



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

MİKRO DERİN ÇEKME İŞLEMİNDE NUMUNE VE TRİBOLOJİK BOYUT ETKİSİNİN SONLU ELEMAN ANALİZİYLE İNCELENMESİ

Mehmet Emin ÇETİN*, Ömer Necati CORA* , Hasan SOFUOĞLU*

*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

ÖZET

Bu çalışmada nümune boyut etkisi ve sürtünme katsayısının bir mikro derin çekme parçasının şekillendirilmesine etkisi sonlu eleman analizi yardımıyla incelenmiştir. Boyut etkisini incelemek amacıyla 0.1 , 0.2 ve 1 mm kalınlıklarında 3 farklı sac kullanılmış; kalıp ve zımbaya ait ölçüler de her bir işlemde aynı oranda arttırılarak 3 farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sac kalınlığının azaltılmasıyla eşdeğer von Mises gerilmesi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Tribolojik boyut etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan analizlerde ise sürtünme katsayısının arttırılması durumunda eşdeğer gerilmelerde artış gözlenmiş ve 0.1 mm sac kalınlığı için en yüksek eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir.

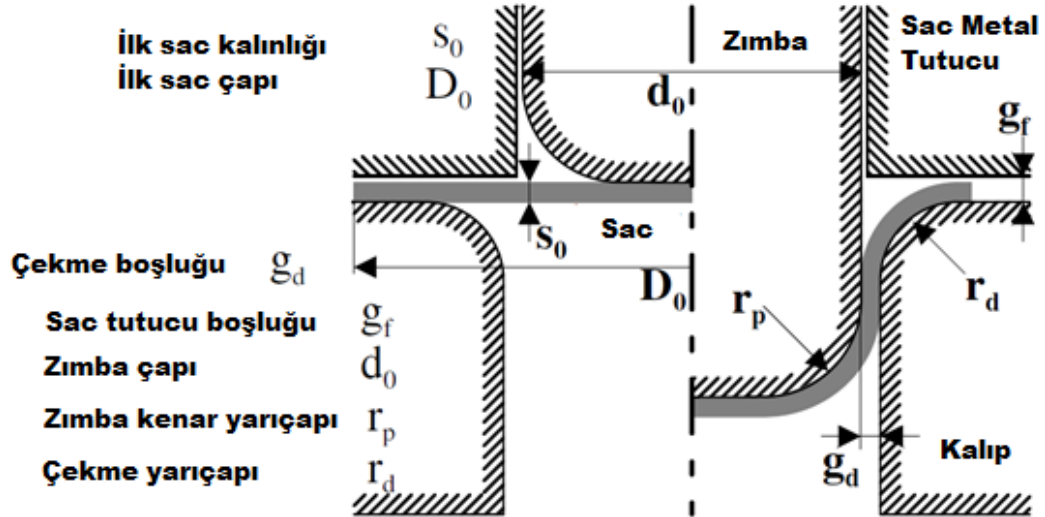
ABSTRACT

Effects of specimen size and coefficient of friction on micro-deep drawn part have been investigated by means of finite element analysis. To this goal, blanks with three different thicknesses, namely 0.1, 0.2, and 1 mm, have been used. Furthermore, dimensions for die and punch are increased by same factor in FE models. Results showed that, equivalent von Mises stress values are increased when thinner sheet gauges are used. Similarly, increased equivalent von Mises stress values are observed with increasing coefficient friction values, and the highest values are obtained for the smallest sheet thickness.

1. GİRİŞ

Derin çekme, sac metalin bir zımba kullanılarak bir kalıp içerisine doğru şekillendirilerek belirli bir geometrik forma veya düzensiz bir şekle dönüştürüldüğü metal şekillendirme işlemidir. Alüminyumdan üretilmiş meşrubat kapları, pişirme tavaları, yangın söndürme tüpleri, mutfak evyeleri derin çekme yöntemi ile üretilen parçalardandır. Derin çekme imalat yöntemi havacılık, otomotiv, süt ürünleri, aydınlatma, eczacılık ve plastik sanayii gibi birçok sektörde uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemin küçültülmüş ölçekli hali “mikro-derin çekme” işlemi olarak adlandırılmakta ve en az iki boyutu mm altındaki ölçülere sahip parçalar üretilmektedir. Mikro-derin çekme yöntemi daha çok tıbbi ve elektronik cihazlarda kullanılan metal parçaların imalatı için tercih edilmektedir.

