

**Atıf İçin:** Sekmen, M., Kurt, A. ve Şeker, U. (2023). Talaş Kaldırma İşleminde Sürtünme Katsayısının Kesme Kuvvetleri, Sıcaklık ve Kesici Takım Gerilmeleri Üzerine Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 1176-1188.

**To Cite:** Sekmen, M., Kurt, A. & Şeker, U. (2023). The Effect of Friction Coefficient on Cutting Forces, Temperature and Cutting Tool Stresses in Machining Process. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 1176-1188.

## Talaş Kaldırma İşleminde Sürtünme Katsayısının Kesme Kuvvetleri, Sıcaklık ve Kesici Takım Gerilmeleri Üzerine Etkisi

Mustafa SEKMEN<sup>1\*</sup>, Abdullah KURT<sup>2</sup>, Ulvi ŞEKER<sup>2</sup>

### **Öne Çıkanlar:**

- Tornalama
- Sürtünme katsayısı
- Takım sıcaklığı

### **Anahtar Kelimeler:**

- Kesme kuvvetleri
- Kesici takım gerilmeleri
- Sürtünme katsayısı
- Sonlu elemanlar
- Takım-talaş ara yüzeyi

### **ÖZET:**

Bu çalışmada, endüstride büyük önem taşıyan tornalama işleminde kullanılan kesici takımların kesme performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Karbür kesici takımlarla AISI 1050 çeliği üzerinde farklı kesme parametreleriyle deneyler yapılmış ve dinamometre yardımıyla kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Kesme parametreleri referans alınarak Deform-3D ile simülasyonlar yapılmıştır. Farklı sürtünme katsayılarıyla (0.3-0.4-0.5-0.6-0.7) yapılan simülasyonlardan elde edilen kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısının sıcaklık ve kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. 0.4 ve 0.5 sürtünme katsayıları için simülasyon ve deneysel kesme kuvveti sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Analizler sonucunda sürtünmenin kesici takım gerilmeleri ve sıcaklık üzerinde çok etkili olduğu gözlenmiştir. Sıcaklığa ve gerilmelere bağlı olarak kesici takımında oluşabilecek aşınma ve hasar noktaları belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kesici takım kesme performansının iyileştirilmesine ve optimum kesme parametrelerinin seçiminde önemli katkılar sağlayacaktır.

## The Effect of Friction Coefficient on Cutting Forces, Temperature and Cutting Tool Stresses in Machining Process

### **Highlights:**

- Turning
- Friction coefficient
- Tool temperature

### **Keywords:**

- Cutting forces
- Cutting tool stresses
- Friction coefficient
- Finite elements
- Tool-chip interface

### **ABSTRACT:**

In this study, it is aimed to improve the cutting performance of the cutting tools used in the turning process, which is of great importance in the industry. Experiments with different cutting parameters were carried out on AISI 1050 steel with carbide cutting tools and cutting forces were measured with the help of a dynamometer. Simulations were made with Deform-3D by taking the cutting parameters as reference. The experimental results and the cutting forces obtained from the simulations carried out with different friction coefficients (0.3-0.4-0.5-0.6-0.7) were compared. In addition, the effects of friction coefficient on temperature and cutting tool stresses were investigated. It has been seen that the simulation and experimental cutting force results for friction coefficients of 0.4 and 0.5 are close to each other. As a result of the analyses, it has been observed that friction has a great effect on cutting tool stresses and temperature. Depending on the temperature and stresses, the wear and damage points that may occur in the cutting tool have been determined. The results obtained from the study will make significant contributions to the improvement of cutting tool cutting performance and the selection of optimal cutting parameters.

<sup>1</sup> Mustafa SEKMEN ([Orcid ID: 0000-0003-4361-3117](https://orcid.org/0000-0003-4361-3117)), Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup> Abdullah KURT ([Orcid ID: 0000-0002-7650-3443](https://orcid.org/0000-0002-7650-3443)), Ulvi ŞEKER ([Orcid ID: 0000-0001-6455-6858](https://orcid.org/0000-0001-6455-6858)), Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mustafa SEKMEN, e-mail: mustafa.sekmen@omu.edu.tr

Bu çalışma Mustafa SEKMEN'in Doktora tezinden üretilmiştir.

## GİRİŞ

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle metal kesmede sonlu elemanlar metodu (SEM), işlenebilirlik operasyonlarının simülasyonu için en yaygın kullanılan araçlardan biridir. Talaş kaldırma işlemi maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu yüzden sonlu elemanlar yöntemi işlenebilirlik uygulamalarında yaygın bir araç haline gelmiştir. Talaş kaldırma süreci kesici takım ve iş parçası ara yüzeyinde sürtünme kaynaklı gerilmelerinin ve yüksek sıcaklıkların olduğu çok zorlu bir işlemdir. Bu nedenle takım aşınması her zaman kaçınılmaz bir sonuçtur. Önceden tahmin edilen takım ömrü, ürünün kalitesini artıracak ve üretim maliyetlerini azaltacaktır. Bu nedenlerle kesme işlemleri için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametreler kullanılarak kesme işlemlerinin yapılması oldukça önemlidir. Talaşlı imalatta kesme bölgesi sıcaklıkları ve kesici takım üzerindeki gerilmeler uzun yıllardır birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Literatürde genel olarak deneysel ve nümerik/simülasyon çalışmalar olarak sınıflandırılan birçok çalışma yapılmıştır.

Ezilarasan ve Velayudham (2017), Nimonic C-263 süper alaşımının işlenmesinde Deform-3D kullanılarak kesme kuvvetleri, kesici takım ucundaki sıcaklık oluşumu ve efektif gerilme değerlerini tahmin ederek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kesici takımında oluşan en yüksek sıcaklık 610°C olarak gerçekleşmiştir. 0.6 sürtünme katsayısı için kesme kuvveti ve sıcaklık değerlerinin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir. Yıldız ve ark. (2020) AISI 1050 çeliğinin delinmesinde kesici takım kaplaması, kesme hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkilerini incelemişlerdir. Deform-3D programı kullanarak kesme parametrelerinin matkap ucunda oluşan gerilmelere etkilerini analiz etmişlerdir. İşlenebilirlikte takım-talaş ara yüzeyinde gerçekleşen olayları anlamının en önemli kriteri sürtünme şartlarını belirlemektir. İşlenebilirlik açısından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak güvenilir tahminler yapılabilir.

Talaş kaldırma, daha yumuşak bir malzemenin (iş parçası) daha sert bir malzeme (kesici takım) ile yüksek basınç altında kesilerek plastik deformasyona maruz kalma sürecidir. Bu süreçte temas halinde olan takım-iş parçası arasında oluşan sürtünme pek çok faktörü etkilemektedir. (Maranhao ve Davim, 2012). Budak ve Ozlu (2008), talaş kaldırma işleminde birinci deformasyon bölgesinde, Johnson-Cook malzeme modelini, ikinci deformasyon bölgesinde ise kayma ve yapışma modellerini kullanarak kesme simülasyonları yapmışlardır. Gök (2015), AISI 1045 çeliğinin tornalaması sırasında oluşan kesme kuvveti ve sıcaklık değerlerini deneysel ve nümerik olarak kıyaslamıştır. Kurt (2009), Inconel 718'in tornalanmasında oluşan kesici takım gerilmelerini farklı kesme parametrelerinde ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar metodu (SEM) ile analiz etmiştir. Özel (2009), AISI 4340 çeliğinin tornalamasında oluşan kesme kuvvetleri, talaş geometrisi, takım aşınması, sıcaklık dağılımları ve kesici takım gerilmelerini incelemiştir. Attanasion ve ark. (2008), takım aşınmasını analiz edebilmek için analitik bir model kullanmışlardır. AISI 1045 çeliğinin kaplanmamış WC takımlarla tornalamasında elde edilen deneysel verilerle, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçlarını karşılaştırarak ikisi arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Ucu ve Aslantaş (2011), AISI 4340 çeliğinin işlenmesinde kaplama (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tipinin kesme kuvveti, kesici takım gerilmeleri ve sıcaklık üzerindeki etkilerini incelemiştir. Binder ve ark. (2017), metal kesmede takım aşınmasını simüle etmek için sonlu eleman tabanlı bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu modele göre takım-talaş yüzeyi ve yanak aşınmasını simüle ederek takım aşınma sürecini tahmin etmişlerdir. Attanasio ve ark. (2017), Inconel 718'in delme işleminde takım aşınmasını simüle etmek için takım geometri güncellemesini hesaba katan SFTC Deform-3D FEA yazılımını geliştirmiş ve uygulanmışlardır.

