

# Dik Kesme İşleminde Kalıcı Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

Mehmet AYDIN

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü

(Geliş / Received : 05.11.2015 ; Kabul / Accepted : 20.03.2016)

## ÖZ

Bu çalışmada, düzlemsel gerinim koşulları altında iş parçasında oluşan kalıcı gerilmeleri tahmin etmek için dik kesme sürecinin ısı- mekanik sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kalıcı gerilmeleri belirlemek için uyarlamalı ağ ve açık dinamik çözüm teknikleri kullanılarak Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) formülasyonlu sonlu eleman (SE) modeli kurulmuştur. 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme süreci için SE benzetimleri tamamlandığında, kesici takım geri çekilmiş ve gerilmeler yatıştırılmıştır. Benzetim sonuçları, işlenen yüzeyin çekme gerilmelerine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Tahmin edilen kalıcı gerilmeler literatürde mevcut deneysel olarak ölçülen verilerle de karşılaştırılmıştır. SE benzetimlerinden elde edilen işlenen yüzeyin kalıcı gerilmeleri oldukça makul bir doğruluğa sahiptir. SE analizlerinden belirlenen teğetsel kalıcı gerilme değerleri kesme parametrelerini eniyilemek ve mekanik bileşenlerin ömrünü artırmak için kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Arbitrary Lagrangian Eulerin formülasyonu; dik kesme; kalıcı gerilme; sonlu eleman modelleme

## Finite element modeling of the Residual Stresses in Orthogonal Machining Process

In this work, a thermo-mechanical numerical analysis of orthogonal machining process is performed to estimate the residual stresses induced in workpiece under plane-strain conditions. To determine the residual stresses, a finite element (FE) model with Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) formulation is established by employing adaptive meshing and explicit dynamics solution techniques. When FE simulations are completed for the orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel, the cutting tool is withdrawn and the stresses are relieved. The results reveal that the machined surface is tensile stresses. The estimated residual stresses are also compared with experimentally measured data available in the literature. The residual stresses of the machined surface obtained from the FE simulations have a quite reasonable accuracy. The values of the tangential residual stresses determined from the FE analyses can be utilized to optimize cutting parameters and improve the life of mechanical components.

**Keywords:** Arbitrary Lagrangian Eulerin formulation; orthogonal cutting; residual stress; finite element modeling

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat süreçleri iş parçalarının yüzey katmanında kalıcı gerilme olarak adlandırılan gerilmelere sebep olmaktadır. Bu gerilmeler kesici takım, iş parçası malzemesi ve kesme parametrelerinden önemli derecede etkilenmektedir ve iş parçalarının fonksiyonel davranışını belirleme bakımından önemlidir. Bu sebeple, yorulma, kırılma ve gerilme korozyonu gibi hasarların azaltılabilmesi için işlenen parçalardaki kalıcı gerilme durumunu kontrol etmek ve anlamak gereklidir.

Talaş kaldırma sırasında oluşan kalıcı gerilmeleri incelemek için analitik modeller [1, 2], sonlu eleman benzetimleri [3–5] ve deneysel yöntemler [6, 7] geliştirilerek çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Deneysel teknikler zaman alıcı ve oldukça maliyetlidir. Analitik yaklaşımlar süreç parametrelerinin karmaşıklığından

dolayı çeşitli varsayımlara dayalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ise talaş kaldırma sürecini incelemek için etkin olarak kullanılmaktadır. Talaş kaldırma sürecini sonlu elemanlar yöntemi ile modellemek için Lagrangian, Eulerian ve Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) olmak üzere üç farklı çözüm yöntemi kapalı ve açık zaman integrasyon teknikleri ile birlikte kullanılır. Kapalı zaman integrasyon tekniği doğrusal statik problemlerine, açık zaman integrasyon tekniği ise doğrusal olmayan dinamik problemleri çözmek için uygulanmaktadır. Lagrangian yaklaşımında sonlu eleman ağı malzemeye atanır ve malzeme ile birlikte hareket eder. Bu yaklaşım geçici bir süreci basit bir şekilde benzetim yapmak için kullanılmaktadır. Ancak, eleman distorsiyonu önemli bir problemdir. Eulerian yaklaşımı genellikle büyük deformasyon problemleri için uygulanır. Sonlu eleman ağı boşlukta sabittir ve sayısal problemlere sebep olmaksızın büyük şekil değiştirmelere müsaade eden eleman yüzeyleriyle malzeme akmaktadır. Eulerian yaklaşımı yeniden sonlu eleman ağı oluşturma algoritmalarına ihtiyaç duymamaktadır. Küçük elemanlardan oluşan sonlu

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mehmet.aydin@bilecik.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 297-304

eleman ağına ihtiyaç duyuldukça artan çözüm süresi Eulerian yaklaşımının başlıca dezavantajıdır. Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) yaklaşımı yukarıdaki iki temel yaklaşımın en iyi özelliklerini birleştirmektedir ve hızlı yakınsama için açık integrasyon çözümünü kullanmaktadır. Bu tekniğin avantajı sonlu eleman ağ yapısını dinamik olarak tanımlama serbestliğidir. Lagrangian yaklaşımının tipik eleman distorsiyonu problemi de bu teknik kullanılarak azaltılabilir.

Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman modelleri kesme hızı, takım geometrisi ve ilerleme miktarı gibi kesme parametrelerinin kalıcı gerilmeler üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmıştır. Shet ve Deng [8] takım-talaş ara yüzü boyunca sürtünme ve talaş açısının etkilerini incelemiş ve bu parametrelerin kalıcı gerilmeler ve şekil değiştirmeler üzerinde doğrusal olmayan etkilere sahip olduğunu tespit etmiştir. Salio vd. [9] sonlu eleman kodu MSC. Marc. ile kesme parametrelerinin etkisini inceleyerek tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen gerilme değerleri arasında tatmin edici bir uyum bulmuştur. Miguelez vd. [10] ALE sonlu eleman yaklaşımını kullanarak dik kesme sırasında oluşan kalıcı gerilmeleri incelemiş ve çekme gerilmelerinin hem ısı hem de mekanik etkilerden kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Liu ve Guo [11] AISI 304 çeliğinin işlenen katmanındaki kalıcı gerilmeler üzerinde ardışık kesme ve takım-talaş sürtünmesinin etkisini incelemek için bir sonlu eleman modeli önermiştir. Bu model, ikinci kesme gerçekleştirildiğinde kalıcı gerilmelerde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, işlenen yüzeydeki kalıcı gerilmelerin takım-talaş ara yüzünün sürtünme koşuluna duyarlı olduğu bulunmuştur. Guo ve Liu [12] de kalıcı gerilmeler üzerinde ardışık kesmelerin etkisini incelemek için aynı iş parçası malzemesini kullanarak benzer bir çalışma sunmuştur. Bu çalışma, kritik bir değer altındaki deforme olmamış talaş kalınlığında yapılan ikinci kesme sonucunda basma kalıcı gerilmelerin meydana gelebileceğini göstermiştir.

Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimleri kesme koşullarının eniyilemesine ve en uygun işleme koşullarını kullanarak kalıcı gerilmelerin azaltılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, pinyon dişli yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliğinin işlenmesinde oluşan kalıcı gerilmeleri incelemek için düzlemsel gerininim koşulları altında dik kesme sürecinin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimleri için Lagrangian sınırlarına sahip ALE yaklaşımı uygulanmıştır. Benzetimler sonucunda, iş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzeyin altında meydana gelen kalıcı gerilme büyüklükleri elde edilmiştir.

## 2. SONLU ELEMAN MODELLEME (FINITE ELEMENT MODELING)

Bu çalışmada, ABAQUS sonlu eleman yazılımı ile talaş oluşumunun benzetimini yapmak için Lagrangian

yaklaşımı kullanılmıştır. Lagrangian yaklaşımında sonlu eleman ağı malzeme ile birlikte akmaktadır [13]. Ancak, eleman distorsiyonu önemli bir sorundur [14]. Lagrangian yaklaşımının tipik eleman distorsiyonu problemini azaltmak ve hızlı yakınsama için açık integrasyon çözümünü kullanan Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) yaklaşımı uygulanmıştır. Tanımlanan ALE yaklaşımını sonlu eleman modeli Prasad'ın modeline [5] benzerdir.

### 2.1. İş Parçası ve Kesici Takım Malzemeleri (Workpiece and Cutting Tool Materials)

Kamyonlarda tork aktarımını sağlayan pinyon dişli yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliği iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. İş parçası malzemesi plastik davranışını tanımlamak için Johnson-Cook (JC) malzeme modeli [15] kullanılmıştır. Bu model, Denklem (1)'de gösterildiği gibi, şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak akış gerilmesini tanımlamaktadır:

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

burada  $A$  oda sıcaklığında ve  $1/s$  şekil değiştirme hızındaki akma dayanımı,  $B$  plastik deformasyonun başlangıcındaki akma dayanımı,  $C$  şekil değiştirme hızı faktörü,  $\bar{\epsilon}$  eşdeğer plastik şekil değiştirme,  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  referans şekil değiştirme hızı,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  malzeme şekil değiştirme hızı,  $n$  işlem-sertleşmesi üssü,  $m$  ısı yumuşama üssü,  $T_r$  oda sıcaklığı ve  $T_m$  iş parçası malzemesi eğrime sıcaklığıdır. 20NiCrMo5 çeliğinin talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman analizi için JC malzeme modelinin parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** 20NiCrMo5 çeliği için Johnson-Cook modelinin parametreleri (Constants of the Johnson-Cook model for 20NiCrMo5 steel) [4]

Malzeme	20NiCrMo5 çeliği
$A$ (MPa)	490
$B$ (MPa)	600
$n$	0.21
$m$	0.6
$C$	0.015
$\dot{\bar{\epsilon}}_0$ ( $s^{-1}$ )	1
$T_r$ ( $^{\circ}C$ )	20
$T_m$ ( $^{\circ}C$ )	1900

Johnson-Cook (JC) modeli iş parçası malzemesinin plastik davranışını tanımlamaktadır. Benzetim için gerekli diğer malzeme özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** İş parçası malzemesi için fiziksel özellikler (The physical properties for the workpiece material) [4]

Özellikler	İş parçası (20NiCrMo5)
Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )	7800
Poisson oranı	0.3
Elastikiyet modülü (GPa)	210
Özgül ısı (J/Kg/°C)	556
Isıl iletkenlik (W/m°C)	47.7
Isıl genleşme (µm/m°C)	1.2

Analitik rijit bir gövde olarak modellenen kesici takımın malzemesi tungsten karbür olup, malzeme özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Kesici takım malzemesi için fiziksel özellikler (The physical properties for the cutting tool material) [4]