Mikro derin çekme işlemine ait şematik gösterim ve bazı proses parametreleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Makro boyutta gerçekleştirilen klasik metal şekillendirme işlemlerinden farklı olarak, tane boyutu (grain size) ve nümune boyutu (specimen size) ve nümune üstü en küçük detay (feature size) mikro şekillendirme işlemlerinde malzeme davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Mikro şekillendirme işlemlerinin güvenilir bir şekilde incelenebilmesi için bu etkilerin kullanılan malzeme modellerinde dikkate alınması gereklidir.



Şekil 1. Mikro derin çekme işleminin şematik gösterimi ve boyutlar [1].

Konvansiyonel derin çekme işlemi sanayide uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir ve proses kabiliyetleri gerek endüstriyel gerekse de akademik çalışmalar sonucunda büyük ölçüde geliştirilmiştir. Son yıllardaki çalışmalarda, derin çekme işleminde şekillendirilmenin bir kistası olarak kabul edilen sınır çekme oranının (limiting drawing ratio) arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Mikro-derin çekme yöntemi ise özellikle 2000’li yıllardan itibaren üzerinde çalışılan bir konu olmuştur.

Saotome vd. (2001) 0.05, 0.1, 0.2 ve 1 mm kalınlıktaki düşük karbonlu çeliğin mikro derin çekme karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Zımba çapının sac kalınlığına oranının (d_0/s_0) artması halinde sınır çekme oranının azaldığı tespit edilmiştir [1].

Witulski vd. (2004) kalınlığı 80 μm ve 300 μm arasında değişen CuZn37 sac malzemesi ile 1 ve 8 mm arasında değişen çaplardaki kapların mikro derin çekme deneylerini ve sonlu eleman analizini gerçekleştirerek çekme boşluğu gibi geometrik parametreleri saptamada enine anisotropi, sürtünme ve işlem sapmalarının etkilerini belirlemeye çalışmışlardır [2].

Mikro ve makro derin çekme arasındaki farklılıkları belirlemek amacıyla 20 μm kalınlıktaki Al 99.5 sac ile 25 μm kalınlıktaki yumuşak çeliğin (DIN 1.0335) mikro derin çekme işlemi 1 mm çaptaki zımba kullanılarak; 1 mm kalınlığında Al 99.5 sac ve 1.35 mm kalınlığında St 15 sacların da makro derin çekme işlemi 50 mm çapındaki bir zımba kullanılarak Vollertsen vd. (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Mikro derin çekme işlemi ile elde edilen silindirik parçanın flanş bölgesinde kırışıklıklar gözlemlenirken makro derin çekme ile elde edilen parçada bu tür bir soruna rastlanılmamıştır. Analizler sonucunda mikro-derin çekme işlemindeki sürtünme etkilerinin makro derin çekme işlemindeki etkilerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu etki literatürde sürtünmenin boyutsal etkisi (friction size effect) olarak adlandırılmaktadır [3].

Sonlu eleman analiz paket programları boyut etkisini ihmal ettiğinden bu etkilerin deneysel olarak belirlenip matematiksel modellere uygulanması gerekmektedir. Yeh vd. (2008) mikro şekillendirmede her kalınlık ve her tane boyutu için malzeme davranışını ifade edecek yeni bir malzeme modeli önermişlerdir. Dinamik sonlu elemanlar ve Hill teorisi kullanarak C 1200 bakır malzemesini silindirik mikro derin çekme işlemine tabi tutmuşlar ve sac kalınlığının küçültülmesi nedeniyle ortaya çıkan tane boyutu ve kalınlık etkilerinin şekillendirilebilirliğe etkisini incelemişlerdir [4].

Vollertsen vd. (2010) mikro derin çekme işlemini 1 mm zımba çapıyla farklı zımba hızlarında (1, 10 ve 100 mm/s) Al 99.5 malzemesi için gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme katsayısının makro şekillendirmede olduğu gibi zımba hızının artışıyla azaldığı ve sınır çekme oranının zımba hızından incelenen aralıkta (1-100 mm/s) bağımsız olduğu belirlenmiştir [5].