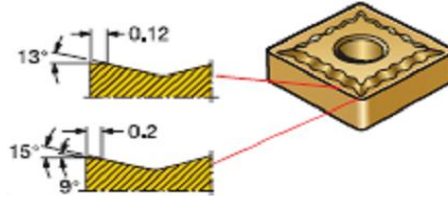
Literatür çalışmaları incelendiğinde, deneysel talaş kaldırma çalışmaların, sonlu elemanlar metoduna dayalı çözümlere yapan programlarla kıyaslandıkları görülmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin uygulandığı birçok çalışmada, çoğunlukla tornalama işlemi ve özellikle talaş oluşturma işlemi sıklıkla 2B olarak incelenmiş ve çoğunlukla iş parçası ele alınmıştır (Xiong ve ark., 2018; Borsos ve ark., 2017; Kherraf ve ark., 2019). Ancak, bu çalışmaların hiçbirinde takım ve talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmeye katsayısına odaklanılmamıştır. Sürtünmeye katsayısı takım-talaş ara yüzeyinde kesme kuvvetleri, sıcaklık, kesici takım gerilmeleri ve takım aşınması gibi karakteristikleri

belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Bu çalışmada, AISI 1050 çeliğinin tornalanması sırasında oluşan kesme kuvvetleri deneysel olarak belirlenmiş ve kullanılan kesme parametreleri, simülasyon işlemlerinde de referans alınarak, takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünmenin kesme kuvvetleri, sıcaklık ve kesici takım gerilmeleri üzerine etkisi 5 farklı sürtünme katsayısı seçilerek nümerik olarak analiz edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

### Deneysel Metot

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak makine imalat sanayinde geniş bir alanda kullanılan AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. Kesme hızı, takım ömrünü belirlemede önemli bir faktördür. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde en önemli faktör, iş parçası ve kesici takım malzeme çiftinin özellikleridir. Kesme parametrelerinin seçiminde ISO 3685 ve takım üreticilerinin kesici takım için önerdiği değerler dikkate alınarak, üç farklı kesme hızı (300, 350 ve 400 m/dk), iki farklı ilerleme oranı (0.2 ve 0.4 mm/dev) ve iki farklı kesme derinliği (1 ve 2 mm) seçilmiştir. Deneylerde, Sandvik marka SNMG formundaki TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN kaplamalı (4225 grade) sementit karbür kesici takım kullanılmıştır. Kesici takım uç burun yarıçapı ( $r$ ) 1.2 mm ve QM talaş kırıcı geometrisine sahiptir. Takım tutucu olarak yanaşma açısı ( $\chi$ ) 75° olan PSBNR 2525M12 kullanılmıştır. Kesici takıma ait talaş kırıcı geometrisi Şekil 1’de verilmiştir.



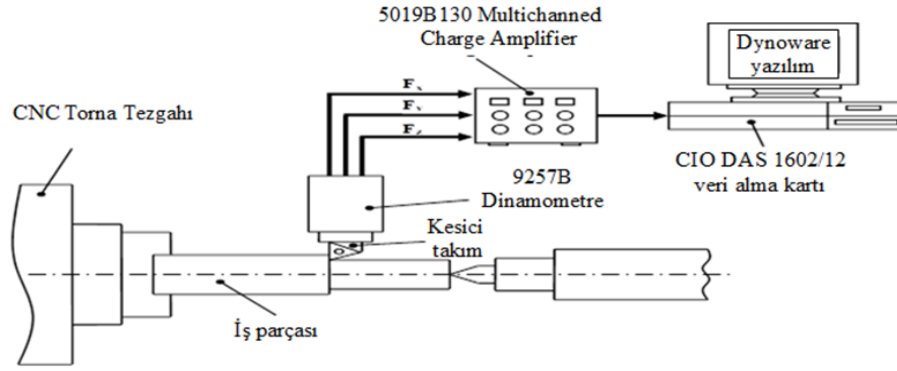
Şekil 1. Kesici takımın talaş kırıcı geometrisi

Deney numuneleri olarak 45 mm çapında AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. Deneylere başlanmadan önce numunelerin dış yüzeylerinden üretim metodundan kaynaklı paslanma, yüzey sertleşmesi ve haddeleme gibi etkileri minimize etmek amacıyla CNC torna tezgâhında 1 mm kesme derinliğinde talaş kaldırılmıştır. Kesme deneyleri, Çizelge 1’de verilen kesme parametrelerine göre JOHNFORD T35 CNC torna tezgâhında yapılmış ve tornalama boyu 25 mm olarak seçilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel parametreler

Takım tutucu	: PSBNR, 2525M12
Kesici takım	: SNMG 1204...
Uç yarıçapı, ( $r$ , mm)	: 1.2
Talaş kırıcı açısı, ( $\gamma$ )	: QM, 13°
Kesme hızı ( $V$ ), m/dk	: 300-350-400
İlerleme oranı ( $f$ ), mm/dev	: 0.2-0.4
Kesme derinliği ( $a$ ), mm	: 1-2

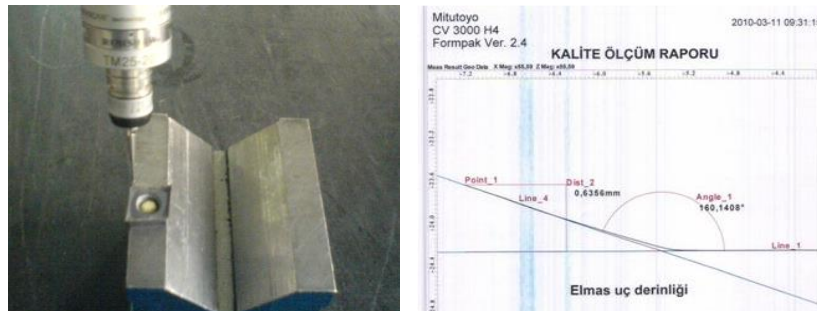
Deneysel kesme kuvvetleri *Kistler 9257B* tipi dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2’de verilmiştir. Dinamometrede dört adet kuvvet sensörü vardır. Her bir sensör, x, y ve z eksenleri doğrultusunda basınca duyarlı üç parçalı kuartz plaklardan oluşmaktadır. Dinamometre tarafından hissedilen gerilim değerleri amplifikatör yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmakta ve Dynoware yazılımı ile kesme kuvveti değerleri tespit edilebilmektedir. Dinamometrenin kalibrasyonu, imalatçı firmanın dinamometre ile birlikte verdiği kalibrasyon değerlerini (data sheet) bilgisayar programına girdikten sonra program otomatik olarak kalibrasyon ayarlarını gerçekleştirmektedir. Dinamometre CNC torna tezgâhında taretine bağlanmıştır.



