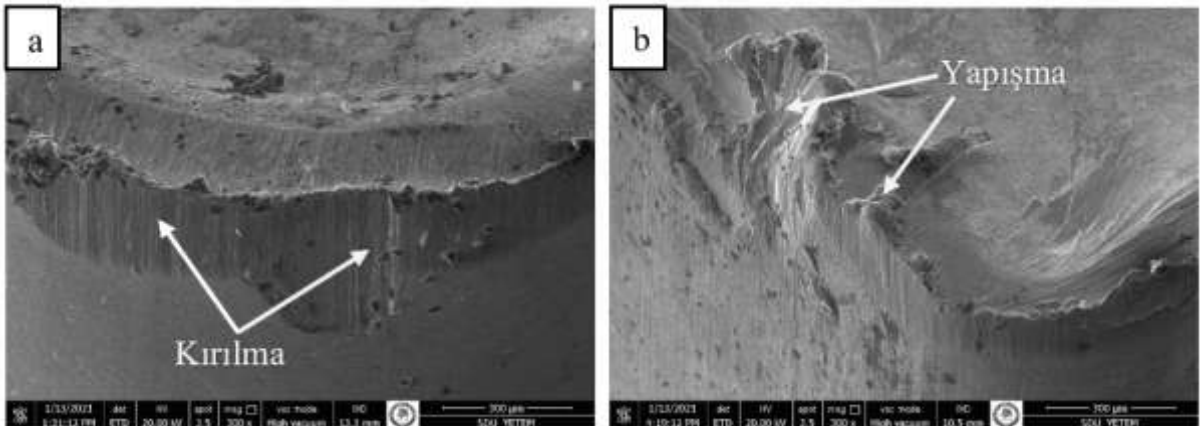
3.1 Kesme Hızının Esas Kesme Kuvveti ve Talaş Oluşumuna Etkisi

Inconel 625 alaşımının kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (F_c) değerleri ile sonlu elemanlar analizinde elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Şekil 6'de F_c değerlerinin 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı kesme hızlarındaki değişim grafiği yer almaktadır.



Şekil 6. Kesme hızına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

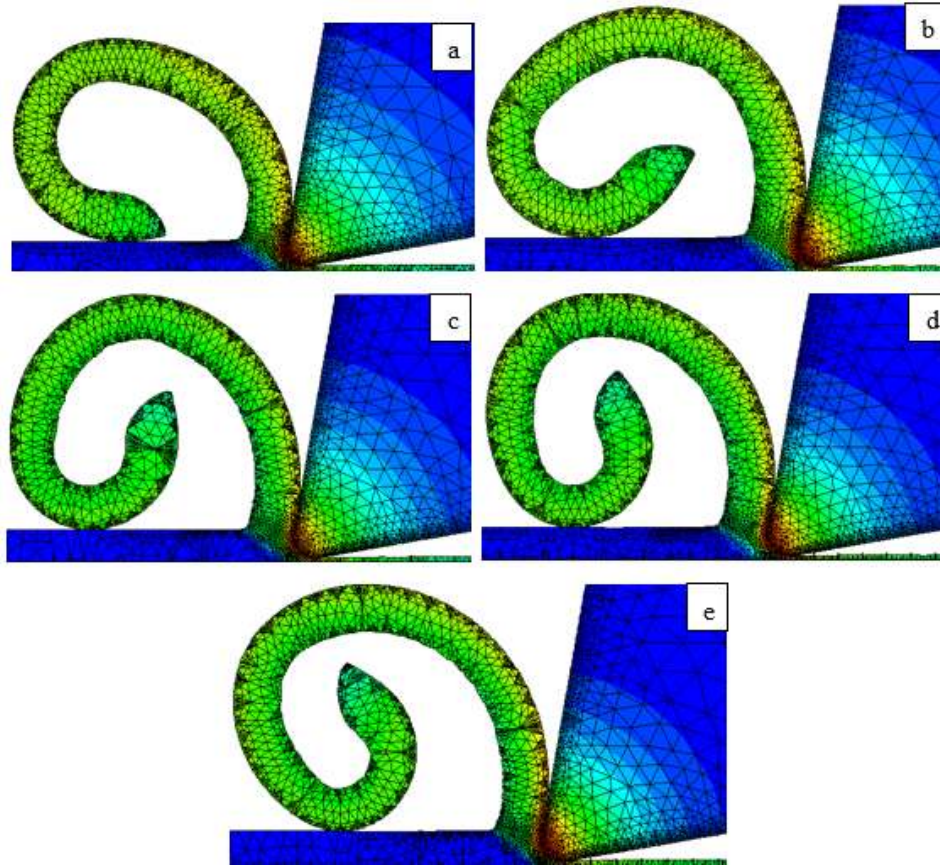
Şekil 6 incelendiğinde tornalama deneylerinde ölçülen F_c değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen F_c değerlerinin benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Nümerik analiz sonuçlarında elde edilen F_c değerlerinin deneysel olarak ölçülen F_c değerlerinden yaklaşık olarak %8 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Hem deneysel hem de nümerik analizlerle belirlenen F_c değerlerinin kesme hızındaki artışa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Örneğin, kesme hızının düzenli olarak %100 ve %150 oranlarında arttırılarak kesme hızının 180 m/dak arttırılmasıyla deneysel olarak ölçülen F_c değerlerinin sırasıyla, %23,52 (340 N) ve %35,48 (310 N) oranlarında azalmıştır. Aynı durum nümerik analizlerle belirlenen F_c değerleri için değerlendirildiğinde sırasıyla %18,78 (330 N) ve %32,88 (295 N) oranlarında azalmıştır. Bu duruma literatürler benzer bir şekilde kesme hızının artmasıyla kesme bölgesinde artan sıcaklığa bağlı olarak kayma dayanımının azalması sonucuyla talaş kalınlığının azalmasının neden olduğu düşünülmektedir [25-27].



