

# SÜRTÜNME MODELLERİNİN VE KATSAYILARININ TALAŞLI İMALATIN SONLU ELEMANLAR BENZETİMİNE ETKİSİ\*\*

**Bülent YARDIMOĞLU\***

*Doç. Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Müh. Fak. Makine Müh. Böl. İzmir  
bulentyardimoglu@iyte.edu.tr*

**Cenk KILIÇASLAN**

*İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Müh.  
Fak. Makine Müh. Böl. İzmir  
cenkkilicaslan@iyte.edu.tr*

## ÖZET

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan talaşlı imalat benzetimlerinde elde edilen sonuçlar en çok iş parçasının anlık akma gerilmesiyle takım-talaş arasındaki sürtünme cinsine ve katsayısına bağlıdır. İş parçasının anlık akma gerilmesi için yüksek sıcaklık ve yüksek deformasyon hızlarında yapılan testleriyle yaklaşık değerler elde edilebilmektedir. Kesme işleminde talaş yüzeyinde oluşan sürtünme şekli ve katsayısı, deney yetersizliklerinden dolayı tam olarak belirlenemediği için, benzetimlerde de kullanılacak sürtünme modeli ve katsayıları da belirsizdir. Bu çalışmanın amacı; Kayma, Coulomb sürtünme modellerinin ve bunların birleşik etkisinin; kesme kuvvetlerine, talaş kalınlığına, talaş ile takım arasındaki temas uzunluğuna ve kayma açısına etkilerini incelemektir. Benzetimlerde; takım rijit, iş parçası ise plastik olarak modellenmiştir. Talaş oluşumu için ayrışma kıstası kullanılmamıştır. Talaş oluşumu, takımın ilerlemesine göre iş parçasının sonlu elemanlar ağının sürekli yenilenmesiyle sağlanmıştır. Yapılan çalışmada, benzetim sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Dik metal kesme, talaşlı imalat, sonlu elemanlar, benzetim, sürtünme

## The Effects of Friction Models and Friction Coefficients on Finite Element Simulations of Machining

### ABSTRACT

The results obtained from finite element simulations of machining are depend mostly on flow stress of workpiece material, type and coefficient of friction between tool and chip. The flow stress of workpiece material is determined approximately by using experiments which are conducted at high temperature, high strain and high strain rate. Type and coefficient of friction between rake face and chip used in computer simulations during the cutting process is not obvious due to lack of experimental technique. The purpose of this study is to analyze the effects of Shear, Coulomb and a Hybrid model which consist of Shear and Coulomb models simultaneously on cutting forces, chip thickness, contact length between chip and rake face and shear angle. In this simulations, while the tool is modelled as rigid body, the workpiece is modelled as fully plastic. Chip separation criteria is not used in these simulations. Chip generation is provided by using remeshing technique depending on the motion of cutting tool. It is seen that simulation results and experimental results are in good agreement.

**Keywords :** Orthogonal metal cutting, machining, finite element analysis, simulation, friction

\* İletişim yazarı

\*\* Bu makale, 17-18 Ekim 2009 tarihlerinde TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından Konya'da düzenlenen V. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi'nde bildiri olarak sunulmuştur.

## GİRİŞ

**T**alaşlı imalat (tornalama, frezeleme, delme, vb.) günümüz endüstrisinde en çok kullanılan imalat yöntemlerinin başında gelmekte olup, teknik-ekonomik olarak da büyük öneme sahiptir ve hâlen bir araştırma konusu niteliğini korumaktadır [1]. Yüksek deformasyon altındaki malzeme davranışı ve takım ile iş parçası arasındaki sürtünme şekli çok karmaşık bir yapıdadır ve belirlenmesi günümüzde kullanılan deneysel yöntemleriyle oldukça zordur [2]. Ayrıca geliştirilen basitleştirilmiş analitik modeller de bu kadar karmaşık süreci tam olarak yansıtamamaktadır.

