

TORNALAMA İŞLEMİ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMALARLA İNCELENMESİ

Kadir GÖK^{a,*}, Erol TÜRKEŞ, Yasin KİŞİOĞLU

^{a,*} Dumlupınar Üniversitesi Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
Tel: 0-274-2270450 kadiryok67@hotmail.com Kütahya/TÜRKİYE

^{b,*} Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Tel: 0-274-265 20 31 eturkes@dpu.edu.tr Kütahya /TÜRKİYE

^{c,*} Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü
Tel: 0-262-3032278 ykisioglu@kocaeli.edu.tr Kocaeli/TÜRKİYE

Özet

Tornalama işlemi analitik olarak incelendiğinde, oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu karmaşık yapı, sonlu eleman (SE) tabanlı simülasyon araçları ile daha kolay çözüm bulabilmektedir. Özellikle, tornalama operasyonlarında analitik ve deneysel olarak tespit edilmesi zor olan takım gerilmeleri, kesme kuvvetleri, takım aşınması, takım-talaş ara yüz sıcaklığı ve kayma açısı gibi bazı parametreler bilgisayar destekli simülasyon araçlarıyla hesaplanabilir. Bu çalışma da, AISI 1010 malzemesi kullanılarak 0.5-1mm talaş derinliklerinde ve 0.18-0.2mm/dev ilerleme miktarlarında yapılan tornalama işlemleri hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmiş elde edilen kesme kuvvetleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece, geliştirilen SE modelinin bu tür uygulamalar için de kullanılabilirliği ispatlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Tornalama işlemi, deneysel yöntem, sonlu eleman modeli

1. Giriş

Talaşlı imalat işlemleri tornalama, frezeleme ve delme olmak üzere 3 ana guruba ayrılabilir. Özellikle tornalama işlemleri makine imalat endüstrisinde çok yaygındır. Tornalama işlemleri kesme parametrelerinin değişkenliği nedeniyle çözümü çok karmaşık problemlerdir. Günümüzde bilgisayarların ve yazılımların gelişmesiyle bu karmaşık problemlerin çözümü daha kolay hale gelmiştir. Kesme simülasyonlarıyla kesme parametrelerine göre kesme sıcaklığı, kesme kuvveti, takım aşınması, takım ve iş parçası üzerinde meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri hesaplanabilmektedir. Kesme analizleri için kullanılan simülasyonlar özellikle deneysel verilerin önceden tespit edilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Kesme simülasyonları talaşlı imalatta uygun kesme koşullarının araştırılmasında bir alternatif olarak kullanılmaktadır.

Tornalama işleminin deneysel incelenmesinin yanı sıra, birçok araştırmacı sonlu elemanlar metodu kullanarak da incelemiştir. Yanda ve diğerleri [1] ortogonal işleme sürecinde karbür kesici takımın kenarı üzerindeki kesme kuvveti, efektif gerilme, toplam Von Misses şekil değiştirmesi ve sıcaklık üzerinde talaş açısının etkisini tahmin etmek için Sonlu elemanlar metodu (SEM) simülasyonu

uygulamasını göstermişlerdir. Attanasio ve diğerleri [2] takım aşınmasının 3 boyutlu olarak sonlu eleman analizini, Kose ve diğerleri [3] ilerlemenin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisini, Kim ve diğerleri [4] kesici takım kenar yarıçapının sıcaklık ve kesme kuvvetleri üzerinde etkisini, Duran ve Nalbant [5] kesici takım üzerinde oluşan çökme değerlerinin sonlu elemanlar metodu ve kastiglano metodu ile karşılaştırılmasını, Jaharah ve diğerleri [6] sonlu elemanlar metoduyla AISI 1045 çeliğin tormalanmasında çeşitli talaş ve boşluk açılarına sahip kesici takımların efektif gerilme ve sıcaklık artışına etkisini, Dechjarern [7] talaş açısının kesme performansı üzerinde etkisini, Yanda ve diğerleri [8] FEM kullanarak takım aşınmasını minimize edebilen işleme süreçlerindeki takım geometrisinin en uygun kombinasyonunu bulmaya çalışmışlardır. Bareggi ve diğerleri [9] bir torna tezgahında metal kesme esnasında takım-talaş ara yüzeyi alanında yüksek hızlı bir soğutma sağlamak için süpersonik bir nozul kullanmış, ticari DEFORM yazılımı kullanılarak 3 boyutlu SE modeli ile talaş biçimi, takım ve iş parçası sıcaklığını, Ucun ve Aslantaş [10] kesme kuvvetleri, sıcaklık, kayma açısı ve takım gerilmesi üzerinde kaplama katman sayısı ve kaplama tipinin etkisini anlamak için bir seri deneysel ve sayısal çalışmayı, Patrascu ve Carutasu [11] talaş kırıcı takımlarla tormalama sürecinin 3D simülasyonu için bir SEM modelini, Zhou ve diğerleri [12] süper finiş sert tormalamada, PCBN kesici takımın takım aşınması üzerinde pah açısının etkisini incelemişlerdir. Özel ise [13] sabit ve değişken kayma ve sürtünme katsayılarına dayalı modeller geliştirerek, FE simülasyonları üzerinde takım-talaş ara yüzeyi sürtünme modelinin etkilerini göstermiştir.

