



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Titanyum alaşımasının yüksek-hızlı işleme süreci: Kapsamlı sonlu eleman modelleme

## *High-speed machining process of titanium alloy: A comprehensive finite element modeling*

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet AYDIN

ORCID: 0000-0003-1126-0601

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aydın M., "Titanyum alaşımasının yüksek-hızlı işleme süreci: Kapsamlı sonlu eleman modelleme", *Politeknik Dergisi*, 25(2): 813-826, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.869482

# Titanyum Alaşımının Yüksek-Hızlı İşleme Süreci: Kapsamlı Sonlu Eleman Modelleme

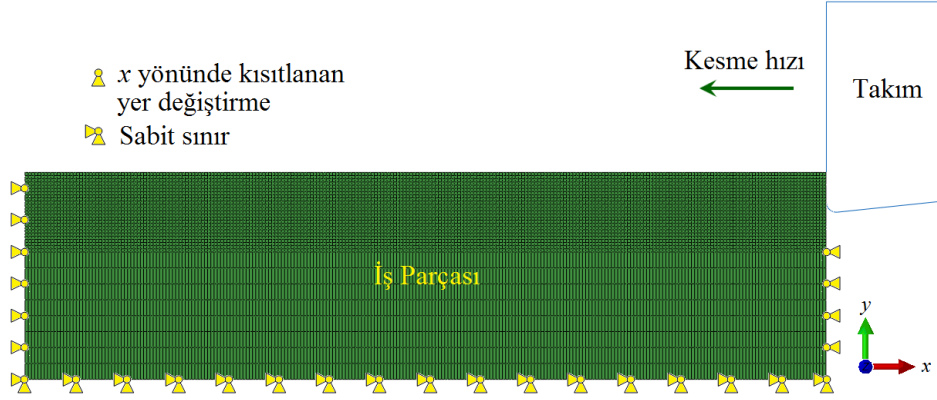
## High-Speed Machining Process of Titanium Alloy: A Comprehensive Finite Element Modeling

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Titanyum alaşımının talaş oluşumu süreci için kapsamlı sonlu eleman (SE) modelleme / A comprehensive finite element (FE) modeling for chip formation process of titanium alloy
- ❖ Yüksek hızlı işleme sırasında talaş oluşumu üzerinde çeşitli talaş açılarının etkisi / Impact of a variety of rake angles on chip formation during high-speed machining
- ❖ Talaş şekli, iş parçası yüzeyi, eşdeğer gerilme, gerinim ve kesme kuvveti gibi parametrelerin analizi / Analysis of parameters such as chip shape, workpiece surface, equivalent stress, strain and cutting force

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, titanyum alaşımının talaş oluşumu süreci için SE modelleme ve benzetimini ele almaktadır. / This study deals with FE modeling and simulation for chip formation process of titanium alloy.



Şekil. Talaş oluşumu için SE modeli / Figure. The FE model for chip formation

### Amaç (Aim)

Bu çalışma, talaş oluşumu benzetimi yapmak için iki boyutlu SE modeli sunmayı amaçlamaktadır. / This study aims to present a two-dimensional FE model for simulating the chip formation.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Talaş şekli, iş parçası yüzeyi, gerilme, gerinim ve kesme kuvvetini içeren temel parametreler SE yöntemiyle tahmin edilmiştir. / The basic parameters, including chip shape, workpiece surface, stress, strain and cutting force, are predicted with the FE method.

### Özgünlük (Originality)

Yüksek kesme hızı altında talaş oluşumu sürecini incelemek için kapsamlı bir SE modeli takdim edilmiştir. / A comprehensive FE model is introduced to study the chip formation process under high cutting speed.

### Bulgular (Findings)

Talaş şekilleri, takım talaş açısıyla değişmektedir. Talaş açısının pozitif yöndeki artışı kesme kuvvetinin azalmasına yol açmaktadır. / The chip shapes vary with the tool-rake angle. An increase in the positive direction of rake angle causes a decrease of cutting force.

### Sonuç (Conclusion)

Bu model, yüksek hızlı işlemede talaş açısının önemli bir rol oynadığını göstermektedir. / This model indicates that the rake angle plays a key role in high-speed machining.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Titanyum Alaşımının Yüksek-Hızlı İşleme Süreci: Kapsamlı Sonlu Eleman Modelleme

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet AYDIN\***

Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye  
(Geliş/Received : 27.01.2021 ; Kabul/Accepted : 13.03.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 17.03.2021)

## ÖZ

Bu çalışma, titanyum alaşımının talaş oluşumu süreci için iki boyutlu sonlu eleman (SE) modelleme ve benzetimini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Yüksek hızlı işleme sırasında çeşitli talaş açılarının etkisini incelemek için talaş şekli, iş parçası yüzeyi, eşdeğer gerilme, plastik gerinim ve kesme kuvveti gibi temel parametreler analiz edilmiştir. Talaş şekilleri, takım talaş açısıyla değişmektedir. Testere ağızlı talaş oluşumu sırasında, birincil deformasyon bölgesi, ikincil bölgeden önemli ölçüde daha yüksek gerilme sergilemektedir. Ayrıca, yüksek gerinimler talaş köklerinde meydana gelmiştir. Testere ağızlı talaşın neden olduğu kesme kuvveti dalgalanması, sürekli talaş oluşumu sırasında elde edilenden daha belirgindir ve kuvvet periyodik olarak değişmektedir. Sonuçlar, talaş açısının pozitif yöndeki artışının kesme kuvvetinde azalmaya ve daha pürüzsüz bir iş parçası yüzeyine yol açtığını da göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Talaş oluşumu, SE modelleme, yüksek-hızlı işleme, titanyum.

# High-Speed Machining Process of Titanium Alloy: A Comprehensive Finite Element Modeling

## ABSTRACT

This study comprehensively deals with a two-dimensional finite element (FE) modeling and simulation for chip formation process of titanium alloy. The basic parameters, such as chip shape, workpiece surface, equivalent stress, plastic strain and cutting force, are analyzed to study the impact of a variety of rake angles during high-speed machining. The chip shapes vary with the tool-rake angle. During the serrated chip formation, the primary deformation region exhibits substantially higher stress than secondary region. Also, the higher strains are occurred at the chip roots. The fluctuation of the cutting force caused by the serrated chip is more prominent than that obtained during the continuous chip formation, and the force varies periodically. The results also show that an increase in the positive direction of rake angle causes a decrease in cutting force and a smoother workpiece surface.

**Keywords:** Chip formation, FE modeling, high-speed machining, titanium.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sonlu elemanlar (SE) yöntemi, talaş kaldırma süreçlerini modellemek için yararlanılan kullanışlı bir yöntemdir. SE yöntemi kullanılarak, gerilme ve gerinim dağılımı gibi deneylerle bulunması oldukça zor olan çeşitli değişkenler doğru olarak tahmin edilebilir. Bu yüzden, birçok araştırmacı süreç performansının analizi ve eniyilemesi için zaman alıcı ve maliyetli fiziksel deneylerin yerine SE yöntemini kullanmıştır [1-3].

Titanyum alaşımları, yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, düşük talaş kaldırma oranı ve ciddi takım aşınması nedeniyle titanyum alaşımlarının işlenmesi zordur. Bu alaşımların yüksek hızda işlenmesi sırasında, genellikle testere ağızlı talaşlar üretilir ve bu durum kesme kuvvetlerinde ciddi dalgalanmalara, takım aşınmasının artmasına ve iş parçası yüzey kalitesinin kötüleşmesine yol açar [4]. İş parçası yüzey kalitesini ve takımların ömrünü iyileştirmek için yüksek hızlı kesme

sırasında kesici takım talaş açısının işlenen iş parçasının deformasyonu, kesme kuvveti, gerilme dağılımı, talaş şekli ve talaş oluşum mekanizması üzerindeki etkisinin anlaşılması gerekir. Bu amaçla kesme kuvvetleri [5], kesici takım gerilmeleri [6] ve takım aşınması [7] gibi performans değişkenleri SE yöntemi ile analiz edilmiştir.

Yüksek hızlı işlemede talaşların şekli, malzemelerin özelliklerine ve kesme koşullarına bağlıdır. Düşük karbonlu çelikler gibi, düşük sertlikteki malzemelerin işlenmesi sırasında kararlı kesme kuvvetleri oluşturan sürekli talaşlar elde edilir. Titanyum alaşımları gibi, yüksek sertlikteki malzemeler geniş bir kesme hızı aralığında testere ağızlı talaşlar ve daha yüksek kesme hızlarında kesikli talaşlar üretirler [8]. Literatürde talaş oluşumunun çeşitli yönleri incelenmiştir. Sürekli talaştan testere ağızlı talaşa geçişin, kesme işlemindeki plastik kararsızlık nedeniyle birincil kayma bölgesindeki termal yumuşama ve deformasyon sertleşmesinden kaynaklandığı gösterilmiştir [9]. Aynı zamanda, birincil deformasyon bölgesindeki yerel termal yumuşamanın adyabatik kayma bantlarının oluşumuna neden olduğu öne sürülmüştür [10]. Arrazola ve arkadaşları [11] süreç parametrelerinin testere ağızlı talaşlar üzerindeki

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mehmet.aydin@bilecik.edu.tr

duyarlılığını analiz etmişlerdir. Sonuçlar, kesici takım talaş açısının ve kesme hızının testere ağızlı talaş oluşumu üzerinde güçlü bir etkisinin olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ambati ve Yuan [12] farklı plastik yer değiştirme değerlerini içeren ardışık hasar modelini kullanarak çeşitli talaş şekillerini analiz etmişler ve ilerleme artışıyla sürekli talaştan testere ağızlı talaşa geçişin gerçekleştiğini göstermişlerdir. Yüksek kesme hızlarında birçok malzeme testere ağızlı talaş oluşturmaktadır. Isıl işlem görmüş AISI1045 çeliği [13], Ti6Al4V titanyum alaşımı [14, 15] ve nikel esaslı Inconel 718 alaşımı [16] üzerinde SE yöntemiyle testere ağızlı talaş oluşumunun sayısal benzetimleri yapılmıştır. Ayrıca, Wang ve arkadaşları [17] alüminyum alaşımının mikro frezelemesi sırasında talaş oluşumunu incelemek için iki boyutlu SE yaklaşımını kullanmışlardır. SE benzetiminden talaş hızı, gerinim hızı, temas basıncı, kesme kuvveti ve talaş akışını tahmin etmişlerdir. Ding ve arkadaşları [18] kanal ve kenar frezeleme koşullarında sertleştirilmiş takım çeliğinin mikro parmak frezeleme benzetiminden sürekli talaş elde etmişlerdir. Kesme kuvvetlerini, talaş oluşumunu, gerilme, sıcaklık ve hız dağılımlarını analiz etmişlerdir.

