

Finite Element Analysis of the Influences of Feed Rate on Cutting Force and Chip Morphology in Orthogonal Turning of Ti6Al4V Alloy

Mehmet AYDIN^{1*} 

¹Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Fine Arts and Design, Department of Industrial Design, Bilecik, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/01/2024
Revision: 26/02/2024
Accepted: 13/03/2024

Keywords

Orthogonal Turning
Feed Rate
Finite Element
Simulation
Ti6Al4V Alloy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/01/2024
Düzeltilme: 26/02/2024
Kabul: 13/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ortogonal Tornalama
İlerleme Hızı
Sonlu Elemanlar
Simülasyonu
Ti6Al4V Alaşımı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study deals with the finite element (FE) analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Bu çalışma, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar (SE) analizini ele almaktadır.

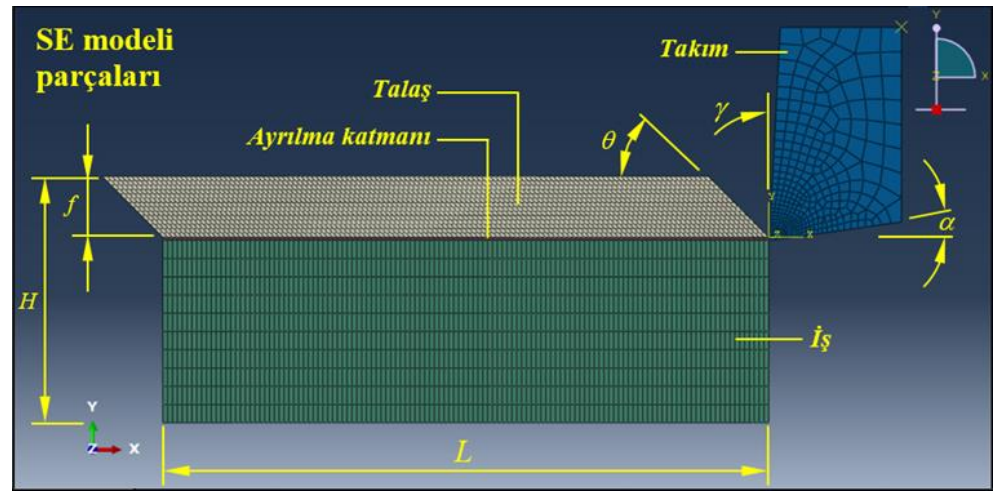


Figure A: Orthogonal turning setup in FE software / Şekil A: SE yazılımındaki ortogonal tornalama düzeneği

Highlights (Önemli noktalar)

- Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının etkileri / Influences of feed rate in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy
- Ortogonal tornalama için enerjiye dayalı hasar kriterine sahip çok parçalı SE modeli / Multi-part FE model with energy-based failure criterion for orthogonal turning
- Kesme kuvveti ve talaş morfolojisinin SE analizi / FE analysis of cutting force and chip morphology

Aim (Amaç): This work aims to present a FE analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Bu çalışma, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin SE analizini sunmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The influences of feed rate on cutting force and chip morphology are investigated using the multi-part FE model with energy-based failure criterion for orthogonal turning process of Ti6Al4V alloy. / Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işlemi için enerjiye dayalı hasar kriterine sahip çok parçalı SE modeli kullanılarak ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Results (Bulgular): The feed rate significantly changes the cutting force and the chip morphology observed in serrated chip shape in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızı kesme kuvvetini ve testere dişli talaş şeklinde gözlenen talaş morfolojisini önemli ölçüde değiştirmektedir.

Conclusion (Sonuç): An increase in the feed rate increases the cutting force. Besides, the higher the feed rate, the more prominent chip segmentation. / İlerleme hızındaki bir artış kesme kuvvetini artırmaktadır. Ayrıca, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa talaş segmentasyonu da o kadar belirgin olmaktadır.



Ti6Al4V Alaşımının Ortogonal Tornalanmasında İlerleme Hızının Kesme Kuvveti ve Talaş Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi

Mehmet AYDIN^{1*}

¹Bilecik Şeyh Ebebalı Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/01/2024
Düzeltilme: 26/02/2024
Kabul: 13/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ortogonal Tornalama
İlerleme Hızı
Sonlu Elemanlar
Simülasyonu
Ti6Al4V Alaşımı

Öz

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminde ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar (SE) analizi gerçekleştirilmiştir. Ortogonal tornalama işlemi sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı SE modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, ağ bağımlılığını azaltmak için karakteristik uzunlukla kontrol edilen enerjiye dayalı sünek hasar kriteri kullanılmıştır. Tornalama simülasyonları üç parametre kullanılarak gerçekleştirilmiştir: kesme hızı (170, 250 m/dak), ilerleme hızı (100, 120, 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$) ve kesme derinliği (2.03 mm). Tahmin edilen kesme kuvvetleri yayımlanmış deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deneysel ve tahmin edilen kesme kuvvetleri arasındaki farkın %13'e kadar azaldığını göstermektedir. İlerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e çıkarıldığında ortalama kesme kuvvetinde yaklaşık %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetinin yanı sıra talaşın geometrik değerleri de incelenmiştir. İlerleme hızının 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e çıkarılması, testere dişli talaşın adım değerinde yaklaşık %40'lık bir artışa neden olmaktadır. 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında tahmin edilen tepe ve vadi değerleri, 120 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında bulunanlardan sırasıyla %30 ve %17 daha yüksektir.