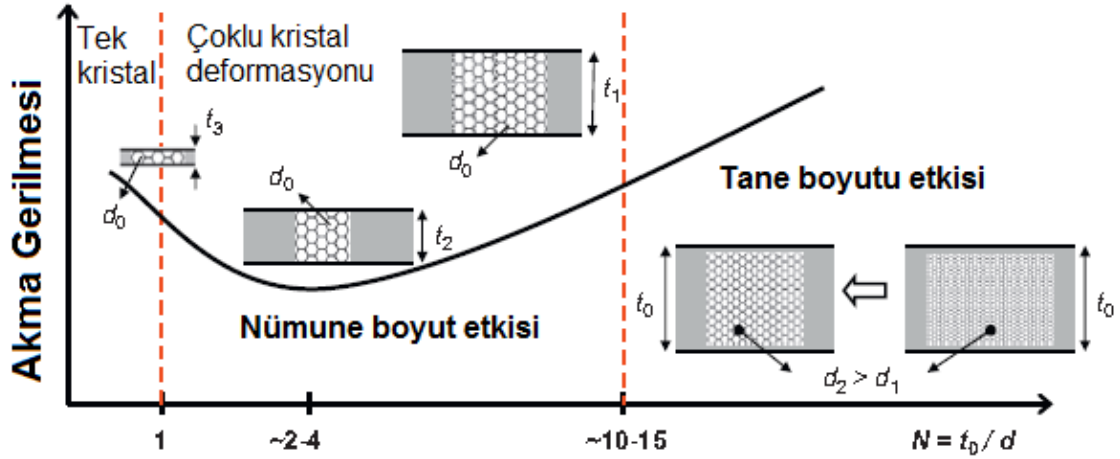
Molotnikov vd. (2012) sac kalınlığının mikro derin çekme işlemine etkisini iri taneli ve ultra-ince taneli bakır saclar kullanarak incelemişler ve tane büyüklüğünün sabit tutulup sac kalınlığının küçültülmesi halinde boyut etkisinin ortaya çıktığını ifade etmişlerdir [6].

Bu çalışmada AISI 1006 düşük karbonlu sacın 0.1, 0.2 ve 1 mm olmak üzere 3 farklı kalınlık durumu için mikro derin çekme işlemi sonlu eleman analizi (SEA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sacların mikro yapısındaki ortalama tane boyutunun aynı olduğu kabul edilmiş ve sac kalınlığı değiştirilerek mikro derin çekme işleminde ortaya çıkan numune boyut etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, sürtünmenin mikro derin çekme işlemine etkisini belirlemek için kalıp-zımba-sac yüzeyleri arasında üç farklı Coulomb sürtünme katsayısı ($\mu = 0.05, 0.08, 0.1$) kullanılmıştır.

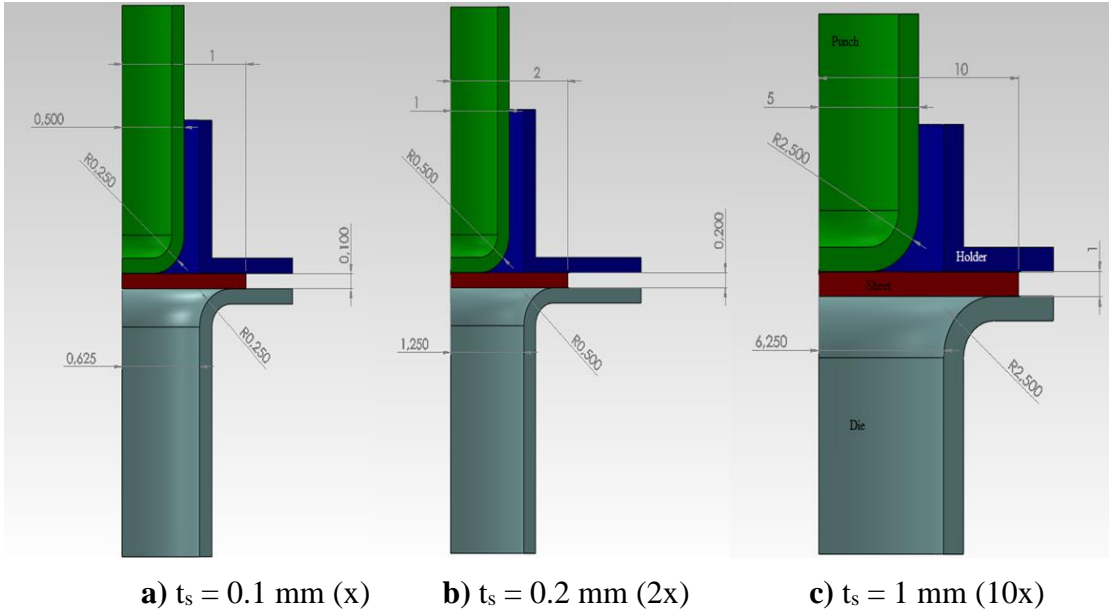
2. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

