

## Mikro Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi ve Uygun Malzeme Modelinin Seçimi

Ahmet HASÇELİK<sup>1\*</sup>, Kubilay ASLANTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Afyon Kocatepe Üniversitesi,  
Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi,  
Afyonkarahisar, Türkiye

[ahascelik@aku.edu.tr](mailto:ahascelik@aku.edu.tr) , [aslantas@aku.edu.tr](mailto:aslantas@aku.edu.tr)

### Özet

İmalat sanayinde gelişen teknoloji ve yüksek hassasiyette parça gereksinimi, mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. Mikro mekanik işleme yöntemi ile hem yüksek hızda hem de yüksek hassasiyette iş parçaları üretmek mümkündür. Bir nümerik modelleme tekniği olan sonlu elemanlar metodu, deneysel olarak tespit etmenin zor olduğu verilerin (gerilme, şekil değiştirme ve sıcaklık) elde edilmesinde önemli bir avantaj sağlar. Mikro işlemin nümerik olarak modellenmesinde en önemli unsur, kullanılan malzeme modelinin doğruluğudur. Bu çalışmada mikro tornalama işlemi 2 boyutlu şartlarda nümerik olarak modellenmiştir. Modellemede Deform-2D ticari yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada farklı malzeme modelleri kullanılarak, deneysel ve nümerik modelleme sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri kıyaslanmıştır. İş parçası malzemesi olarak, biyomedikal sektörde çokça kullanılan Ti6Al4v alaşımı seçilmiştir. Çalışmada sabit kesme hızı (100m/dk) ve farklı ilerleme değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonunda Kay (2002) tarafından önerilen, Johnson-Cook (J-C) malzeme modelinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Nümerik modelleme ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın % 5-15 arasında olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro Tornalama, Sonlu Elemanlar Analizi, Kesme Kuvvetleri

## Modeling of Micro Turning Process with Finite Elements Method and Selection of Suitable Material Model

### Abstract

Developing technology in the manufacturing industry and the requirement of high precision parts reveals micro machining. It is possible to produce workpieces both at high speed and with high precision by means of micro-mechanical machining. The finite element method, a numerical modelling technique, provides a significant advantage in obtaining data (stress, strain and temperature) that are difficult to experimentally detect. The most important element in the numerical modeling of the micro machining is; the correctness of the material model used. In this study, micro turning process is modeled numerically in 2D conditions. Deform-2D commercial software was used in the modeling. In the study, cutting forces obtained by experimental and numerical modeling are compared using different material models. As workpiece material, Ti6Al4V alloy, which is widely used in the biomedical applications, has been selected. Constant cutting speed (100m / min.) and different feed rate values are used. At the end of the study, it was observed that the Johnson-Cook (J-C) material model recommended by Kay (2002) is more compatible with the experimental results. It has been determined that the difference between the numerical model and experimental results is between 5-15%.

**Keywords:** Micro Turning, Finite Element Analysis, Cutting Forces

## I. GİRİŞ

Günümüz imalat teknolojilerinde, parçaların minyatürleşmesi, küçülen cihaz boyutları ve yüksek hassasiyette parça gereksinimi yeni arayışlara neden olmuştur. Bütün bu gereksinimler, gelişen teknoloji ile birleştiğinde mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. İçinde bulunduğumuz bu minyatürleşme çağında mikro üretim en popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir. Son yıllarda makro boyutlarda yapılan çalışmalar kadar mikro boyutlarda da birçok çalışma yapılmaktadır[1].

Mikro mekanik işleme yöntemi, iş parçalarını yüksek hızda ve yüksek hassasiyette üretmeyi mümkün kılmaktadır. minyatür sistemler, kolay taşınabilme ve kullanılabilme, düşük malzeme ve güç tüketimi, küçük numune gereksinimleri, yüksek ısı transferi ve daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlayabilmektedir. mikro mekanik işleme yaklaşık 60 milyar dolar işlem hacmine sahip, dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstridir. Bu büyüyen endüstride mikro silindirik parçalar üretilirken kaynak ve zaman kullanımında yüksek verim edilebilmektedir[2].

Karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla çözümünü sağlayan sonlu elemanlar metodu pek çok mühendislik uygulamasında kullanılan yaygın ve kullanışlı bir çözüm metodudur.

Karmaşık mühendislik problemleri, beraberinde karmaşık çözümler içerir. Bu karmaşa, çözüm aşamasını da hassasiyetten uzaklaştırır. Karmaşık problemlerin en kısa yoldan doğru sonuca en yakın çözümle ulaştırılması için sonlu elemanlar metodu kullanılabilir[3].