Şekil 2. Kesme deneyleri için hazırlanan deney düzeneği (Kurt, 2006)

### Nümerik Analiz

Sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerde talaş kaldırma süreci simülasyon zamanına, eleman sayısına, büyüklüğüne ve tipine bağlı olarak zaman alan bir süreçtir. Bu nedenle, daha önce yapılan çalışmalar ve simülasyon programı dikkate alınarak simülasyon süreci optimize edilmeye çalışılmıştır. Tornalama simülasyonu Deform-3D Machining modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Machining modülü *Pre* (ön işlemci), *Simulate* (simülatör) ve *Post* (son işlemci) olarak üç bölümden oluşmaktadır. *Pre* bölümü simülasyon için kesme parametrelerinin girildiği, *Simulate* bölümü girilen parametrelere göre simülasyon işleminin yapıldığı, *Post* bölümü ise analiz sonuçları simülasyon ekranından görüntülenebildiği bölümdür. Literatürde simülasyon çalışmalarında genellikle sürtünme katsayısı 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 veya 0.7 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, optimum sürtünme katsayısını belirlemek için yukarıda belirlenen 5 farklı sürtünme katsayısı programa girilerek analizler yapılmıştır. Kesici takım ölçülerini elde etmek için üretici firma katalog bilgileri ve Mitutoyo CV Hexagon 3 boyutlu koordinat ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3). SolidWorks yazılımı kullanılarak kesici takımın üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan katı model daha sonra STL dosya uzantısı kullanılarak *Deform-3D Pre* modülüne aktarılmıştır. Ardından kesici takım  $\chi=75^\circ$  yanaşma açısına göre  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinatlarında konumlandırılmıştır.



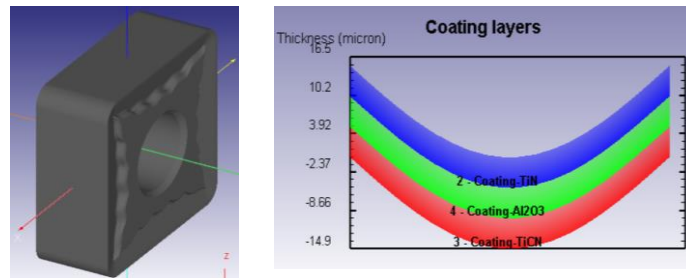
Şekil 3. Ölçüm cihazı ve ölçüm raporu

Programın malzeme kütüphanesine AISI 1050 çeliği için Johnson-Cook malzeme parametreleri girilmiştir. İş parçası malzemesi, izotropik sertleşmeye sahip elasto-plastik olarak modellenmiş olup akma gerilmesi, Johnson-Cook yapısal modeline (JC modeli) dayalı olarak gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Metal kesme işleminde büyük plastik deformasyonların oluşması nedeniyle iş parçası malzemesi gerinim sertleşmesine maruz kalır. Metal kesmeyi simüle etmek için yaygın olarak kullanılan JC modeli, yüksek gerinim ve gerinim oranları içeren mekanik prosesleri modellemek için çok kullanışlıdır. JC modeli, iş parçası malzemelerinin akış gerilim davranışını gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığın çarpımsal etkileri olarak ele alan bir modeldir. Johnson-Cook yapısal modeline dayalı akış gerilim denklemi, Eşitlik 1'de verilmiştir (Özel, 2009).

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

Eşitlik 1'deki  $A$ , malzemesinin akma gerilmesi ve  $B$  gerinme sertleşmesi katsayısı olup  $n$ ,  $C$ ,  $\dot{\epsilon}_0$  ve  $\dot{\epsilon}$  sırasıyla gerinme sertleşmesi üssü, gerinme hızı sertleşme üssü, plastik gerinme oranı ve referans gerinme hızıdır.  $\bar{\epsilon}$ , eşdeğer plastik gerinim,  $T$ , mutlak sıcaklık,  $T_m$  malzemenin ergime sıcaklığını,  $T_r$  ortam sıcaklığı ve  $m$  ise termal yumuşama katsayısıdır.

AISI 1050 iş parçası için JC akma gerilmesi modeli kullanılmıştır. AISI 1050 için Johnson-Cook parametreleri simülasyon programına,  $A$ : 880 MPa,  $B$ : 500 MPa,  $n$ : 0.234,  $C$ : 0.0134,  $m$ : 1 ve  $T_m$ : 1733°K olarak girilmiştir (Aslan, 2014). Kesici takım malzeme bilgileri ve kaplama bilgileri için programın malzeme kütüphanesindeki veriler kullanılmıştır. Kesici takım için sementit karbür (WC) malzemesi tanımlanmıştır. Simülasyon programında kesici takım kaplamaları olarak her biri için 5 µm kalınlığında sırasıyla TiCN, Al2O3 ve TiN kaplama katmanları oluşturulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Modellenen kesici takım ve kaplamaları

Deform-3D simülasyon programına girilen kesici takım ve iş parçası malzeme özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Kesici takım ve iş parçası malzeme özellikleri

Malzeme	AISI 1050 (Tang, 2006)	WC
Elastikiyet modülü, GPa	208	650
Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	7860	11 900
Poisson oranı	0.297	0.25
Isıl iletkenlik, W/m <sup>o</sup> K	49.5	100
Isıl genleşme, 10 <sup>-6</sup> /°C	11.65×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-6</sup>
Özgül ısı, J/kg <sup>o</sup> K	477	334

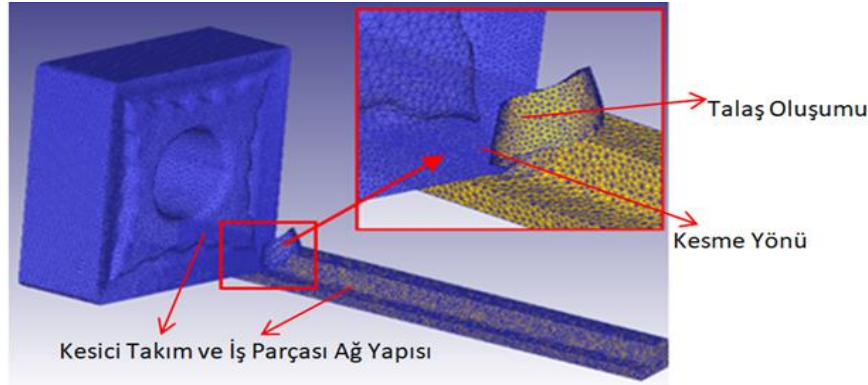
Sonlu eleman modellemesinde çözümlene doğruluğu için problem geometrisini uygun boyutta elemanlara bölmek (meshing) çok önemlidir (Soldani ve ark., 2008). Ağ oluşturma işlemi sırasında dikkate alınması gereken birçok konu vardır, ancak bunlar daha fazla iş yükü gerektirir. Ağ elemanların boyutu veya sayısı, elde edilecek sonuç dosyasının boyutu, hesaplama doğruluğu ve simülasyonun süresi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, elemanların sayısı veya boyutu, her açıdan tartılarak doğru bir şekilde belirlenmelidir. Ağ oluşturma işlemi kesici takımın iş parçasıyla temas ettiği burun yuvarlatma yarıçapı çevresinde daha yoğun eleman olacak şekilde oluşturulmuştur. Programdaki talaş ayırma kriteri, temas halindeki herhangi bir düğüm 0.1'den büyük bir çekme kuvvetine veya basınca maruz kaldığında normal ayrılma meydana gelir. Literatürde belirtilen öneriler dikkate alınarak (Soldani ve ark., 2008; Küçüktürk, 2013), simülasyon tipi olarak Lagrange artımlı simülasyon kullanılmıştır.