2.1. Mikro Derin Çekme Modellerinin Oluşturulması

Tane boyutu ve nümune boyut etkisinin akma mukavemeti üzerine etkisi Şekil 2’de gösterilmiştir. Boyut etkisi (N), nümune kalınlığının (t_0), tane boyutuna (d) oranı olarak $\left[N = \frac{t_0}{d} \right]$ şeklinde ifade edilebilir. Yapılan çalışmalar N değerinin 1-15 aralığı için nümune boyut etkisinin, 15’den büyük değer için ise tane boyutu etkisinin baskın olduğunu göstermiştir [7]. Nümune boyut etkisini incelemek amacıyla aynı tane boyutu büyüklüğüne sahip olduğu varsayılan 0.1 , 0.2 ve 1 mm kalınlıklarında 3 farklı sac malzemesinin mikro-derin çekme davranışı incelenmiştir. Bu etkinin tespit edilebilmesi amacıyla Şekil 1’de gösterilen tüm proses parametreleri sac kalınlığının artış ölçüsünde (x,2x,10x) arttırılmıştır. Derin çekme işleminde yırtılmadan ve flanş kalmayacak şekilde çekilebilecek sac çapının zımba çapına oranı olarak ifade edilen sınır çekme oranı tüm analizlerde 2 olarak alınmıştır $\left(\beta = \frac{D_0}{d_0} = 2 \right)$. Analizi yapılacak parçaların katı modelleri Solidworks 2011 yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 3). Oluşturulan mikro derin çekme işlemi modelinde sac, kalıp, tutucu ve zımba boyutları için Saotome vd. (2001)’nin çalışması referans alınmıştır [1].



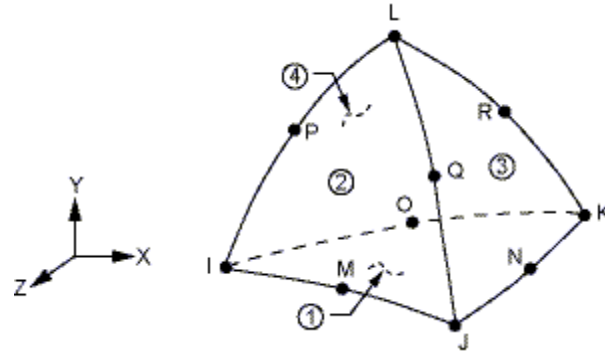
Şekil 2. Nüme ve tane boyutunun akma mukavemeti üzerine etkisi [7]



Şekil 3. Mikro-derin çekme işlemine ait oluşturulan katı modeller ve boyutlar

Katı model halindeki mikro derin çekme işlemi modeli Ansys Workbench ticari SEA paket yazılımına aktarılmıştır. Sacın sonlu eleman modelini elde etmek için Şekil 4’te gösterilen 3 boyutlu 10 düğüm noktalı yapısal katı tipi tetrahedral eleman (Solid 168) sonlu eleman tipi kullanılmıştır. Çift çekirdekli 2.66 GHz işlemci, 3 GB ön bellek, 512 MB ekran kartına sahip bir kişisel bilgisayar ve açık adım (explicit) çözüm tekniği kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan eleman sayısına bağlı olarak çözüm süreleri 2 dk ile 4 saat arasında değişiklik göstermiştir.