Şekil 7. Kesici takımlarda meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri.

Şekil 7’de 60 m/dak ve 180 m/dak kesme hızlarında yapılan deneyler sonrasında kesici takımlar meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 6 (a)’da düşük kesme hızlarında kesici takımda aşınma görülür iken Şekil 6 (b)’de yüksek kesme hızlarında yapılan tornalama deneylerinde kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıya bağlı olarak ısıl yumuşamadan dolayı çıkan talaşların kesici takıma yapıştığı görülmektedir.

Şekil 8’de 0,12 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı kesme hızlarındaki nümerik analizler sonucunda elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. 60 m/dak, 90 m/dak, 120 m/dak, 150 m/dak ve 180 m/dak kesme hızlarında yapılan nümerik analizlerde talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,204 mm, 0,198 mm, 0,187 mm, 0,181 mm ve 0,175 mm ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda kesme hızındaki artışa bağlı olarak talaş kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir.

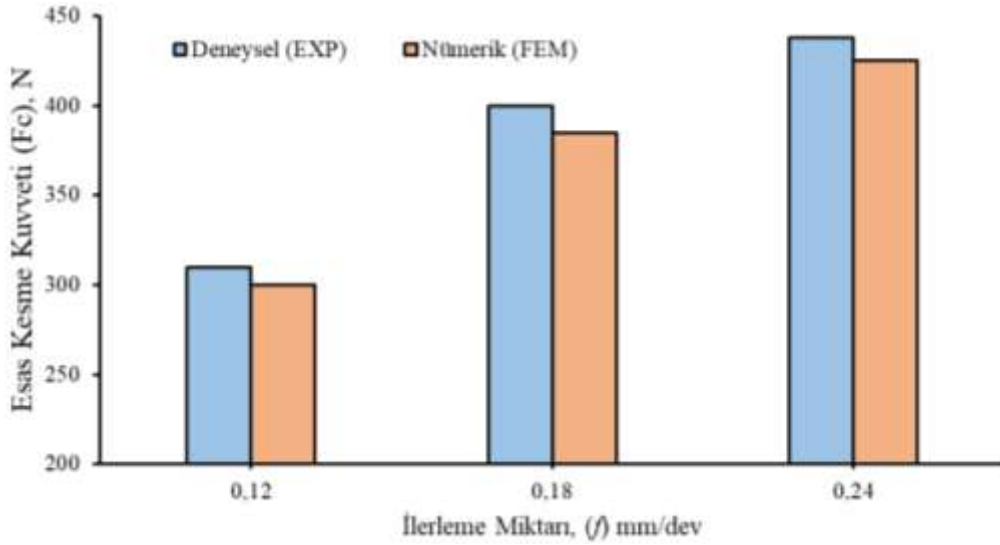


Şekil 8. Kesme hızına bağlı talaş oluşumu a) 60, b) 90, c) 120, d)150, e) 180 m/dak.