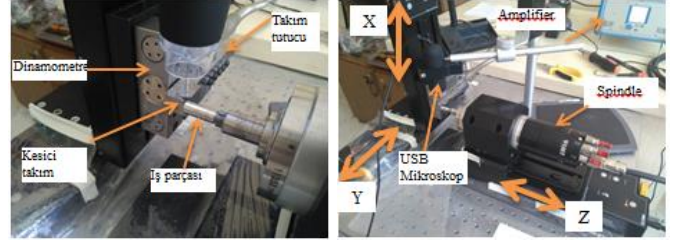
Matematiksel altyapısı Sonlu Elemanlar Metoduna dayanan DEFORM yazılımı, tasarımcıların ısı işlemler, metal şekillendirme, kesme ve kaynaklama gibi birçok prosesi analiz edebilmek için laboratuvarında gerçek iş parçaları üzerinde yapılan deneyleri sanal ortama taşımalarını sağlayan bir mühendislik yazılımıdır. DEFORM aynı zamanda inanılmaz esnekliği sayesinde analizcilere birçok uygulama, geliştirme ve araştırma dallarında çalışma olanağı sağlayan bir sistemdir. 2 ve 3 boyutlu modellemeye imkan tanıyan bu ticari yazılım sayesinde laboratuvar ortamında oldukça maliyetli ve zaman kaybettiren deney çalışmalarını minimuma indirgeyip tasarruf sağlayarak verimi artırmamız mümkündür dolayısıyla bu yazılım oldukça kullanışlı ve pratiktir[4].

## II. MATERYAL VE METOT

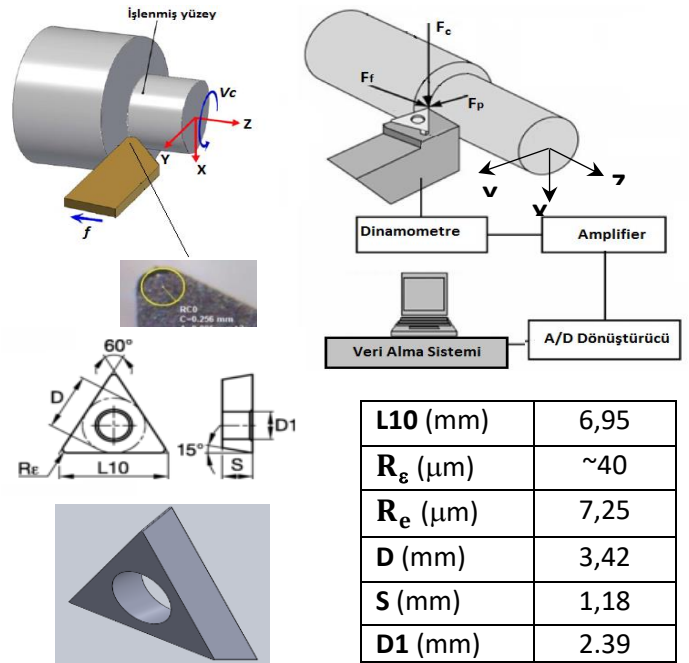
### A. Deney Düzenegi

Yapılan çalışmada sabit 100m/dk kesme hızının ayarlandığı bir deney düzenegi kullanılmıştır. Yatay bir işleme merkezine benzemekte olan deney düzeneginde korozyona karşı yüksek dirençli Ti6Al4v iş parçası spindle'a bağlanmıştır. Kullanılan spindle max 60000 dev/dk'ya kadar çıkabilen IMT markadır ve devir ayarı kendine ait bilgisayar yazılımı ile hassas olarak elde edilebilmektedir. Eksen hareketleri için mikro step motorlarla desteklenmiş lineer kızaklar (Thorlabs) kullanılmıştır. Kızakların maksimum hareket mesafesi 150mm olup hassasiyeti ise 0,1µm dur. Spindle X eksenini hareketini sağlayan kızak üzerine montaj edilmiştir. Kesici takım mini dinamometre üzerine, dinamometre Y eksenini ifade eden kızak üzerine sabitlenmiştir. Talaş derinliği Z eksenini vasıtasıyla verilmektedir. Kesici takımda 2µm TiAlN kaplama kullanılmış olup takıma ait geometrik özellikler şekilde

verilmektedir. Yanaşma açısının 90° olması ve dinamometreye bağlanabilmesi adına takım tutucu özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneylerde kesme bölgesinin daha net olarak gözlemlenebilmesi adına 50-800 arasında büyütme yapabilen bir USB mikroskop kullanılmıştır. Tüm sistem titreşimsiz optik bir tabla üzerine montaj edilmiştir[5].