Talaş kaldırma işleminin SE analizi, genellikle Eulerian veya Lagrangian sınırlarına sahip yeniden ağ oluşturma tekniği ile gerçekleştirilmektedir [19, 20]. Bu çalışmada, titanyum alaşımı için yüksek hızlı işleme sürecinin benzetimini gerçekleştirmek amacıyla yeniden ağ oluşturma tekniğinin yerine eleman silme tekniğinin uygulandığı bir SE modeli sunulmuştur. Daha sonra, kesici takım talaş açısının talaş şekli, iş parçası yüzeyi, eşdeğer gerilme, gerinim alanı ve kuvvet büyüklükleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 2. TALAŞ OLUŞUMUNUN SE MODELİ (FE MODEL OF CHIP FORMATION)

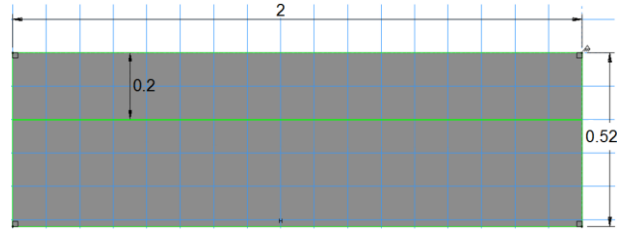
Ti6Al4V titanyum alaşımının talaş oluşumu işlemi için iki boyutlu SE modeli JC malzeme ve hasar yasası kullanılarak Abaqus/Explicit yazılımında hazırlanmıştır.

### 2.1. İş Parçası ve Takım Geometrik Modelleri (Workpiece and Tool Geometric Models)

İş parçası geometrik modelini oluşturmak için Part modülünde menü çubuğundan Part→Create seçilmiştir. Açılan Create Part diyalog kutusunda iş parçası modelinin adı Base, modelleme boşluğu 2D Planar, model tipi Deformable, temel unsur Shell ve yaklaşık boyut 5 olarak ayarlanmıştır. Eskiz çizim modülünde iş parçası geometrik modeli, Şekil 1'de gösterildiği gibi, 0.52 mm × 2 mm boyutlarında oluşturulmuş ve talaş katmanını, alt kısımdan daha fazla elemanla modellemek için iki farklı alana bölünmüştür.

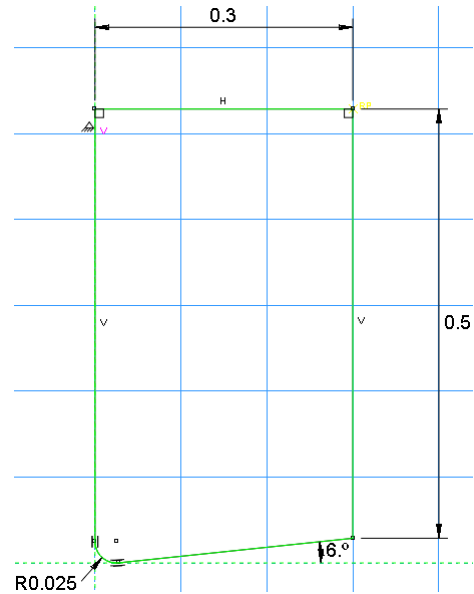
Kesici takım geometrik modelini oluşturmak için de Create Part diyalog penceresinden iki boyutlu modelleme boşluğu seçilmiştir. Model tipi Analytical rigid ve yaklaşık boyut 5 olarak ayarlanmıştır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, kesici takım 0.025 mm uç yarıçaplı ve

6° boşluk açılı ( $\gamma$ ) olarak modellenmiştir. Kesme sırasında takım talaş açısı ( $\alpha$ ) talaş şeklini etkileyen önemli bir faktördür [21]. Bu nedenle, talaş açısının talaş şekli üzerindeki etkisini incelemek için kesme analizi geniş bir talaş açısı aralığında (-30, 0 ve 30°) gerçekleştirilecektir.



Şekil 1. İş parçası (Workpiece)

Eskiz çizildikten sonra, menü çubuğundan Tools→Referans Point seçilmiş ve takımın sağ üst köşesi referans noktası olarak tanımlanmıştır. Böylece, kesme hızı uygulanabilecek ve kesme kuvveti kolaylıkla elde edilebilecektir.



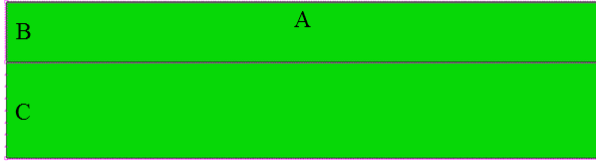
Şekil 2. Kesici takım (Cutting tool)

### 2.2. Elemanlara Ayırma ve Örgü Parça Oluşturma (Meshing and Mesh Part Creation)

SE ağını oluşturmadan önce, iş parçası kenarları üzerindeki ağ gözü sayısını ayarlamak için menü çubuğundan Seed→Edges ve Şekil 3'te gösterilen A, B ve C kenarları sırasıyla seçilerek ağ gözü sayısı 250, 25 ve 8 olarak tanımlanmıştır.

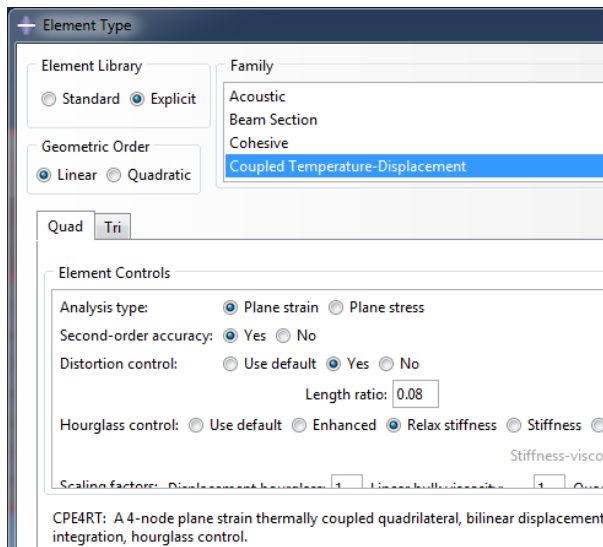
Ağ gözü sayısı ayarlandıktan sonra, iş parçası modelinin ağ şekli kontrol parametrelerini tanımlamak için menü çubuğundan Mesh→Controls seçilmiştir. Açılan Mesh Controls diyalog penceresinde dörtgen (Quad) eleman

şekli ve hesaplamayı daha kolay ve daha hızlı hale getirebilen Structured ağ oluşturma tekniği ayarlanmıştır.



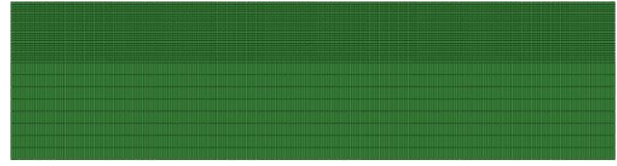
Şekil 3. Ağ gözü sayısı ayarlanmış iş parçası geometrisi (Seeded workpiece geometry)

Sonraki adımda, eleman tipini ayarlamak için menü çubuğundan Mesh→Element Type ve tüm iş parçası çerçeve içine alınarak seçilmiştir. Şekil 4’te gösterildiği gibi, Element Type diyalog kutusunda Coupled Temperature–Displacement eleman ailesi ve eleman kontrol seçeneklerinde Plane strain analiz tipi tanımlanmıştır. İkincil hesaplama doğruluğu ve Relax stiffness hourglass kontrol seçenekleri de işaretlenmiştir. Analiz sırasında aşırı eleman bozulmalarını önlemek için distorsiyon kontrol değeri 0.08 olarak girilmiş [22] ve geri kalan seçenekler varsayılan olarak ayarlanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, iş parçasını elemanlara ayırmak için iyi bir kararlılığa sahip dört düğümlü eleman tipi (CPE4RT) kullanılmıştır. İş parçası modeli, 8250 eleman ve 8534 düğümden oluşmaktadır.



Şekil 4. Eleman tipi (Element type)

Son olarak, ağ oluşturma işlemi tamamlamak için menü çubuğundan Mesh→Part ve SE ağı oluşturulmuş iş parçasını Base-mesh olarak tanımlamak için menü çubuğundan Mesh→Create Mesh Part seçilmiştir. Şekil 5’te gösterildiği gibi, yeşil bir örgü iş parçası oluşturulmuştur. Sonraki modelleme işlemleri, bu örgü iş parçasına dayanmaktadır.



Şekil 5. Örgü parça modeli (Mesh part model)

### 2.3. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Talaş kaldırma işleminde, iş parçası malzemesi yüksek gerinim hızı ve sıcaklık altında deformasyona uğrar. Yüksek hızlı kesme koşullarında, SE benzetimlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirmek için güvenilir akış gerilmesi modelleri kullanmak gereklidir. Malzemelerin akış gerilmesi özelliklerini tanımlamak için Johnson-Cook (JC) modeli [23], Usui modeli [24] ve yarı deneysel Zerilli modeli [25] gibi çeşitli yapısal modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmada, iş parçası malzemesinin akış gerilmesini tanımlamak için Denklem (1)’de verilen JC modeli kullanılmıştır. Bu model, büyük gerinimlerin, yüksek şekil değiştirme hızlarının ve sıcaklığa bağlı visko-plastik deformasyonun dahil edildiği işlemlerde metallerin ve alaşımlarının davranışını tatmin edici bir şekilde tanımlamaktadır.

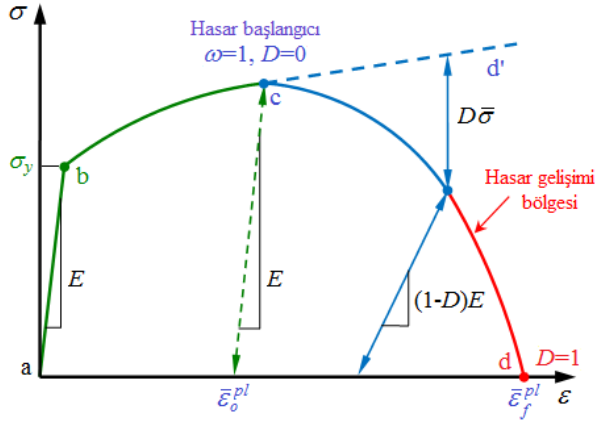
$$\bar{\sigma} = \left[ A + B (\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

burada  $\bar{\sigma}$  eşdeğer gerilme,  $\bar{\epsilon}^{pl}$  eşdeğer plastik gerinim,  $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$  eşdeğer plastik gerinim hızı,  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  referans gerinim hızı (1/s),  $A$  malzemenin akma mukavemeti,  $B$  sertleşme modülü,  $C$  gerinim hızına bağlı malzeme sabiti,  $n$  sertleşme üssü,  $m$  termal yumuşama katsayısı,  $\theta$  işlem sıcaklığı,  $\theta_m$  (Ti6Al4V için 1605°C) malzeme ergime sıcaklığı ve  $\theta_0$  (25°C) ortam sıcaklığıdır [26].