Özellikler	Kesici takım (karbür)
Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )	1500
Poisson oranı	0.3
Elastikiyet modülü (GPa)	800
Özgül ısı (J/Kg/°C)	203
Isıl iletkenlik (W/m°C)	46
Isıl genleşme (µm/m°C)	4.7

## 2.2. Sınır Koşulları ve Model Geometrisi (Boundary Conditions and Model Geometry)

Şekil 1 sabit kesme hızında hareket eden iş parçasından sürekli talaşın oluşturulduğu dik kesme sürecinin sonlu eleman modelini göstermektedir. Talaş kaldırma sürecinin benzetimini yapmak için 20NiCrMo5 çeliği iş parçası Lagrangian sınır koşullu modellenmiştir ve 2mm×5mm boyuta sahiptir. Talaş iş parçasından ayrıldığında elemanların aşırı deformasyonunu önlemek için talaş katmanı eğimli elemanlardan oluşturulmuştur. Kesme yönü ile bu elemanların eğimi arasındaki açı 64° dir. İş parçasının yüzey özellikleri üzerinde kesici takım geometrisi büyük bir etkiye sahip olup, 20 µm uç yarıçapına ( $r_b$ ), 6° talaş açısına ( $\gamma$ ) ve 6° boşluk açısına ( $\alpha$ ) sahip kesici takım analitik rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Sınır koşulları hem iş parçası hem de kesici takım için uygulanmıştır. İş parçasının y eksenindeki yer değiştirilmesi sınırlandırılmış ve x eksenindeki hareketi serbest bırakılmıştır. Kesici takım sabittir ve tüm yönlerdeki hareketi sınırlandırılmıştır. Modelin tüm düğüm noktalarının başlangıç sıcaklığı 20 °C dir. Benzetimler sabit kesme hızı ( $V_c$ ), farklı ilerleme hızları ( $f$ ) ve kesme derinliklerinde ( $a$ ) yapılmıştır. Tablo 4 kesme koşullarını göstermektedir.

**Çizelge 4.** Kesme koşulları (Cutting conditions)

Deney no	Kesme hızı, $V_c$ (mm/s)	İlerleme, $f$ (mm/dev)	Kesme derinliği, $a$ (mm)
1	4333.3	0.2	0.5
2	4333.3	0.8	0.5
3	4333.3	0.45	0.95

## 2.3. Eleman ve Ağ Yapısı Tipi (Element and Meshing Type)

Isıl-mekanik dik kesme süreci için düzlemsel şekil değiştirme analizi ALE formülasyonlu dört düğüm noktasına ve dörtgen geometriye sahip CPE4RT eleman tipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kesici takım, ilerleme yüzü algoritması ile birlikte serbest ağ yapısı tekniği kullanılarak elemanlara bölünmüştür. Talaş katmanı ise, düzenli ağ yapısı tekniği ile elemanlara ayrılmıştır. 0.2 mm/dev ilerleme hızı için talaş katmanı kesme yönünde 100 elemana sahip 8 alt katmandan oluşmaktadır. 0.45 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için talaş katmanı sırasıyla 18 ve 32 alt katmana sahiptir. Hesaplama zamanını azaltmak için bu katmandan aşağıya doğru gittikçe artan eleman boyutu tercih edilmiştir ve sonlu eleman ağını oluşturmak için ilerleme yüzü algoritması ile birlikte serbest ağ yapısı tekniği kullanılmıştır.

## 2.4. ALE Uyarlamalı Ağ Yapısı (ALE Adaptive Meshing)

ALE uyarlamalı ağ yapısı, sonlu eleman ağ hareketinin iş parçası malzemesi deformasyonundan bağımsız olduğu sonlu eleman modeli oluşturmak için uygulanır. Bu çalışmada, ALE uyarlamalı ağ bölgesi tüm iş parçası malzemesini seçerek oluşturulmuştur. Yeniden sonlu eleman ağı oluşturmak için frekans 100 alınmıştır. Her bir artıştaki yeniden ağ oluşturma süpürmesi ve başlangıç süpürme değeri 5 olarak seçilmiştir.