### Analiz Prosedürü

Program tarafından “.db” uzantılı olarak kaydedilen simülasyon veri tabanı dosyası, simülasyon tamamlandıktan sonra ön işlemler panelindeki “Die Stress Analysis” modülünde açılmış ve analiz

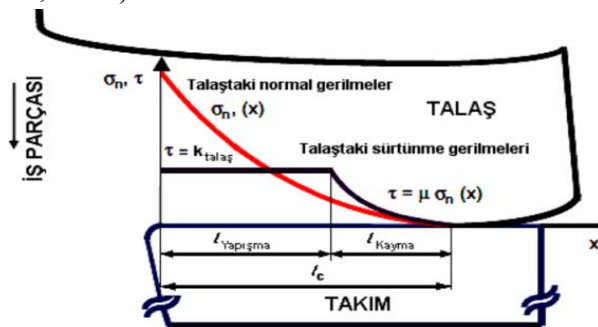


edilecek adım seçilmiştir. Kesici takıma etki eden kesme kuvvetleri programda interpolasyon ile belirlenir. İlk olarak simülasyondaki kesme kuvveti  $F_c$  değeri için deneysel değere en yakın kesme konumunu gösteren adım veya süre belirlenmiş ve daha sonra gerilme analizi için seçilmiştir. Seçilen bu adım/zaman için sadece kesici takım gerilmeleri incelenmiştir. AISI 1050 çeliğinin simülasyonunda, ısı transfer sabiti  $45 \text{ N/s/mm/}^\circ\text{C}$  ve oda sıcaklığı  $20^\circ\text{C}$  olarak seçilmiştir (Yanda ve ark., 2009). Simülasyonlarda talaş oluşum süreci seçilen mesh boyutu ve elman sayısına bağlı olarak oldukça uzundur. Simülasyonların temel amacı, gerçek çözüme mümkün olduğunca yaklaşımdır. Simülasyonlarda kesme uzunluğu bu sebeple  $15 \text{ mm}$ , iş parçası geometrisi ise sadeleştirilmiş model olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda ısı transferinin etkisi dikkate alınarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Deform-3D simülasyonlarında, kesici takım uç kısmında yoğun olacak şekilde takım için minimum eleman boyutu  $0.1 \text{ mm}$  alınarak yaklaşık  $367000$  eleman ve iş parçası ise yaklaşık  $130000$  eleman olarak seçilmiştir. Simülasyonlar sırasında bazı adımlardan elde edilen tipik bir talaş oluşturma süreci ve ağ oluşumu Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Deform-3D programında talaş oluşumu

Takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünme kesme kuvvetleri, sıcaklık, takım-talaş temas uzunluğu gibi pek çok veriyi birinci dereceden etkilemektedir. Zorev tarafından ortaya konulan sürtünme modeli takım-talaş arasındaki ilişkiyi tanımlayan modellerden birisidir. Zorev modelinde, takım-talaş ara yüzeyini yapışma bölgesi ve kayma bölgesi olarak ikiye ayırmıştır, Şekil 6. Yapışma bölgesini çok yüksek gerilmelerin plastik deformasyona sebep olduğu ve takım ucuna yakın bölge olarak, kayma bölgesini ise, yapışma bölgesinden başlayarak takım-talaş temasının kesildiği yere kadar olan mesafe olarak tanımlamıştır. Sürtünme modelinin her iki bölge için farklı olması gerektiği ifade etmişlerdir (Ucun ve ark., 2010).



Şekil 6. Zorev sürtünme modeli (Ucun ve ark., 2010)

Kayma sürtünme modeli takım-talaş ara yüzeyindeki, yapışma uzunluğu boyunca kayma gerilmesinin sabit olduğu ve iş parçasının kayma akma gerilmesi ( $k_{talaş}$ ) ile ilişkili olduğu şeklindedir. Eşitlik 2'de verilen modelde kayma gerilmesi ve kayma akma gerilmesi arasındaki ilişki;

$$\tau = m \cdot k_{talaş} \quad (2)$$

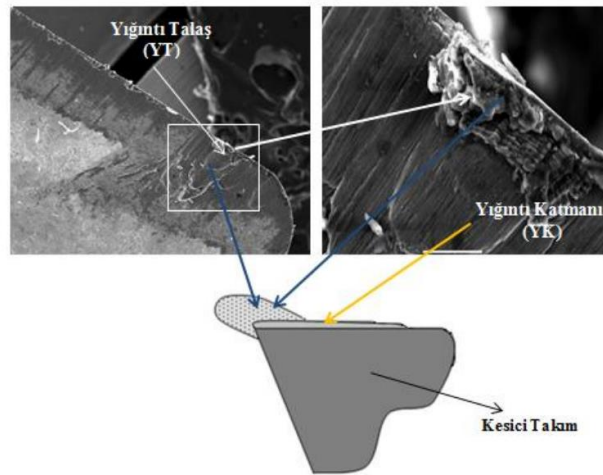
olarak tanımlanır. Buradaki  $\tau$ ,  $m$ ,  $k_{talaş}$  sırasıyla kayma gerilmesi, kayma sürtünme katsayısı ve iş parçası malzemesinin kayma akma gerilmesidir (Ucun ve ark., 2010).

Simülasyonlarda ise Eşitlik 3’de verilen Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır. Coulomb sürtünme modeli ise kayma bölgesinin parabolik olarak değiştiği varsayımına dayanmaktadır ve kayma gerilmesi, sürtünme katsayısı ve normal erilmeye bağlı olarak değişmektedir. Bu modelde kayma bölgesinde oluşan kayma gerilmesi;

$$\tau = \mu\sigma_n \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır. Formüldeki  $\tau$ ,  $\mu$  ve  $\sigma_n$  sırasıyla takım yüzeyindeki kayma gerilmesi, sürtünme katsayısı ve normal gerilmedir (Ucun ve ark., 2010).

Talaş kaldırma işleminde önemli bir diğer faktör ise kesici takım aşınma mekanizmalarıdır. Yapışma aşınma mekanizması özellikle sünek malzemelerin işlenmesinde meydana gelmekte ve talaşın kesici takım yüzeyine eklenmesi şeklinde gerçekleşir (Kendall, 1995). İş parçası malzemesinin Şekil 7’de görüldüğü gibi, takımın talaş yüzeyine fazlaca yapışmasına yığıntı talaş (YT), geniş alana yapışarak oluşturduğu ince katmana ise yığıntı katmanı (YK) denir. Özellikle kesme hızına bağlı olarak kesici takım yüzeyinde oluşan sıcaklık ve gerilmeler takım üzerinde YK ve YT oluşmasına neden olur. Kesici takım üzerindeki bu oluşumların bir nedeni de iş parçasının kimyasal yapısıdır (Gökçe ve Biberici, 2022; Özbek ve Saruhan, 2020).