SEM' in avantajlarının yanı sıra kullanımını kısıtlayan durumlar da söz konusudur. Metal kesme işlemi yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarında gerçekleştiği için kesme sırasında kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin eksiksiz olarak bilinmesi gerekir. Malzemelerin flow stress eğrileri özellikle kesme analizlerinde mutlaka kullanılmalıdır. Fakat günümüzde her malzemenin akma gerilmesi eğrisi mevcut değildir. Bunun için malzemenin farklı sıcaklıklarda ve şekil değiştirme hızlarında bir seri çekme testi yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, AISI 1010 malzemesi üzerinden kuru kesme şartları altında, sabit devir sayısı, farklı talaş derinliği (0.5mm – 1mm) ve farklı ilerleme miktarlarında (0.18mm/dev – 0.2 mm/dev), Tungsten carbide (WC) kesici uçlar kullanılarak tormalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen kesme kuvveti değerleri Deform3D kullanılarak yapılan kesme simülasyonlarından elde edilen kesme kuvveti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra kesici uç üzerinde oluşan sıcaklık değerleri de simülasyon çalışmasından elde edilerek, talaş derinliği ve ilerleme miktarının nasıl etki ettiği üzerinde durulmuştur.

2. Deneysel ve Nümerik Çalışmalar

2.1. Tormalama İşlemi

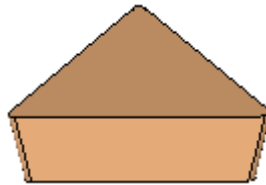
Tormalama işlemleri için Mitsubishi tarafından üretilen TCMA 160404 kodlu kesici uçlar kullanılmıştır. Yapılan tormalama işlemlerinde kullanılan sabit ve değişken parametreler Çizelge 1' de verilmiştir. Takım ucunun geometrisi Şekil 1 'de gösterilmiştir. Tormalama işlemlerinde $\Phi 50$ çapında ve 60 mm uzunluğunda AISI 1010 numuneleri kullanılmıştır. Deneyler, TOS marka universal bir torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde üç boyutlu ölçme yapabilen Kistler 9257BA dinamometresi kullanılarak X, Y ve Z doğrultularında oluşan kuvvetler ölçülmüştür.

Çizelge 1. Tornalama işlemi parametreleri

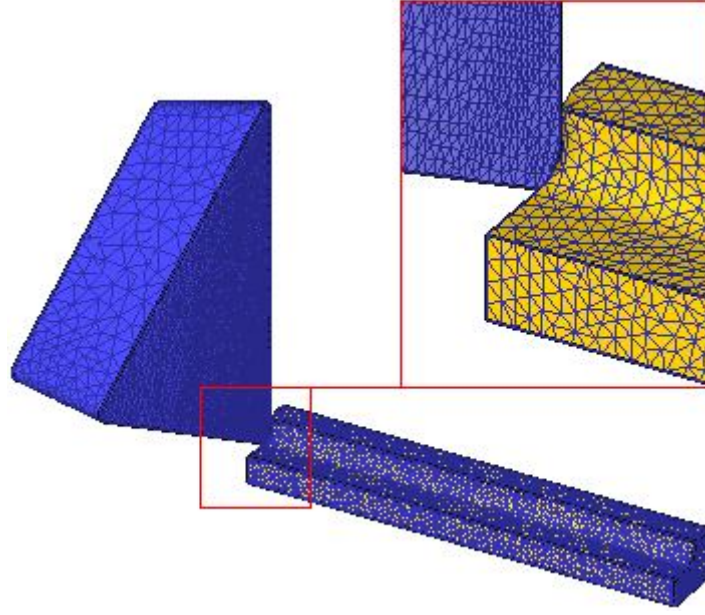
Takım uç yarıçapı (mm)	0.4
Boşluk açısı (°)	7
Talaş açısı (°)	0
Talaş derinliği (mm)	0.5-1
Devir Sayısı (dev/dak)	710
İlerleme hızı (mm/dv)	0.18-0.2
Kesici Kalitesi	WC
Kesme Uzunluğu (mm)	20