Finite Element Analysis of the Influences of Feed Rate on Cutting Force and Chip Morphology in Orthogonal Turning of Ti6Al4V Alloy

Article Info

Research article
Received: 15/01/2024
Revision: 26/02/2024
Accepted: 13/03/2024

Keywords

Orthogonal Turning
Feed Rate
Finite Element Simulation
Ti6Al4V Alloy

Abstract

In this research, a finite element (FE) analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning process of Ti6Al4V alloy is carried out. A multi-part FE model is established to optimize material properties and contact conditions during the orthogonal turning process. Besides, an energy-based ductile failure criterion controlled by a characteristic length is employed to reduce the mesh dependency. The turning simulations are performed by using three parameters: the cutting speed (170, 250 m/min), feed rate (100, 120, 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$) and depth of cut (2.03 mm). The predicted cutting forces are compared with published experimental findings. The results show that the difference between experimental and predicted cutting forces decreases up to 13%. An increase of about 20% in the average cutting force is observed when the feed rate is increased from 120 to 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$. In addition to the cutting force, the geometrical values of chip are investigated. The increase in the feed rate from 120 to 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$ results in an increase of approximately 40% in the pitch value of serrated chip. The predicted peak and valley values at a feed rate of 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$ are 30% and 17% higher, respectively, than those found at a feed rate of 120 $\mu\text{m}/\text{rev}$.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları yüksek mukavemetleri, mükemmel kırılma ve korozyon dayanımları nedeniyle uzay, havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde kullanılmaktadır [1]. Ancak, neredeyse tüm titanyum alaşımlarının, düşük ısı iletkenliği ve yüksek kimyasal aktivite nedeniyle

işlenmesi zordur. Titanyum alaşımlarının bu özellikleri, işleme süreçlerinde yüksek sıcaklığa ve hızlı takım aşınmasına neden olur [2, 3]. Ayrıca, uygun kesme parametrelerinin kullanılmamasından dolayı, yüzey kalitesinin kötüleşmesi, işleme maliyetlerinin artması ve verimliliğin azalması görülmektedir [4].

Ti6Al4V alaşımı, işlenmesi zor olan bir tür titanyum alaşımıdır. Titanyum alaşımının yüksek hızda işlenmesi, yüksek gerinim, yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızını içeren karmaşık bir süreçtir. İşlenebilirliğinin iyice araştırılması gereklidir. Bu bağlamda, talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetini [5], momenti [6], güç tüketimini [7, 8] ve kesme sıcaklığını [9] tahmin etmek için SE yöntemiyle simülasyonlar yürütülmüştür. Bu simülasyonları gerçekleştirmek için Deform [10], ThirdWave Advantedge [11] ve Abaqus [12] gibi yazılım paketleri kullanılmıştır. İlk çalışmalar, sürekli talaş oluşumunu modelleyen Eulerian analizine dayalıdır [13]. Gerçekçi bir hasar kriteri gerektiren Lagrangian hesaplamaları da talaş kaldırma işlemlerini modellemek için kullanılmıştır. Yaşar ve ark. [14] Lagrangian ağ yapısına dayalı SE modeli ile tornalama işleminde oluşan kesme kuvvetlerinin analizini yapmışlardır. Benzer şekilde, Aydın [15, 16] ortogonal kesme sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin ve kesme kuvvetlerinin analizi için Lagrangian formülasyonunu benimsemiştir. Diğer bir araştırmada, Aydın [17] Ti6Al4V alaşımının ortogonal kesme simülasyonu için eleman silme yönteminin kullanıldığı bir SE modeli sunmuştur.

Gelişigüzel Lagrangian–Eulerian (ALE) ağ oluşturma yaklaşımı, hem Eulerian hem de Lagrangian formülasyonlarının avantajlarını birleştirmektedir ve sürekli talaş tipini modellenmektedir [18, 19]. Arrazola ve ark. [20] ortogonal kesme simülasyonu sırasında iş parçasının sık sık yeniden elemanlara ayrılmasını azaltmak için ALE formülasyonunu kullanmışlardır. Ancak, ALE yöntemi başlangıç talaş geometrisine ilişkin bazı varsayımlara ihtiyaç duymaktadır. Son zamanlarda ALE'nin dezavantajlarının üstesinden gelmek için Birleşik Eulerian-Lagrangian (CEL) yöntemi gittikçe daha fazla uygulanmaktadır. Ducobu ve ark. [21] Ti6Al4V alaşımının ortogonal kesme işlemi için Eulerian ağlarla modellenen iş parçası ve Lagrangian ağlarla modellenen kesici takımdan oluşan bir CEL modeli sunmuşlardır. Zhuang ve ark. [22] CEL yöntemini ve J-C yapısal malzeme yasasını içeren bir SE modeli önermişlerdir. Ancak, bu modeller, uzun bir hesaplama süresi gerektiren üç boyutlu bir ortam gerektirmektedir.

Tornalama işleminde ilerleme hızı, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerinde dinamik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, titanyum alaşımı Ti6Al4V'nin ortogonal tornalama simülasyonu sırasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, ortogonal tornalama işlemi

sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı SE modeli önerilmiştir. Ağ bağımlılığını azaltmak için karakteristik eleman uzunluğuna dayalı hasar kriteri uygulanmıştır. Uygun ağ boyutunun belirlenebilmesi için tahmin edilen kesme kuvvetleri literatürden elde edilen deneysel kuvvetle karşılaştırılmıştır.

2. ORTOGONAL TORNALAMA İŞLEMİNİN SE ANALİZİ (FE ANALYSIS OF ORTHOGONAL TURNING PROCESS)

2.1. Ortogonal Tornalamanın Modellenmesi (Modelling of Orthogonal Turning)

Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemek için Abaqus/ExplicitTM SE yazılımı kullanılarak iki boyutlu (2B) SE modeli geliştirilmiştir. İş parçası; talaş, ayrılma katmanı ve iş olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. İş parçasının üç farklı bölüme ayrılması, farklı malzeme özelliklerinin, temas koşullarının ve hasar yasalarının tanımlanmasını sağlamıştır. Böylece, talaş katmanında farklı hasar enerjisine sahip J-C hasar modeli ve temas koşulları uygulanmıştır. Üç parçanın montajı, Abaqus'te mevcut olan standart birleştirme kısıtlaması uygulanarak yapılmıştır. Şekil 1 model geometrisi ve sınır koşullarını şematik olarak göstermektedir.

SE modeli, birleşik termo-mekanik analiz için kullanılan dörtgen düzlemsel gerinim elemanları (CPE4RT) kullanılarak yeniden ağ oluşturma tekniği uygulanmadan oluşturulmuştur. Talaş katmanı ağı, hesaplamının başlangıcındaki distorsiyon problemlerini önlemek için 45°'lik bir eğim açısı (θ) ile karakterize edilirken, ayrılma katmanı ve iş düzgün paralel elemanlarla modellenmiştir.