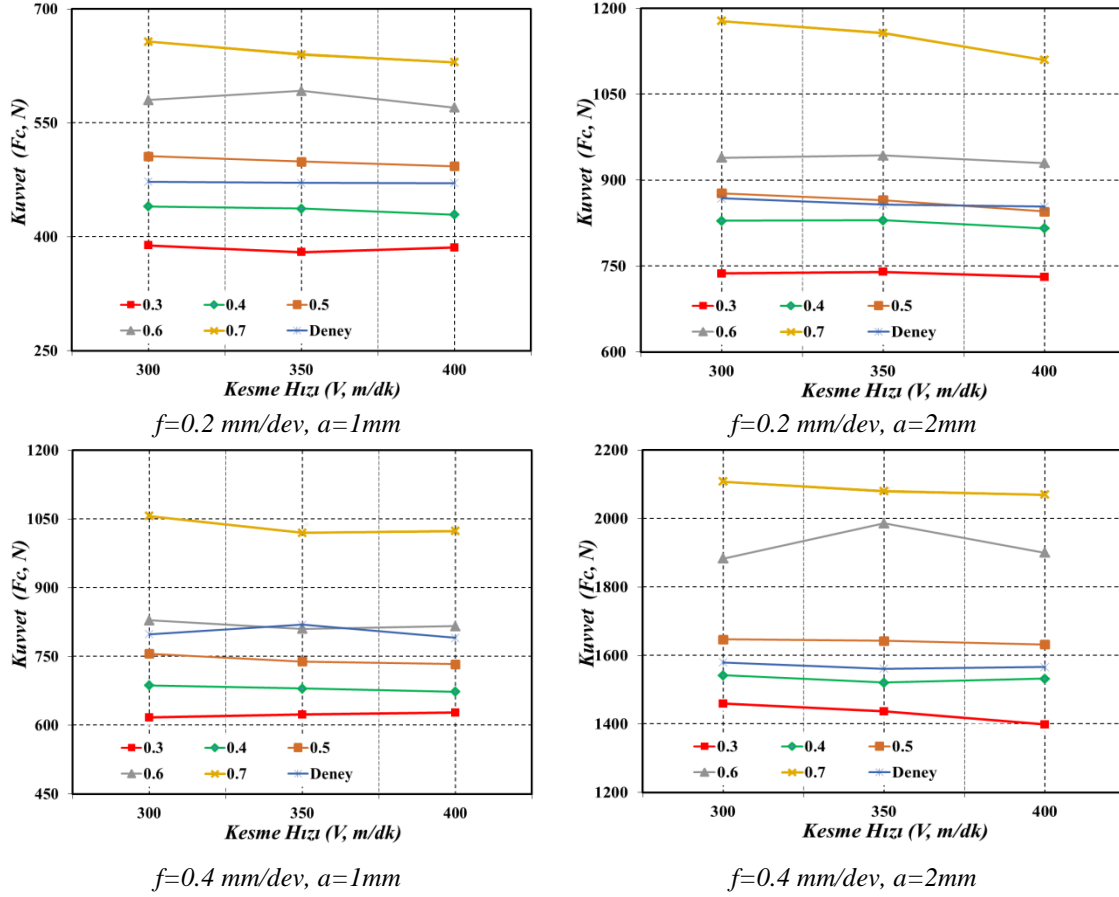


Şekil 7. Takım üzerindeki YT ve YK oluşumu (Sekmen ve ark., 2015)

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Kesme hızına göre esas keme kuvveti ( $F_c$ ) değişimleri Şekil 8’de gösterilmektedir. Grafiklerde dinamometre ile ölçülen ve kesme simülasyonları ile elde edilen kesme kuvvetleri verilmiştir. Beş farklı sürtünme katsayısı, iki farklı ilerleme oranı ve kesme derinliğinde elde edilen sonuçlara göre genel olarak 0.6 ve 0.7 sürtünme katsayılarında elde kesme kuvvetleri deneysel sonuçlardan yüksek 0.3 ve 0.4 sürtünme katsayılarında ise düşüktür. Deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar 0.5 sürtünme katsayısında elde edilmiştir. Analizler sürtünme katsayısının artmasıyla kesme kuvvetlerinin yükseldiği ve düşmesiyle de azaldığı görülmüştür (Özel, 2009). Deneysel sonuçlara en yakın analiz sonuçları sürtünme katsayısının 0.4 ve 0.5 olarak seçildiği değerlerdir. Sürtünme katsayısının 0.4 seçildiği analizlerde kesme kuvvetleri deneysel sonuçlardan %11 daha küçük, sürtünme katsayısının 0.5 seçildiği analizlerde ise deneysel sonuçlardan %4 daha büyük çıktığı görülmüştür. Sürtünme katsayısının 0.3 olduğu analizlerde deneysel sonuçlardan %18 daha küçük, sürtünme katsayısının en yüksek seçildiği 0.7’de ise deneysel sonuçlardan %26 daha büyük değerler çıkmıştır. Sürtünme katsayısının 0.6 ve 0.7 seçildiği değerlerde deneysel sonuçlardan uzaklaşıldığı görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarında görüleceği gibi kesme parametreleri değiştirilmediği halde sürtünme katsayısının 0.3'ten 0.7'ye çıkmasıyla kesme kuvvetlerinde yaklaşık %58'lik bir artış meydana gelmektedir. Bu sonuçlar talaş kaldırma işleminin karakteristiğini belirleyen en önemli unsurlardan birinin sürtünme koşulları olduğunu göstermektedir.



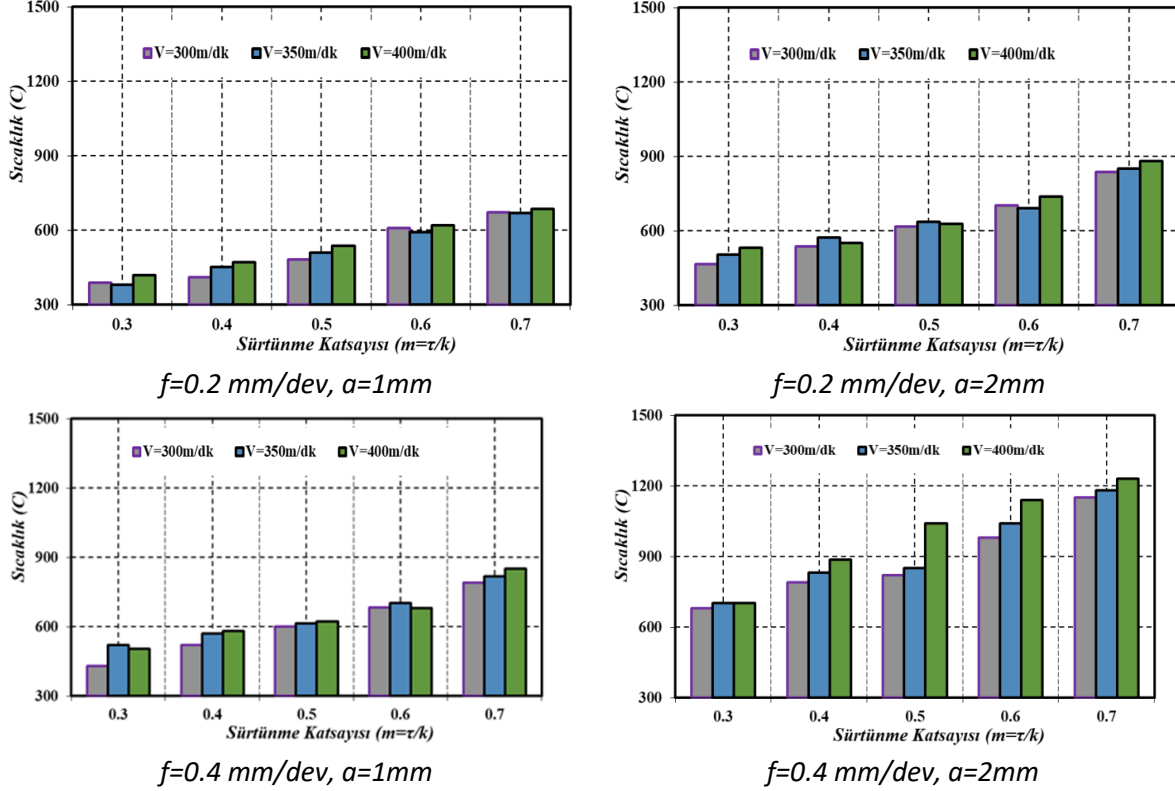
Şekil 8. Sürtünme katsayısı-kesme hızının kesme kuvvetlerine etkisi