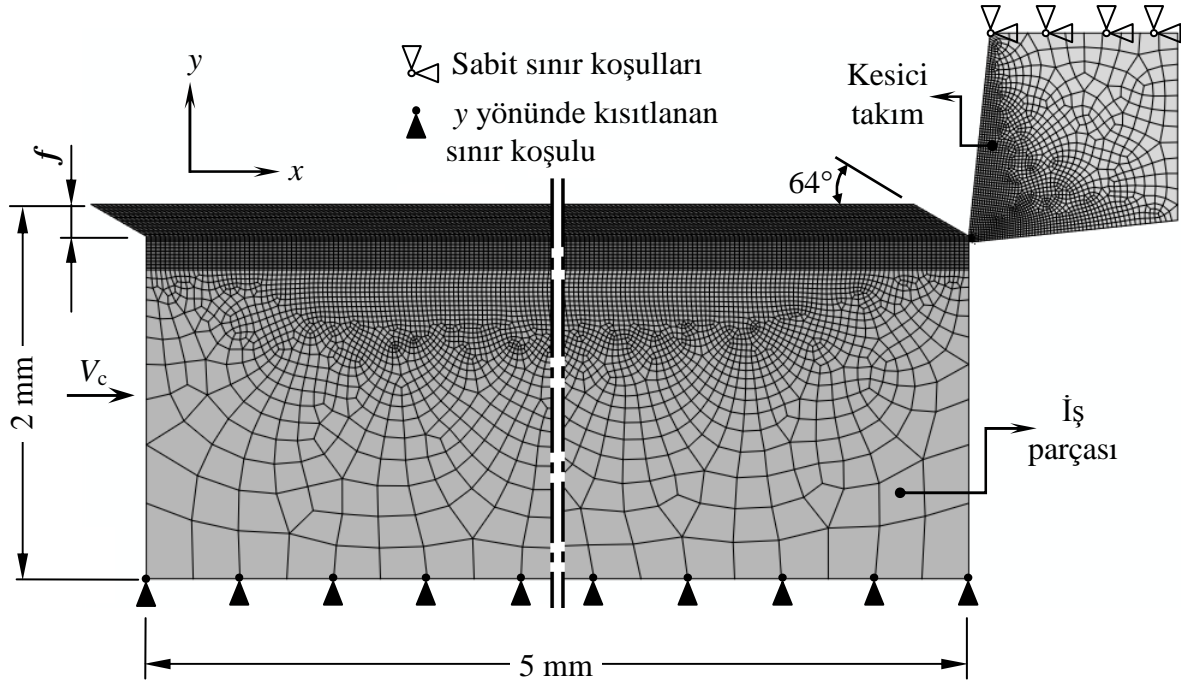
Uyarlamalı ağın çeşitli yönlerini ve uyarlamalı ağ bölgesine uygulanan iletim algoritmalarını kontrol etmek için ALE uyarlamalı ağ kontrolü kullanılmıştır. Bu özellik uyarlamalı ağ seçeneği ile birlikte uygulanmıştır. Ağ düzleştirilmesi elemanların distorsiyonunu azaltmak için kullanılan geometriye dayalı algoritma ile birlikte hacim, laplas ve eşpotansiyel düzleştirme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu üç yöntem için ağırlık faktörlerini belirlemek çok önemli olup, mevcut modelde hacim, laplas ve eşpotansiyel düzleştirme için ağırlık faktörleri sırasıyla 0.8, 0.1 ve 0.1 alınmıştır. Eleman bozulmasını azaltmak için uyarlamalı ağ düzleştirme tekniğine dayalı en-boy oranı geliştirme tekniği uygulanmıştır. Model Lagrangian sınır koşuluna sahip olduğu için çok büyük deformasyona maruz

kalmaktadır. Bu yüzden, malzeme hareketini dikkate alan güncel düğüm noktası konumlarına dayalı ağ süpürmesi kullanılmıştır.

Her bir iletim süpürmesinde eleman ve malzeme durum değişkenleri eski ağdan yeni ağa aktarılmak zorundadır. Değişkenlerin sayısı malzeme modeline ve eleman formülasyonuna bağlı olup, gerilme, yoğunluk ve iç enerji çözüm değişkenleridir. Uyarlamalı ağ ya da iletim adımından sonra yeniden ağ oluşturma için ikinci derece

yöntemi uygulanmıştır. Momentum iletimi için en az sayısal işlem ve iki boyutta iki değişken gerektiren eleman merkezi izdüşüm yöntemi kullanılmıştır.

Uyarlamalı ağ kısıtlamaları ağ hareketi üzerindeki kontrolü sağlamaktadır ve herhangi bir sınır koşulu ya da malzemeye uygulanan yüklerden bağımsız hareket etmektedir. Burada uyarlamalı ağ düğüm noktaları sınırlandırılmıştır ve malzeme ile birlikte akmaktadır.



Şekil 1. Lagrangian sınır koşullu ALE yaklaşımı için sonlu eleman modeli (Finite element model for ALE approach with lagrangian boundary condition)

## 2.5. Temas Çifti Modelleme (Modeling Contact Pair)

Takım-iş parçası temas çiftinin yanı sıra takım-talaş ara yüzündeki mekanik teması tanımlamak için yüzey-yüzey temas koşulu kullanılmıştır. Temas problemlerini çözmek için penaltı ve kinematik algoritmaları yaygın olarak kullanılır. Temas koşulu, penaltı yaklaşımında tam olarak yerine getirilemez. Bu çalışmada, mekanik kısıtlamaları modellemek için kinematik temas algoritması kullanılmıştır.

Temas yüzeylerinin teğetsel davranışını tanımlamak için 0.4 sürtünme katsayısına sahip penaltı yöntemi kullanılmıştır [5]. Bu yöntem, yüzeylerin izafi hareketine müsaade etmektedir ve aşağıda ifade edilen Coulomb sürtünme modeline dayalıdır:

$$\tau = \mu \sigma \quad (2)$$

burada  $\tau$  sürtünme kayma gerilmesi,  $\mu$  sürtünme katsayısı ve  $\sigma$  normal gerilmedir. Bu sürtünme yasası temas ara yüzüne teğet kayma gerilmesi ( $\tau$ ) kritik sürtünme kayma gerilmesine ( $\tau_c$ ) ulaştığında temas noktasında izafi hareketin oluşacağını belirtmektedir. Bu çalışmada, kritik kayma gerilmesi değeri iş parçası

malzemesinin akma gerilmesine eşit alınmış olup, 210 MPa'dır. Yapışma yüzeyinin küçük bir kısmını belirleyerek elastik kaymayı da kontrol etmek mümkündür. Burada kayma toleransı 0.005 olarak alınmıştır. En yüksek elastik kayma rijitliği 200 MPa eşittir ve bu değer normal rijitlik değerinden biraz düşüktür [5]. Ayrıca, mekanik temas analizinde yüzeylerin hareketini yöneten normal davranış sert temas olarak modellenmiştir.