2.2. Sonlu Elemanlar Metodu Kullanarak Modelleme

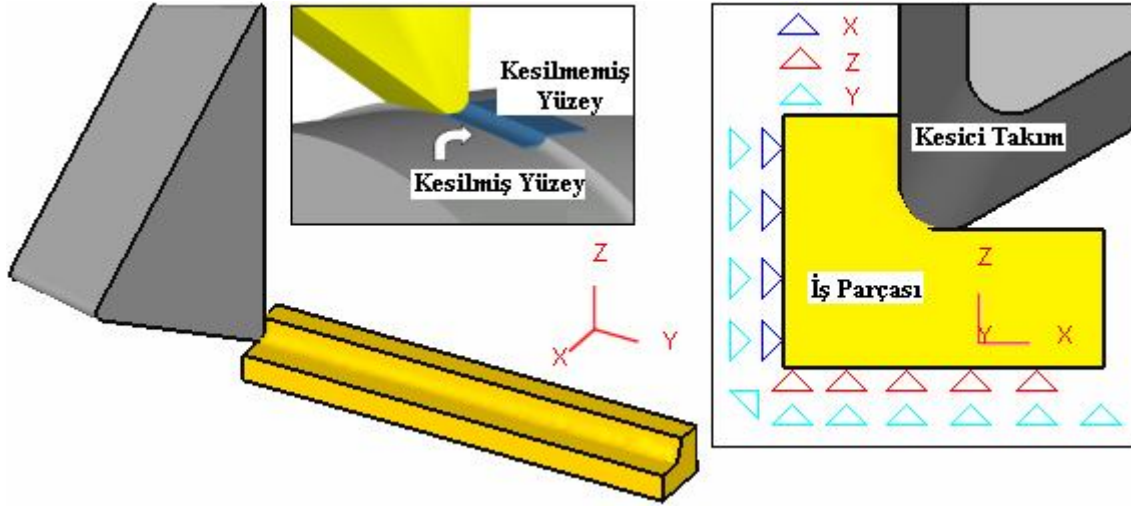
Bu çalışmada, AISI 1010 çeliği malzemesi üzerinden, WC kesici uçlar kullanılarak, sabit devir sayısı, farklı talaş derinliği ve ilerleme miktarı kullanılarak yapılan tornalama işlemlerinin kesme simülasyonları DEFORM 3D yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. WC kesici ucun 3 boyutlu modeli SolidWorks programında oluşturularak (Şekil 1) "STL" formatında DEFORM 3D programına aktarılmıştır. Metal kesme işlemleri karmaşık yapıda olduğu için, simülasyonların çözümü bazen günler alabilmektedir. Bundan dolayı, bu tür problemlerin çözümünde işlemcisi hızlı bilgisayarlar kullanmak problemin çözüm süresi açısından çok önemlidir. Kesici uç ve iş parçasının ağ (mesh) yapısı için dört düğümlü tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Takım ucu için 26149 eleman, 5963 düğüm ve 5792 çokgen kullanılırken, iş parçası için ise 29192 eleman, 6957 düğüm ve 7284 çokgen kullanılmıştır. Kesici takım ve iş parçası için ağ yapısı Şekil 2. de verilmiştir. Kesici takım ve iş parçası üzerine uygulanan sınır şartları kullanıcı tarafından girilirken, elemanlar arasındaki temas bölgeleri program tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur. Kesme işlemini basitleştirmek için iş parçası DEFORM-3D programına göre iş parçası üzerinden küçük bir parça alınarak oluşturulmuştur. Aynı zamanda kesici takıma Y ekseninde kesme hızı kadar bir hız uygulanmıştır. Şekil 3'de kesici takım ve iş parçasına uygulanan sınır şartları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, iş parçasının X ve Z yüzeylerinde hareket kısıtlaması yapılmıştır. Buna ilaveten, iş parçasının bu iki yüzeyinde Y doğrultusunda hareket kısıtlaması uygulanmıştır.