Sonlu eleman analizi yapılırken yeterli miktarda elemanın kullanıldığından emin olunması ve sonuçların yakınsaklığının kontrol edilmesi amacıyla 0.1, 0.2 ve 1 mm kalınlıktaki saclar farklı eleman sayıları ile modellenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Saclar için kullanılan eleman sayıları Tablo 1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 boyutlu 10 düğüm noktalı yapısal katı tipi eleman [8]

Tablo 1. Sac modellemesinde kullanılan sonlu eleman sayıları

Sac kalınlığı [mm]	Kullanılan Eleman Sayısı		
	Analiz 1	Analiz 2	Analiz 3
0.1	744	11505	90930
0.2	752	11585	94500
1	702	10830	91980

2.2. Malzeme Özellikleri

Sac malzemesi olarak düşük karbonlu AISI 1006 çeliği kullanılmıştır [8]. Johnson-Cook malzeme modeli metal esaslı malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızları için uygun bir model olduğundan malzeme modeli olarak tercih edilmiştir. Johnson-Cook malzeme modeli ve lineer malzeme parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Kalıp ve zımba ise rijid olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

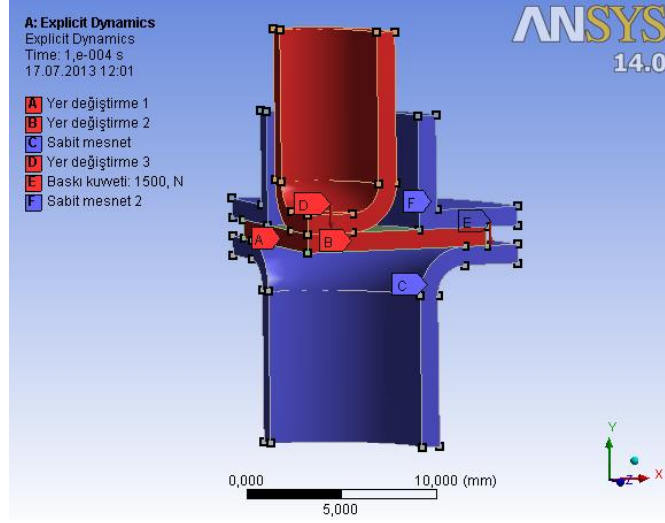
Akma Gerilmesi (MPa)	Mukavemet Sabiti (MPa)	Sertleşme Üssü	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
350	275	0,36	210	0.3

2.3. Uygulanan Kuvvet ve Sınır Şartları

Analizler gerçekleştirilirken tutucu, zımba ve kalıp rijit olarak modellenmiştir. Mikro derin çekme işleminin sonlu elemanlar analizi yapılırken kullanılan sınır şartları makro derin çekme işleminin analizinde kullanılanlardan farklı değildir. Sadece tutucu (blank holder) tarafından saca uygulanan baskı kuvveti değişiklik göstermektedir. Baskı kuvveti 1 mm sac kalınlığı için (- Y) yönünde 1500 N, 0.2 mm’lik sac kalınlığı için (- Y) yönünde 35 N, 0.1 mm’lik sac kalınlığı için (- Y) yönünde 30 N olacak şekilde uygulanmıştır. Sınır şartları detaylı olarak Şekil 5’te gösterilmiştir.

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan bütün modellerde sac-sac tutucu, sac-zımba, sac-kalıp temas bölgelerindeki sürtünme katsayısı Witulski vd. tarafından yapılan çalışma referans

alınarak 0.08 olarak kabul edilmiştir [2]. Bunun yanında mikro derin çekme işleminde sürtünmenin kalınlık değişimi üzerine etkisini görebilmek için 0.05 ve 0.1 sürtünme katsayıları ile analizler tekrarlanmıştır.