Talaş oluşumu benzetimlerinde bir hasar modeli de kullanılır. Bu model, Şekil 6’da verildiği gibi, sünek bir malzemenin hasar gelişimini gösteren tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile verilebilir. Şekilde, sürekli eğri, hasarlı gerilme-gerinim davranışını ve kesikli eğri, hasar olmadığında görülen davranışını temsil etmektedir.

Sünek kırılma ile talaş oluşumu iki aşamada gerçekleşir. İlk aşama hasarın başlatılması ile ilgilidir, ikincisi ise kırılma enerjisi yaklaşımına dayalı hasar gelişimi ile ilgilidir.

Hasar başlangıç kriteri olarak Denklem 2’de sunulan JC hasar modeli [28] kullanılmıştır. Denklem (3) ile ifade edilen skaler hasar parametresi ( $\omega$ ) 1’i aştığında hasarın başladığı varsayılır.



Şekil 6. Gerilme-gerinim eğrisi (Stress-strain curve) [27]

$$\bar{\varepsilon}_o^{pl} = \left[ D_1 + D_2 \exp\left( D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[ 1 + D_4 \ln\left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 + D_5 \left( \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \right) \right] \quad (2)$$

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_o^{pl}} \quad (3)$$

burada  $\bar{\varepsilon}_o^{pl}$  hasar başlangıcındaki eşdeğer plastik gerinim,  $P$  hidrostatik basınç,  $P/\bar{\sigma}$  gerilme üç eksenliliği,  $D_1$ - $D_5$  JC hasar parametreleri ve  $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$  eşdeğer plastik gerinim artışıdır.

Hasar gelişimi sırasında, gerilme-gerinim ilişkisi malzeme davranışını tam olarak temsil etmez. Bu nedenle, Hillerborg ve arkadaşları [29] tarafından önerilen kırılma enerjisi formülasyonu hasarın başlamasından sonra yer değiştirme-gerilme tepkisi oluşturarak ağ bağımlılığını azaltmak için kullanılır. Birim çatlak alanını elde etmek için gerekli kırılma enerjisi ( $G_f$ ), Denklem (4)'te verilen Hillerborg'un kırılma enerjisi ile ifade edilebilir:

$$G_f = \int_{\bar{\varepsilon}_o^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} L \sigma_y d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \quad (4)$$

Denklem 4'te,  $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$  kırılma anındaki eşdeğer plastik gerinim,  $L$  bir elemanın karakteristik uzunluğu ve  $\sigma_y$  akma gerilmesi,  $\bar{u}^{pl}$  eşdeğer plastik yer değiştirme ve  $\bar{u}_f^{pl}$  kırılma anındaki eşdeğer plastik yer değiştirmedir.

Ağ bağımlılığını azaltmak için kırılma enerjisine dayalı doğrusal hasar gelişim parametresi Denklem (5)'te verildiği gibi ifade edilir:

$$D = \frac{L \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \quad (5)$$

burada  $\bar{u}_f^{pl}$  Denklem (6) ile hesaplanabilir [30]:

$$\bar{u}_f^{pl} = \frac{2G_f}{\sigma_{y0}} \quad (6)$$

burada  $\sigma_{y0}$  hasar kriterine ulaşıldığı andaki akma gerilmesi değeridir.

Her bir integrasyon noktasında hasar değişkeni ( $D$ ) 1'e eşit olduğunda, eleman tamamen hasar gördüğü için Abaqus yazılımı tarafından sağlanan eleman silme tekniği ile ortadan kaldırılır. Tamamen hasar görmeyen elemanlar ise talaşı oluşturur.

Hasar gelişimi için gerekli kırılma enerjisi ( $G_f$ ) Denklem (7) ile belirlenebilir [31]:

$$G_f = \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) K_C^2 \quad (7)$$

burada  $E$  malzemenin elastikiyet modülü,  $\nu$  Poisson oranı,  $K_C$  çatlak gelişimi için kırılma tokluğu sabitidir.

Ti6Al4V titanyum alaşımı iş parçası malzemesinin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. JC malzeme parametreleri de Çizelge 2'de sunulmuştur. Parametreler 0.0001, 0.1 ve 2150 s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızlarında ve en yüksek 0.57 plastik gerinim seviyesinde belirlenmiştir [32].

Çizelge 1. İş parçası malzemesinin özellikleri (The properties of workpiece material) [33]

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastikiyet modülü (GPa)	Poisson oranı	Isıl iletkenlik (W/mK)	Özgül ısı (J/kgK)	Isıl genleşme katsayısı (1/K)
4430	109 (50°C)	0.34	6.8 (20°C)	611 (20°C)	9 × 10 <sup>-6</sup>
	91 (250°C)		7.4 (100°C)	624 (100°C)	
	75 (450°C)		9.8 (300°C)	674 (300°C)	
			11.8 (500°C)	703 (500°C)	

Çizelge 2. JC malzeme modeli sabitleri (JC material model constants) [34]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
862	331	0.34	0.012	0.8	-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

Ti6Al4V olarak tanımlanacak yeni bir malzeme oluşturmak için Property modülüne girilmiş ve menü çubuğundan Material→Create seçilmiştir. Açılan Edit Material diyalog kutusunda sırasıyla General→Density öğelerine tıklanarak yoğunluk değeri girilmiştir. Mechanical→Elasticity→Elastic seçilmiş ve veri sekmesinde, elastikiyet modülü ve Poisson oranı değerleri tanımlanmıştır. Malzemenin plastik davranışını tanımlamak için Mechanical→Plasticity→Plastic öğeleri seçilmiştir. Hardening seçeneği Johnson-Cook olarak ayarlanmıştır.  $C$  değeri 0.012 ve Epsilon sıfır noktası değeri 1 olarak girilmiştir. Bu parametreler, gerinim hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Malzemenin hasar parametrelerini ayarlamak için Mechanical→Damage for Ductile Metals→Johnson-Cook Damage ve hasar gelişimi kriteri olarak kırılma enerjisi seçilmiştir. Malzeme ısı iletkenliğini tanımlamak için Thermal→Conductivity seçilmiş ve Conductivity veri sütununda sıcaklığa bağlı olarak veriler girilmiştir. Malzeme genleşme katsayısı Mechanical→Expansion seçilerek ayarlanmıştır. Özgül ısı kapasitesi için Thermal→Specific Heat seçilmiş ve sıcaklığa bağlı olarak veriler girilmiştir. Inelastic heat fraction için varsayılan değer kullanılmıştır.

#### 2.4. Kesit Tanımlama ve Atama (Section Description and Assignment)

Kesit oluşturmak için menü çubuğundan Section→Create seçilmiş ve Section-Base kesiti tanımlanmıştır. Malzeme Ti6Al4V ve düzlemsel gerilme/gerinim kalınlığı 1 olarak ayarlanmıştır.

Kesit atama işleminden önce bir eleman seti oluşturulmalıdır. Eleman seti için menü çubuğundan Tools→Set→Create seçilmiştir. Açılan Create Set diyalog kutusunda eleman seti Base-el olarak tanımlanmış ve Type sekmesinde Element işaretlenmiştir. Daha sonra, tüm iş parçası fare ile çerçeve içine alınarak işlem tamamlanmıştır. Eleman seti oluşturulduktan sonra, geometriye kesit atamak için menü çubuğundan Assign→Section seçilmiş ve Base-el eleman seti ayarlanmıştır. Edit Section Assignment diyalog kutusundaki kesit sekmesinde Section-Base kesiti seçilerek kesit tipi ve atanan malzeme tanımlanmıştır. Kesit malzemesi atama işlemi tamamlandığında örgü iş parçasının rengi, Şekil 7’de sunulduğu gibi, kesit atama işleminin başarılı olduğunu göstermek için açık yeşile değişmektedir.

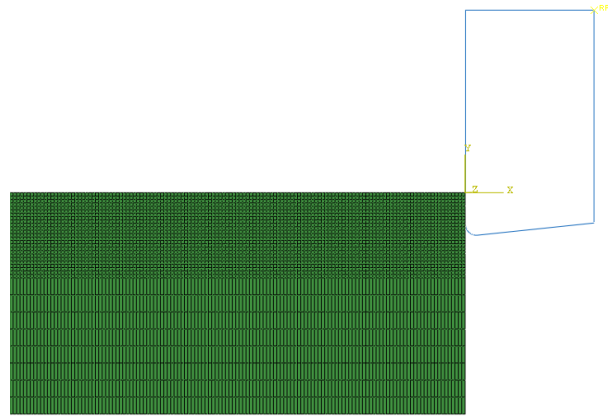


Şekil 7. Atanan kesit (Assigned section)

#### 2.5. Model Montajı (Model Assembly)

Parçaların montajını yapmak ve kesici takımı iş parçasına göre konumlandırmak için Assembly modülüne girilmiş ve menü çubuğundan Instance→Create seçilmiştir. Açılan Create Instance diyalog kutusunda Base-mesh ve Tool seçilmiş, Dependent (mesh on part) öğesi ayarlanmış ve böylece Base-mesh ve Tool çizim bölgesinde görüntülenmiştir.

Montajın koordinat orijini, varsayılan olarak iş parçası ve takımın koordinat orijini ile çakışmaktadır. Kesici takım ucunu kesme derinliğine taşımak için menü çubuğundan Instance→Translate seçilmiştir. Taşıma için başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları izafi değerler olarak girilir. Varsayılan başlangıç taşıma noktası koordinatı 0,0’dır. Bitiş noktası koordinatları 0.001, 0.1 olarak girilmiştir. Böylece kesici takım 0.1 mm’lik kesme derinliğine ayarlanmıştır. Burada kesici takımın iş parçasına yeterince yakın olmasına, ancak ilk penetrasyon gerçekleşmemesine dikkat edilmelidir. Takım iş parçasına çok uzaksa, kesme işlemi geç başlayacaktır. Çok yakınsa, ara yüz oluşur ve takım ile iş parçası arasındaki temas ilişkisi etkilenir. Şekil 8 iş parçası ve kesici takımın konumunu göstermektedir.