Yukarıdaki açıklanan nedenlerden dolayı sayısal modeller önem kazanmaktadır. Örneğin, deneysel olarak belirlenmesi zor olan deformasyon, deformasyon hızı, takım ve iş parçasındaki oluşan gerilmeler vb. gibi değişkenler, sayısal modellerle yaklaşık olarak belirlenebilmektedir. Ayrıca, sayısal modeller kullanılarak takım geometrisi, takım ve takım üzerinde kullanılacak kaplama malzemesinin seçimi, en uygun kesme koşulları ve diğer önemli parametreler, herhangi bir deneye gerek kalmadan belirlenebilmektedir. Ancak sayısal modeller hâlen kesin sonuçlar verememektedir. Sonuçları etkileyen önemli parametreler aşağıda verilmiştir [3]:

- Talaşlı imalatta çok yüksek deformasyon hızları ve yüksek sıcaklıklar meydana gelmektedir. Sayısal analizlerde kullanılacak olan malzeme modeli yüksek deformasyondaki ve yüksek sıcaklıklardaki malzeme davranışını en iyi şekilde göstermek zorundadır.
- Takım ile iş parçası arasındaki sürtünme koşulları karmaşık bir yapıdadır. Talaşlı imalat işleminde takım ile iş parçası arasında yüksek gerilmeler söz konusu olduğundan sürtünme özellikleri önemli değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle sürtünmenin doğru modellenmesi kritik önem taşımaktadır.
- Sayısal modellemede kullanılan ayrışma kıstasları fiziksel sonuçları doğrudan etkilediğinden uygun kıstaslar kullanılmalıdır.
- Takımın ve iş parçasının sıcaklık dağılımları benzetim sonuçlarında etkili olmaktadır. Bu nedenle sayısal modelde uygun ısıl katsayıların kullanılması gerekmektedir.

Literatüre bakıldığında talaşlı imalatta meydana gelen sürtünmenin ve sonlu elemanlar benzetimlerinde sürtünme modellerinin ve katsayılarının etkilerinin araştırıldığı birçok yayın bulunmaktadır. Yang ve Liu [2] benzetimlerinde; önerdiği normal/sürtünme gerilmesi polinomu ile takımın talaş yüzeyindeki gerilme değişimine ve kesme kuvvetlerine bağlı olan ortalama sürtünme katsayılarını kullanarak sürtünmenin etkilerini araştırmışlardır. Filice ve ark. [3] beş farklı sürtünme modelinin ve sürtünme katsayılarının sonlu

elemanlar benzetimine olan etkilerini, sürtünme modeli ile takım-iş parçası arasındaki sıcaklık değişim katsayısının kesme sırasında oluşan sıcaklıklara olan etkilerini incelemişlerdir. Zorev [4] yaptığı deneylerde; normal gerilmenin takım ucunda en yüksek değerde bulunduğunu, takım ucundan uzaklaştıkça eğrisel olarak sıfıra düştüğünü, sürtünme gerilmesinin ise takım ucundan başlayarak belirli bir uzaklığa kadar sabit kaldığını ve daha sonra eğrisel olarak sıfıra düştüğünü belirlenmiştir. Özel [5] sürtünme modellerinin sonlu elemanlar benzetimine olan etkilerini, kesme parametrelerini ve takım ile iş parçası arasında oluşan sıcaklıkları deneysel verilerle karşılaştırarak incelemiştir. Childs [6], talaşlı imalatta kullanılan sürtünme modellerinin, yağlamanın, ısıl yumuşamanın sürtünmeye olan etkilerini incelemiştir. Haglund [7] sürtünme modellerinin sonlu elemanlar benzetimine etkisini Rastgele Lagrangian-Eulerian (ALE) metodu kullanılarak incelemiştir.

Bu çalışmada; Kayma, Coulomb sürtünme modellerinin ve sürtünme katsayılarının kesme kuvvetlerine, talaş kalınlığına, kayma açısına ve temas uzunluğuna olan etkileri literatürde mevcut deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmiş daha sonra Kayma ve Coulomb sürtünme modellerinin birleşimi esasına dayalı olarak yapılan model için benzetim sonuçları sunulmuştur.

## METAL KESMEDE SÜRTÜNME

Talaşlı imalata yönelik ilk yapılan araştırmalarda takım ile iş parçası arasındaki sürtünmenin Eşitlik (1)'de gösterilen Coulomb Kanunu'na bağlı kaldığı kabul edilmiştir.

$$\tau = \mu \cdot \sigma \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $\tau$  sürtünme gerilmesi,  $\mu$  sabit sürtünme katsayısı ve  $\sigma$  normal gerilmedir.