Kesme derinliği ve ilerlemenin artmasıyla kesme kuvvetleri de artmıştır. Talaş kesit alanı, ilerleme ve kesme derinliğinin artmasıyla genişler ve genişleyen talaş kesit alanı, talaşı çıkarmak için gereken enerjiyi artırır. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinde artışlar görülmüştür. Deneysel sonuçlara göre 0.2 mm/dev ilerleme oranında, kesme derinliğinin 1 mm'den 2 mm'ye çıkmasıyla kesme kuvvetlerinde %82, 0.4mm/dev ilerleme değerinde ise %95 artış olmuştur. Kesme derinliği 1 mm ve ilerleme oranının 0.2 mm/dev'den 0.4 mm/dev'e çıktığında kesme kuvvetlerinde %70, 2 mm kesme derinliğinde ise bu artış %71 olarak gerçekleşmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme oranının kesme kuvveti üzerindeki etkileri simülasyon sonuçlarında da benzer şekilde görülmüştür. Kesme hızının kesme kuvvetleri ve farklı sürtünme katsayıları üzerine etkisi Şekil 8'de, deneysel ve analiz sonuçlarında kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde bir miktar azalma olduğu gözlenmiştir. Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerine etkisi, sürtünme katsayısı ve ilerleme oranı ile kıyaslandığında oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 9'da deneysel parametreler referans alınarak Deform-3D simülasyon programında farklı sürtünme katsayılarında elde edilen kesici takım sıcaklıkları verilmiştir. Sürtünme katsayısı arttıkça kesici takım sıcaklığının da arttığı gözlenmiştir. 1 mm kesme derinliğinde sürtünme katsayısı 0.3'ten 0.4'e çıktığında kesici takım sıcaklığı, 0.2 ve 0.4 mm/dev ilerleme oranında sırasıyla %12 ve %14, 0.4'ten 0.5'e çıktığında %14 ve %9, 0.5'den 0.6'ya çıktığında %18 ve %12, 0.6'dan 0.7'e çıktığında ise %11 ve %18'lik bir artış gerçekleşmiştir. 2 mm kesme derinliğinde de yine aynı şekilde benzer bir



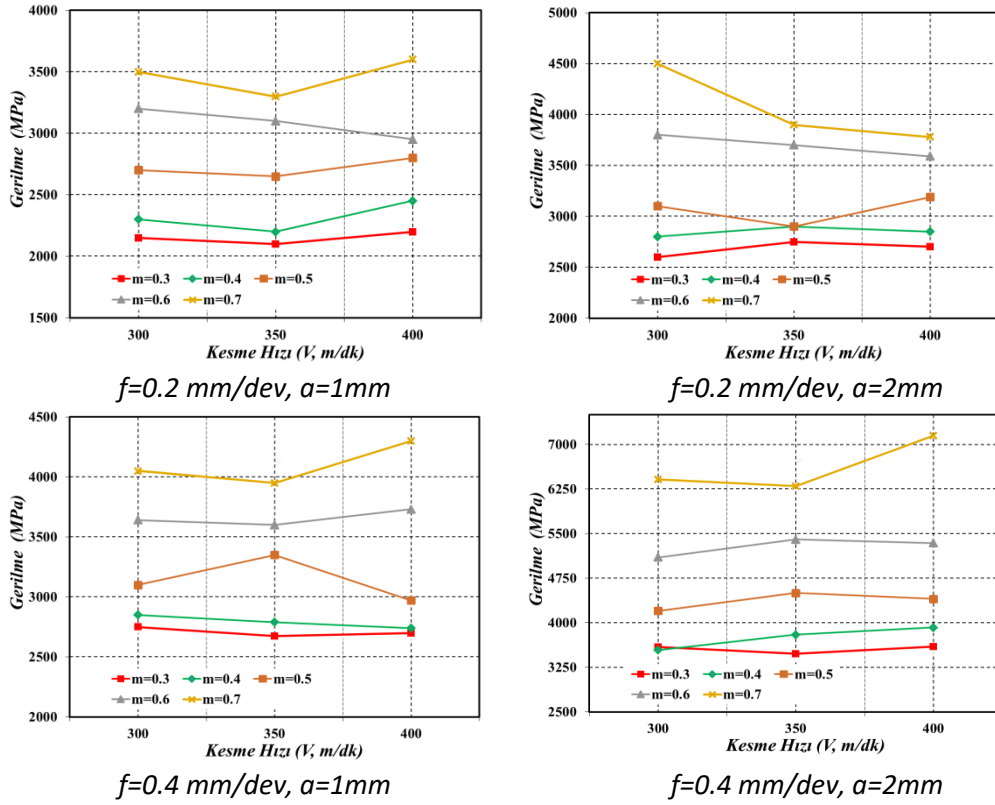
artış eğilimi gözlenmiştir. En yüksek kesici takım sıcaklığı sürtünme katsayısının 0.7 seçildiği 400 m/dk kesme hızı ve 2 mm kesme derinliğinde 1290°C olarak gerçekleşirken, en düşük kesici takım sıcaklığı sürtünme katsayısının 0.3 seçildiği 350 m/dk kesme hızı ve 1 mm kesme derinliğinde 380°C olarak gerçekleşmiştir.



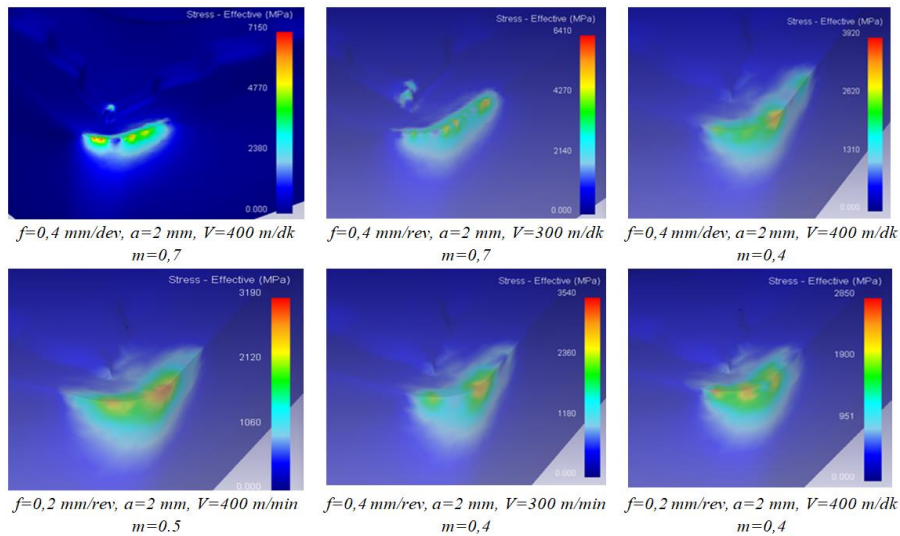
Şekil 9. Sürtünme katsayısının kesici takım sıcaklığı üzerine etkisi