Şekil 1. Torna kesici takım ucu üç boyutlu modeli



Şekil 2. Kesici uç ve iş parçasının ağ (mesh) yapısı.



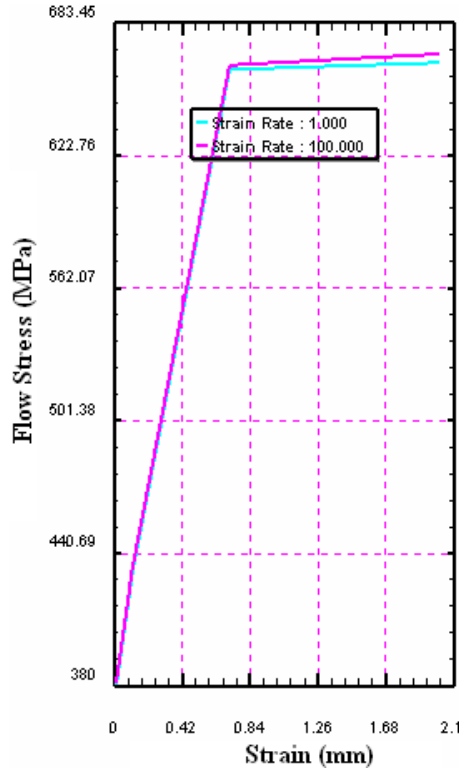
Şekil 3. Kesici takım ve iş parçası üzerine uygulanan sınır şartları.

2.2.1. Malzeme Modeli

Sonlu elemanlar metodunun kullanımında, metal kesme, delme, şekillendirme ve sıvama gibi işlemler yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarında gerçekleştiği için kesme sırasında kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin eksiksiz olarak bilinmesi gerekir. Malzemelerin flow stress eğrileri özellikle kesme analizlerinde mutlaka kullanılmalıdır. Fakat günümüzde her malzemenin akma gerilmesi eğrisi mevcut değildir. Bunun için malzemenin farklı sıcaklıklarda ve şekil değiştirme hızlarında bir seri çekme testinin yapılması gerekmektedir. Kesme simülasyonu sürecinde kullanılan AISI 1010 çeliğinin akış gerilmesi eğrileri DEFORM-3D malzeme kütüphanesinden alınmıştır. AISI

1010 çeliğinin akış gerilmeleri şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu kanun bir malzemenin gerçek davranışını görme yeteneğinden dolayı seçilmiştir (1). Şekil 4' de bu simülasyon çalışmasında kullanılan flow stress eğrileri şekil değiştirme miktarının bir fonksiyonu olarak görülmektedir. Aynı zamanda kesme analizinde kesici uç olarak kullanılan WC kesici takım ve iş parçası olarak kullanılan AISI 1010 çeliğine ait malzeme özellikleri Çizelge 2. de verilmiştir. Denklem 1' deki flow stres ($\bar{\sigma}$), AISI 1010 malzemesinin, sıcaklık altında gösterdiği etkili plastik şekil değiştirme ($\bar{\epsilon}$), etkili şekil değiştirme hızı ($\dot{\bar{\epsilon}}$) ve sıcaklığın (T) bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

$$\bar{\sigma} = (\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$



Şekil 4. AISI 1010 malzemesine ait akış gerilmesi eğrileri [14]

Çizelge 2. Malzeme Özellikleri [14]

Kesici Takım Özellikleri (WC Kesici Takım)	
Elastiklik Modülü (MPa)	650000
Poison Oranı	0.25
Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	5e-06
Isıl İletkenlik (W/mK)	59
Isı Kapasitesi ($\text{N}/\text{mm}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	15
İş Parçası Malzeme Özellikleri (AISI 1010)	
Elastikiyet Modülü (MPa)	206754
Poisson Oranı	0.3
Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1.2e-05
Isıl İletkenlik (W/mK)	50.708 (100°)- 29 (1485°)
Isı Kapasitesi ($\text{N}/\text{mm}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	3.80981 (100°)- 4.3 (1485°)