Şekil 1: Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü.



Şekil 2: Deneylerde kullanılan kesici takım ve koordinat sistemi.

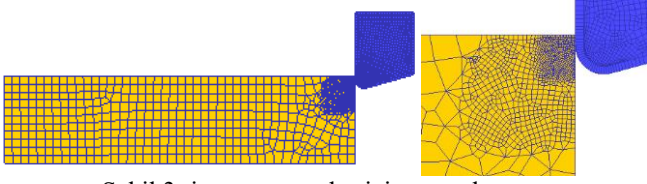
Kesici takımın burun yarıçapı ( $R_c$ ) yaklaşık 40µm ve kenar yarıçapı ( $R_e$ ) de yaklaşık 7,25 µm olarak ölçülmüştür. Çalışmada talaş derinliği ( $a_p$ ) 40µm alınmıştır. Deneyler 100m/dk sabit kesme hızında 2 farklı ilerleme değeri için (10µm, 20µm) yapılmıştır. Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup çıktı olarak kesme değerleri dikkate alınmıştır. Deneylerde kesme mesafesi kısa tutulmak suretiyle takımdaki aşınma göz ardı edilmiştir.

### B. Modelleme

Bir mühendislik sisteminin çözülmesi esnasında bu sistemin matematiksel modelinin hazırlanması ve bu modelin çözümünün gerçekleşmesi tasarımcıya birçok avantaj sağlayacaktır. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan Deform programı ile mühendislik sistemlerini modelleyip simule ederek sıcaklık, kesme kuvvetleri, gerilme vb gibi birçok veriyi elde edebilmek mümkündür. Talaş oluşumu prosesinde remeshing tekniği kullanılarak, her bir çözüm aralığı için yeniden sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Her bir çözüm aralığında kesme esnasında

<b>L10 (mm)</b>	6,95
<b><math>R_c</math> (µm)</b>	~40
<b><math>R_e</math> (µm)</b>	7,25
<b>D (mm)</b>	3,42
<b>S (mm)</b>	1,18
<b>D1 (mm)</b>	2.39

meydana gelen kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı veri olarak program tarafından kaydedilmiştir. Çözümlerde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 2 de verilmiştir[6].



Şekil 3: iş parçası ve kesici uç mesh yapısı.

Literatürde bir çok malzeme modeli olmakla beraber, modelleme esnasında kullanılan malzeme modeli çok önemli olup, sonuçları büyük ölçüde değiştirebilmektedir.

Temel Johnson-Cook (J-C) ;

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

Temel Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli 3 fonksiyonun kombinasyonu olarak temsil edilir [7];

$$\sigma = f(\varepsilon) \cdot g(\dot{\varepsilon}) \cdot h(T) \quad (2)$$

$$f(\varepsilon) = (A + B\varepsilon^n) \quad (3)$$

$$g(\dot{\varepsilon}) = \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (4)$$

$$h(T) = \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

Bu gösterimde  $f(\varepsilon)$ ,  $g(\dot{\varepsilon})$  ve  $h(T)$  sırasıyla, şekil değiştirme sertleşmesi, şekil değiştirme hassasiyet oranı ve termal yumuşama davranışını temsil eder[8].

Bu çalışmadaki modellemelerde temel Johnson-Cook (J-C) malzeme modelinin yanında modifiye edilmiş 2 farklı model daha kullanılmıştır[9].

Bunlar;

Model 1) Şekil değiştirme yumuşaması ve sıcaklığa bağlı, modifiye edilmiş malzeme modeli[10]

$$\sigma = \left[ A + B\varepsilon^n \left( \frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left[ D - (1 - D) \left[ \tanh \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right]^s \right] \quad (6)$$

$$D = 1 - \left( \frac{T}{T_m} \right)^d \quad p = \left( \frac{T}{T_m} \right)^b$$

Model 2) Sıcaklığa bağlı olmayan modifiye edilmiş malzeme modeli aşağıda verilmiştir. Modele dahil edilen 4.fonksiyon ( $g(\varepsilon)$ ) temel modüldeki 2.fonksiyon ( $g(\dot{\varepsilon})$ ) ile benzerlik göstermektedir. Her iki fonksiyonda şekil değiştirmeye bağlıdır.

$$g(\varepsilon) = \left[ M + (1 - M) \left[ \tanh \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right]^s \right] \quad (7)$$