3.2 İlerleme Miktarının Esas Kesme Kuvveti Ve Talaş Oluşumuna Etkisi

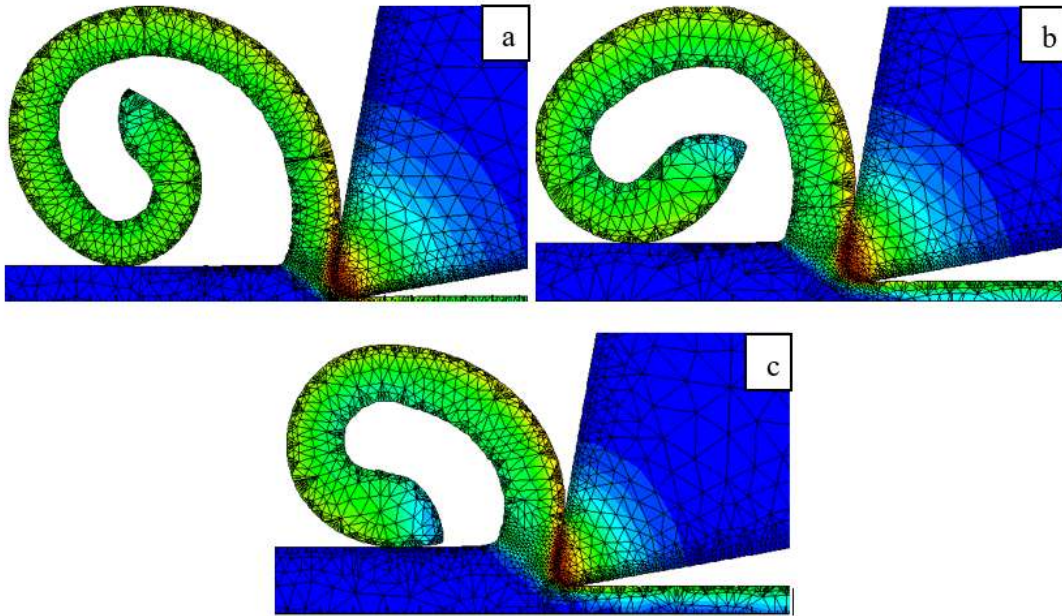
Şekil 9’de farklı ilerleme miktarlarında yapılan tornalama deneylerinde ölçülen Fc değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen Fc değerlerinin değişim grafiği yer almaktadır. Şekil 9 incelendiğinde, ilerleme miktarının düzenli olarak %50 ve %100 oranlarında artırılarak 0,24 mm/dev artırılmasıyla Fc değerinin %29 (400 N) ve %41,29 (438 N) oranlarında artmıştır. Aynı kesme şartlarında nümerik analizlerle belirlenen Fc değerinde ise sırasıyla %28,33 (385 N) ve %41,66 (425 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Hem deneysel hem de nümerik analizlerle belirlenen Fc değerlerinin ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir. Şekil 10’da 180 m/dak kesme hızında, 1 mm talaş derinliğinde ve farklı ilerleme miktarlarında yapılan nümerik analizlerde elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. Nümerik analiz

sonucunda, 0,12 mm/dev, 0,18 mm/dev ve 0,24 mm/dev ilerleme miktarları için talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,175 mm, 0,275 mm ve 0,362 mm ölçülmüştür.



Şekil 9. İlerleme miktarına göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Hem deneysel hem de nümerik analizlerde ilerleme miktarının artması ile F_c değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Literatürde bu durum çoğunlukla ilerleme miktarındaki artışa bağlı olarak talaş kesitinin artması ile talaşın deforme edilmesi için gerekli olan enerjinin artması ile açıklanmaktadır [28-30]. Nümerik analizler sonucu elde edilen talaş kalınlığı değerleri ve Şekil 10'da yer alan talaş oluşumu görüntüleri bu durumu doğrulamaktadır.