2.2.2. Takım-Talaş Ara yüzü Tanımlanması

Sürtünme katsayısı, zamanın bir fonksiyonu yada ara yüz basıncının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Sürtünme modelleri Shear (Kayma) ve Coulomb sürtünme olarak 2 çeşittir. Kayma (yapışma) Sürtünme, sabit kayma sürtünmesi çoğunlukla hacim –şekillendirme simülasyonları için kullanılır. Sabit sürtünme modelindeki sürtünme kuvveti eşitlik (2)' deki gibi tanımlanır.

$$f_s = m.k \quad (2)$$

f_s sürtünme kuvveti, k kayma akma gerilmesi ve m sürtünme katsayısıdır. Bu durum sürtünmenin deformasyon olan nesnenin akma gerilmesinin bir fonksiyonu olduğunu ifade eder. Coulomb sürtünme modeli elastik olarak deforme olmuş 2 nesnenin arasında temas olduğunda kullanılır (elastik-plastik bir nesne elastik olarak deforme olmuş ise) yada elastik bir nesne ve rijit bir nesne; genel olarak saç şekillendirme süreçlerinde kullanılır. Coulomb kanunu modelinde sürtünme kuvveti eşitlik (3)' deki gibi tanımlanır.

$$f_s = \mu.p \quad (3)$$

f_s sürtünme kuvveti, p iki nesne arasındaki arayüz basıncı ve μ sürtünme katsayısıdır [15]. Bu çalışmada düşük kesme hızları kullanıldığı için Coulomb sürtünme modeli seçilmiştir. Düşük kesme hızlarında konvansiyonel işlemede Coulomb sürtünme modeli takım yanak yüzeyinde oldukça etkili olabilir [13]. Ortogonal kesme de takım ve talaş arasındaki sürtünmenin ortalama katsayısı genel olarak eşiklik (6)' da verildiği gibi ölçülen kesme kuvvetlerinden hesap edilir [13]. Hesaplama sonucu ortalama sürtünme katsayısı $\mu = 0.75$ olarak bulunmuştur. Eşitlik (4)' da F_c ve F_t deneysel olarak dinamometre ile elde edilen esas kesme ve ilerleme kuvvetleridir. α ise talaşa açısıdır.

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (4)$$

2.2.3. Isı Dağılımı ve Transferi

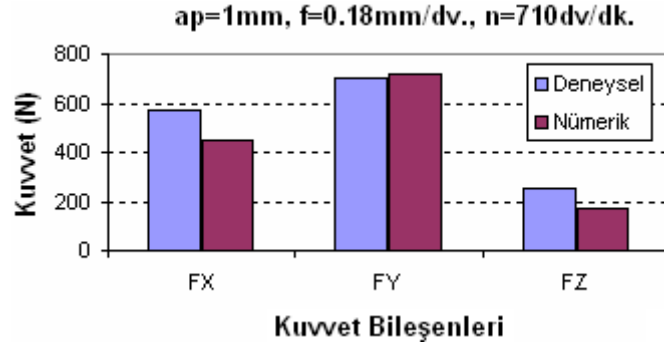
Kesici takım, iş parçası ve talaş üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı yüzey bütünlüğü ve takım aşınması yönünden çok etkilidir. Kesme sırasında oluşan ısının esas kaynağı plastik iş ve takım-talaş ara yüzündeki sürtünmedir. Bu ısının bir kısmı talaş ile uzaklaşırken bir kısmı da ortama bırakılmaktadır. İşleme simülasyonu başlangıç sıcaklığı 20°C varsayılan oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesinin serbest yüzeyinden ortama olan ısı transferi aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada, iş parçası malzemesi ve ortam arasındaki ısı transfer katsayısı $h = 45 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ olarak kabul edilmiştir. T_w and T_o sırasıyla, iş parçası malzemesi ve ortam sıcaklığıdır.

$$Q = h(T_w - T_o) \quad (5)$$

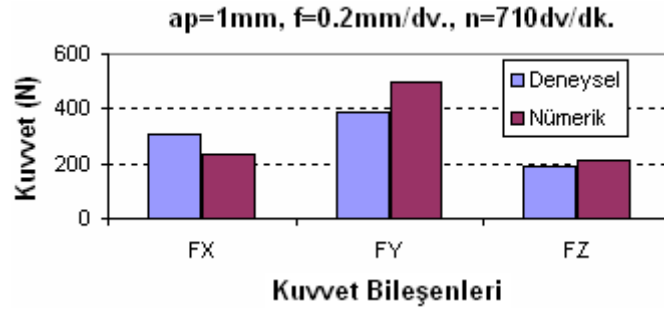
3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Deneysel ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