Bu kanuna göre sürtünme gerilmesi, normal gerilmeye sürtünme katsayısıyla bağlıdır. Düşük kesme hızlarında Coulomb sürtünme modeli kullanılabilir. Ancak yüksek kesme hızlarında yüksek sıcaklıklar ve yüksek normal gerilmeler oluşur [8]. Dolayısıyla sıcaklık ve normal gerilme dağılımı sürtünme davranışında etkili olduğundan sürtünme katsayısının sabit alınması ve bu modelin kullanılması uygun değildir [9].

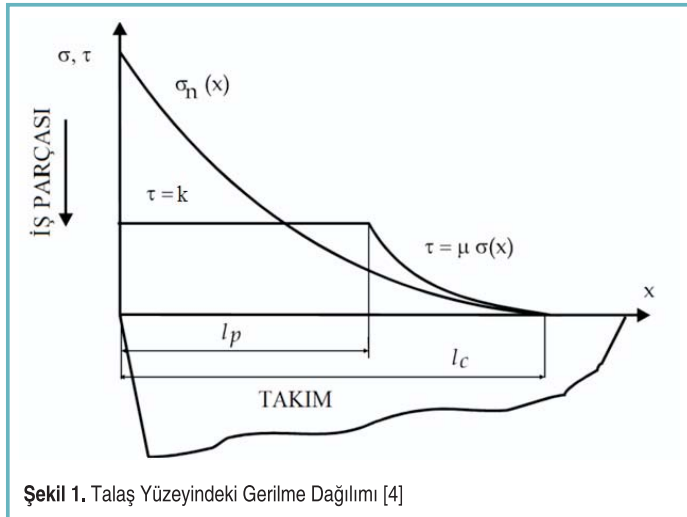
Diğer bir sürtünme modeli Eşitlik (2)'de gösterilen sabit kayma modelidir. Bu modelde takım ile talaş arasındaki temas uzunluğu boyunca sabit sürtünme-kayma gerilmesi oluştuğu varsayımı yapılır.

$$\tau = m \cdot k \quad (2)$$

Bu eşitlikte  $\tau$  sürtünme gerilmesi,  $m$  sürtünme faktörü,  $k$  iş parçası malzemesinin kesme-akma gerilme değeridir. Bu Kanun'a göre sürtünme gerilmesi, iş parçasının kayma-akma gerilmesi değerine sürtünme faktörüyle bağlıdır.

Zorev [4] tarafından yapılan araştırmalarda normal ve kayma-akma gerilmelerinin takımın talaş yüzeği üzerindeki dağılımı belirlenmiş olup; bu dağılım Şekil 1'de gösterilmiştir. Zorev'e göre takımın uç kısmındaki normal gerilme yüksek bir değerde olduğundan, talaş takımın yüzeğine yapışır. Bu nedenle bu yüzeğe "yapışma" yüzeği denir. Ancak normal gerilme, takımın ucundan uzaklaştıka düşme eğilimi gösterir. Bir noktadan sonra talaş, normal gerilmenin düşmesi nedeniyle yapışmayı bırakarak, takımın talaş yüzeğinde kaymaya başlar. Bu sebeple bu bölgeye "kayma" bölgesi adı verilir. Sürtünme gerilmesi ise yapışma bölgesi boyunca iş parçasının kayma-akma gerilmesi değerine eşitir ve sabittir. Kayma bölgesine geldiğinde düşme eğilimi gösterir. Yapışma ve kayma bölgeleri Eşitlik (3)'de belirtildiği Şekilde ifade edilirler;

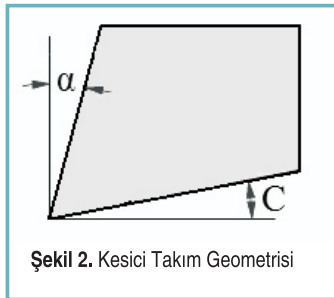
$$\begin{aligned} \tau \geq k & \text{ ise } \tau(x) = k & 0 < x \leq l_p \\ \tau < k & \text{ ise } \tau(x) = \mu \sigma_n(x) & l_p < x \leq l_c \end{aligned} \quad (3)$$