Şekil 8. Parçaların montajı (Assembly of parts)

#### 2.6. Analiz Tipi ve Çıktılar (Analysis Type and Outputs)

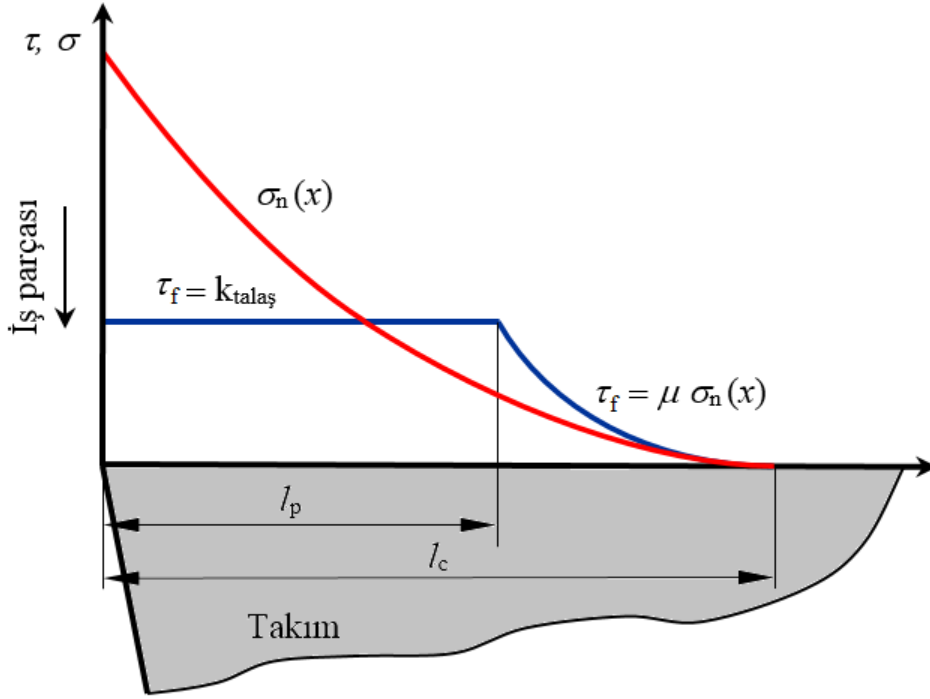
Analiz adımını tanımlamak için Step modülüne girilmiş ve menü çubuğundan Step→Create seçilmiştir. Create Step diyalog kutusunda, analiz adımının adı Cutting olarak tanımlanmıştır. Bu adım, başlangıç analiz adımından sonra eklenmektedir. Analiz adımı tipi Dynamic, Temp-disp, Explicit olarak seçilmiştir. Time period, 1.5 mm işleme uzunluğu ve 300 m/dak kesme hızı hesaba katılarak 0.0003 s ve geri kalan seçenekler varsayılan olarak ayarlanmıştır.

Abaqus varsayılan çıktı öğeleri sağlamaktadır. Sistem tarafından ayarlanan varsayılan çıktı öğeleri Field Output Requests Manager diyalog kutusunda, F-Output-1 seçilerek Edit Field Output Request ara yüzünde görüntülenebilir.

## 2.7. Temas ve Rijit Cisim Kısıtlamaları (Contact and Rigid Body Constraints)

Talaş kaldırma benzetimi gerçekleştirmek için, takım-talaş ara yüzü boyunca normal ( $\sigma_n$ ) ve sürtünme kayma ( $\tau_f$ ) gerilme dağılımları modellenir [35]. Bu dağılımlar, Şekil 9'da gösterildiği gibi, temsil edilir. Zorev'in modeline [36] göre, kuru kesme koşullarında işleme sırasında takım talaş yüzeyinde aynı anda iki bölge

mevcuttur. Takımın ucundan bir noktaya kadar, takım-talaş temas alanında yapışma bölgesi oluşur ve yapışma bölgesindeki sürtünme kayma gerilmesi ( $\tau_f$ ) talaş üzerindeki takım-talaş ara yüzündeki ortalama kayma akış gerilmesine ( $k_{\text{talaş}}$ ) eşittir ( $\tau_f = k_{\text{talaş}}$ ). Bu noktadan sonra, Coulomb sürtünme yasasının uygulanabileceği kayma bölgesi oluşur ve sürtünme kayma gerilmesi, sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) kullanılarak belirlenebilir.



Şekil 9. Talaş yüzeyindeki gerilme dağılımları (Stress distributions on rake face) [36]

Talaş yüzeyindeki normal gerilme dağılımı ( $\sigma_n$ ) ve sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) bilindiğinde, sürtünme gerilmesi ( $\tau_f$ ) Denklem (8) ve (9) kullanılarak belirlenebilir:

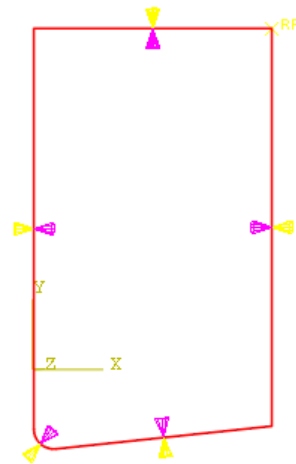
$$\tau_f(x) = k_{\text{talaş}}, \mu \sigma_n(x) \geq k_{\text{talaş}} \text{ (yapışma bölgesi)} \quad (8)$$

$$\tau_f(x) = \mu \sigma_n(x), \mu \sigma_n(x) < k_{\text{talaş}} \text{ (kayma bölgesi)} \quad (9)$$

Yapışma bölgesinin uzunluğu ( $l_p$ ) ve takım-talaş temas uzunluğu ( $l_c$ ), SE benzetimi sürtünme modelinde kullanılamamaktadır. Bu çalışmada, takım-talaş sürtünmesi Coulomb sürtünme yasasına dayalıdır. Sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), 0.3 değerine ayarlanmıştır [37].

Bir temas oluşturmadan önce kesici takım temas yüzeyini ve iş parçası düğüm setini tanımlamak gereklidir. Kesici takım temas yüzeyini oluşturmak için Interaction modülüne girilmiştir. View→Assembly Display Options seçilmiştir, Assembly Display Options diyalog kutusundaki Instance sekmesinde sadece Tool-1'in görüntülenmesi sağlanmıştır. Daha sonra, menü çubuğundan Tools→Surface→Create seçilerek açılan Create Surface diyalog kutusunda yüzey adı Tool\_surf ve tipi Geometry olarak tanımlanmıştır. Takım seçildiğinde iki farklı renk

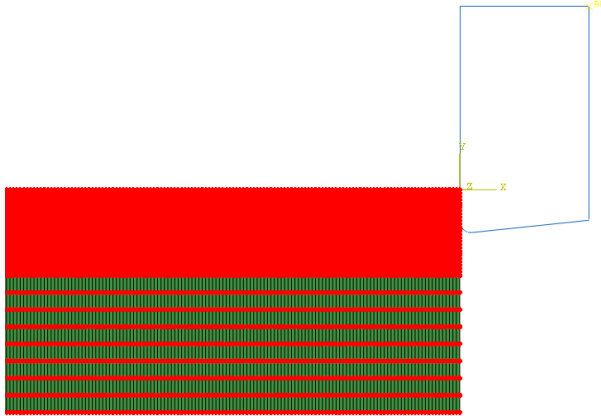
seçeneği ortaya çıkmaktadır. Şekil 10'da gösterildiği gibi, farklı renkler, takımın iç ve dış yüzeylerini temsil etmektedir. Takım temas yüzeyini tanımlamak için takımın dış yüzeyini temsil eden sarı renk seçilmiştir.



Şekil 10. Takım temas yüzeyi (Tool contact surface)



İş parçası düğüm setini tanımlamak için Assembly Display Options diyalog kutusundaki Instance sekmesinde Base-mesh-1 (iş parçası) seçilerek iş parçası görünüm ekranına geri getirilmiştir. Menü çubuğundan Tools→Set→Create seçilmiştir. Açılan Create Set diyalog kutusunda düğüm seti adı n\_all ve tipi Node olarak tanımlanmıştır. Son olarak, Şekil 11'de gösterildiği gibi, iş parçasının tüm düğümleri seçilmiştir.



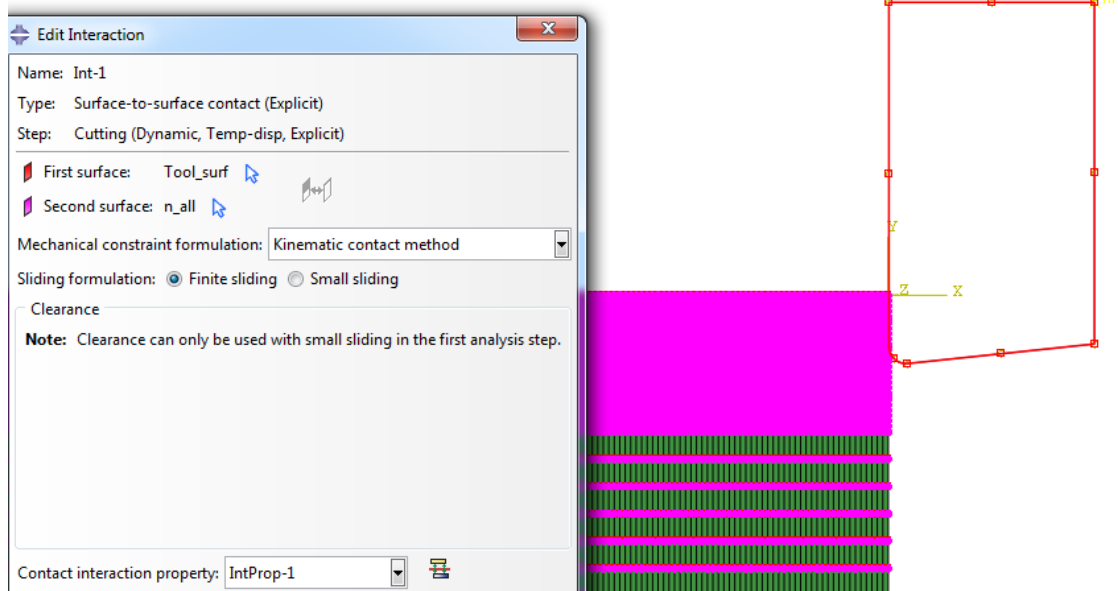
Şekil 11. İş parçası düğüm seti (Node set of workpiece)

Temas özelliklerini tanımlamak için menü çubuğundan Interactions→Property→Create seçilmiş, açılan diyalog kutusundaki varsayılan IntProp-1 adı ve Contact seçeneği kabul edilmiştir. Edit Contact Property diyalog

kutusunda Mechanical→Tangential Behavior ve sürtünme formülasyonu Penalty olarak seçilerek sürtünme katsayısı 0.3 olarak ayarlanmıştır. Normal temas özelliklerini ayarlamak için Mechanical→Normal Behavior seçilmiş ve varsayılan seçenekler kabul edilmiştir.

Temas çiftini tanımlamak için menü çubuğundan Interaction→Create seçilmiştir. Görüntülenen Create Interaction diyalog kutusunda Int-1 varsayılan adı kabul edilmiş, Cutting adımı ve temas çifti tipi listesinden Surface-to-surface contact (Explicit) seçilmiştir. Ana yüzey olarak tanımlı yüzeyler listesinden Tool\_surf ve yardımcı yüzey için n\_all düğüm seti ayarlanmıştır. İşlem tamamlandıktan sonra, ana ve yardımcı temas çifti, Şekil 12'de gösterildiği gibi, vurgulanmaktadır.