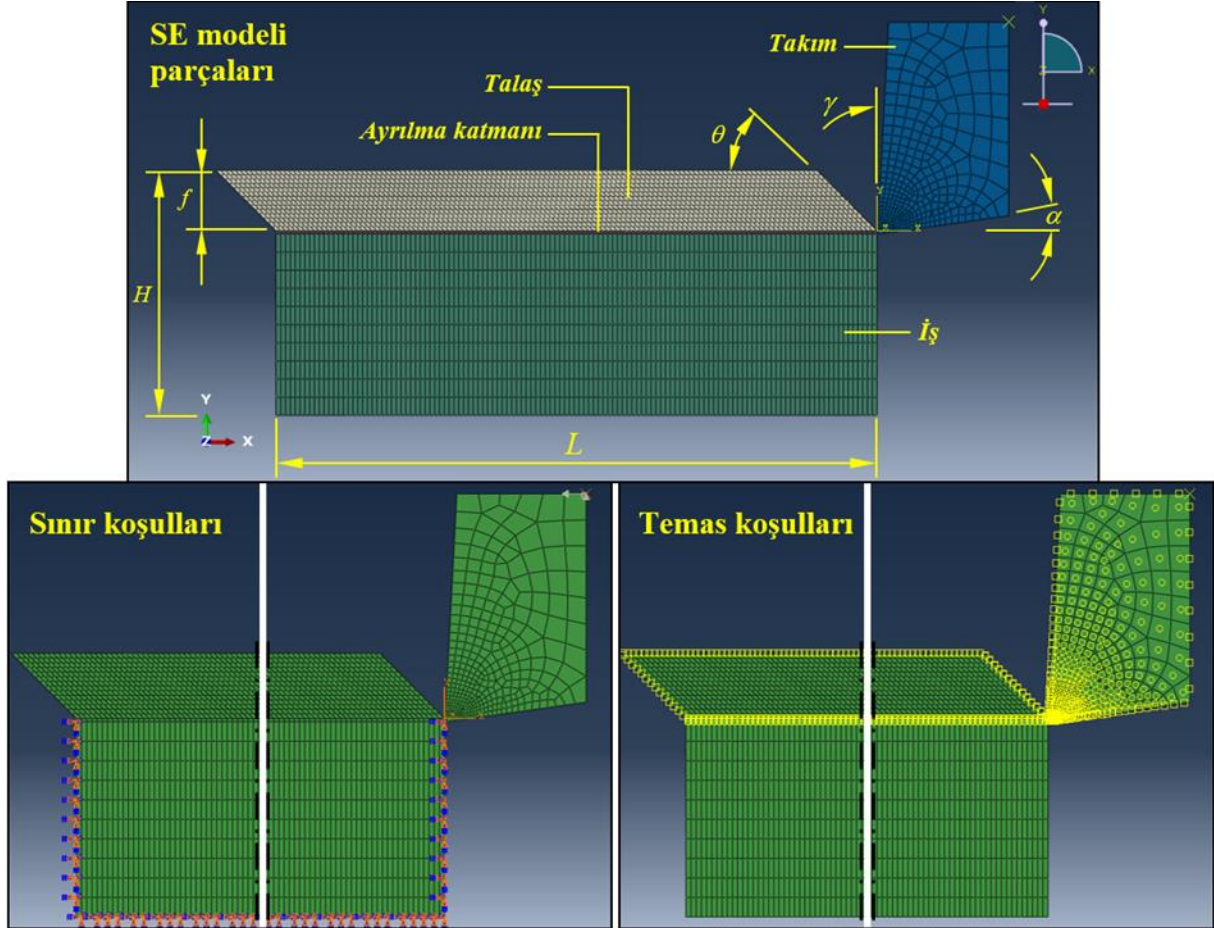
İş parçası boyutu, hasar enerjisi yoğunluğunun sabit kalmasını sağlamak için ilerleme hızı (f) cinsinden tanımlanmıştır. f 'nin H 'ye oranı $1/4$ 'tür ve f 'nin L 'ye oranı $1/10$ 'dur. Ayrıca, talaşın alt kısmına yerleştirilen ayrılma katmanının kalınlığı kesici kenar yarıçapına eşittir. Bu çalışmada, benimsenen tüm kesme parametreleri, Chen ve ark. [23] tarafından kullanılan parametrelere benzer şekilde alınmıştır. Kesici takım, talaş (γ) ve boşluk (α) açıları sırasıyla 3° ve 8° olan ve 5 μ m kesici kenar yarıçapına (r) sahip rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Kuru kesme koşulunda gerçekleştirilen simülasyonlarda kesme hızı kesici takıma uygulanırken iş katmanının alt, ön ve arka

kenarlarındaki düğümler sabitlenmiştir. Ortam sıcaklığı 293 °K dir.

$$\tau_f = \begin{cases} \mu\sigma_n < \tau_{\max} & \text{ise } \mu\sigma_n \\ \mu\sigma_n \geq \tau_{\max} & \text{ise } \tau_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Takım ve iş parçası arasındaki temas davranışı, normal gerilme (σ_n) ile sürtünme gerilmesini (τ_f), Denklem (1)'de verildiği gibi, ilişkilendiren Coulomb sürtünme modeli [24] kullanılarak tanımlanabilir:

burada τ_{\max} kayma gerilmesi limitidir ve μ sürtünme katsayısıdır. Bu çalışmada μ , Calamaz ve arkadaşları [25] tarafından sunulduğu gibi, 0.05 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Ortogonal tornalama için 2B SE modeli (2D FE model for orthogonal turning)

Takım ve iş parçası arasındaki temas alanı boyunca sürtünme, Denklem (2)'de tanımlandığı gibi, bir ısı akışı üretmektedir.

$$\phi_f = \eta_f \tau_f \mathcal{K} \quad (2)$$

burada η_f sürtünme işinin ısıya dönüşen kısmı ve \mathcal{K} kayma gerinimi hızıdır. Tüm sürtünme işinin ısıya dönüştüğü varsayılarak η_f 1 olarak alınır [26]. Sürtünme ısı, Denklem (3)'te belirtildiği gibi, talaş ve takım yüzeyleri arasında paylaşılır.

$$\phi_A = f_f \phi_f \quad \text{ve} \quad \phi_B = (1 - f_f) \phi_f \quad (3)$$

burada ϕ_A ve ϕ_B sırasıyla talaşa ve takıma akan ısı akışıdır ve f_f talaşa iletilen sürtünme ısıdır. Mevcut model için f_f 0.5 olarak alınmıştır [26].