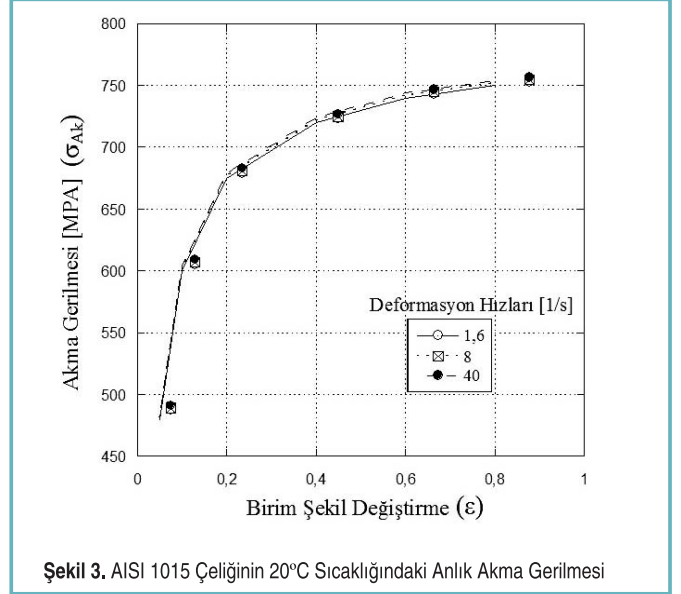
Şekil 1. Talaş Yüzeğindeki Gerilme Dağılımı [4]

## SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada takım malzemesi Bil [10]'in çalışmasında olduğu gibi kaplamasız Tungsten Karbür (WC) olarak seçilmiş ve rijit olarak modellenmiştir. Takımın talaş yüzeği açısı (α) 20°, boşluk açısı (c) 5° olup, bu açılar Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kesici Takım Geometrisi