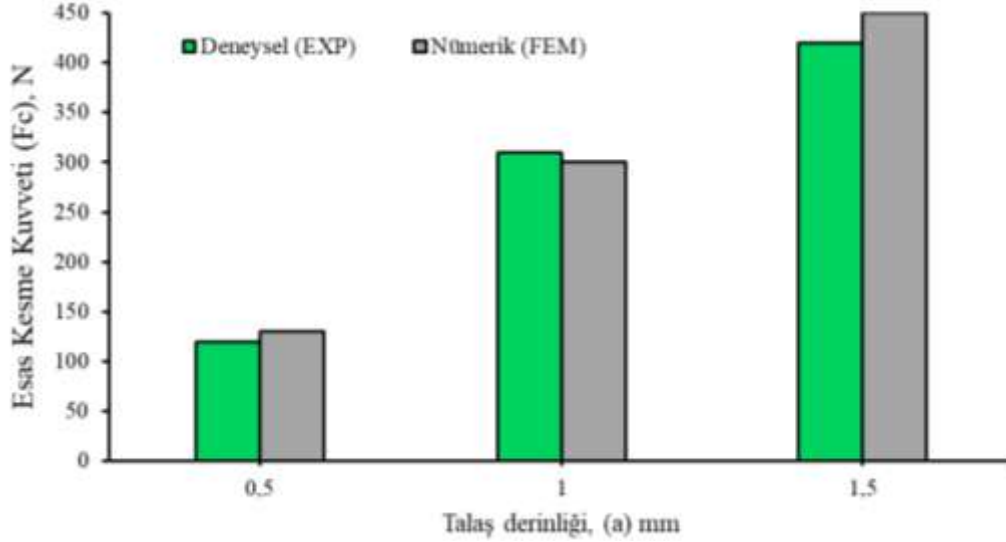


Şekil 10. İlerleme miktarına bağlı talaş oluşumu a) 0,12, b) 0,18, c) 0,24 mm/dev.

3.3 Talaş Derinliğinin Esas Kesme Kuvveti ve Talaş Oluşumuna Etkisi

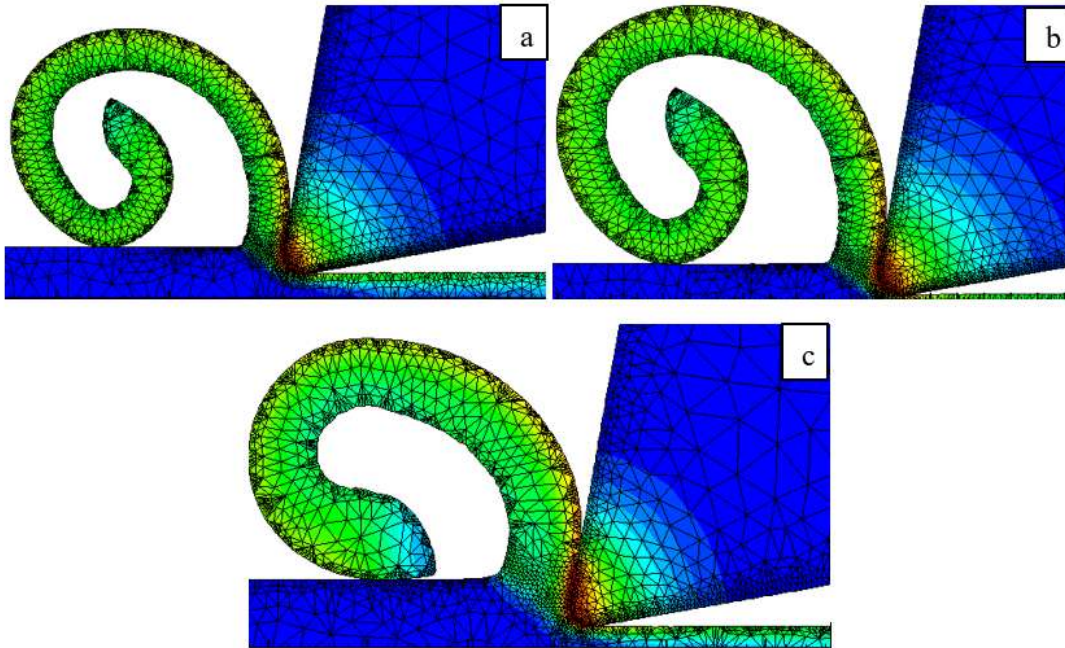
Şekil 11'de 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarından ve farklı talaş derinliklerinde yapılan tornalama deneylerinde ölçülen F_c değerleri ile nümerik analizlerden elde edilen F_c değerlerinin değişim grafiği yer almaktadır. Şekil 11'da talaş derinliğine göre F_c