Takım ve iş parçası arasında ısı transferine izin verilmiştir ve kararlı duruma hızla ulaşmak için yüksek bir termal temas iletkenliği katsayısı tanımlanmıştır ($h_{im} = 10^4$ kW/m²K) [27].

2.2. Enerjiye Dayalı Sünek Hasar Malzeme

Modeli (Energy-based Ductile Failure Material Model)

Yüksek hızlı talaş kaldırma işlemi, son derece yüksek deformasyonlar ve kısıtlanmamış plastik akış içermektedir. Yüksek derecede elastik olmayan deformasyonlar nedeniyle termal yumuşama oluşur ve sıcaklık değişikliklerine yol açar. Bu nedenle, gerinim hızı ve sıcaklığın etkilerini dikkate alan bir

malzeme modelinin kullanılması gereklidir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının tornalama simülasyonu için J-C malzeme modeli [28] benimsenmiştir. Akış gerilmesi ($\bar{\sigma}$), Denklem (4)'te verildiği gibi, ifade edilebilir:

$$\bar{\sigma} = [A + B \times (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \times \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

Tablo 1. J-C malzeme modeli için Ti6Al4V alaşımı parametreleri (Ti6Al4V alloy parameters for J-C material model) [29, 30]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\bar{\epsilon}}_0$ (s ⁻¹)	T _r (°K)	T _m (°K)
862	331	0.34	0.012	0.8	1.0	293	1878

Kesici takım malzemesi doğrusal elastik modelle tanımlanan tungsten karbürdür. Tablo 2 Ti6Al4V alaşımının ve karbür kesici takımın malzeme özelliklerini göstermektedir.

Talaş oluşumu sürecini modellemek için hasar davranışı, hasar başlama parametresi ve hasar gelişimi yasası kullanılarak karakterize edilmiştir. Hasar başlama parametresi Denklem 5'te sunulan kümülatif ilişki ile modellenebilir.

$$w = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad 0 \leq w \leq 1 \quad (5)$$

burada $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ plastik gerinim artışı ve $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ hasar anındaki plastik gerinimdir. Hasar parametresi (w) 1'i aştığında hasar başlatılır. J-C hasar gerinimi [29] Denklem (6) ile tanımlanabilir:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 e^{(d_3(p/\bar{\sigma}))}] [1 + d_4 \ln \dot{\bar{\epsilon}}] [1 + d_5 T^*] \quad (6)$$

burada p hidrostatik basınç ve $p/\bar{\sigma}$ gerilme üç eksenliliğidir. d_1-d_5 mekanik deneylerle elde edilebilen hasar parametreleridir. Ti6Al4V alaşımı için J-C hasar modeli parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Bu çalışmada, malzemenin hasar gelişim davranışını temsil etmek için enerjiye dayalı hasar kriteri uygulanmıştır [31]. Bu model, karakteristik uzunluk (L_c) ile ilişkili hasar enerjisini (G_f) kullanmaktadır. Hasar başlangıcından sonra gerilme-yer değiştirme tepkisini dikkate alarak iş parçası malzemesinin zayıflamasını yönetmektedir, dolayısıyla ağ bağımlılığı azaltılmaktadır. Hillerborg hasar enerjisi olarak da adlandırılan hasar enerjisi (G_f) Denklem (7) ile ifade edilebilir:

burada A , B , n , C ve m Hopkinson çubuk testlerinden elde edilen ve gerilme-gerinim eğrilerinden belirlenen malzeme parametreleridir. $\bar{\epsilon}^{pl}$ ve $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ sırasıyla plastik gerinim ve gerinim hızıdır. $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ referans gerinim hızıdır. T , T_r ve T_m sırasıyla iş parçası sıcaklığı, oda sıcaklığı ve malzeme ergime sıcaklığıdır. Ti6Al4V alaşımı için J-C malzeme modeli parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L_c \sigma_y d\bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \quad (7)$$

burada $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ sifira eşit plastik şekil değiştirmedir. \bar{u}^{pl} hasar başlangıcından sonraki plastik yer değiştirmedir. \bar{u}_f^{pl} hasar anında plastik yer değiştirmedir.

Ayrılma katmanı için doğrusal gelişimli hasar değişkeni (D) Denklem (8) ile belirlenebilir:

$$D = \frac{2G_f L_c \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

Talaş için üstel gelişimli hasar değişkeni (D) Denklem (9) ile belirlenebilir:

$$D = 1 - \exp \left(- \int_0^{\bar{u}^{pl}} \frac{\bar{\sigma}}{G_f} d\bar{u}^{pl} \right) \quad (9)$$

Hasar değişkeni (D) 1 olduğunda ilgili elemanlar uzaklaştırılır ve çatlak oluşur. Talaş oluşumunu modellemek için hasar enerjisi (G_f) [32], Denklem (9)'da sunulduğu gibi de tanımlanabilir:

$$(G_f)_{I,II} = ((1 - \nu)^2 / E) (K_C^2)_{I,II} \quad (10)$$

burada ν Poisson oranıdır. K_C kırılma tokluğudur ve I ve II alt simgeleri sırasıyla çekme ve kesme koşullarını göstermektedir.

Yüksek hızlı kesme sırasında mekanik davranış sıcaklıktan etkilendiği için plastik deformasyon sıcaklığın artmasına neden olan bir ısı akışı üretmektedir ve plastik deformasyon ısı akışı Denklem (11) ile belirlenebilir:

$$\phi_p = \eta_p \bar{\sigma} : \bar{\varepsilon}^p \quad (11) \quad \text{burada } \eta_p \text{ ısıya dönüştürülen plastik işin yüzdesidir ve \%90'a eşit olarak alınmıştır.}$$

Tablo 2. Ti6Al4V alaşımı ve karbür kesici takımın malzeme özellikleri (Material properties of Ti6Al4V alloy and carbide cutting tool) [23, 30]

Parametre	Ti6Al4V alaşımı	Karbür kesici takım
Yoğunluk (kg/m ³)	4430	11900
Elastikitey modülü (GPa)	109 (323°K) 91 (523°K) 75 (723°K)	534
Poisson oranı	0.34	0.22
Isıl genişleme (1/°K)	9 × 10 ⁻⁶	
Isıl iletkenlik (W/m°K)	6.8 (293°K) 7.4 (373°K) 9.8 (573°K) 11.8 (773°K)	50
Özgül ısı (J/kg°K)	611 (293°K) 624 (373°K) 674 (573°K) 703 (773°K)	400