Rijit gövde kısıtlamasını oluşturmak için menü çubuğundan Constraint→Create seçilmiştir. Açılan Create Constraint diyalog kutusunda, Rigid Body işaretlenmiş ve Edit Constraint diyalog kutusu görüntülenmiştir. Bu diyalog kutusunda, Analytical Surface bölge tipi ve tanımlı yüzeyler listesinden Tool\_surf seçilmiştir. Referans noktası için takım eleman seti tanımlanmalıdır. Takım geometri setini tanımlamak için menü çubuğundan Tools→Set→Create seçilmiştir. Açılan Create Set diyalog kutusunda adı ref\_geo ve tipi Geometry olarak tanımlanmıştır. Daha sonra, RP harfleriyle işaretlenmiş olan takım referans noktası seçilmiştir. Böylece, tanımlanan ref\_geo noktası, referans noktası olarak kullanılmıştır.



Şekil 12. Temas çifti (Contact pair)

## 2.8. Sınır Koşulları (Boundary Conditions)

İşleme sırasında, iş parçasının alt yüzeyi tamamen sınırlandırılmış ve yan yüzeyleri de X doğrultusunda kısıtlanmıştır. Kesici takım, sabit hızla -X doğrultusunda doğrusal olarak hareket etmektedir. Takım hızı

değişikliğini daha düzenli hale getirmek için hız genlik eğrisi eklenebilir. Ayrıca, kesici takım iş parçasını oda sıcaklığında işlediğinden, iş parçası ve takımın üst ucu için önceden tanımlanmış bir sıcaklık alanı ayarlamak gereklidir.

Takım üzerine yer değiştirme yükünü uygulayabilmek ve kesme kuvveti çıktısını elde etmek için ref\_geo olarak tanımlanan takım referans noktası kullanılmıştır.

İş parçası serbestlik derecelerini tanımlamak için düğüm setleri tanımlanmalıdır. İş parçası alt kenarı düğüm setini oluşturmak için Load modülünde menü çubuğundan Tools→Set→Create seçilmiştir. Açılan Create Set diyalog kutusunda düğüm seti adı base\_bottom, tipi Node olarak tanımlanmış ve alt kenardaki tüm düğümler seçilmiştir.

Genlik eğrisini tanımlamak için menü çubuğundan Tools→Amplitude→Create seçilmiştir. Açılan Create Amplitude diyalog kutusunda varsayılan Amp-1 adı kabul edilmiş ve Tabular tipi seçilmiştir. Zaman ve genliğin matematiksel ilişkisi, Şekil 13'te gösterildiği gibi, girilmiştir. Genlik eğrisi, takım hareket hızının değişim sürecini sıfırdan maksimuma ve sonra sıfıra ayarlamayı sağlamaktadır.

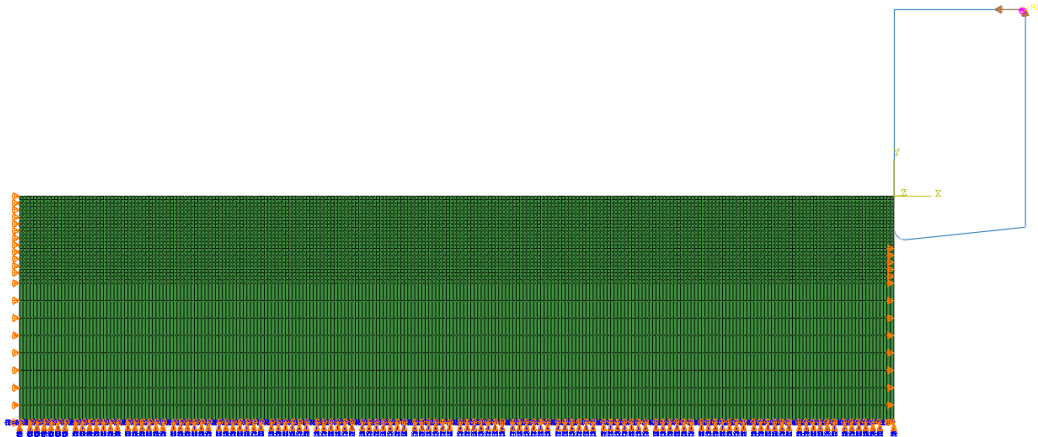
İş parçasının alt tarafına uygulanacak sınır koşullarını tanımlamak için menü çubuğundan BC→Create seçilmiş ve Create Boundary Condition diyalog kutusunda adı Fix\_work olarak tanımlanmıştır. Initial analiz adımında Mechanical sınır koşulu kategorisi ve Symmetry/Antisymmetry/Encastre seçilmiştir. Bölge

seçim iletisi görüntülendiğinde, base\_bottom düğüm seti ve tüm kısıtlamaları temsil eden ENCASTRE ögesi ayarlanmıştır. İş parçasının ön ve arka kenarlarına uygulanacak sınır koşulları için de yukarıdaki işlem tekrar edilmiştir.

Amplitude Data		Baseline Correction
	Time/Frequency	Amplitude
1	0	0
2	2.4E-005	1
3	0.00028	1
4	0.0003	0

Şekil 13. Genlik eğrisi (Amplitude curve)

Tool\_move adlı kesici takım sınır koşulunu oluşturmak için Cutting analiz adımında Mechanical kategorisi ve Velocity/Angular velocity ayarlanmıştır. Bölge seçimi iletisi görüntülendiğinde, ref\_geo takım referans noktası seçilmiştir. Takım hareketi sınır koşulları (kesme hızı ve genlik) Edit Boundary Condition diyalog kutusunda tanımlanmıştır. Sınır koşulları oluşturulduktan sonra elde edilen model görünümü Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Sınır koşulları (Boundary conditions)

İş parçasının başlangıç sıcaklık sınır koşulunu tanımlamak için menü çubuğundan Predefined Field→Create seçilmiştir. Açılan Create Predefined Field diyalog kutusunda sınır koşulu adı Temp\_work olarak tanımlanmış ve Initial analiz adımı ayarlanmıştır. Other kategorisinde Temperature seçeneği işaretlenmiş ve n\_all düğüm seti seçilmiştir. Edit Predefined Field diyalog kutusunda başlangıç sıcaklık sınır koşulu 298K (25°C) olarak ayarlanmıştır. Takım referans noktası ref\_geo için de başlangıç sıcaklık sınır koşulunu tanımlamak için yukarıdaki işlem tekrar edilmiştir.

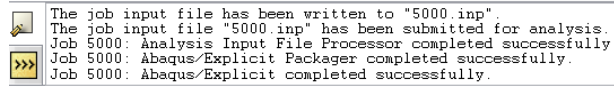
## 2.9. İş Başlatma (Starting a Job)

Model oluşturulduktan sonra Job modülüne girilir. İş başlatmak için iş oluşturma, girdi dosyasını yazma, veri kontrolü ve girdi dosyasını gönderme işlemleri yapılır. İş oluşturmak için menü çubuğundan Job→Create

seçilmiştir. Açılan Create Job diyalog kutusunda işin adı 5000 olarak tanımlanmıştır. Edit job diyalog kutusu görüntülenmiş, varsayılan seçenekler kabul edilmiş ve iş oluşturma görevi tamamlanmıştır. Oluşturulan işin girdi dosyasını yazmak için menü çubuğundan Job→Manager seçilir. Açılan Job Manager diyalog kutusunda Write Input düğmesine tıklanır. Bu işlem sayesinde modelin bir girdi dosyası (inp) çalışma dizinine yazılır. Veri kontrol görevini gerçekleştirmek için Data Check seçeneği kullanılır. Job Manager diyalog kutusunda durum sütunu, görev yürütme ilerlemesini göstermektedir. Görev tamamlandığında hata yoksa, Check Completed görüntülenir.

\*inp. dosyasının analizini gerçekleştirmek için 5000 adlı iş seçilmiş ve Submit düğmesine tıklanmıştır. Şekil 15'te gösterildiği gibi, bu sırada ekranın altındaki pencerede

durum görüntülenebilir. Analiz tamamlandıktan sonra, elde edilen hesaplama sonuçları visualization modülünden çıkarılabilir.



Şekil 15. İş ilerlemesi (Job progress)

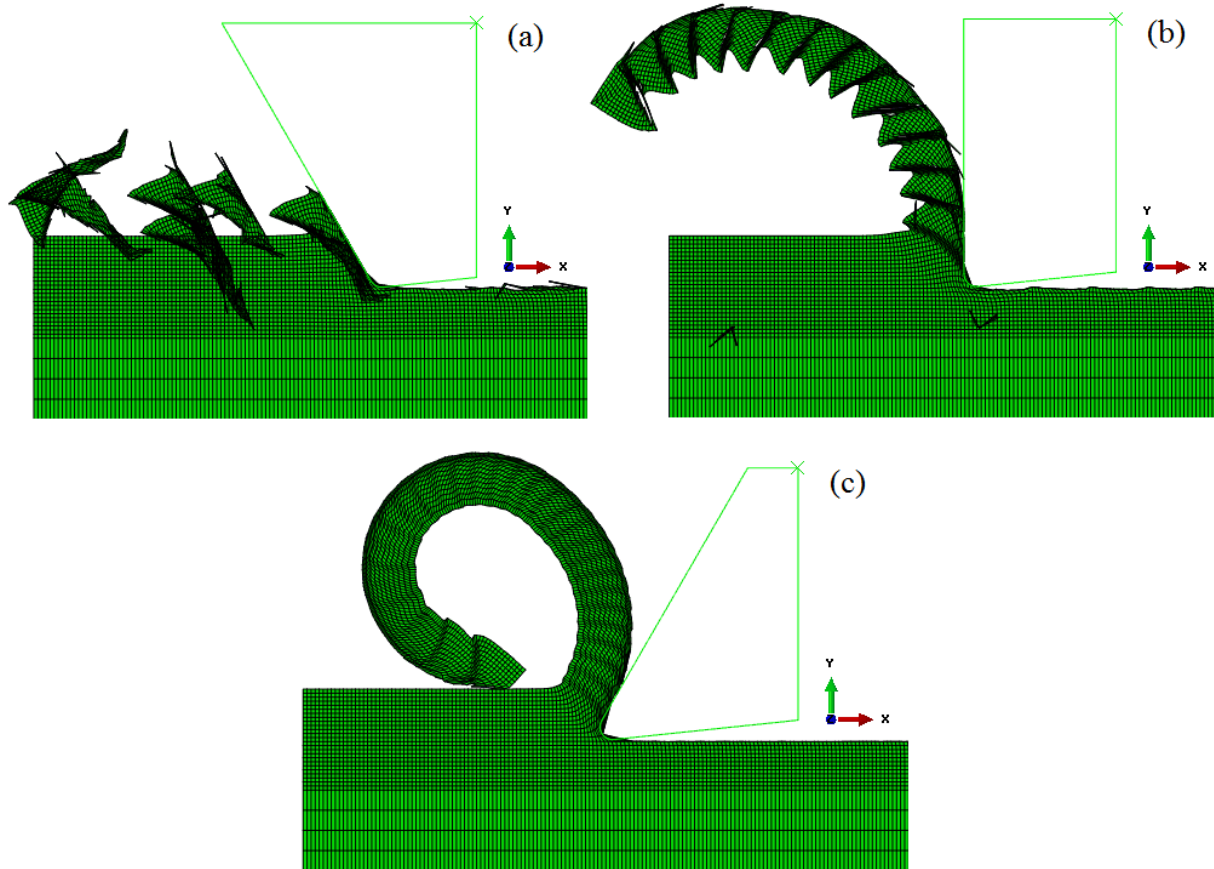
### 3. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION)

Talaş kaldırma işleminin analizi için iş parçası ve takım arasındaki ilk temastan talaş oluşumunun tamamen gerçekleşmesine kadar benzetim gerçekleştirilmesi gerekir. Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının dik kesme işleminin üç farklı durumu,  $-30^\circ$ ,  $0^\circ$  ve  $30^\circ$  takım talaş açısı, 300 m/dak kesme hızı, 0.1 mm kesme derinliği ve 1 mm kesme genişliği ile analiz edilmiştir. Talaş şekli, iş parçası yüzeyi, eşdeğer gerilme, plastik gerinim ve kesme kuvveti gibi parametreler incelenmiştir.