değerlerindeki değişimler değerlendirildiğinde, ilerleme miktarının etkisine benzer bir eğilim görülmektedir. Talaş derinliğinin düzenli olarak %100 ve %200 oranlarında artırılarak 1,5 mm'ye artırılmasıyla yapılan deneylerde F_c değeri %158,3 (310 N) ve %250 (420 N) oranlarında artmıştır. Aynı kesme şartlarında nümerik analizlerle belirlenen F_c değerinde ise sırasıyla %130 (300 N) ve %246,15 (450 N) oranlarında bir artış görülmüştür. Şekil 11 incelendiğinde hem deneysel hem de nümerik analizlerle belirlenen F_c değerlerinin talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 11. Talaş derinliğine göre deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 12'de 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve farklı talaş derinliklerinde yapılan nümerik analizlerde elde edilen talaş oluşumu görüntüleri yer almaktadır. Nümerik analizlerde 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm talaş derinlikleri için talaş kalınlığı sırasıyla, yaklaşık olarak 0,168 mm, 0,175 mm ve 0,353 mm ölçülmüştür. Sonuç olarak, talaş derinliğinin artması talaş kalınlığının arttığı ve buna bağlı olarak F_c değerlerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 12. Talaş derinliğine bağlı talaş oluşumu a) 0,5, b) 1, c) 1,5 mm.

Şekil 13’de 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve (0,5 1 ve 1,5 mm) farklı talaş derinliklerinde yapılan tornalama deneyleri sonucu elde edilen talaş görüntüleri yer almaktadır. Şekil 13 incelendiğinde deneysel çalışma sonrası elde edile talaş görüntüleri nümerik analiz sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 13. Talaş görüntüleri a)0,5 b)1 c)1,5 mm.

Hem deneysel hem de nümerik analiz sonuçları için genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artmasıyla esas kesme kuvvetinin arttığı gözlenirken, kesme hızının artması ile Fc değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç literatürle örtüşmektedir. Deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel olarak ölçülen Fc değerleri ile nümerik analizler sonucu elde edile Fc değerleri arasında yaklaşık olarak %12 oranında bir sapma tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, kaplamasız kesici takımlar kullanılarak Inconel 625 süperalaşımının tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (Fc) üzerinde kesme parametrelerinin etkisi deneysel ve nümerik analizler ile değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarına göre, ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artmasıyla esas kesme kuvvetinin arttığı gözlenirken, kesme hızının artması ile Fc değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- En düşük esas kesme kuvveti değeri, 180 m/dak kesme hızında, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve 0,5 mm talaş derinliğinde yapılan deneylerde 120 N olarak ölçülmüştür.
- Deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel olarak ölçülen Fc değerleri ile nümerik analizler sonucu elde edile Fc değerleri arasında yaklaşık olarak %12 oranında bir sapma tespit edilmiştir.
- Kesme simülasyonları, imalat endüstrisinde kesilmesi zor malzemelerin işlenebilirliği hakkında ileri düzeyde bilgi sağlayabilir.

Teşekkür

119M785 numaralı proje ile sağlanan maddi destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz.

Yazar(lar)ın Katkıları

MA, deney tasarımını, tornalama deneylerini ve nümerik analizleri gerçekleştirmiştir. MA ve HD, verilerin analizini, yorumlanmasını ve değerlendirmesini yapmışlar ve ayrıca makalenin yazımını gerçekleştirmişlerdir.

Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Trent E. M., “Metal Cutting”, Butterworths Press, London, 1-171 (1989).
- [2]. Black P. H., “Theory of Metal Cutting”, Mcgraw-Hill Book Company Inc, USA, 1-200 (1961).
- [3]. Gökçe H., “Bakır Malzemenin Delinme Performansının Kesme Kuvveti ve Takım Sıcaklığı Açısından İncelenmesi”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (3): 1039-1053.
- [4]. Kalyon A., “Alüminyum 6082 Alaşımının Pirinç Elektrot ile İşlenebilirliğinin Optimizasyonu”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6 (1): 118-130.
- [5]. Maity R. M., Chatterjee P., Chakraborty S., “Cutting tool material selection using grey complex proportional assessment method”, Mater. Des., 2012, 36: 372-378.
- [6]. Jawaid A., Koksall S., Sharif S., “Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy”, Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116 (1): 2-9.
- [7]. Akgün M., Demir H., “Estimation of Surface Roughness and Flank Wear in Milling of Inconel 625 Superalloy”, Surface Review and Letters 2021.
- [8]. Yavuz M., Küçükarslan S., “Doğrusal Olmayan Malzemeler için Sonlu Eleman Çözümündeki Dönüşüm Bozukluklarının Giderilmesi”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (3): 1140-1151.
- [9]. Yetgin A., Durmuş B., “Analysis of the Effect of Rotor Slot Type on Torque Ripple in Induction Motors by Finite Element Method”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2): 536-542.
- [10]. Doğru M., (2019). “Topology Optimization of Truck Chassis Under Multi Loading Conditions”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6 (3): 856-867.
- [11]. Ucuñ İ., Aslantaş K., Apaydın D., “Çok Kaplamalı Kesici takımla tornalama işleminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi”, Electronic Journal of Machine Technologies, 2010, 7 (1): 69-82.
- [12]. Uçak N., Çiçek A., Özkaya E., and Aslantaş K., “Finite element simulations of cutting force, torque, and temperature in drilling of Inconel 718”, Procedia CIRP, 2019, 82: 47–52.
- [13]. Parida A. K., and Maity K., “Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis”, Eng. Sci. Technol. an Int. J., 2017, 20 (2): 687-693.
- [14]. Korkmaz M., Çakıroğlu R., Yaşar N., Özmen R., Günay M., “Al2014 Alüminyum Alaşımının

- Delinmesinde İtme Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2019, 6 (1): 193-199.
- [15]. Parida A. K., and Maity K., “FEM analysis and experimental investigation of force and chip formation on hot turning of Inconel 625”, *Def. Technol.*, 2019, 15 (6): 853-860.
- [16]. Tamang S. K., Teyi N., and Tsumkhapa R. T., “Numerical Simulation of Cutting Force in High Speed Machining of Inconel 718,” *Key Eng. Mater.*, 2020, 856: 43–49.
- [17]. Akgün M., Demir H., “Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy”, *Politeknik Dergisi*, 2021, 24 (2): 391-400.
- [18]. <https://catalogs.kennametal.com/?RelId=6.11.15.0.p1.15&lang=enm> (Erişim Tarihi: 07.05.2021).
- [19]. Johnson G. J., Cook W., “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures”, In *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, The Hague, 541–547, (1983).
- [20]. Lotfi M., Jahanbakhsh M. and Farid A. A., “Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis”, *Tribology International*, 2016, 99: 107-116.
- [21]. Hokka M., Gomon D., Shrot A., Leemet T., Bäker M., and Kuokkala V. T., “Dynamic Behavior and High Speed Machining of Ti-6246 and Alloy 625 Superalloys: Experimental and Modeling Approaches”, *Exp. Mech.*, 2014, 54 (2): 199-210.
- [22]. <https://www.alloywire.com/products/inconel-625/>. (Erişim Tarihi: 01.01.2021).
- [23]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7682>. (Erişim Tarihi: 01.01.2021).
- [24]. <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. (Erişim Tarihi: 01.01.2021).
- [25]. Çiftci İ., “Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools”, *Tribology International*, 2006, 39 (6): 565–569.
- [26]. Demir H., Gündüz S. and Erden M. A., “Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, 95 (5): 2951-2958.
- [27]. Özlü B., Demir H., Türkmen M. and Gündüz S., “Investigation of Machinability of Cooled Microalloy Steel in Oil After the Hot Forging with Coated and Uncoated CBN Cutting Tools”, *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, 2018, 36 (4): 1165-1174.
- [28]. Işık Y., “Investigating the machinability of tool steels in turning operations”, *Materials and Design*, 2007, 28: 1417-1424.
- [29]. Özlü B., Demir H., Türkmen M., “The effect of mechanical properties and the cutting parameters on machinability of AISI 5140 steel cooled at high cooling rates after hot forging”, *Politeknik Dergisi*, 2019, 22 (4): 879-887.
- [30]. Akkuş H., Yaka H., “Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy”. *Measurement*, 2021, 167, 108465.