Tablo 3. J-C hasar modeli için Ti6Al4V alaşımı parametreleri (Ti6Al4V alloy parameters for J-C failure model) [29]

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tornalama simülasyonunda, sünek metallerin malzeme deformasyon süreci genellikle gerilme-gerinim eğrisi ile karakterize edilir. Hasar gelişimi aşamasında, gerilme-gerinim ilişkisini doğru bir şekilde yakalamak için enerji esaslı hasar kriteri kullanılabilir ve hasar enerjisi yoğunluğu (G_ε) [23] Denklem (12) ile hesaplanabilir:

$$G_\varepsilon = \frac{G_f}{L_c} = \int_{\bar{\varepsilon}_{0i}^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{\varepsilon}^{pl} \quad (12)$$

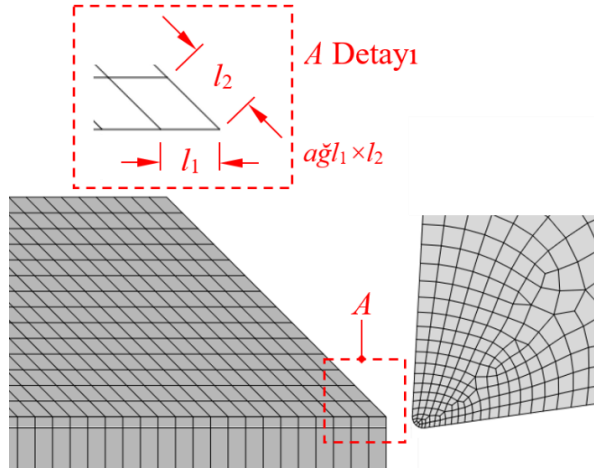
L_{c1} ve L_{c2} farklı karakteristik uzunlukları için hasar enerjisi yoğunluğunu sabit tutmak amacıyla hasar enerjisi (G_f), Denklem (13)'te gösterildiği gibi, değiştirilmelidir:

$$\frac{G_{f1}}{L_{c2}} = \frac{L_{c1}}{L_{c2}} \quad (13)$$

SE ağının kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için talaş katmanı uzun kenarları kesme hızı yönüne göre 45° eğik dikdörtgen elemanlar ile modellenmiştir. Şekil 2 detaylı olarak talaş katmanındaki eleman şeklini göstermektedir. $a\bar{g}l_1 \times l_2$ tanımında l_1 ve l_2 sırasıyla eleman kısa ve uzun kenar uzunluklarıdır.

Talaş kaldırma sırasında özellikle testere dişli talaş oluşumunda büyük deformasyon yaygın bir olgudur. Deformasyon büyüklüğü de önemli ölçüde SE ağı için benimsenen eleman boyutuna bağlıdır [26]. Sonuç olarak, ağ bağımlılığını azaltmak için uygun eleman boyutu belirlenmelidir. Tablo 4 talaş katmanı için analiz edilen ağ modellerini göstermektedir. Tabloda görüldüğü gibi, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızlı ortogonal tornalama işleminde ağ parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için talaş katmanında aynı enerji hasar kriteri (hasar enerjisi veya hasar enerjisi yoğunluğu) uygulanmıştır. Burada kesme

hızı (V) 250 m/dak ve ilerleme hızı (f) 100 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ve kesme derinliği (d) 2.03 mm'ye ayarlanmıştır.



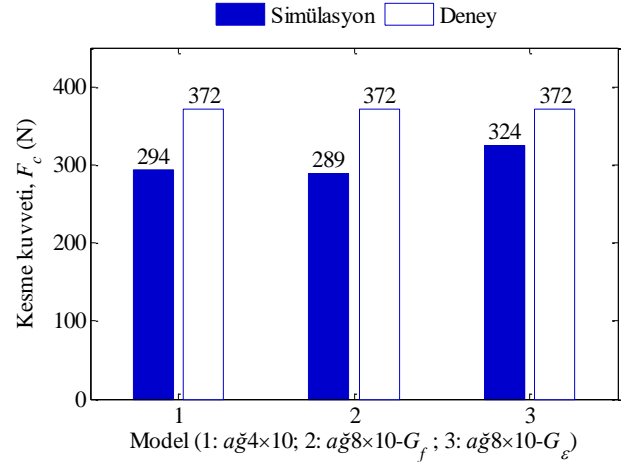
Şekil 2. Talaş katmanındaki eleman şekli (Element shape in the chip layer)

Table 4. Talaş katmanı için aynı hasar sabitine sahip ağ modelleri (Mesh models with the same failure constant for the chip layer)

Model	Hasar enerjisi, G_f (10^3 J/m^2)	Hasar enerjisi yoğunluğu, G_ε (10^9 J/m^3)
$a\check{g}4\times 10$	16.4	6.2
	19.7	7.4
	23.9	8.9
$a\check{g}8\times 10-G_f$	16.4	4.4
	19.7	5.2
	23.9	6.3
$a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$	23.3	6.2
	27.9	7.4
	33.8	8.9

Aynı hasar enerjisi ve hasar enerjisi yoğunluğu koşulları altında SE ağı modellerini incelemek için sayısal olarak tahmin edilen ortalama kuvvetler aynı kesme koşulunda literatürde mevcut olan deneysel ortalama kesme kuvveti [23] ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminden tahmin edilen kesme kuvvetleri (F_c) genel olarak deneysel kuvvet büyüklüğünden düşüktür. Kesme kuvvetleri için benzer bir değişim, Wang ve ark. [30] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da görülmüştür. Bu sonuç, J-C malzeme modeli ile düşük olarak tahmin edilen iş parçası malzemesinin işleme sertleşmesine bağlanabilir. SE yöntemiyle $a\check{g}4\times 10$ 'dan tahmin

edilen kesme kuvveti ölçülen değerden yaklaşık %20 daha düşüktür. $a\check{g}8\times 10-G_f$ modelinden, tahmin edilen kuvvet, artan ağ boyutuyla birlikte biraz azalma eğilimi göstermiş ve kesme kuvvetinin yüzde hatası 22.3 olarak bulunmuştur. Tahmin edilen kesme kuvveti $a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$ koşulu altında artmış ve kuvvetler arasındaki bağıl hata %13'e kadar azalmıştır. Yukarıdaki tartışmadan hasar enerjisi yoğunluğuna dayalı $a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$ modelinin kesme kuvvetini daha iyi bir doğrulukla tahmin edilmesini sağladığı sonucu çıkarılabilir.