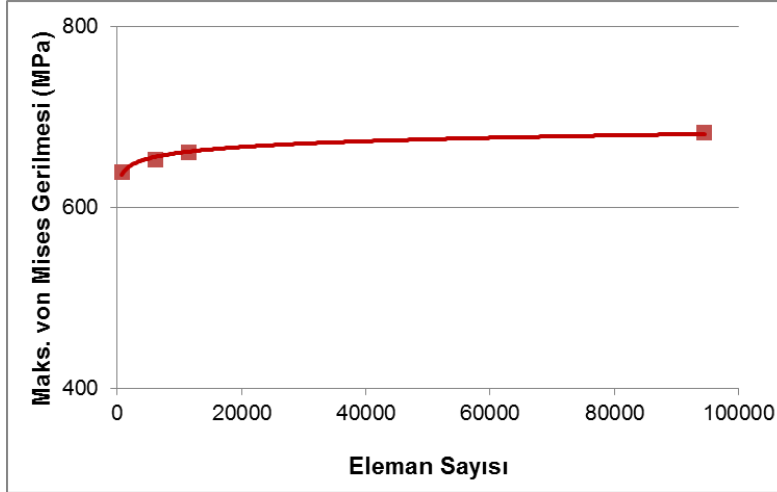


Şekil 5. Analizlerde kullanılan sınır şartlarının gösterimi

3. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Yakınsaklık Analizi

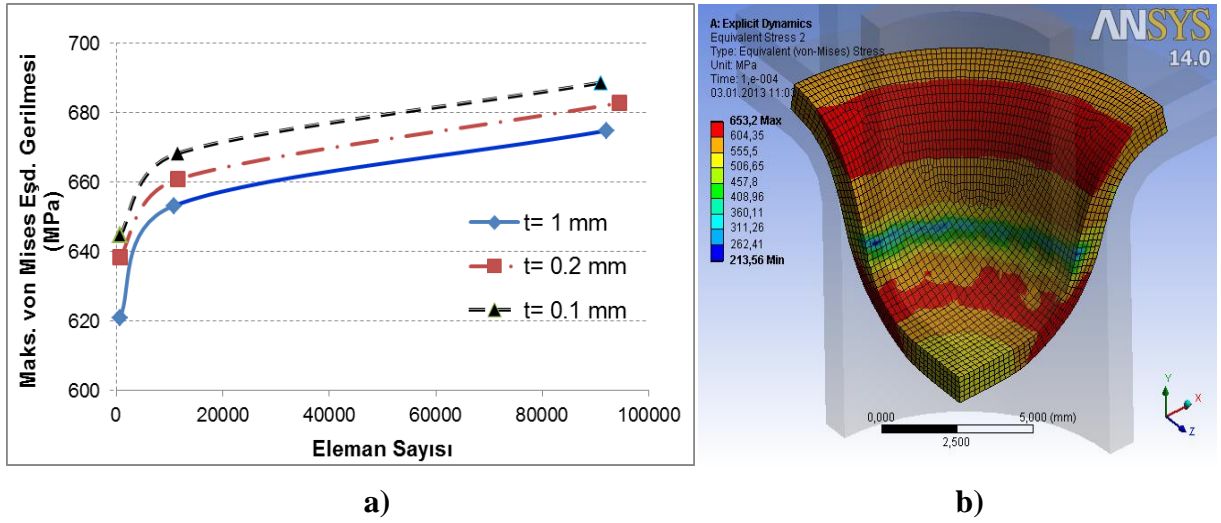
Sac modelinde kullanılan sonlu eleman sayısının yeterli olup olmadığının anlaşılması için 0.2 mm kalınlıktaki sac, kalınlık boyunca 4 farklı eleman sayısı (2, 4, 5, 10 eleman) modellenmiştir. Bu şekilde tüm sac için sırasıyla 752, 6092, 11585, 94500 elemandan oluşan modeller oluşturulmuştur. Analizler sırasında sac-sac tutucu, sac-zımba, sac-kalıp temas ara yüzlerinde sürtünme katsayısı 0.08 olarak kabul edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen maksimum von Mises eşdeğer gerilmesi değerlerinin modellerde kullanılan eleman sayılarına göre değişimi Şekil 6'da gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi eleman sayılarının artırılmasıyla sonuçların yakınsadığı ve oluşan değer farklılıklarının %3 mertebelerinde olduğu görülmüştür. Çözüm zamanından tasarruf etmek amacıyla sac kalınlığı boyunca 5 eleman olacak şekilde ağ örgüsü (mesh) oluşturmanın yeterli olacağı ve böylece sacın modellenmesinde kullanılacak toplam eleman miktarının yaklaşık 12000 eleman ile sınırlandırılması uygun görülmüştür.