#### 3.1. Talaş Açısının Talaş Oluşumuna Etkisi (Effect of Rake Angle on Chip Formation)

Şekil 16(a)–(c) üç farklı talaş açısı altında elde edilen talaş şeklini ve ağ deformasyonunu göstermektedir. Şekil

16(a)'da görüldüğü gibi,  $-30^\circ$ 'lik açıda kesikli talaş şekli oluşmuştur. Talaş, takım talaş yüzeyi tarafında aşırı deformasyona uğramış ve pürüzlü bir iş parçası yüzeyi görülmüştür.  $-30^\circ$ 'lik negatif talaş açısı verildiğinde, pürüzlü bir yüzey oluşması, kesme hareketinin itme ve sıkıştırma kuvvetine dönüşmesi ile açıklanabilir [21]. Şekil 16(b),  $0^\circ$ 'lik takım talaş açısında oluşan talaş şeklini göstermektedir. Takımın ilerlemesiyle keskin testere ağızlı talaşlar sürekli olarak elde edilmiştir ve işlenen iş parçasının yüzeyi daha az pürüzlüdür. Testere dişler arasındaki deformasyon bölgesinde malzemenin termoplastik kararsızlığından kaynaklandığı kabul edilen adyabatik kayma bantları ortaya çıkmıştır [8]. Kayma bantları önemli derecede deforme olmuş ve benzer açılarda takım ilerleme yönüne doğru eğilmişlerdir. Talaş yüzeyine yakın taraf daha pürüzsüzdür ve diğer taraf testere ağızı şeklindedir. Başka bir deyişle, Ti6Al4V alaşımını yüksek hızlı işleme sırasında meydana gelen plastik deformasyon talaşın kayma yüzeyindeki gerilmeyi arttırmıştır. Şekil 16(c),  $30^\circ$ 'lik talaş açısında elde edilen benzetim sonucunu göstermektedir. İş parçasının yüzey kalitesini önemli derecede iyileştiren sürekli talaş oluşmuştur. Şekil 16(b) ve (c)'den, talaş açısındaki artışın işlenen iş parçası yüzeyini daha pürüzsüz hale getirdiği çıkartılabilir.

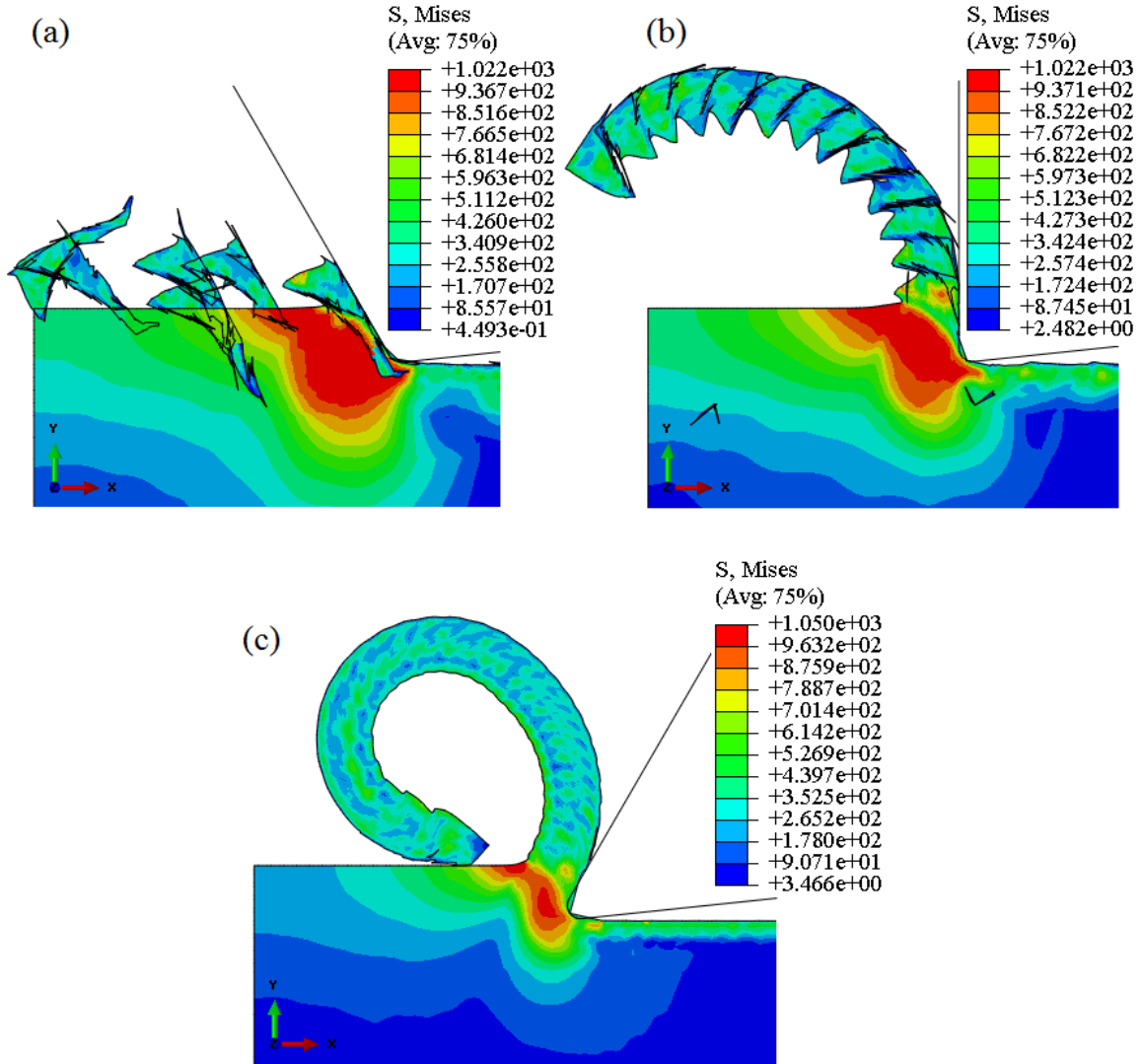


Şekil 16. Talaş şekli ve ağ deformasyonu: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$  (Chip shape and mesh deformation: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$ )

### 3.2. Eşdeğer Gerilme Dağılımı (Equivalent Stress Distribution)

Şekil 17(a)–(c), üç farklı talaş açısı için SE benzetimlerinden tahmin edilen iş parçası eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her üç durumda da, takım ucundan talaşın serbest yüzeyine uzanan birincil deformasyon bölgesinde yüksek eşdeğer gerilme dağılımları (yaklaşık 700'den 1000'e MPa) gözlemlenirken, ikincil deformasyon bölgesinde daha düşük eşdeğer gerilme büyüklükleri (yaklaşık 350'den

700'e MPa) görülmüştür.  $-30^\circ$  ve  $0^\circ$ 'lik takım talaş açıları için talaş ve iş parçasındaki en yüksek eşdeğer gerilme bölgeleri yaklaşık olarak aynı büyüklüklere ve benzer desenlere sahip olmasına karşın,  $30^\circ$ 'lik açıda daha küçük bir en yüksek eşdeğer gerilme bölgesi oluşmuştur. Başka bir deyişle,  $-30^\circ$  ve  $0^\circ$ 'lik talaş açılarında, kesme hareketi, talaşın deforme olmasını önleyen ve talaş ve iş parçasında daha büyük eşdeğer gerilme alanına neden olan itme ve sıkıştırma işlevini içermektedir [21].

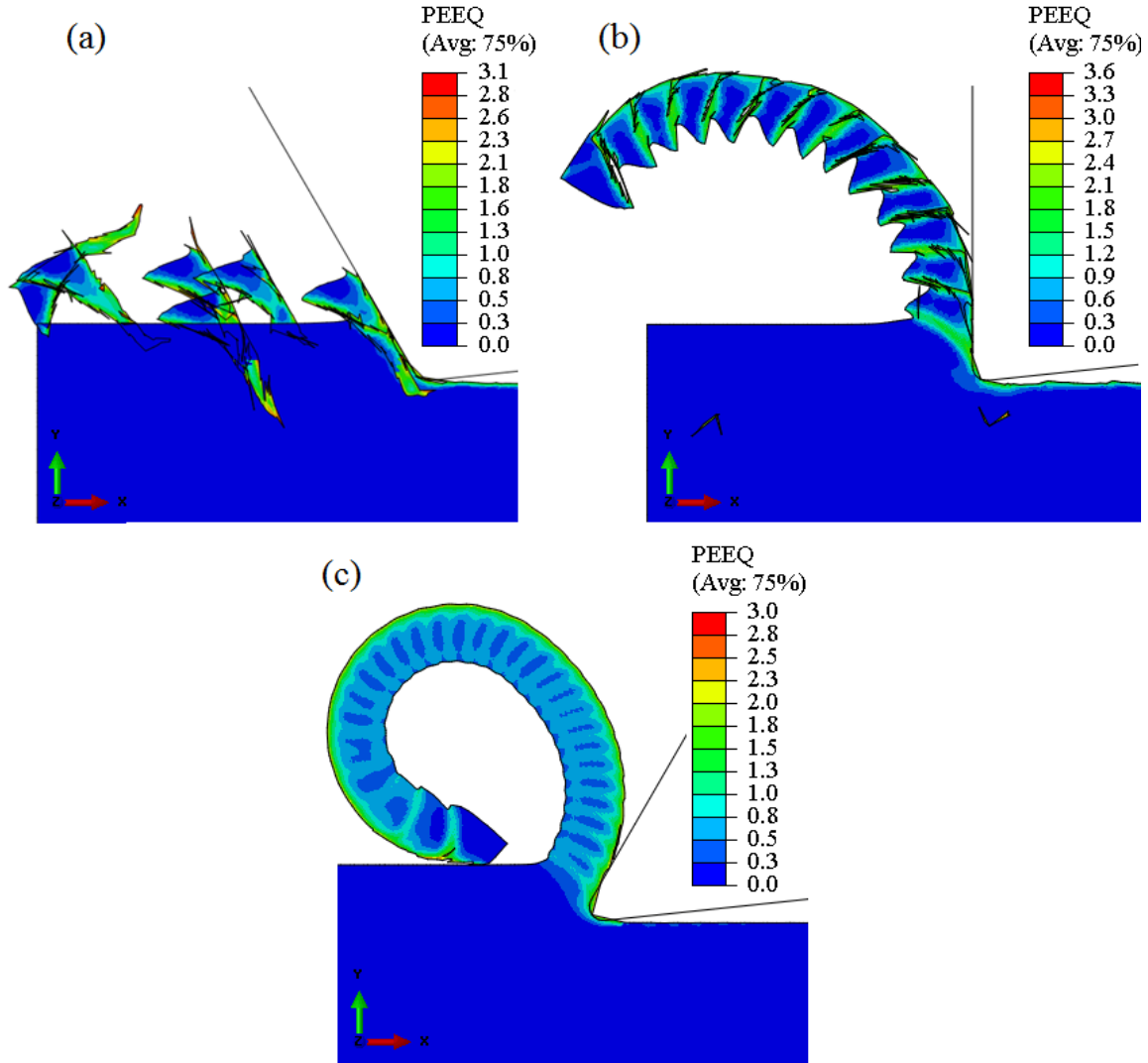


Şekil 17. Eşdeğer gerilme dağılımları: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$  (Equivalent stress distributions: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$ )