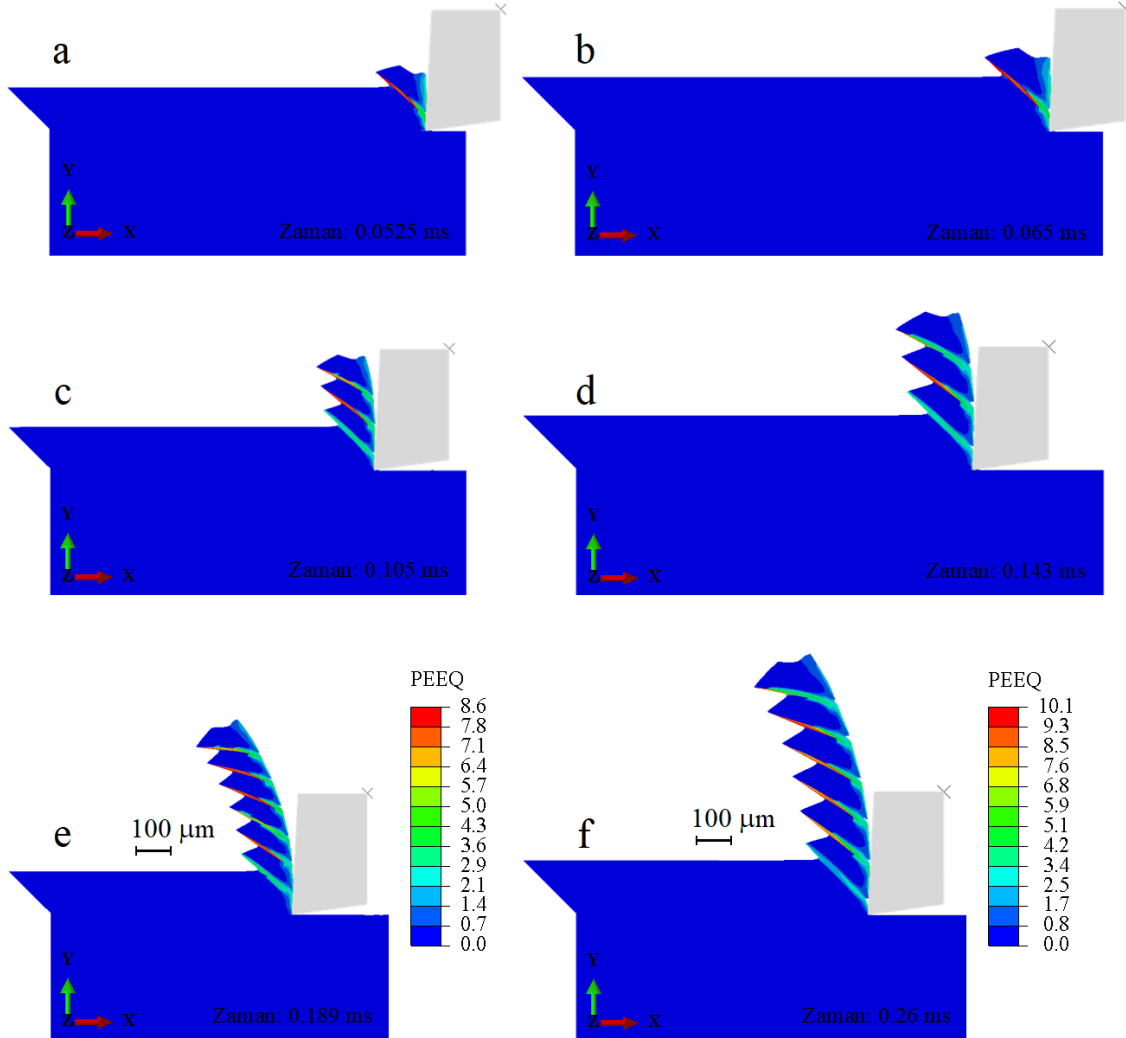
Şekil 3. Simüle edilen ve ölçülen [23] kesme kuvvetlerinin ortalama değerleri (The average values of simulated and measured cutting forces)

Ağ modelleri üzerindeki çalışma, talaş katmanı alt kenar ve eğik kenar ağ gözü sayıları sırasıyla 125 ve 14 olarak tanımlanarak elde edilen $8\times 10 \mu\text{m}$ boyutunda dikdörtgen elemanların tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Simülasyon süreçlerinde, iş parçası geometrisinin tüm boyutu, ilerleme hızı (f) ile aynı oranda değiştirilmiş ve farklı ilerleme hızları için ağ gözü sayıları sabit tutulmuştur. Ayrıntılı olarak, Denklem 13'te gösterildiği gibi, farklı karakteristik uzunluk L_c oranına göre hasar enerjisi yoğunluğunu korumak için farklı ilerleme hızları koşullarında hasar enerjisi (G_f) değiştirilmiştir.

İlerleme hızının talaş morfolojisi üzerindeki etkisini incelemek için 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları seçilmiştir. Yüksek hızlı ortogonal tornalama simülasyonları 170 m/dak kesme hızı ve 2.03 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımı için tahmin edilen talaş morfolojileri ve eşdeğer plastik gerinim (PEEQ) dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Seçilen süreç parametreleriyle tornalama işlemleri sırasında birincil kayma bölgesi ve takım-talaş arayüzü boyunca yoğunlaşan adyabatik kayma bantlarından (termo-plastik kararsızlık) dolayı Ti6Al4V alaşımının kesme işlemi sırasında testere dişli talaşlar oluşmuştur.

Diğer bir ifadeyle, $a\tilde{g}8\times 10-G_\varepsilon$ koşulu talaş oluşumu sırasında kayma lokalizasyonunun iyi bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır. İlerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e arttırıldığında, talaştaki ısı koşulları daha büyük ilerleme hızıyla daha adyabatik olma eğiliminde olduğundan talaş segmentasyonunun

daha belirgin olduğu gözlenebilir. Bu nedenle, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa, Şekil 4e ve f'de gösterildiği gibi, kayma bantlarındaki plastik gerinim gradyanı da o kadar yüksektir. Başka bir deyişle, ilerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e arttırıldığında en yüksek plastik şekil değiştirme 8.6'dan 10.1'e değişmiştir.