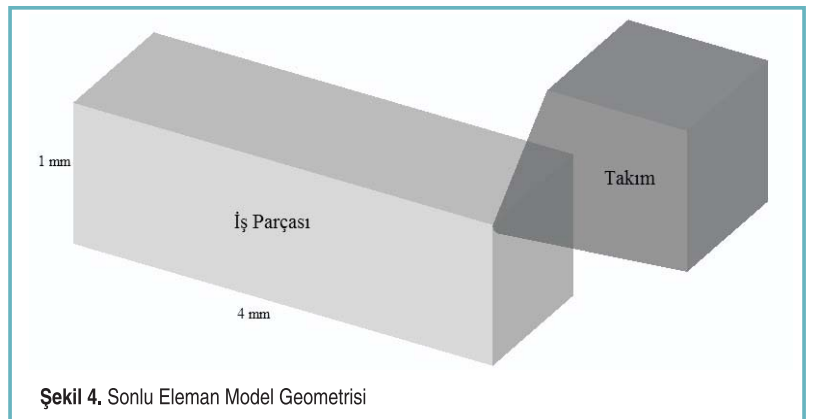


Şekil 3. AISI 1015 Çeliğinin 20°C Sıcaklığındaki Anlık Akma Gerilmesi

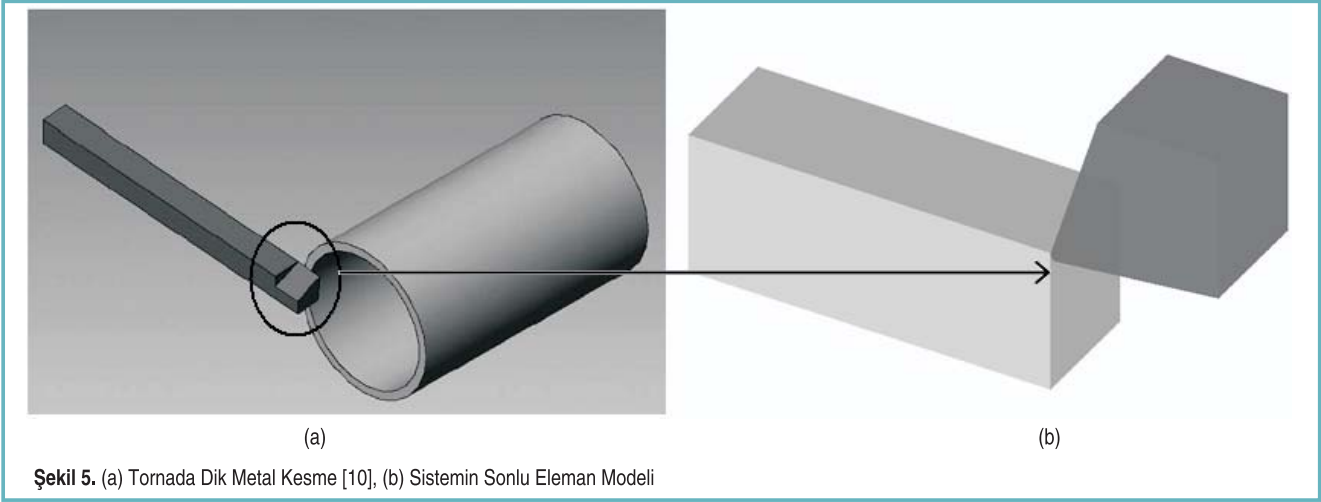
Takımın sonlu eleman ağı 1014 elemandan ve 1073 düğümden oluşmaktadır.

İş parçası malzemesi AISI 1015 çeliğidir ve sadece plastik malzeme davranışını gösterecek Şekilde modellenmiştir. Malzemenin anlık akma gerilmesi değerleri, ε=0,05-0,8 birim Şekil değiştirme, ε̇=1,6, 8, 40 s<sup>-1</sup> değormasyon hızları ve T=20-1200°C sıcaklık aralıklarında verilmiştir. İş parçasının 20°C sıcaklığındaki akma gerilmesi Şekil 3'te gösterilmiştir. Malzemenin hiç elastik değormasyona uğramadan deforme olduğu kabulü yapılmıştır. Böylece hesaplama süresinin çok uzun olmasının önüne geçilmiştir. İş parçasının sonlu eleman ağı 3171 elemandan ve 3276 düğümden oluşmaktadır.

Benzetimlerde Coulomb, Kayma ve Kayma-Coulomb olarak üç farklı sürtünme modeli ve farklı sürtünme katsayıları kullanılmıştır. Talaş oluşumu için herhangi bir ayırma kistası kullanılmamıştır. Talaş oluşumunun, takımın ilerlemesine göre iş parçasındaki sonlu elemanlar ağının sürekli yenilenmesiyle meydana gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 4. Sonlu Eleman Model Geometrisi



Şekil 5. (a) Tornada Dik Metal Kesme [10], (b) Sistemin Sonlu Eleman Modeli

Sonlu elemanlar model geometrisi Şekil 4'te verilmiş olup, iş parçasının modellenen kısmı 1 mm yüksekliğinde ve 4 mm uzunluğundadır.

Bil [10]'ün çalışmasında yapılan deneyde dış çapı 56 mm, iç çapı 53,1 mm olan içi boş bir silindir Şekil 5-a'da gösterildiği gibi, dik tormalama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyde kesme derinliği, ilerleme değerinden çok daha büyük olarak alınmış, böylece sonlu elemanlar modelinde düzlem şekil değiştirme varsayımının kullanılabilir olması sağlanmıştır.

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{l - r_c \sin \alpha} \quad (4)$$

Bu eşitlikte;  $\phi$  kayma açısı;  $r_c$  talaş kalınlığı oranı= $t/t_c$ ,  $t$  deforme olmamış talaş kalınlığı,  $t_c$  deforme olmuş talaş kalınlığı,  $\alpha$  takımın talaş yüzey açısıdır.

Kayma sürtünme modelinin kullanıldığı benzetimlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde kesme kuvveti için en iyi değer  $m=0,2$  de elde edilmiştir. İlerleme kuvveti ve oluşan talaş kalınlığı için en iyi değer ise  $m=0,5$ 'de elde edilmiştir.