Kesme hızının kesici takım uç sıcaklığı üzerine etkisi incelendiğinde kesme hızının artmasıyla genel olarak sıcaklığında arttığı görülmüştür. Bu artış sürtünme katsayısı kadar etkili değildir. Simülasyon sonuçları kesme işleminde seçilmiş bir bölgenin ortalamasıdır yani kısmen karardır. Kesme simülasyonları tüm deneyler için aynı prosedür kullanılarak yapılmasına rağmen, bazı deneyler için simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar birbirine çok yakındır. Ancak seçilen bölgenin konumu nedeniyle bazı deneyler için farklı sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın bir başka nedeni de iş parçası malzemesi için seçilen malzeme modelinin etkisi olarak düşünülebilir. Ancak simülasyonlarla 0.4 ve 0.5 sürtünme katsayılarında elde edilen  $F_c$  esas kesme kuvveti sonuçları ile kesme deneylerinde ölçülen deneysel sonuçlarının genellikle birbirine paralel olduğu söylenebilir.

Sürtünme katsayısının efektif gerilmeye (von Mises gerilmesi,  $SE_{QV}$ ) etkisi Şekil 10'da verilmiştir.  $SE_{QV}$ , kesici takım kesme performansını değerlendirmek, olası aşınma ve hasar durumlarının yerlerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. En yüksek  $SE_{QV}$  gerilimi sürtünme katsayısının 0.7 olduğu 400 m/dk, 0.4 mm/dev ilerleme ve 2 mm kesme derinliğinde 7150 MPa olarak gerçekleşmiştir. Kesme kuvvetlerinde deneysel sonuçlara en yakın sonuçların elde edildiği, sürtünme katsayısının 0.4 ve 0.5 olduğu değerlerde  $SE_{QV}$  gerilmeleri 2200 MPa ile 4500 MPa aralığında oluşmuştur. Gerilmelerin sürtünme katsayısı, genişleyen talaş kesit alanı nedeniyle ilerleme ve kesme derinliğinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Kesme hızı değişiminin ise gerilmeler üzerinde bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Şekil 10. Sürtünme katsayısının  $S_{EQV}$  gerilmelerine etkisi

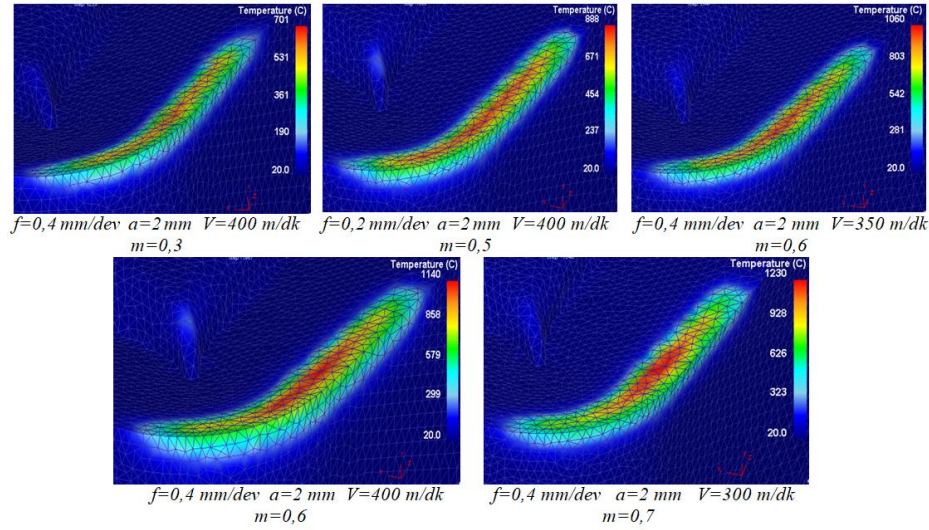
Şekil 11'e göre efektif gerilmeler genellikle kesici takım ucunda kesici kenar çevresinde, kesme yüzeyi veya talaş yüzeyi üzerinde yoğunlaşmakta ve kesme derinliği boyunca da etkisini göstermektedir. Kesici takım üzerindeki gerilmeler, özellikle olası takım aşınması veya hasarının kesici takım burun yarıçapı boyunca keskin kenarlarda aşınma veya keskinliğini yitirmesi şeklinde olabileceği düşünülmektedir. Kesici takım üzerinde oluşabilecek bu körleşme kesme işlemini ve iş parçası yüzey kalitesini olumsuz etkileyecektir. Kesici takım ucunda YK veya YT oluşmasının nedeni, kesme hızı ve iş parçasının kimyasal yapısına bağlı olarak talaş kaldırma esnasında takım-talaş arasındaki sürtünmenin etkisiyle oluşan kesici takımdaki sıcaklık ve gerilmelerdir.



Şekil 11. Kesici takım gerilmeleri

Simülasyonlarda kesici takımın kesme performansını değerlendirmek ve olası aşınma yerlerini belirtmek açısından takım sıcaklık oluşum noktaları üzerinde durulmuştur. Kesici takım üzerindeki

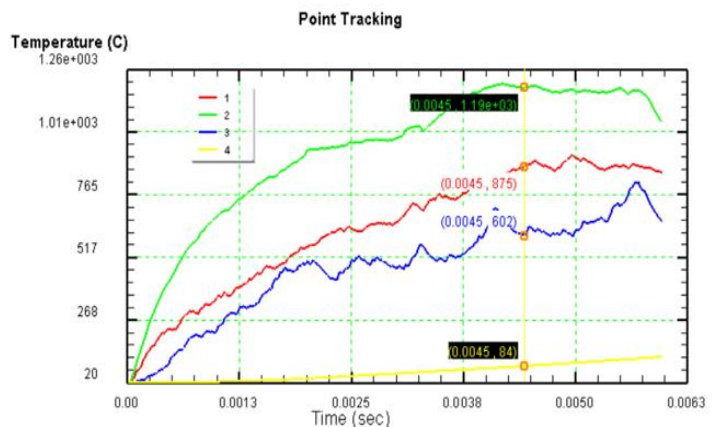
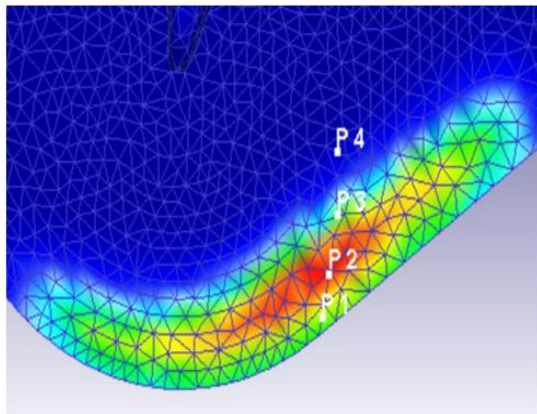
sıcaklık dağılımları Şekil 12’de verilmiştir. Bilindiği gibi kesici takım üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları aynı zamanda takımda meydana gelebilecek olası hasar durumlarını tahmin etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 12. Kesici takım sıcaklık dağılımları

Sürtünme katsayısı ve kesme hızı sıcaklık dağılımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Sıcaklıklar kesici takım burun yarıçapı boyunca ve hemen altında olduğu, talaş yüzeyi ve esas kesme kenarında, kesme derinliği mesafesince de etkili olduğu gözlenmektedir. Sürtünme katsayısının artmasıyla maksimum sıcaklık bölgelerinin talaş yüzeyi ve esas kesme kenarı boyunca arttığı gözlenmiştir. En yüksek takım sıcaklığı takım-talaş temas alanının uzamasına bağlı olarak takım uç burun yarıçapı ve esas kesme kenarı boyunca uzanarak 0.2 ve 1 mm derinlikte talaş akışının ve sürtünmenin olduğu bölgelerde maksimum düzeye ulaştığı görülmektedir. Takım aşınması yönüyle ele alındığında sıcaklığın maksimum olduğu talaş yüzeylerinde krater aşınmasının oluşabileceğini sürtünme katsayısının yüksek olduğu (0.6 ve 0.7) analizlerden tahmin edilebilmektedir.