Şekil 4. Farklı ilerleme hızlarında talaş oluşumu ve gerinim alanı gelişimi (Chip formation and strain field development under different feed rates): (a) (c) (e) $f=120 \mu\text{m}/\text{dev}$; (b) (d) (f) $f=150 \mu\text{m}/\text{dev}$

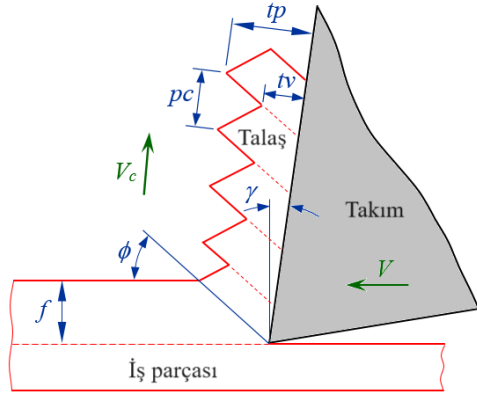
Şekil 5'de gösterildiği gibi, testere dişli talaş morfolojisi, adım (pc), vadi (tv) ve tepe (tp) olmak üzere üç parametre kullanılarak tanımlanır. Adım (pc) ve talaş kayma hızı (V_c) biliniyorsa, kesme kuvvetlerinin frekansı (fc) [33] Denklem (14) kullanılarak tahmin edilebilir:

$$fc(\text{kHz}) = \frac{V_c(\text{m/s})}{p_c(\text{mm})} \quad (14)$$

İki farklı ilerleme hızı için sayısal olarak elde edilen testere dişli talaşın geometrik parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Bu sonuçlar, her bir parametre değeri için talaş boyunca en az üç kez ölçüm yapılarak elde edilmiştir.

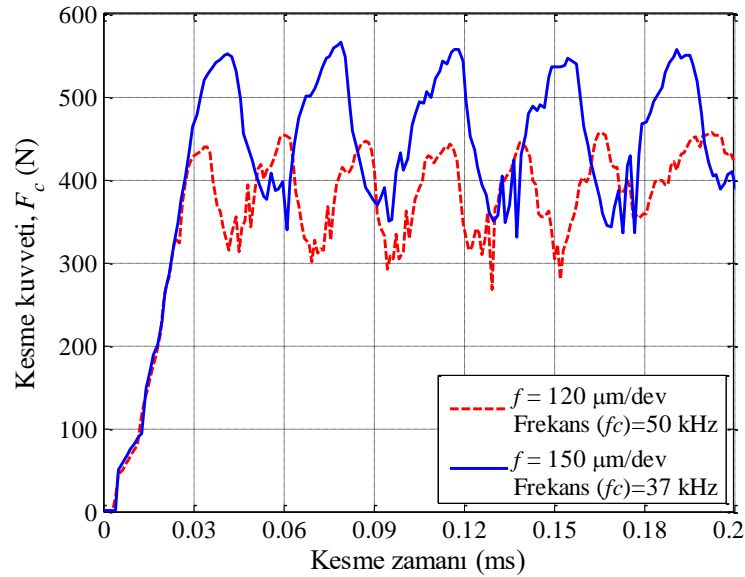
Tablodan, yüksek kesme hızı altında ilerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e değiştirildiğinde adım boyutunun yaklaşık %40 arttığı çıkarılabilir. Benzer bir eğilim tepe ve vadi değerlerinde de görülmüştür. 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında tahmin edilen tepe ve vadi değerleri 120 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında bulunanlardan sırasıyla %30 ve %17 daha yüksektir. Ayrıca, tabloda iki farklı ilerleme hızı için kesme kuvvetlerinin ortalama değerleri verilmiştir. 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında elde edilen kesme kuvveti, 120 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında elde edilen kesme kuvvetinden yaklaşık %20 daha büyüktür. Dolayısıyla, daha yüksek kuvvet büyüklüğü nedeniyle 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında

birincil kesme bölgesinde yapılan plastik iş daha fazladır.



Şekil 5. Testere dişli talaşın geometrik özellikleri
(Geometrical characteristics of serrated chip)

Şekil 6 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları için simüle edilen kesme kuvvetlerinin (F_c) zamana göre değişimini göstermektedir. 0.03 ile 0.06 ms aralığında kararlı duruma ulaşılmıştır. Wang ve ark. [30] tarafından sunulan çalışmada da gösterildiği gibi, testere dişli talaşlardaki adyabatik kayma bantlarının periyodik oluşumundan dolayı kesme



Şekil 6. 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları altında simüle edilen kesme kuvvetlerinin değişimi (Variation of simulated cutting forces under feed rates of 120 and 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminde ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, ortogonal tornalama işlemi sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı 2B SE modeli önerilmiş ve ağ bağımlılığını azaltmak için enerjiye dayalı hasar kriteri uygulanmıştır. Aşağıdaki bulgular çıkarılabilir:

kuvvetlerinin periyodik dalgalanmalarla değiştiği gözlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin frekansları (f_c), yüksek kesme hızı altındaki ilerleme hızları için farklıdır. İlerleme hızının 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e çıkarılmasıyla, kesme kuvvetinin genlikleri yaklaşık 75'den 100 N'a artarken, dalgalanma frekansı (f_c) 50'den 37 kHz'e azalmıştır. Başka bir deyişle, kesme kuvveti büyüklükleri ilerleme hızına önemli ölçüde bağlıdır. Kesme kuvveti değerlerinde gözlenen farklılıklar da eşdeğer plastik gerinim değerlerindeki değişimlerle açıklanabilir.

Table 5. Farklı ilerleme hızları altında ortalama simüle edilen kesme kuvvetlerinin ve talaş özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of average simulated cutting forces and chip characteristics under different feed rates)

İlerleme hızı ($\mu\text{m}/\text{dev}$)	F_c (N)	Talaş morfolojisi		
		tp (μm)	tv (μm)	pc (μm)
120	385	150	94	71
150	469	195	110	99

1. Karakteristik eleman uzunluğu ile kontrol edilen hasar enerjisi yoğunluğuna dayalı çok parçalı ortogonal tornalama SE modeliyle tahmin edilen kesme kuvveti deneysel sonuç ile uyum içerisinde bulunmuştur. Bu SE modeli farklı ilerleme hızlarında ağ bağımlılığının etkisini azaltabilir.
2. Takım ucunda başlayan ve talaş serbest yüzeyine yayılan adyabatik kayma kararsızlığı nedeniyle, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızda tornalanmasında testere dişli talaşlar gözlenmiştir.