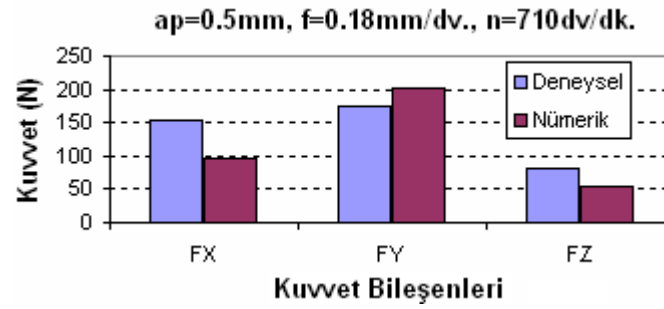
Yapılan çalışma sonunda kesici takımlar üzerinde oluşan F_X : İlerleme kuvveti, F_Y : Esas kesme kuvveti ve F_Z : Pasif kuvvetlerin hem deneysel hem de nümerik sonuçları arasındaki karşılaştırma Şekil 5' de verilmiştir. Grafiklerde a_p : talaş derinliğini, f : ilerleme miktarını ve n : devir sayısını ifade etmektedir. Şekil 5a' da ki grafikte, hem nümerik hem de deneysel değerler arasındaki benzerlik %97.5 ile F_Y : Esas kesme kuvvetinde görülmüştür. Aynı grafikte F_X : İlerleme kuvveti için deneysel ve nümerik değerler arasındaki uyum %79 iken, F_Z : Pasif kuvvet için %69 olarak bulunmuştur. Diğer grafiklerde de esas kesme kuvvetleri diğer iki kuvvete göre daha yakın çıkmıştır. Bunun sebebi bilgisayar destekli simülasyonlarda bazı kabullenmelerin yapılmasıdır. Şekil 3.'de görüldüğü gibi iş parçasının üzerinden prizmatik bir parça alınarak simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bundan dolayı ilerleme doğrultusunda çok hassas değerler elde etmek zordur.



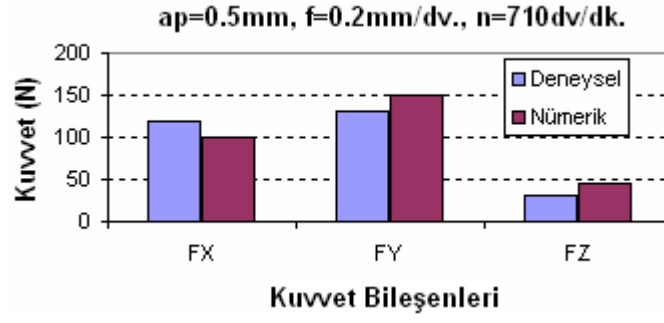
a)



b)



c)

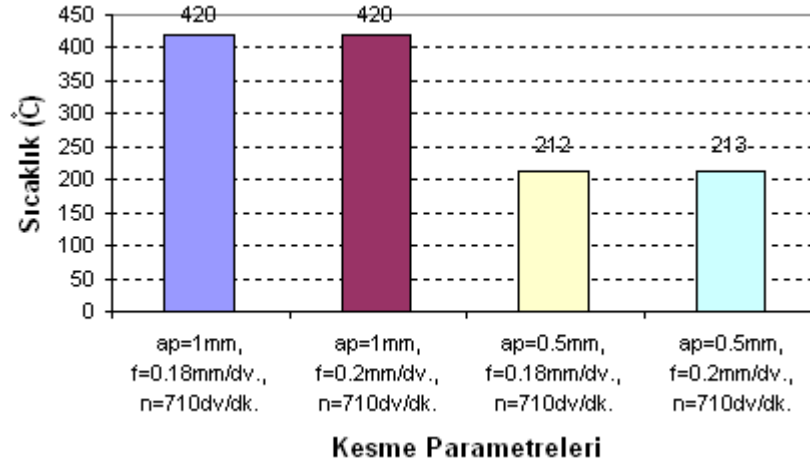


d)