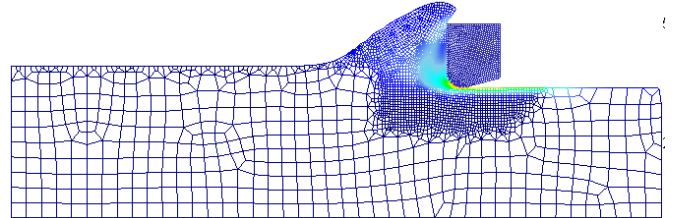
$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \left[ M + (1 - M) \left[ \tanh \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right]^s \right] \quad (8)$$

Çalışmada kullanılan veriler tabloda gösterilmiştir;

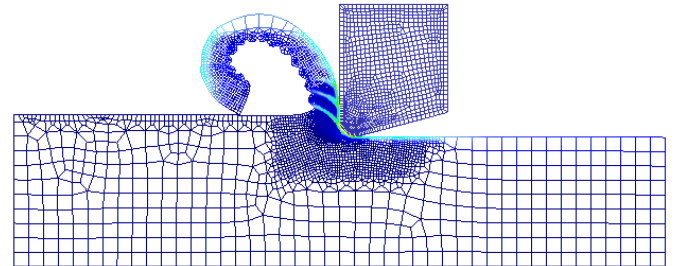
Tablo 1: Kay(2002)'nin önerdiği Johnson-Cook malzeme modeli sabitleri[11] ve karakteristikleri[12]

Karakteristikler	Değerleri	Tanımları
$\varepsilon$	değişken	Plastik şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	değişken	Şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	1	Referans şekil değiştirme hızı
A(MPa)	1098	Malzeme akma gerilmesi sabiti
B(MPa)	1092	Malzemenin sertleşme modülü
n	0,93	Sertleşme katsayısı
C	0,014	Şekil değiştirme hızı hassasiyeti
m	1	Malzemenin termal yumuşama katsayısı
M	0.48	
Tr (°C)	20	Oda sıcaklığı
Tm (°C)	1660	İş parçası ergime sıcaklığı
r	1	Malzemeye ait katsayı
s	5	Malzemedeki yumuşama eğilimi
a	2,5	Malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi
b	2	Sıcaklığa bağlı akma yumuşama etkisi
d	0,5	D'nin sıcaklığa bağlı olma derecesi

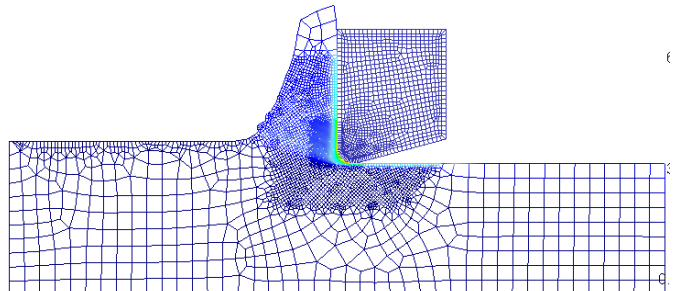
DeneySEL çalışmalar sonucu elde edilen veriler referans alınarak, deneme yanılma yoluyla bu malzeme modellerinde farklı sabitler denenmiş ve daha sağlıklı karşılaştırma yapabilmek adına 3 malzeme modelinde de Kay (2002) tarafından önerilen sabitlerin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4: temel J-C için iş parçası talaş formu ve mesh yapısı.



Şekil 5: model 1 için iş parçası talaş formu ve mesh yapısı.



Şekil 6: model 2 için iş parçası talaş formu ve mesh yapısı.

Talaş formunun temel J-C malzeme modeli ve model 2 için düz formda, model 1 içinse testere formunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın sebebinin malzeme modelindeki yumuşama etkisi olduğu düşünülmektedir.

### III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Onlarca deney ve modelleme sonucu deneme yanıtı yoluyla literatürdeki birçok malzeme model sabiti ve 3 farklı Johnson-Cook(J-C) malzeme modeli denenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Kay (2002) tarafından önerilen sabitlerin kullanılmasına karar verilmiş ve başta temel J-C malzeme modeli olmak üzere literatürde mevcut 2 tane de modifiye edilmiş malzeme modelinden(model 1 ve model 2) modelleme yapıldıktan sonra kuvvet verileri ( $f_c, f_f$ ) alınıp, bunlar birbiriyle ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

2 farklı ilerleme değeri (10 $\mu$ m, 20 $\mu$ m) ve 3 farklı malzeme modeli için yapılan modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvet verileri ( $f_c, f_f$ ) ve deneysel sonuçlardan elde edilen kesme kuvvetleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2: Malzeme modellerine göre kesme kuvvetleri tablosu