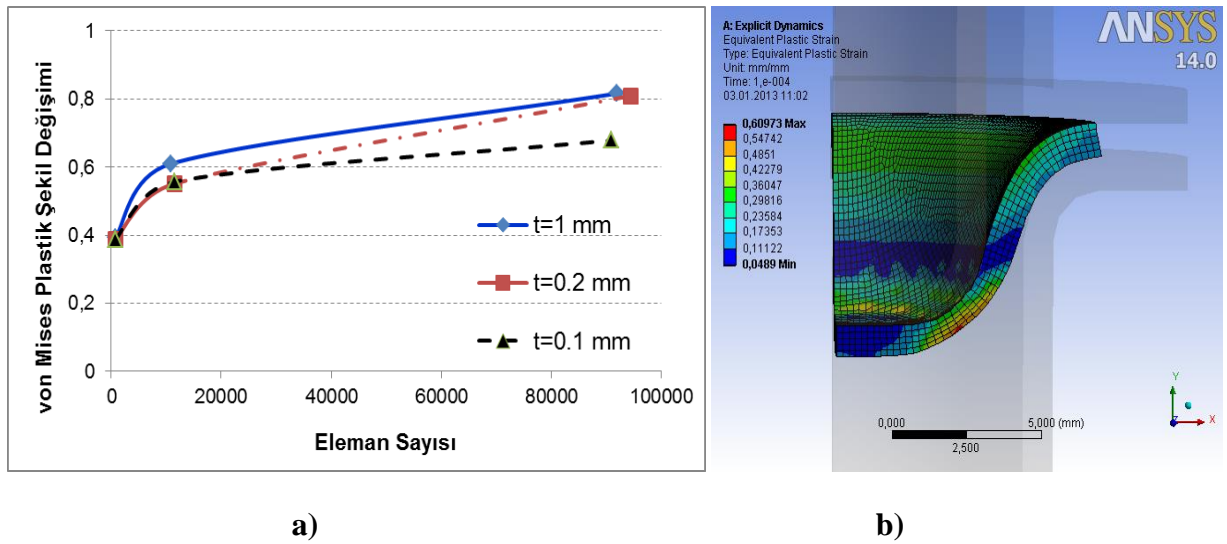
Şekil 6. $t = 0.2$ mm kalınlığındaki sac için kullanılan eleman sayısının maksimum von Mises eşdeğer gerilmesi ile değişimi

3.2. Sac kalınlığının deformasyon parametrelerine etkisi (Nümete boyut etkisi)

Tane boyutu aynı kabul edilen farklı kalınlıklı türdeş sacların mikro derin çekme karakteristiğini belirlemek amacıyla bu sacların sonlu eleman analizlerinde elde edilen maksimum von Mises eşdeğer gerilmesi ve plastik şekil değişimi sırasıyla Şekil 7 ve 8'de kullanılan farklı eleman sayıları için verilmiştir. Bu grafiklerden görülebileceği üzere sac kalınlığı azaldıkça elde edilen maksimum gerilme değeri modelde kullanılan eleman sayısından bağımsız olarak artmaktadır. Bu durum ince sacın daha kolay şekillendirilebilirliği (artan deformasyon) ile açıklanabilir. Öte yandan, mikro yapılar göz önüne alınacak olursa, 0.2 mm kalınlı sacda yüzeyde bulunan tanelerin (surface grains) iç kısımda bulunan tanelerin (internal grains) hacmine oranı diğer saclara göre fazladır. Yüzeyde bulunan tanelerin yüksek oranda bulunması durumunda malzemenin akma gerilmesinin azaldığı ifade edilmiştir [9]. 0.1, 0.2 ve 1 mm kalınlıklı saclar arasında maksimum von Mises plastik şekil değişimi değerleri 1 mm kalınlıklı modelde ortaya çıkmıştır.



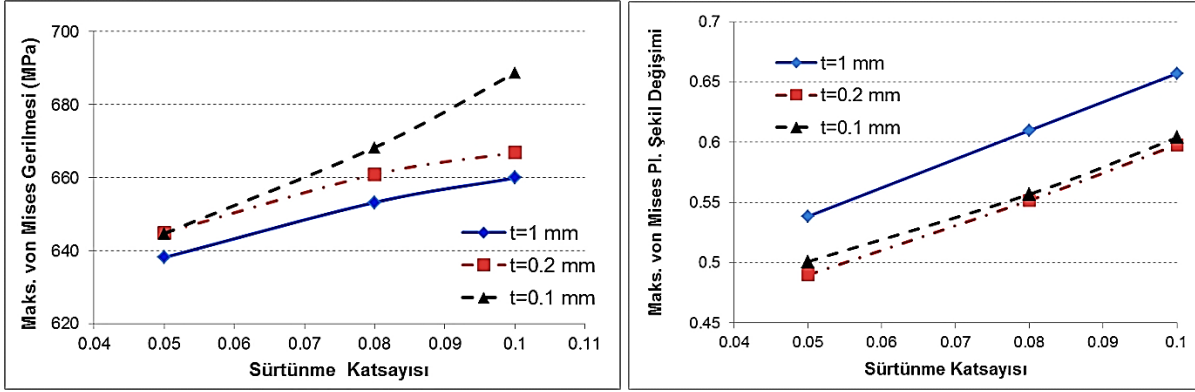
Şekil 7. a) Farklı kalınlıklardaki saclarda maksimum von Mises eşdeğer gerilmesinin kullanılan eleman sayısı ile değişimi, b) t_s = 1 mm için von Mises eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 8. a) Farklı kalınlıklardaki saclarda maksimum von Mises plastik şekil değişiminin kullanılan eleman sayısı ile değişimi, b) t_s = 1 mm için eşdeğer plastik şekil değişimi dağılımı