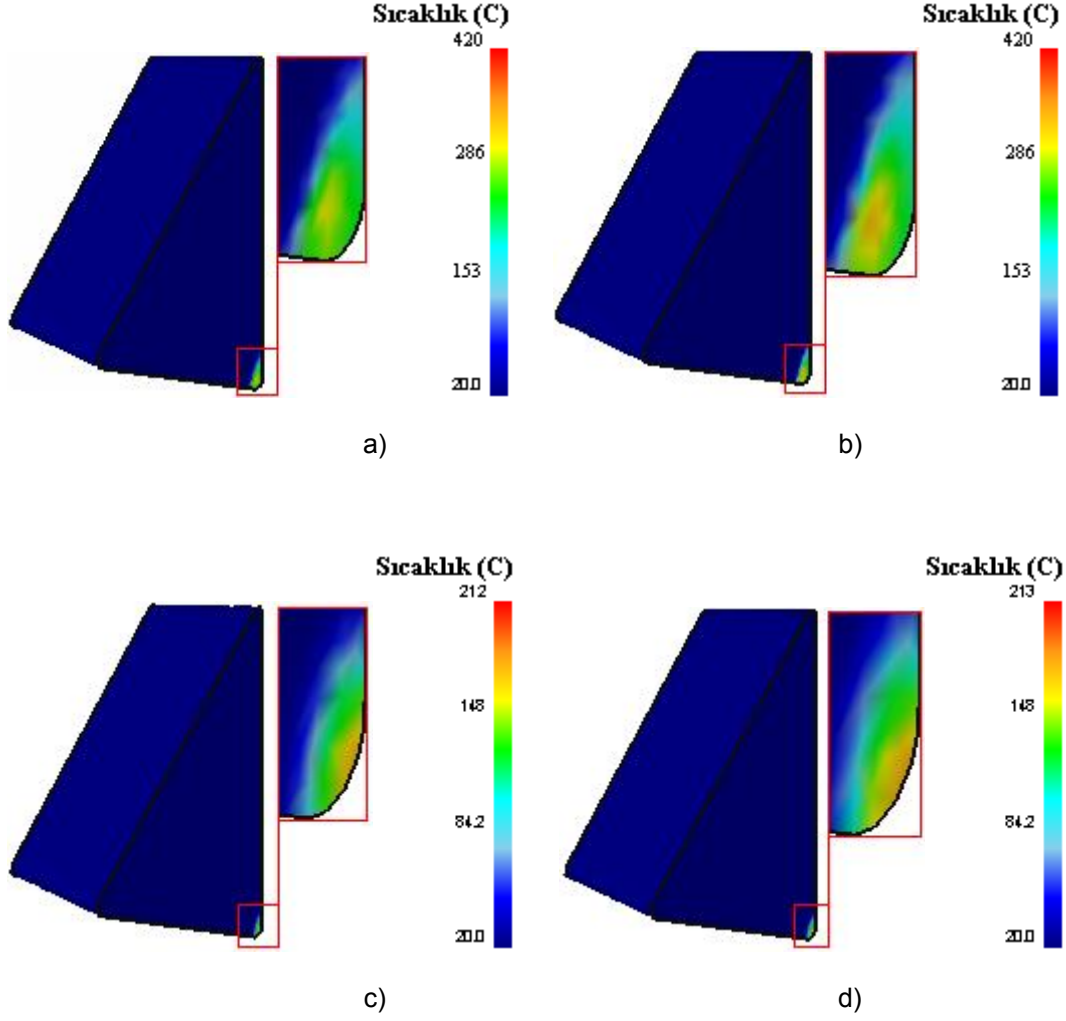
Şekil 5. Deneysel ve nümerik kesme kuvvetleri.

3.2. Takım Üzerinde Oluşan Sıcaklık Değerleri

Kesme simülasyonları sonucunda kesici takım üzerinde oluşan sıcaklık değerleri Şekil 6' da gösterilmiştir. Şekil 7' de ise farklı kesme parametrelerinde takım ucunda oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir. Kesici takım, iş parçası ve takım-talaş ara yüzünde oluşan sıcaklık ve dağılımları kesme işlemlerinde çok önemlidir. Kesme parametreleri, kesici geometrisi, kaplama malzemesi gibi bir çok durum kesme sırasında oluşan sıcaklık değerlerini etkilemektedir. Nümerik çalışmalar sonucunda, kesici takım üzerinde oluşan sıcaklıkların ilerleme miktarıyla değişmezken, talaş derinliğiyle yarı yarıya azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 6. Farklı kesme parametrelerinde takım üzerinde oluşan sıcaklık değerleri.