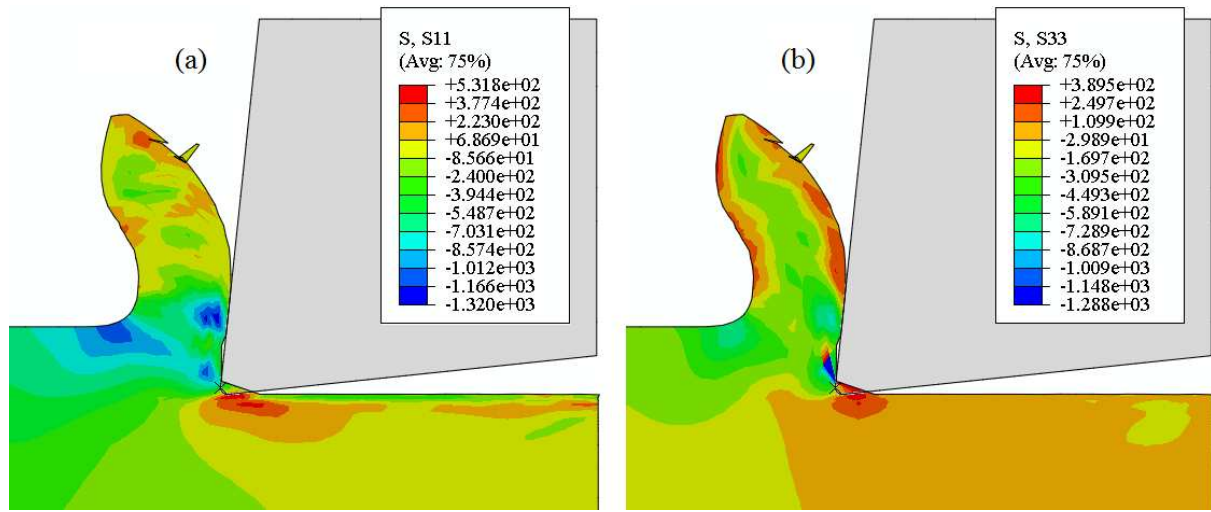
## 2.6. Hasar Başlatma Kriteri (Damage Initiation Criterion)

Talaş kaldırma benzetimlerinde takım ucunda küçük bir bölgede meydana gelen gerilmeler ve şekil değiştirmeler hasar başlatma kriterini sağladığında iş parçası malzemesi şekil değiştirmeye ve talaşlar oluşmaya başlamaktadır. Bu çalışmada, sünek hasar başlatma kriteri kullanılmıştır. Bu kriter gere, kayma şekil değiştirme değeri kritik plastik şekil değiştirme değerine ulaştığında talaş ayrılması meydana gelmektedir. Burada hasar başlamasını yönetmek için kullanılan kritik plastik şekil değiştirme değeri ( $\epsilon_p$ ) 1.5 dir [5].

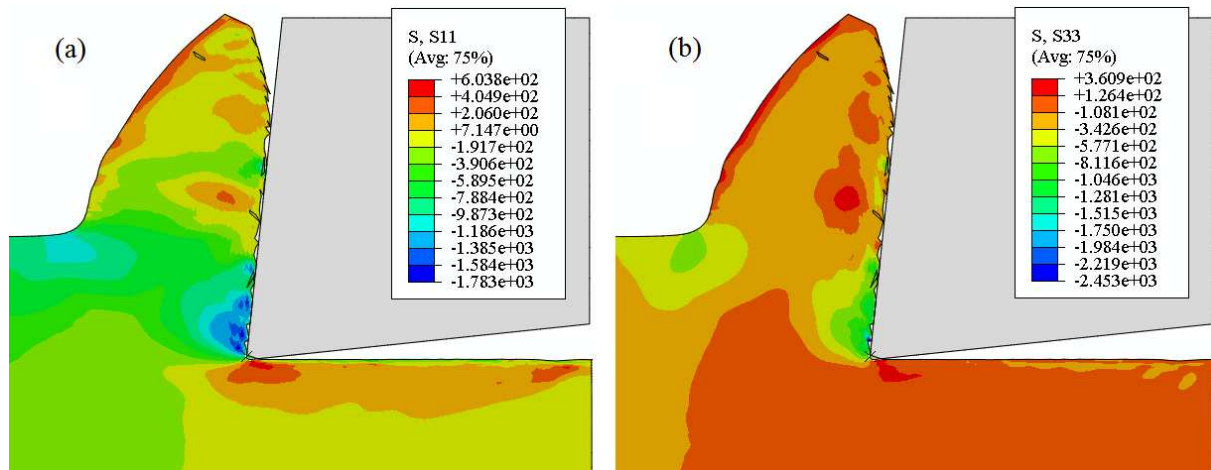
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, Lagrangian sınırlarına sahip ALE yaklaşımı kullanılarak dik kesme sürecinin iki boyutlu sonlu eleman benzetimleri yapılmıştır. Sonlu eleman benzetimleri kesme, kesici takımı iş parçası üzerinden geri çekme ve iş parçası sıcaklığını oda sıcaklığına soğutma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma sürecinin daha gerçekçi bir şekilde benzetimini yapmak için talaş geometrisi önceden tanımlanmamıştır. Sonlu eleman benzetimlerinden elde edilen kalıcı gerilme değerleri literatürde mevcut deneysel sonuçlarla [5] da karşılaştırılmıştır.