### 3.3. Eşdeğer Gerinim Dağılımı (Equivalent Strain Distribution)

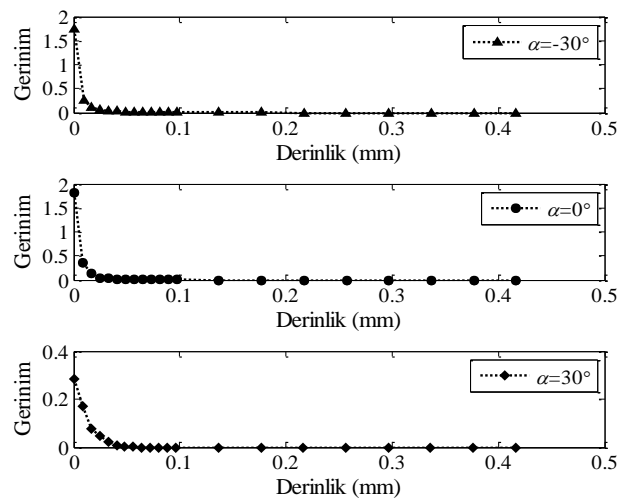
$-30^\circ$ ,  $0^\circ$  ve  $30^\circ$  takım talaş açılarında elde edilen iş parçası eşdeğer plastik deformasyon (PEEQ) kontur haritaları Şekil 18'de gösterilmiştir.  $-30^\circ$  ve  $0^\circ$ 'lik açılarda adyabatik kayma bantlarının oluştuğu, plastik deformasyon dağılımı haritası ile doğrulanmıştır. Kaymadan dolayı yoğun plastik deformasyonun oluştuğu

birincil deformasyon bölgesinde yüksek gerinim büyüklükleri ortaya çıkmıştır. Kong ve arkadaşları [8] tarafından bulunduğu gibi, adyabatik kayma bantları arasında kalan bölgede daha küçük deformasyon meydana gelmiştir ve gerinim esas olarak talaş köklerinde yoğunlaşmıştır.  $30^\circ$ 'lik açıda yüksek deformasyonlar takım-talaş ara yüzüne bitişik ince bir tabakada gözlemlenmiştir. Bu durum, takım ve talaş arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır [8].



**Şekil 18.** Plastik deformasyon dağılımları: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$  (Plastic strain Distributions: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$ )

Şekil 19, üç farklı takım talaş açısı koşulunda iş parçası yüzeyinde ve yüzey altında tahmin edilen eşdeğer gerinim değerlerini göstermektedir. Talaş açısına bakılmaksızın, işlenen iş parçası yüzeyinde yüksek gerinim değerleri oluşmuştur. Derinlik arttıkça gerinim değerleri aniden azalmış ve iş parçasının alt yüzeyinde sıfıra yaklaşmıştır.  $-30$ ,  $0$  ve  $30^\circ$  talaş açılara sahip takımlarla işlenmiş iş parçası yüzeyinin eşdeğer plastik deformasyon değerleri sırasıyla 1.74, 1.81 ve 0.28 olarak hesaplanmıştır. Burada, talaş açısı  $0^\circ$ 'dan  $30^\circ$ 'ye yükseldiğinde, iş parçası yüzeyindeki eşdeğer gerinim değerinin, yaklaşık 1.5'lik bir azalmayı temsil edecek şekilde 1.81'den 0.28'e düştüğüne dikkat edilmelidir. Yukarıdaki sonuçlardan açıkça görüldüğü üzere, talaş açısı artırıldığında, işlenmiş iş parçası yüzeyindeki eşdeğer gerinim azalmaktadır. Bu durum, kesme kuvvetinde görülen fiziksel olay ile özdeşdir. Bu nedenle, iş parçası yüzeyindeki eşdeğer gerinimi önemli ölçüde azaltmak için talaş açısını arttırmak gereklidir.

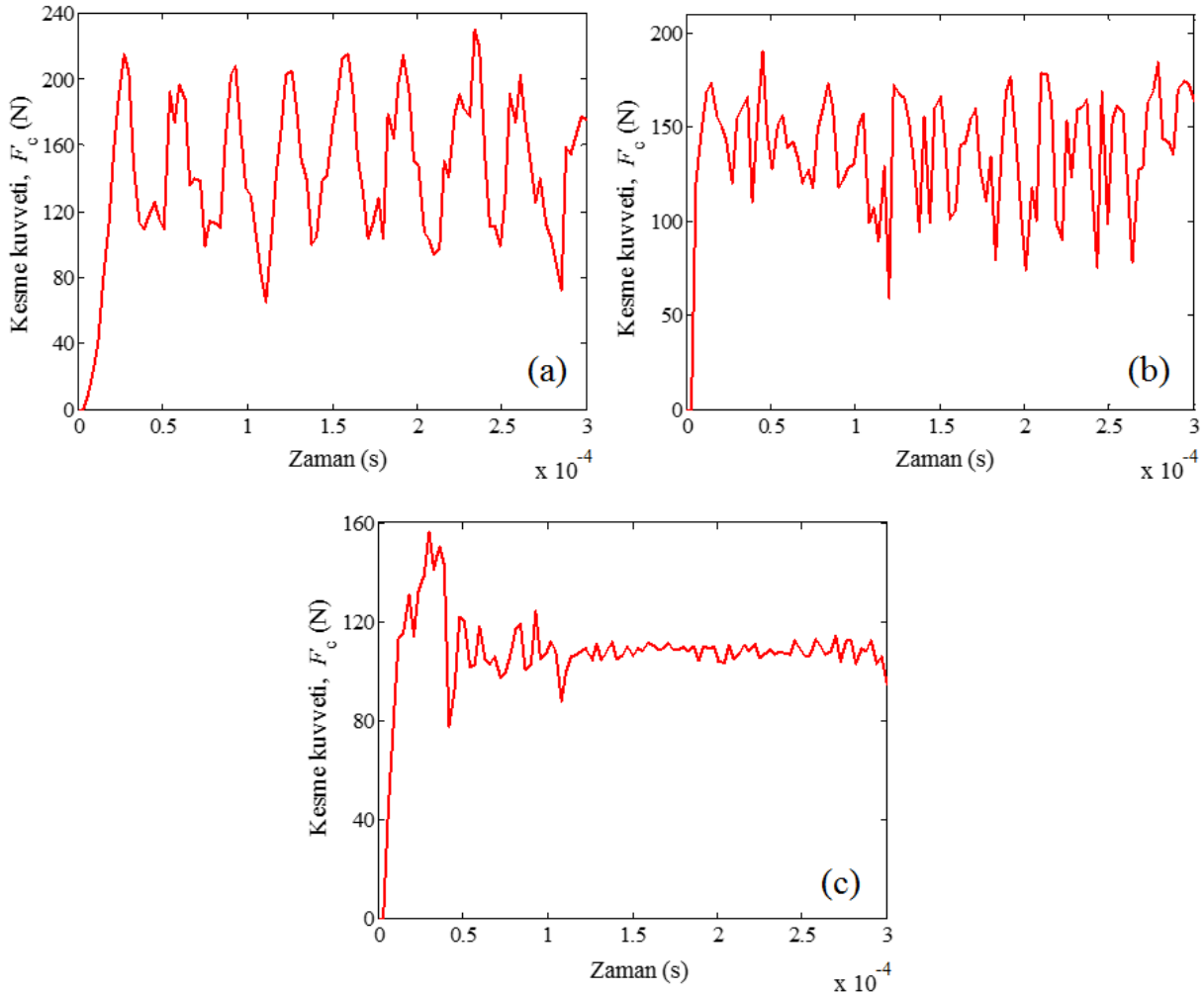


**Şekil 19.** İşlenmiş yüzey ve yüzey altındaki eşdeğer gerinimler (Equivalent strains on the machined surface and subsurface)

### 3.4. Kesme ve İtme Kuvvetleri (Cutting and Thrust Forces)

Kesikli talaş oluşturan  $-30^\circ$ 'lik talaş açısında hesaplanan kesme kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 20(a)'da verilmiştir.  $0^\circ$ 'lik talaş açısında, testere ağızlı talaş şekli oluşmuştur ve kesme kuvveti değişimi Şekil 20(b)'de gösterilmiştir. Sürekli talaş şekline sebep olan  $30^\circ$ 'lik talaş açısında elde edilen kesme kuvveti değişim eğilimi de Şekil 20(c)'de sunulmuştur. Kesikli ve testere ağızlı talaş kesme kuvveti değişimleri, sürekli talaş kuvvet

değişimine kıyasla büyük dalgalanmalar ve 'artan-azalan' sürekli bir döngü süreci sergilemiştir. Bu fark, deformasyon bölgelerinin termoplastik kararsızlığından kaynaklanmaktadır. Birincil deformasyon bölgesinde yoğun kayma deformasyonu oluşmaya başladığında termoplastik kararsızlık ortaya çıkar ve yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde düşer. Buna bağlı olarak kesme kuvveti azalan bir değişim gösterir. Daha sonra, takım ilerlemeye devam ettikçe, yeni bir kayma bandı oluşur ve kesme kuvveti yavaş yavaş artar [8].