Şekil 7. Farklı kesme parametrelerinde takım ucunda oluşan sıcaklık dağılımları, $a_p=1\text{mm}$, $f=0.18\text{mm/dv.}$, $n=710\text{dv/dk.}$ a), $a_p=1\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/dv.}$, $n=710\text{dv/dk.}$ b), $a_p=0.5\text{mm}$, $f=0.18\text{mm/dv.}$, $n=710\text{dv/dk.}$ c) $a_p=0.5\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/dv.}$, $n=710\text{dv/dk.}$ d).

4. Değerlendirme

Ç1010 malzemesinden yapılmış bir iş parçası kullanılarak 0.5~1mm kalınlığında talaş ve 0.18~0.2mm/dev ilerleme miktarlarında yapılan tornalama işlemi hem deneysel hem de bilgisayar ortamında simüle edilerek elde edilen kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Aynı tornalama işlemi parametreleri dikkate alınarak yapılan deneysel ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir uyum gözlenmiştir. Elde edilen kesme kuvvetleri sonuçları arasında yakınsama yaklaşık %97.5 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, ilerleme kuvvetleri arasında yaklaşık %79 ve pasif kuvvetlerin sonuçları arasındaki yakınsama yaklaşık %69 olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi, simülasyon çalışmasının basit bir şekilde modellenmesi olup ilerleme doğrultusunda çok hassas değerler elde etmek zordur.
- Kesici takım üzerinde oluşan sıcaklık değerleri talaş kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterirken ilerleme miktarına bağlı olarak sıcaklık değerleri değişmemektedir. Kesici takım üzerinde oluşan sıcaklık değişimi talaş kalınlığı ile yaklaşık birebir doğru orantılı olarak değiştiği hesaplanmıştır.

Bunun sebebi, kesici takım ile iş parçası arasındaki temas alanına bağlı olarak sürtünmede meydana gelen değişikliktir.

Kaynaklar

- [1] Yanda, H., A., G., Jaharah, Haron, C., H., C., Effect of rake angle on stress, strain and temperature on the edge of carbide cutting tool in orthogonal cutting using fem simulation, ITB J. Eng. Sci., 42 (2), 2010, 179-194.
- [2] Attanasio, A., Ceretti, E., Rizzuti, S., Umbrello, D., Micari, F., 2008, 3D Finite Element Analysis of Tool Wear in Machining, CIRP Manufacturing Technology, 57, 61-64.
- [3] Köse, E., Kurt, A., Şeker, U., 2008, The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718, J. Mater. Process. Technol., 196, 2008, 165-173.
- [4] K.W. Kim, W.Y. Lee and H.C. Sin., 1999, A finite-element analysis of machining with the tool edge considered. J. Mater. Process. Technol. 86, 45-55.
- [5] Duran, A., Nalbant, M., Finite element analysis of bending occurring while cutting with high speed steel lathe cutting tools, Materials and Design, 26, 2005, 549-554.
- [6] Jaharah A.G., Wahid S.W., Che Hassan C.H., Nuawi M.Z., Mohd Nizam Ab Rahman., The effect of uncoated carbide tool geometries in turning AISI 1045 using finite element analysis, European Journal of Scientific Research, 2, 2009, 271-277.
- [7] Dechjareern S., 3D finite element investigations of the influence of tool rake angle on cutting performance, Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing 1, 2008, 149-158.
- [8] Yanda, H., Jaharah A.G., Che Hassan C. H., Effect of rake and clearance angles on the wear of carbide cutting tool, Engineering e-Transaction, 4 (1), June 2009, 7-13.
- [9] Bareggi, A., O'Donnell, Torrance, A., Modelling thermal effects in machining by finite element methods, Proceedings of the 24 th International Manufacturing Conference, 1.1, August 2007, 263-272.
- [10] Uçun, İ., Aslantaş, K., Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools, Int J Adv Manuf Technol, 54, 2011, 899-910.
- [11] Patrascu, G., Carutasu, G., Using virtual manufacturing simulation in 3D cutting forces prediction, Fascicle of Management and Technological Engineering, VI (XVI), 2007, 1423-1426.
- [12] Zhou, J.M., Walter, H., Andersson, M., Stahl, J.E., Effect of chamfer angle on wear of pcbn cutting tool, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 2003, 301-305.
- [13] Özel, T., The influence of friction models on finite element simulations of machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 2006, 518-530.
- [14] Deform 3D v10.0 package program material library.
- [15] DEFORM-3D v10.0 Manual.