Tablo 1. Deneysel Sonuçlar [10]

Kesme Kuvveti $F_c$ [N]	İlerleme Kuvveti $F_t$ [N]	Talaş Kalınlığı $t_c$ [mm]	Temas Uzunluğu $L_c$ [mm]	Kayma Açısı $\phi$ [°]
62	55	0,1	0,85	29,54

Kesme işleminde, kesme hızı  $V_c=22$  m/dak, kesme derinliği 1,45 mm, ilerleme hızı  $f=0,05$  mm/devir olarak kullanılmıştır. Oluşturulan modelde bu kesme şartları kullanılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

## KAYMA VE COULOMB SÜRTÜNME MODELLERİNİN ANALİZİ

Dik metal kesme benzetimi Tablo 2'de gösterilen iki farklı sürtünme modeli ve dört farklı sürtünme katsayısı kullanılarak yapılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için sürtünme katsayıları aynı değerde alınmıştır.

Kayma açısının sonlu elemanlar benzetimi sonucunda bulunan ve analitik olarak hesaplanan değerleri Tablo 3-5'te verilmiş olup, analitik hesaplamada Eşitlik (4) [11] kullanılmıştır.

Tablo 2. Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Sürtünme Modelleri ve Katsayıları

Sürtünme Tipi	Sürtünme Katsayısı
Kayma	0,2, 0,3, 0,4, 0,5
Coulomb	0,2, 0,3, 0,4, 0,5

Tablo 3. Kayma Sürtünme Modeli İçin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sürtünme Katsayısı	$F_c$ [N]	$F_t$ [N]	$t_c$ [mm]	$L_c$ [mm]	$\phi$ [°]	$\phi_{Analitik}$ [°]
$m=0,2$	73	42	0,082	0,07	27,82	35,9
$m=0,3$	75	43	0,088	0,077	27	33,63
$m=0,4$	78	43	0,092	0,082	26,4	32,34
$m=0,5$	82	45	0,1	0,084	26	29,5
Deneysel [10]	62	55	0,1	0,85	29,54	

Tablo 4. Coulomb Sürtünme Modeli İçin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sürtünme Katsayısı	$F_c$ [N]	$F_t$ [N]	$t_c$ [mm]	$L_c$ [mm]	$\theta$ [°]	$\theta_{\text{Analitik}}$ [°]
$\mu=0,2$	83	42	0,1	0,09	25	29,68
$\mu=0,3$	87	44	0,107	0,107	24,4	30,33
$\mu=0,4$	91	46	0,11	0,11	23,6	26,84
$\mu=0,5$	92	47	0,11	0,12	23,3	26,84
DeneySEL [10]	62	55	0,1	0,85	29,54	

Benzetimlerde hata oranı en yüksek olarak bulunan değişken talaş-takım arasındaki temas uzunluğudur ve yapılan tüm benzetimlerde kabul edilebilir hata oranlarında bulunamamıştır. Kayma açısı sonuçları arasında en iyi değerler sonlu elemanlar modeliyle elde edilen değerlerdir. Analitik formülasyonla elde edilen kayma açısı sonuçlarındaki hata daha fazladır.

Coulomb sürtünme modelinin kullanıldığı benzetimlerden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Kesme kuvveti için deneysel veriye en yakın değer  $\mu=0,2$ 'de elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında sürtünme katsayısı değeri arttıkça kesme kuvveti değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. İlerleme kuvveti için deneysel veriye en yakın değer  $\mu=0,5$ 'de elde edilmiştir.

Oluşan talaş kalınlığı en iyi  $\mu=0,2$  değerinde meydana gelmiştir. Diğer sürtünme katsayılarıyla hesaplanan talaş kalınlıkları da kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca  $\mu=0,2$  sürtünme katsayısının kullanıldığı benzetimden elde edilen kayma açısı deneysel sonuca en yakındır. Bu sürtünme modelinde de temas uzunlukları kabul edilebilir hata oranlarında hesaplanamamıştır.

## KAYMA VE COULOMB SÜRTÜNME MODELLERİNİN BİLEŞİK ETKİSİNİN ANALİZİ

Shatla'ya [12] göre; Şekil 4'te gösterilen kayma bölgesinin uzunluğu ( $l_p$ ), deforme olmamış talaş kalınlığının iki katına eşit alınmalıdır. Ancak bu yaklaşım uygulandığında kayma bölgesinin uzunluğu, benzetimlerde meydana gelen talaş-takım arasındaki temas uzunluğundan büyük olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada kayma bölgesinin uzunluğu Özel [5]'in çalışmasında olduğu gibi deforme olmamış talaş kalınlığına eşit alınmıştır. Birleşik analiz için kullanılan Kayma ve Coulomb sürtünme katsayıları Bölüm 4'te yapılan analizler göz önüne alınarak seçilmiştir.