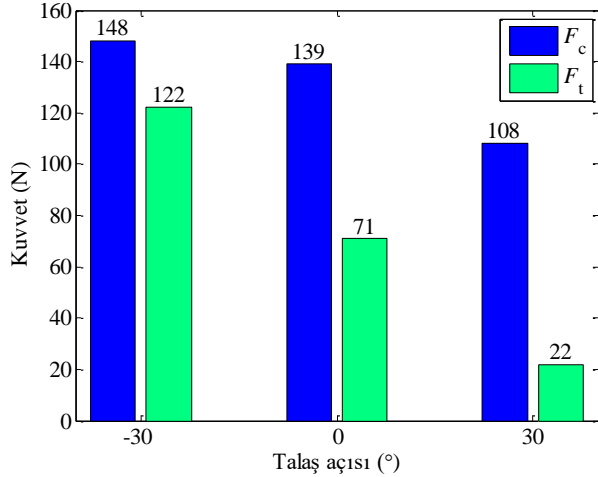


Şekil 20. Zamanla kesme kuvvetlerinin değişimleri: (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$  (Variations of cutting forces with time : (a)  $\alpha = -30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 0^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$ )

Şekil 21,  $-30$  ile  $30^\circ$  arasındaki takım talaş açılarında benzetimlerden elde edilen kesme ve itme kuvvetlerini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi,  $-30$ ,  $0$  ve  $30^\circ$  talaş açılarında teğetsel yöndeki kesme kuvveti bileşenleri sırasıyla 148, 139 ve 108 N olarak hesaplanmıştır. İlerleme yönündeki karşılık gelen itme kuvveti büyüklükleri de 122, 71 ve 22 N'dur. Bu sonuçlar, takım talaş açısı  $-30^\circ$ 'den  $30^\circ$ 'ye değiştirildiğinde kesme ve itme kuvvetlerinin azaldığını göstermiştir. Dolayısıyla, takım ne kadar keskinse, kesme ve itme kuvvetlerinin o kadar küçük olduğu

sonucuna varılabilir.  $0$  ve  $30^\circ$  talaş açılarında benzetimlerden elde edilen kesme kuvvetleri arasında, yaklaşık 30 N'luk bir fark vardır. İtme kuvveti bileşenlerinin farkı daha belirgindir ve yaklaşık 50 N'a kadar ulaşmıştır.  $0$  ve  $30^\circ$ 'lik açılarda bulunan sonuçlara göre, enerji tüketimi açısından takım talaş açısı  $30^\circ$ 'ye ayarlanmalıdır. Diğer taraftan,  $0^\circ$ 'lik talaş açılı takımın  $30^\circ$ 'lik açılı takımdan çok daha uzun ömürlü olacağı unutulmamalıdır. Lo [21] tarafından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Takım talaş açısı  $-30^\circ$ 'den  $0^\circ$ 'ye arttırıldığında, teğetsel kesme kuvveti bileşeninin

değişimi çok sınırlıdır.  $-30^\circ$ lik açıda elde edilen teğetsel kesme kuvveti ile  $0^\circ$ lik açıda bulunan kesme kuvveti arasındaki fark sadece 9 N'dur, bu fark o kadar küçüktür ki göz ardı edilebilir. Ancak,  $-30^\circ$ lik talaş açısı altındaki takım ömrü,  $0^\circ$ lik açıdakinden çok daha uzundur.



**Şekil 21.** Talaş açısı ile kesme ve itme kuvvetlerinin değişimi (Variation of the cutting and thrust forces with rake angle)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, esasen Abaqus/Explicit yazılımı ile Ti6Al4V titanyum alaşımının kesme süreci benzetimi için SE modelleme adımlarını kapsamlı bir şekilde tanıtmaktadır ve farklı takım talaş açılarının talaş şekli, işlenen iş parçası yüzeyi, eşdeğer gerilme, plastik gerinim dağılımı ve kesme kuvveti üzerindeki etkilerini incelemektedir. Benzetim bulgularını analiz ederek, aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir:

1.  $-30^\circ$  ve  $0^\circ$  talaş açısına sahip takımlarla Ti6Al4V alaşımının kesme işlemi sırasında, sırasıyla kesikli ve testere ağızlı talaş şekilleri elde edilmiş ve kesme kuvveti dalgalanması da oldukça belirgindir. Ti6Al4V alaşımının kesme işlemi sırasında en büyük gerilme birincil deformasyon bölgesinde, yüksek plastik deformasyonlar ise ikincil deformasyon bölgesinde talaş köklerinde meydana gelmiştir.
2.  $30^\circ$  talaş açısındaki kesme benzetiminde, Ti6Al4V alaşımı iş parçasının yüzey kalitesini önemli derecede iyileştiren ve kararlı kesme kuvveti değişimi oluşturan sürekli talaş elde edilmiştir.
3.  $30^\circ$ lik talaş açılı takımla işleme esnasında yüksek eşdeğer gerilmeler birincil deformasyon bölgesinde gözlemlenirken, yüksek plastik deformasyonlar takım-talaş ara yüzüne bitişik ince bir tabaka boyunca görülmüştür.
4. Aynı kesme koşulu altında  $-30^\circ$ lik talaş açısı en yüksek kesme ve itme kuvvetlerini oluşturmaktadır;  $30^\circ$ lik talaş açısında karşılık gelen kuvvetler en küçüktür. Takım talaş açısı  $-30^\circ$ 'dan  $30^\circ$ 'ye

değiştirildiğinde, kesme ve itme kuvvetleri azalmaktadır. Bu sonuç, daha keskin bir takım geometrisi oluşması ile açıklanabilir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Mehmet AYDIN:** Benzetimleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aydın M., “Dik kesme işleminde kalıcı gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 19(3): 297–304, (2016).
- [2] Al-Zkeri I., Rech J., Altan T., Hamdi H. and Valiorgue F., “Optimization of the cutting edge geometry of coated carbide tools in dry turning of steels using a finite element analysis”, *Machining Science and Technology*, 13: 36–51, (2009).
- [3] Aydın M., “Prediction of cutting speed interval of diamond-coated tools with residual stress”, *Materials and Manufacturing Processes*, 32: 145–150, (2017).
- [4] Gao C. and Zhang L., “Effect of cutting conditions on the serrated chip formation in high-speed cutting”, *Machining Science and Technology*, 17: 26–40, (2013).
- [5] Gökçe H., Çiftçi İ. ve Gökçe H., “Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi: saf molibdenin işlenmesi üzerine bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 947–954, (2019).
- [6] Kurt A. ve Şeker U., “Kesici takım gerilmelerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(4): 491–497, (2005).
- [7] Akgün M. and Demir H., “Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy”, *Journal of Polytechnic*, <https://doi.org/10.2339/politeknik.706605>.
- [8] Kong X., Li B., Jin Z. and Geng W., “Broaching performance of superalloy GH4169 based on FEM”, *Journal of Materials Science and Technology*, 27: 1178–1184, (2011).
- [9] Komanduri R. and Turkovich B.F., “New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys”, *Wear*, 69: 179–188, (1981).
- [10] Duan C.Z. and Zhang L.C., “Adiabatic shear banding in AISI 1045 steel during high speed machining: Mechanisms of microstructural evolution”, *Materials Science and Engineering A*, 532: 111–119, (2012).

- [11] Arrazola P.J., Villar A., Ugarte D. and Marya S., “Serrated chip prediction in finite element modeling of the chip formation process”, *Machining Science and Technology*, 11: 367–390, (2007).
- [12] Ambati R. and Yuan H., “FEM mesh-dependence in cutting process simulation”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53: 313–323, (2010).
- [13] Duan C. and Zhang L., “A reliable method for predicting serrated chip formation in high-speed cutting: analysis and experimental verification”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64: 1587–1597, (2013).
- [14] Aydın M. and Köklü U., “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, (2020).
- [15] Aydın M., “Numerical study of chip formation and cutting force in high-speed machining of Ti-6Al-4V bases on finite element modeling with ductile fracture criterion”, *International Journal of Material Forming*, <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01617-9>.
- [16] Wang B., Liu Z., Hou X. and Zhao J., “Influences of cutting speed and material mechanical properties on chip deformation and fracture during high-speed cutting of Inconel 718”, *Materials*, 11: 461, (2018).
- [17] Wang J., Gong Y., Abba G., Antoine J.F. and Shi J., “Chip formation analysis in micromilling operation”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45: 430–447, (2009).
- [18] Ding H., Shen N. and Shin Y.C., “Experimental evaluation and modeling analysis of micromilling of hardened H13 tool steels”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133: 041007, (2011).
- [19] Aydın M. and Köklü U., “Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92: 1465–1480, (2017).
- [20] Aydın M. and Köklü U., “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, (2018).
- [21] Lo S.P., “An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 105: 143–151, (2000).
- [22] <http://imechanica.org/files/16-adaptive-mesh.pdf>
- [23] Johnson G.R. and Cook W.H., “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures”, *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Netherlands, 541–547, (1983).
- [24] Shirakashi T., Maekawa K. and Usui E., “Flow stress of low carbon steel at high temperature and strain rate. I: Propriety of incremental strain method in impact compression test with rapid heating and cooling systems”, *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 17: 161–166, (1983).
- [25] Zerilli F.J. and Armstrong R.W., “Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations”, *Journal of Applied Physics*, 61: 1816–1825, (1987).
- [26] Wang B. and Liu Z., “Investigations on the chip formation mechanism and shear localization sensitivity of high-speed machining Ti6Al4V”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75: 1065–1076, (2014).
- [27] Chen G., Li J., He Y. and Ren C., “A new approach to the determination of plastic flow stress and failure initiation strain for aluminum alloys cutting process”, *Computational Materials Science*, 95: 568–578, (2014).
- [28] Johnson G.R. and Cook W.H., “Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures”, *Engineering Fracture Mechanics*, 21: 31–48, (1985).
- [29] Hillerborg A., Modeer M. and Petersson P.E., “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”, *Cement and Concrete Research*, 6: 773–781, (1976).
- [30] Baker M., “Finite element investigation of the flow stress dependence of chip formation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 1–13, (2005).
- [31] Viggo T., “Effect of pure mode I, II or III loading or mode mixity on crack growth in a homogeneous solid”, *International Journal of Solids and Structures*, 47: 1611–1617, (2010).
- [32] Meyer H.W. and Kleponis D.S., “Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration”, *International Journal of Impact Engineering*, 26: 509–521, (2001).
- [33] Chen G., Ren C., Yang X., Jin X. and Guo T., “Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56: 1027–1038, (2011).
- [34] Johnson G.R. and Holmquist T.J., “Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures”, *Los Alamos National Laboratory*, LA-11463-MS, (1989).
- [35] Childs T.H.C., Maekawa K., Obikawa T. and Yamane Y., “Metal machining: Theory and applications”, *Arnold Publishers*, London, UK, (2000).
- [36] Zorev N.N., “Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting”, *International Research in Production Engineering*, New York, 42–49, (1963).
- [37] Hall S., Loukaides E., Newman S.T. and Shokrani A., “Computational and experimental investigation of cutting tool geometry in machining titanium Ti-6Al-4V”, *Procedia CIRP*, 86: 139–144, (2019).