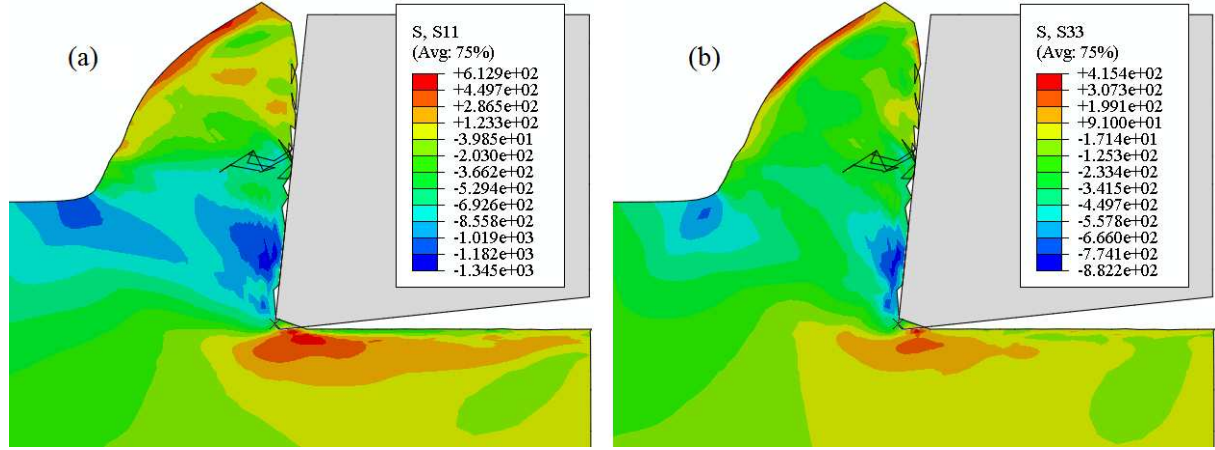
Şekil 2, 3 ve 4 iş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzey altında tahmin edilen teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) ve eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) bileşenlerinin alanlarını göstermektedir. Talaş kaldırma sürecinin bu benzetim sonuçlarından kesici takım uç kısmında yüksek gerilme bölgesinin meydana geldiği sonucu çıkarılabilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, 0.2 mm/dev ilerleme miktarında tahmin edilen en yüksek teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) ve eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) bileşenleri sırasıyla 531.8 MPa ve 389.5 MPa olarak bulunmuştur. İlerleme miktarı 0.8 mm/dev'e arttırıldığında meydana gelen en yüksek teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) 603.8 MPa ve eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) 360.9 MPa'dır (Şekil 3). Bu sebeple, ilerleme miktarı işlenen yüzeyde oluşan kalıcı gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 2. Deneysel tahmin edilen  $\sigma_{xx}$  ve  $\sigma_{zz}$  gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ); (b) eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) (The fields of stress components  $\sigma_{xx}$  and  $\sigma_{zz}$  estimated for experiment 1: (a) tangential stress ( $\sigma_{xx}$ ); (b) axial stress ( $\sigma_{zz}$ ))



Şekil 3. Deneysel tahmin edilen  $\sigma_{xx}$  ve  $\sigma_{zz}$  gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ); (b) eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) (The fields of stress components  $\sigma_{xx}$  and  $\sigma_{zz}$  estimated for experiment 2: (a) tangential stress ( $\sigma_{xx}$ ); (b) axial stress ( $\sigma_{zz}$ ))

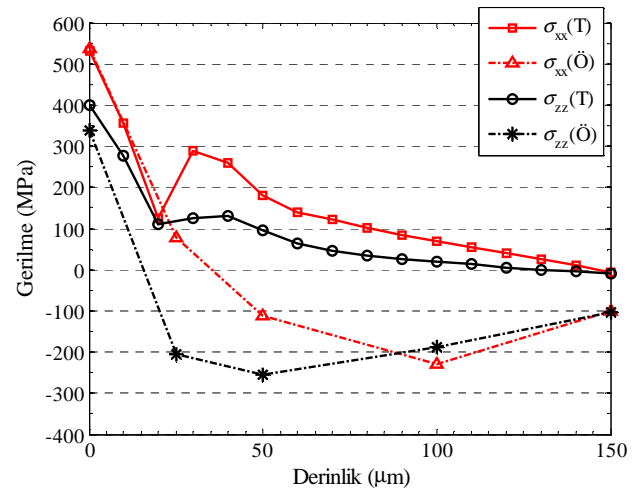


**Şekil 4.** Deneysel tahmin edilen  $\sigma_{xx}$  ve  $\sigma_{zz}$  gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ); (b) eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) (The fields of stress components  $\sigma_{xx}$  and  $\sigma_{zz}$  estimated for experiment 3: (a) tangential stress ( $\sigma_{xx}$ ); (b) axial stress ( $\sigma_{zz}$ ))