Kayma ve Coulomb sürtünme modellerinin birlikte kullanıldığı benzetimlerden elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Kesme kuvveti, talaş kalınlığı ve temas uzunluğu Bölüm 4'te  $m=0,2$  ve  $m=0,3$  için yapılan benzetimlerden bir miktar daha yüksek çıkmış, ilerleme kuvvetleri ise yaklaşık olarak aynı değerde çıkmıştır. Bu modelle hesaplanan kayma açısı değerleri deneysel sonuca daha yakındır.

Tablo 5. Kayma- Coulomb Sürtünme Modeli İçin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sürtünme Katsayısı [Kayma-Coulomb]	$F_c$ [N]	$F_t$ [N]	$t_c$ [mm]	$L_c$ [mm]	$\theta$ [°]	$\theta_{\text{Analitik}}$ [°]
$m=0,2$ ; $\mu=0,3$	76	42	0,096	0,077	28	30,78
$m=0,2$ ; $\mu=0,5$	75	41	0,095	0,086	28	31,1
$m= 0,3$ ; $\mu=0,5$	79	42	0,093	0,096	27	32
DeneySEL [10]	62	55	0,1	0,85	29,54	

## SONUÇLAR

Bu çalışmada Kayma, Coulomb sürtünme modellerinin ve bunların birleşik etkisinin kesme sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm benzetimlerden elde edilen kesme kuvvetleri deneysel verilerden yüksek değerlerde çıkmıştır. Bunun nedenleri şu şekilde özetlenebilir: Kullanılan sürtünme modelleri basit modeller olduğundan fiziksel işlemi gerçekçi olarak yansıtamamaktadır. Ayrıca yapılan benzetimlerde takım rijit olarak modellendiğinden dolayı gerçek işlem davranışını gösterememektedir. Yapılan benzetimlerde görülmüştür ki sürtünme katsayısı arttıkça kesme kuvveti de artmaktadır. Coulomb modelinin kullanıldığı benzetimlerde oluşan kesme kuvvetleri, kayma modeline göre daha yüksek değerlerdedir. Talaşlı imalat işlemlerinde çok yüksek normal gerilmeler oluşmaktadır. Bu yüksek gerilme değerlerinden hesaplanan sürtünme gerilmesi de yüksek olmaktadır. Bu nedenle Coulomb sürtünme modelinde oluşan kesme kuvveti kesme modeline göre daha yüksektir. Kesme kuvvetleri deneysel verilerden yüksek çıkmasına karşın, ilerleme kuvvetleri deneysel verilerden düşük çıkmıştır. Ayrıca bu kuvvet sürtünme katsayılarının değişiminden çok etkilenmemektedir. Bu nedenle istenilen değerlere ulaşmak için sürtünme katsayısını değiştirmek yeterli değildir. İlerleme kuvvetinin deneysel verilerden düşük çıkmasının nedenleri şu şekilde açıklanabilir: İlerleme kuvveti işlenmiş yüzeyin durumundan, takım aşınmasından ve iş parçasının elastik davranışından etkilenmektedir [13]. Yapılan benzetimlerde takım aşınması, iş parçasının yüzey durumu ve iş parçasının elastik davranışı göz ardı edilmiştir. Bu nedenle ilerleme kuvveti deneysel verilerden daha düşük çıkmıştır. Tüm modellerde takım ile talaş arasındaki temas uzunluğu deneysel verilerden çok düşük olarak bulunmuş olup, sürtünme katsayısı arttıkça temas uzunluğunun arttığı gözlenmiştir. Bunun nedenlerinde biri oluşan talaş şeklidir. Küçük sürtünme katsayılarında daha yuvarlak, büyük katsayılarında ise daha düz talaşlar oluşmuştur. Ayrıca kullanılan malzeme modelindeki verilerin yetersizliği de temas uzunluğunun yüksek hatayla hesaplanmasına neden olmuştur. Kesme işlemi sırasında  $\epsilon=1,2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  değerinde deformasyon hızı oluşmaktadır. Modelde kullanılan anlık akma gerilmesi değerleri  $\epsilon=40 \text{ s}^{-1}$  değerine kadar yazılımda vardır ve program bu hızdan sonraki anlık akma gerilmesi değerlerini ekstrapolasyon yaparak hesaplamaktadır. Bu yöntemle hesaplanan anlık akma gerilmesi değerleri gerçek malzeme davranışını göstermemekte ve benzetim sonuçlarını olumsuz etkilemektedir. İki sürtünme modelinin birlikte kullanıldığı benzetim sonuçlarına bakıldığında, sistemin Coulomb sürtünme modelinden fazla etkilenmediği gözlenmiştir. Benzetimlerde meydana gelen temas uzunluğu deneysel veriden küçük olduğundan talaş ile takım arasında daha çok kayma sürtünmesi etkili olmakta, Coulomb