3. Enerjiye dayalı hasar kriterli çok parçalı SE modeli ile Ti6Al4V alaşımının yüksek kesme hızında ortogonal tornalama simülasyonu kesme kuvvetlerinin periyodik değişimine yol açmıştır.
4. Yüksek kesme hızında, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa, talaş segmentasyonu da o kadar belirgin olmaktadır. Ayrıca, daha büyük ilerleme hızı, daha yüksek kesme kuvveti meydana getirmektedir ve frekansı azaltmaktadır.
5. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, tornalama işleminin temel bilgisini sağlamaktadır ve verilen kesici takım ve iş parçası malzemeleri için kesme kuvveti açısından ilerleme hızının optimize edilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda J-C malzeme ve hasar denklemlerindeki parametrelerin tornalama simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi araştırılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods he use in his work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet AYDIN: Simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the simulations, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çelik, Y.H. ve Kılıçkap, E. (2018). Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(1), 163–175.
- [2] Safari, H., Sharif, S., Izman, S. and Jafari, H. (2014). Kurniawan, D. Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI.

- Materials and Manufacturing Processes, 29 (3), 350–356.
- [3] Jianwei, M., Zhenyuan, J., Fuji, W. and Fuda, N. (2014). Spindle speed selection for high-speed milling of titanium alloy curved surface. Materials and Manufacturing Processes, 29, 364–369.
- [4] Kara, F., Aslantas, K. and Çiçek, A. (2015). ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel. Neural Computing and Applications, 26, 237–250.
- [5] Binali, R. (2023). Parametric optimization of cutting force and temperature in finite element milling of AISI P20 steel. Journal of Materials and Mechatronics: A, 4(1), 244–256.
- [6] Binali, R., Yıldız, S. ve Neşeli, S. (2021). S960QL yapı çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 31(1), 85–91.
- [7] Korkmaz, M.E. and Günay, M. (2018). Finite element modelling of cutting forces and power consumption in turning of AISI 420 martensitic stainless steel. Arabian Journal for Science and Engineering, 43, 4863–4870.
- [8] Binali, R., Coşkun, M. ve Neşeli, S. (2022). An Investigation of Power Consumption in Milling AISI P20 Plastic Mold Steel by Finite Elements Method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 34, 513–518.
- [9] Gupta, M.K., Korkmaz, M.E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G.M. and Günay, M. (2022). In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study. Mechanical Systems and Signal Processing, 169, 108772.
- [10] Kara, F., Aslantas, K. and Çiçek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI316L using artificial neural network. Applied Soft Computing, 38, 64–74.
- [11] Korkmaz, M.E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R. ve Günay, M. (2019). Al2014 Alüminyum alaşımının delinmesinde itme kuvvetinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 193–199.
- [12] Aydın, M. and Köklü, U. (2020). Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V titanium alloy. Simulation Modelling Practice and Theory, 100, 102039.
- [13] Calamaz, M., Coupard, D. and Girot F. (2010). Numerical simulation of titanium alloy dry machining with a strain softening constitutive law. Machining Science and Technology, 14 (2), 244–257.

- [14] Yaşar, N., Yurtkuran H. ve Günay M. (2018). Sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(4), 765–773.
- [15] Aydın, M. (2016). Dik kesme işleminde kalıcı gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi. Politeknik Dergisi, 19(3), 297–304.
- [16] Aydın, M. and Köklü, U. (2018). A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 517–527.
- [17] Aydın, M. (2022). Titanyum alaşımının yüksek-hızlı işleme süreci: Kapsamlı sonlu eleman modelleme. Politeknik Dergisi, 25(2), 813–826.
- [18] Aydın, M. and Köklü, U. (2017). Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 1465–1480.
- [19] Aydın, M. (2017). Prediction of cutting speed interval of diamond-coated tools with residual stress. Materials and Manufacturing Processes, 32, 145–150.
- [20] Arrazola, P.J., Villar, A., Ugarte, D. and Marya, S. (2007). Serrated chip prediction in finite element modeling of the chip formation process. Machining Science and Technology, 11, 367–390.
- [21] Ducobu, F., Rivière-Lorphèvre, E. and Filippi, E. (2017). Finite element modelling of 3D orthogonal cutting experimental tests with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) formulation. Finite Elements in Analysis and Design, 134, 27–40.
- [22] Zhuang, K., Zhou, S., Zou, L., Lin, L., Liu, Y., Weng, J. and Gao, J. (2022). Numerical investigation of sequential cuts residual stress considering tool edge radius in machining of AISI 304 stainless steel. Simulation Modelling Practice and Theory, 118, 102525.
- [23] Chen, G., Ren, C.Z., Yang, X.Y., Jin, X.M. and Guo, T. (2011). Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 56(9-12), 1027–1038.
- [24] Zorev, N.N. (1963). Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. International Research in Production Engineering, 42–49.
- [25] Calamaz, M., Coupard, D. and Girot, F. (2008). 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, 275–288.
- [26] Zhang, Y.C., Mabrouki, T., Nelias, D. and Gong, Y.D. (2011). Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach. Finite Elements in Analysis and Design, 47, 850–863.
- [27] Thepsonthi, T. and Özel, T. (2015). 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: experimental validations on chip flow and tool wear. Journal of Materials Processing Technology, 221, 128–145.
- [28] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983). 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, Netherlands, 541–547.
- [29] Johnson, G.R. and Holmquist, T.J. (1989). Test data and computational strengthen and fracture model constants for materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures, LA-11463-MS, Los Alamos National laboratory.
- [30] Wang, B. and Zhanqiang, L. (2014). Investigations on the chip formation mechanism and shear localization sensitivity of high-speed machining Ti6Al4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75, 1065–1076.
- [31] Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, PE. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, 6, 773–781.
- [32] Chen, G., Ren, C., Zhang, P., Cui, K. and Li, Y. (2013). Measurement and finite element simulation of micro-cutting temperatures of tool tip and workpiece. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 75, 16–26.
- [33] Vyas, A. and Shaw, M.C. (1999). Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121, 163–172.