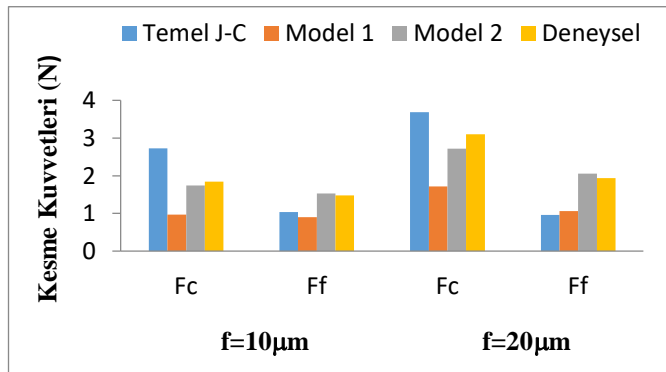
Kuvvetler(N)	f=10 $\mu$ m		f=20 $\mu$ m	
	$f_c$	$f_f$	$f_c$	$f_f$
Temel J-C	2,726	1,040	3,684	0,959
Model 1	0,97	0,9	1,714	1,062
Model 2	1,743	1,526	2,721	2,061
Deneysel	1,842	1,482	3,104	1,94

### IV. KARŞILAŞTIRMA

Deneysel sonuçlar ile modelleme sonucu elde edilen nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında;

- Temel J-C modeli sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin deneysel verilere %15-%50 hatayla yakınsadığı görülmektedir.
- Model 1'nin kullanılması sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin deneysel verilere %35-%50 hatayla yakınsadığı görülmektedir.
- Model 2'in kullanılması sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin deneysel verilere %5-%15 hatayla yakınsadığı görülmektedir.

Aşağıdaki grafikte modelleme ve deney sonucu elden edilen kuvvet verilerinin karşılaştırılması görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 6: Farklı malzeme modelleri için kesme kuvvetlerinin değişimi.

### V. SONUÇ

Bu çalışmada 2 farklı ilerleme değeri (10 $\mu$ m, 20 $\mu$ m) için 3 farklı malzeme modeli ile modelleme yapılmış, modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvet verileri ( $f_c, f_f$ ) ile deneysel sonuçlardan elde edilen kesme kuvvet verileri ( $f_c, f_f$ ) kıyaslanmıştır. Talaş formları dikkate alınmamıştır.

Sonuç olarak yumuşama etkisinin olmadığı, bu çalışmadaki model 2'nin deneysel sonuçlara en az hata payıyla yakınsayarak, en yakın sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Malzeme modeli seçimi birçok farklı kritere bağlı olmakla beraber gerçeğe en yakın modellemeyi yapabilmek için doğru malzeme modelinin seçimi oldukça önemlidir.

Doğru malzeme modelinin seçimi ile rahatlıkla yapılabilecek modellemeler sayesinde, bilimsel çalışmalarda deney sayısını minimuma indirgeyerek maliyet ve zamandan tasarruf sağlamak mümkündür.

### KAYNAKLAR

- [1] Karagöz M., "Modelling and robust controller design for a multi-axis micro-milling machine" the degree of master of science in mechanical engineering, Bilkent University, Turkey, September 2016
- [2] Yücel E., Çiçek A. "İmalat Alanında Yaygın Olarak Kullanılan Mikro İşleme Teknikleri", SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 15. Cilt, 1. Sayı, s.46-59, 2011.
- [3] Elektrik Port Web Sitesi, <http://www.elektrikport.com>
- [4] Figes Mühendislik Web Sitesi, <http://www.figes.com.tr>
- [5] Aslantaş K., Şahan Ö., "Ti6Al4V alaşımının mikro işleme şartlarında yüksek hızda tormalanması", 8.Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, s.101-110, 2-4 Kasım 2017.
- [6] Uzun I., Aslantaş K., "Talaş açısının kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisinin modellenmesi", Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu, s.50-53, 17 Nisan 2007.
- [7] Sima M., Özel T., "Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V", International Journal of Machine Tools, s.943-960, 2010.
- [8] G.-R. Johnson, W.-H. Cook, A constitutive model for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, vol. 54, 1983, pp. 1-7.
- [9] Styger G., Laubscher R.F., Oosthuizen G.A., "Effect of constitutive modeling during finite element analysis of machining-induced residual stresses in Ti6Al4V", 2nd CIRP Conference on Surface Integrity, s.294-301, 2014.
- [10] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot, A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48 (2008) 275-288
- [11] W.-S.Lee, C.-F. Lin, High-temperature deformation behavior of Ti6Al4V alloy evaluated by high strain-rate compression tests, Journal of Materials Processing Technology 75(1998) s.127-136.
- [12] Uzun İ., Aslantaş K., Apaydın D. "Çok kaplamalı kesici takım ile tormalama işleminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:7, No:1, s.69-82, 2010.