sürtünmesi, sonuçları kayda değer şekilde etkilememektedir. Bu nedenle hesaplanan temas uzunluğunun küçük olduğu benzetimlerde bu model sonuçlar üzerinde çok fazla değişiklik yaratmamaktadır.

Yapılan bu çalışmada; oluşturulan sonlu elemanlar modeli yeterli yaklaşımı göstermiştir. Ancak talaşlı imalat benzetimlerinin daha doğru sonuçlar vermesi için kullanılan malzeme modelinde gerekli verinin bulunmasının yanında, sistemin gerçek davranışını gösteren sürtünme modelleri kullanılmalı ve işlemlerde oluşan sürtünme katsayıları deneme-yanılma yöntemi yerine deneysel yöntemlerle belirlenebilmelidir.

## KAYNAKÇA

1. **Grzesik, W.** 2008. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, Elsevier.
2. **Yang, X., Liu, C.R.** 2002. "A New Stress-Based Model of Friction Behavior in Machining and its Significant Impact on Residual Stresses Computed By Finite Element Method," *International Journal of Mechanical Sciences* 44, p.703-723.
3. **Filice, L., Micari, F., Rizzuti, S., Umbrello, D.** 2007. "A Critical Analysis on the Friction Modelling in Orthogonal Machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, p.709-714
4. **Zorev, N.N.** 1963. "Inter-Relationship Between Shear Processes Occurring Along The Tool Face and Shear Plane In Metal Cutting," *International Research in Production Engineering ASME*, p.42-49
5. **Özel, T.** 2006. "The Influence of Friction Models on Finite Element Simulations of Machining," *International Journal of Tools & Manufacture* 46, p.518-530
6. **Childs, T.H.C.** 2006. "Friction Modelling in Metal Cutting," *Wear* 260, p.310-318.
7. **Haglund, A.J., Kishawy, H.A., Rogers, R.J.** 2008. "An Exploration of Friction Models For The Chip-Tool Interface Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Model," *Wear* 265, s.452-460.
8. **Arrazola, P.J., Ugarte, D., Dominguez, X.** 2008. "A New Approach For The Friction Identification During Machining Through The Use Of Finite Element Modelling," *International Journal of Tools & Manufacture* 48, p.173-183.
9. **Zemzemi, F., Rech, Salem, J., Ben, W. Dogui, A., Kapsa, P.,** 2008. "Identification of a Friction Model at Tool/Chip/Workpiece Interfaces in Dry Machining of AISI4142 Treated Steels," *Journal of Material Processing Technology*, 2008, doi:10.1016/j.jmatprotec.09.019.
10. **Bil, H.** 2003. "Simulation of Orthogonal Metal Cutting By Finite Element Analysis," Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara.
11. **Merchant, M.E.** 1945. "Mechanics of the Metal Cutting Process," *Journal of Applied Physics* 16, p.267-318.
12. **Shatla, M., Kerk, C., Altan, T.** 2001. "Process Modelling in Machining. Part II: validation And Applications Of The Determined Flow Stress Data," *International Journal of Tools & Manufacture* 41, p.1659-1680.
13. **Kim, K.W., Lee, W.Y., Sin, H.** 1999. "A Finite Element Analysis For The Characteristics of Temperature And Stress in Micro-Machining Considering The Size Effect," *International Journal of Tools & Manufacture* 39, p.1507-1524.