Talaş kaldırma sonucunda ortaya çıkan gerilme alanlarından işlenen yüzeyin altındaki derinlik boyunca kalıcı gerilmelerin değişimleri de elde edilmiştir. Bu değişimler kesici takım iş parçasından ayrıldıktan sonra belirlenmiştir. Benzetimlerden verileri almak için kalıcı gerilmeler yüzeyden 150  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar teğetsel (xx) ve eksenel (zz) yönde bulunmuştur. Şekil 5, 6 ve 7 iş parçası soğutulduğunda ve gerilme dindirildiğinde tahmin edilen ve deneysel olarak ölçülen [5] kalıcı gerilme bileşenlerini göstermektedir. Şekillerde  $\sigma_{xx}(\ddot{O})$  ve  $\sigma_{zz}(\ddot{O})$  ölçülen gerilme bileşenlerini ve  $\sigma_{xx}(T)$  ve  $\sigma_{zz}(T)$  tahmin edilen gerilme bileşenlerini göstermektedir. Kalıcı gerilmeler işlenen yüzey katmanında çekme gerilmesi yönündedir. 20NiCrMo5 çeliği için benzetimlerden elde edilen sonuçlar literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırıldığında, tahmin edilen kalıcı gerilme dağılımları ve ölçümler sonucunda elde edilen gerilme profillerinin birbirine benzediği görülmüştür.

Şekil 5’de görüldüğü gibi, 0.2 mm/dev ilerleme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen deney 1’de takım iş parçası üzerinden geri çekildiğinde ve iş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda işlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(T)$ ) 530.137 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ) 538 MPa dır. İşlenen yüzeyde tahmin edilen eksenel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(T)$ ) 400.423 MPa ve ölçülen eksenel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ) 337 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %1.5 dir. Eksenel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %20’den daha azdır. İşlenen yüzeyde oluşan gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu sonucu çıkarılabilir. Hem tahmin edilen hem de ölçülen teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) ve eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) büyüklükleri işlenen yüzeyde çekme gerilmesi yönündedir. Tahmin edilen ve deneysel olarak bulunan işlenen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri kesici takımın kesme yönündeki kayma hareketinden

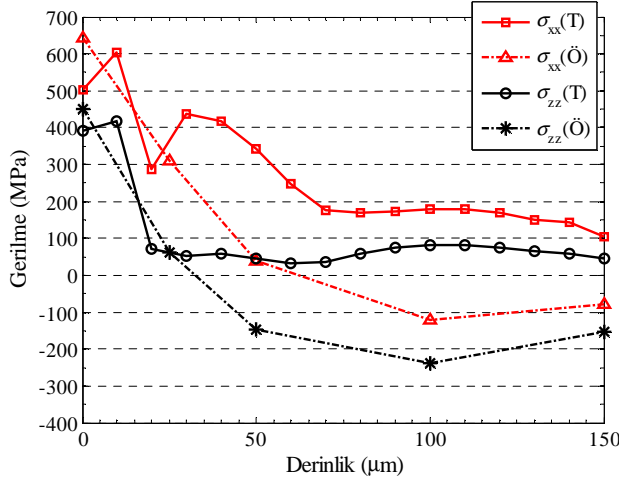
dolayı eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) sonuçlarından daha yüksektir.



**Şekil 5.** 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 1) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 1))

Şekil 6’da görüldüğü gibi, 0.8 mm/dev ilerleme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen deney 2’de takım iş parçası üzerinden geri çekildiğinde ve iş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(T)$ ) ve eksenel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(T)$ ) dağılımları tamamen çekme gerilmesi yönündedir. Ancak, ölçülen teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ) ve eksenel gerilme ( $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ) profilleri büyük ölçüde basma gerilmesi özelliği taşımaktadır. Bu fark, işlenen yüzeyden aşağıya doğru inildikçe doğru kalıcı gerilme değerlerini ölçmenin oldukça zor olmasıyla açıklanabilir. İşlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(T)$ ) 503.849 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ) 643.1 MPa dır. İşlenen yüzeyde tahmin edilen eksenel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(T)$ ) 392.74

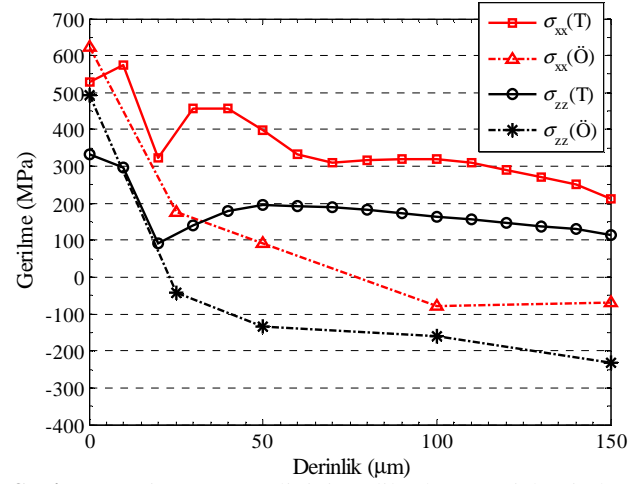
MPa ve ölçülen aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ) 451.6 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %20 dir. Aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %15'den daha azdır. Ayrıca, deney 1'de görüldüğü gibi, hem tahmin edilen hem de ölçülen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri aksel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) sonuçlarından daha büyüktür.