Şekil 13’te sürtünme katsayısı 0.7 ve 300 m/dk kesme hızı, 0.4 mm/dev ilerleme ve 2 mm kesme derinliğinde yapılan analizde kesici takımın talaş yüzeyi ve uç yarıçapının farklı noktalarında oluşan 1230°C’lik sıcaklık dağılımı verilmiştir. P1 noktası takım ucuna daha yakın olmasına rağmen maksimum sıcaklık P2 noktası bölgesinde oluşmuş ve sıcaklık bu bölgede kesme süresince diğer tanımlanan noktalara göre daha hızlı bir şekilde yükselmiştir. Diğer noktadaki sıcaklık yükselmesi ise daha hafif eğimli seyrettiği görülmektedir.



Şekil 13. Kesici takımın farklı noktalarındaki sıcaklık dağılımları

## SONUÇ

Bu çalışmada, AISI 1050 çeliğinin işlenmesinde sürtünme katsayısı, kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Deform-3D programı ile çeşitli kesme simülasyonları yapılarak sürtünme katsayısının kesme kuvvetleri, sıcaklık, kesici takım gerilmeleri ve takım aşınmasına etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Simülasyon çalışmalarında sürtünme katsayısının 0.4 ve 0.5 olarak seçildiği değerlerde deneysel kesme kuvveti sonuçlarına daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- Kesici takım gerilmelerinin genellikle takım uç yarıçapı boyunca, talaş yüzeyi ve yan yüzeyde yoğunlaştığı görülmüştür.
- Kesici takım sıcaklıkları sürtünme katsayısının yüksek seçildiği değerlerde yaklaşık 1230°C'ye kadar çıkmıştır. Sıcaklıkların kesici takım uç yarıçapı ve esas kesme kenarında kesme derinliği boyunca etkili olduğu, kesme kenarından 0.2 mm ila 1 mm uzaklıkta talaş yüzeyinde maksimum düzeye ulaştığı görülmektedir.
- Olası takım aşınma noktalarının takım uç yarıçapı, esas kesme kenarı ve talaş yüzeyi olduğu, aşınma tiplerinin ise talaş yüzeyinde krater aşınması, yan yüzey aşınması ve çentik aşınma şeklinde olabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışmada uygulanan simülasyon analizleri delme, frezeleme gibi diğer talaşlı imalat işlemlerinde, mühendislik malzemelerine uygulanabilmektedir. Ayrıca kesici takım tasarımı, kesme performansının iyileştirilmesi ve optimum kesme parametrelerinin seçimine ilişkin değerlendirmeler kolaylıkla yapılabilmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi (Proje Kodu: 07/2010-56) ve Deform yazılım lisansı sağlayan Türkiye distribütörü FİGES'e teşekkür ederim.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Aslan D, Budak E, 2014. Semi analytical force model for grinding operations. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Procedia CIRP, 14: 7-12.
- Attanasio A, Ceretti E, Rizzuti S, Umbrello D, Micari F, 2008. 3D finite element analysis of tool wear in machining. CIRP Annals -Manufacturing Technology, 57: 61-64.
- Attanasio A, Faini F, Outeiro JC, 2017. FEM simulation of tool wear in drilling. Procedia Cirp, 58: 440-444.
- Binder M, Klocke F, Doebbeler B, 2017. An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting. Simulation Modelling Practice and Theory, 70: 65-82.
- Borsos B, Csörgö A, Hidas A, Kotnyek B, Szabo A, Kossa A, Stepan G, 2017. Two-Dimensional Finite Element Analysis of Turning Processes Periodica Polytech. Mech. Eng., 61: 44-54.
- Budak E, Ozlu E, 2008. Development of a thermomechanical cutting process model for machining process simulations. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57 (1): 97-100.
- Ezilarasan C, Velayudham A, 2017. Theoretical predictions and experimental validations on machining the Nimonic C-263 super alloy. Simulation Modelling Practice and Theory, 40: 192-207.



- Gök K., 2015. Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations. *Measurement*, 75: 57-68.
- Gökçe H, Biberçi M. A, 2022. Investigation of thrust force, drill bit temperature and burr height in the drilling of aluminum alloy used in ammunition wing drive systems. *Experimental Techniques*, 46(4), 691-705.
- Kendall LA, 1995. Friction and Wear of Cutting Tools and Cutting Tool Material. *ASM Metal Handbook, Friction, Lubrication and Wear vol. 18*, ASM International, Ohio.
- Kherraf A, Tamerabet Y, Brioua M, Benbouta R, 2019. Chip formation process using finite element simulation “influence of cutting speed variation” *J. Solid Mech.* 4: pp. 854-861.
- Küçüktürk G, 2013. Modeling and analyzing the effects of experimentally determined torque and thrust force on cutting tool according to drilling parameters. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 227: 84-95.
- Kurt A, 2009. Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 36 (6): 9645-9657.
- Kurt, A, 2006 . Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Matematiksel Modellerin Oluşturulması. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4: 25-30, 44-53, 108-112.
- Maranhao C, Davim J P, 2012. The role of flow stress and friction coefficient in fem analysis of machining. *Rev. Adv . Mater. Sci.*, 30: 184-188.
- Özbek O, Saruhan H, 2020. The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 2762-2772.
- Özel T, 2009. Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling. *J. Mater. Pro. Techno*, 209 (11): 5167-5177.
- Sekmen M, Günay M, Şeker U, 2015. Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi. *Politeknik dergisi*, 18(3): 141-148.
- Soldani X, Moufki A, Molinari A, Budak E, Özlü E, 2008. High speed machining of AISI 1050 Steel: modelling and experimental. *Int. J. Mater. Form.*, 1: 1439-1441.
- Tang SH, Kong YM, Sapuan SM, Samin R, Sulaiman S, 2006. Design and thermal analysis of plastic injection mould. *J. Mater. Pro. Techno*, 171(2): 259-267.
- Ucun İ, Aslantas K, 2011. Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools. *Int J Adv Manuf Technol*, 54: 899-910.
- Ucun İ, Aslantaş K, Apaydın D, 2010. Çok Kaplamalı Kesici Takımla Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 7(1): 69-82.
- Xiong Y, Wang W, Jiang R, Lin K, Shao M, 2018. Mechanisms and FEM simulation of chip formation in orthogonal cutting in-situ TiB<sub>2</sub>/7050Al MMC. *Materials*, 11(4); 606.
- Yanda H, Ghani JA, Hassan C, 2009. Effect of rake and clearance angles on the wear of carbide cutting tool. *Department of Mechanical and Materials Engineering*, 4: 7-13.
- Yıldız A, Kurt A, Yağmur S, 2020. Finite element simulation of drilling operation and theoretical analysis of drill stresses with the deform-3D. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104: 102153.