3.3 Sürtünme katsayısının deformasyon parametrelerine etkisi (tribolojik boyut etkisi)

Mikro derin çekme işleminin sonlu eleman analizlerinde sürtünmenin deformasyon parametreleri üzerindeki etkisini görmek amacıyla sac-sac tutucu, sac-zimba, sac-kalıp temas yüzeylerine 3 farklı sürtünme katsayısı ($\mu = 0.05, 0.08$ ve 0.1) uygulanmıştır. Sürtünme katsayısının artışıyla birlikte hem gerilme hem de şekil değişimi değerlerinde analizi yapılan bütün sac kalınlıkları için artış tespit edilmiştir. Analizler sonucu en yüksek gerilme değeri $t = 0.1$ mm kalınlığı için elde edilirken en büyük şekil değişimi $t = 1$ mm kalınlıklı modelde ortaya çıkmıştır. Gerilme değeri değişimlerinde $t = 0.2$ ve 1 mm lik saclara ait, şekil değişimi değerlerinde de $t = 0.1$ ve 0.2 mm kalınlıklı saclara ait karakteristiklerin benzer olduğu görülmüştür.



a)

b)

Şekil 9. Sürtünme katsayısının farklı kalınlıklardaki sacların deformasyon davranışına etkisi
a) maksimum von Mises gerilmesi değişimi, b) maksimum von Mises plastik şekil değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada mikro derin çekme prosesinde aynı ortalama tane büyüklüğüne sahip farklı kalınlıklı saclar için nümune boyutu ve sürtünmenin boyutsal etkilerini belirlemek amacıyla sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda,

1. Sac kalınlığının küçültülmesiyle von Mises eşdeğer gerilmesi ve plastik şekil değişiminin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum literatürde numune boyutu etkisi olarak bilinmektedir.
2. Sürtünme katsayısının artışıyla deformasyon karakteristiklerinde beklenildiği gibi artış görülmüştür. Proses boyutlarının küçültülmesi halinde deformasyon karakteristiklerindeki değişim daha şiddetli gerçekleşmiş bu sonuç da tribolojik boyut etkisini doğrulamıştır.

KAYNAKLAR

1. Y. Saotome, K. Yasuda, H. Kaga, “**Micro deep drawability of very thin sheet steels**”, J Mater Process Technol, 113 641-647, 2001.
2. N. Witulski, H. Justinger, and G. Hirt, “**Validation of FEM Simulation For Micro Deep Drawing Process Modeling**” AIP Conf. Proc. 712 952-957, 2004.
3. F. Vollertsen, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler, “**State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing**” J Mater Process Technol 151 70-79, 2004.
4. Fung-Huei Yeh, Ching-Lun Li, Yuung-Hwa Lu, “**Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming**” J Mater Process Technol 201 237-241, 2008.
5. Frank Vollertsen, Zhenyu Hu, “**Analysis of punch velocity dependent process window in micro deep drawing**” Prod. Eng. Res. Devel. 4 553-559, 2010.
6. A. Molotnikov, R. Lapovoka, C.F. Gaa, C.H.J. Davies, Y. Estrina, “**Size effects in micro cup drawing**”, Mater Sci Eng A: Struc 550 312-319, 2012.
7. S. Mahabunphachai, M. Koç, “**Investigation of size effect on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales**”, Int J Mach Tools Manuf 48 1014-1029, 2008.
8. ANSYS® Workbench, Release 14.0, Ansys Workbench Help, ANSYS, Inc. 2011

9. M.W. Fu, W.L. Chan, “**A review on the state-of-the-art microforming technologies**”, Int J Adv Manuf Technol 67 2411-2437, 2013.