**Şekil 6.** 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 2) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 2))

Şekil 7'de görüldüğü gibi, 0.45 mm/dev ilerleme hızı ve 0.95 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen benzetimden tahmin edilen teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}(T)$ ) ve aksel gerilme ( $\sigma_{zz}(T)$ ) büyüklükleri 150  $\mu\text{m}$  derinlik boyunca çekme gerilmesi özelliği göstermiştir. Deneysel olarak belirlenen teğetsel gerilme ( $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ) dağılımı yaklaşık 75  $\mu\text{m}$ 'dan daha küçük derinlikler için çekme gerilmesi yönünde olup, 75  $\mu\text{m}$ 'dan daha büyük derinlikler için basma gerilmesi özelliği sergilemiştir. Ölçümler sonucunda bulunan aksel gerilme ( $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ) dağılımı ise daha fazla basma gerilmesi özelliğine sahiptir. Tahmin edilen ve ölçülen gerilme dağılımları arasındaki fark, yukarıda da açıklandığı gibi, deneysel olarak gerilme büyüklüklerinin ölçülmesinin zor olmasına bağlanabilir. İşlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(T)$ ) 529.993 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ) 624.1 MPa olarak bulunmuştur. İşlenen yüzeyde tahmin edilen aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(T)$ ) 333.9 MPa ve ölçülen aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ) 491.2 MPa'dır. Elde edilen bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %15 dir. Aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %35'den daha azdır. Ölçülen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ )

büyüklikleri aksel gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerlerinden daha büyüktür.



**Şekil 7.** 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 3) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 3))

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Talaş kaldırma işlemlerinde işlenen yüzeyin altındaki farklı malzeme katmanları arasındaki plastik şekil değiştirmeler iş parçasında kalıcı gerilmelere yol açmaktadır. Bu çalışmada, iş parçası kalıcı gerilmelerini belirlemek için pinyon dişlilerin yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliğinin talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimi için uyarlamalı ağ yapısına sahip Arbitrary Lagrangian Eulerian yöntemi kullanılmıştır. Talaş kaldırma süreci sonucunda kesici takım uç kısmında yüksek gerilme bölgesinin mevcut olduğu ve işlenen yüzeyde oluşan gerilme büyüklüklerinin çekme gerilmesi özelliği taşıdığı tespit edilmiştir. İş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzey altında tahmin edilen gerilme büyüklükleri literatürden elde edilen deneysel sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. 0.5 mm sabit kesme derinliğinde 0.2 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hatalar sırasıyla yaklaşık %1.5 ve %20 dir. 0.2 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hatalar sırasıyla %20 ve %15'den daha az olarak bulunmuştur. 0.95 mm kesme derinliği ve 0.45 mm/dev ilerleme hızında işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ( $\sigma_{xx}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %15 olup, aksel kalıcı gerilme ( $\sigma_{zz}$ ) değerleri arasındaki mutlak yüzde %35'den daha azdır. Talaş kaldırma benzetimlerinden elde edilen teğetsel kalıcı gerilmeler ( $\sigma_{xx}$ ) süreç parametrelerinin eniyilemesi için kullanılabilir. Tahmin edilen ve

ölçümler sonucunda bulunan kalıcı gerilme dağılımları benzer bir değişim göstermiştir. Ancak, işlenen yüzeyden aşağıya doğru gidildikçe benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların tam olarak eşleşmediği ortaya çıkmıştır. Bu durum, derinlik artıkça deneysel olarak doğru kalıcı gerilmelerin ölçülmesinin zor olmasına bağlanabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Liang S.Y. and Su J.-C., “Residual stress modeling in orthogonal machining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56: 65–68, (2007).
2. Ulutan D., Alaca B.E. and Lazoglu İ., “Analytical modelling of residual stresses in machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 183: 77–87, (2007).
3. Özel T. and Zeren E., “Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining”, *The international journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35: 255–267, (2007).
4. Stenberg N. and Proudiana J., Numerical modelling of turning to find residual stresses, *Procedia CIRP*, 8: 258–264, (2013).
5. Prasad C.S., “FEM modeling to verify residual stress in orthogonal machining”, *Lap Lambert Academic Publishing*, Saarbrücken, Deutschland, (2010).
6. Shih A.J. and Yang H.T.Y., “Experimental and finite element predictions of the residual stresses due to orthogonal metal cutting”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36: 1487–1507, (1993).
7. Tekaslan Ö., Gerger N. ve Şeker U., “AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin farklı kesme parametreleri ile tornalama işleminden sonra oluşan kalıcı gerilmelerin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24: 443–452, (2009).
8. Shet C. and Deng X., “Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 573–587, (2003).
9. Salio M., Berruti T. and Poli G., “Prediction of residual stress distribution after turning in turbine disks”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48: 976–984, (2006).
10. Miguélez M.H., Zaera R., Molinari A., Cheriguene R. and Rusinek A., “Residual stresses in orthogonal cutting of metals: The effect of thermomechanical coupling parameters and of friction”, *Journal of Thermal Stresses*, 32: 269–289, (2009).
11. Liu C.R. and Guo Y.B., “Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool-chip friction on residual stresses in a machined layer”, *International Journal of Mechanical Science*, 42: 1069–1086, (2000).
12. Guo Y.B. and Liu C.R., “FEM analysis of mechanical state on sequentially machined surfaces”, *Machining Science and Technology*, 6: 21–41, (2002).
13. Vaz M. Jr, Owen D.J.R., Kalhori V., Lundblad M. and Lindgren L.-E., “Modelling and simulation of machining processes”, *Archives of Computational Methods in Engineering* 14: 173–204, (2007).
14. Adetoro M.B. and Wen P.H., “Simulation of end milling on FEM using ALE formulation”, *Abaqus User's Conference*, New Port, Rhode Island, USA, 1–19, (2008).
15. Johnson G.R. and Cook W.H., “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures”, *Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, 541–547, (1983).