

Derin Çekmede Buruşmanın Bilgisayar Destekli Modellenmesi

Mehmet Ali Pişkin

Mak. Yük. Müh.

Aselsan A.Ş.
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu

Prof. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılarak derin-çekme işlemlerinde buruşma davranımları elde edilmiştir. Dört nodlu, beş serbestlik derecesine sahip olan bir kabuk elemanı formüle edilmiştir ve Von Mises akma kriteri ile izotropik, elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Geliştirilen yazılım ile bu kabuk elemanını kullanarak parçanın membran davranışlarının yanında bükülme davranışları da elde edilmiştir. Dört farklı eleman boyu ve iki farklı şekil (yuvarlak ve dikdörtgen) için benzeşimler yapılmış ve elde edilen kalınlık ve nod deplasmanı dağılımları ticari bir sonlu eleman programının ve önceden gerçekleştirilmiş deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Buruşma, Derin-çekme, Metal Levha Şekillendirme, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Bilgisayar Destekli Metal Şekillendirme

GİRİŞ

Derin-çekme, sac malzeme kullanarak üretim yapmak için kullanılan bir metal şekillendirme metodudur. Derin-çekme işleminde sac, kalıp, zımba ve baskı plakası yardımıyla şekillendirilir. Bu takımların uygun şekilde seçilmesi, işlemin başarısı açısından son derece önemlidir. Son ürünün şekli doğrudan kalıp, zımba ve baskı plakasına bağlıdır [1].

Derin-çekme işlemi beş farklı bölgede incelenmelidir:

- Kalıp ve baskı plakası arasında kalan bölge (flanj)
- Kalıp profili bölgesi
- Kalıp ve zımba arasında kalan bölge
- Zımba profili bölgesi
- Zımba başı bölgesi

Söz konusu edilen bölgelerde değişik hatalar oluşmaktadır. Boyun verme ve yırtılma zımba başı, zımba profili ve zımba ile kalıp arasındaki bölgelerde gerçekleşmektedir. Flanaj bölgesinde ise buruşma oluşur.

Buruşma radyal çekme sonucu oluşur. Flanaj bölgesinde çevresel baskı gerilmesi bulunur. Radyal çekme gerilmesi belirli bir değeri aştığında, çevresel yöndeki baskı gerilmesi çok yükselir ve malzeme bükülür. Bunun sonucu olarak dalgalı bir yapı oluşur [2].

Buruşma istenmeyen bir deformasyondur, dolayısıyla önlenmesi gerekir. Bu amaçla en çok kullanılan iki yöntem baskı plakası uygulaması ve pot çemberi kullanılmasıdır. Baskı plakası uygulamasında iki metod vardır. İlk metotta baskı

plakası ve kalıp arasındaki mesafe sabit tutulur. Bu sayede malzeme kalınlığının sabit tutulması ve dalga oluşumunun önlenmesi sağlanır. Diğer metotta ise baskı plakası aracılığıyla malzemeye bir kuvvet uygulanır. Uygulanacak kuvvetin büyüklüğünün dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Buruşmayı önlemek için kullanılan diğer yöntem olan derin-çekme yatağında ise, malzeme, bir erkek takım yardımı ile kalıp üzerindeki bir yataktan akmaya zorlanır. Malzeme yataktan akarken baskı gerilmesi azalır. Yatağın konumu ve derinliğine karar verilerek, malzeme buruşma oluşturacak kritik gerilme değerlerine ulaşmadan çekme işleminin tamamlanması sağlanabilir.

Buruşma oluşumunun öngörülebilmesi derin-çekme işlemi için çok kritik bir konudur. Malzemenin buruşup buruşmayacağını bilmek, üretimde kullanılacak takımların seçimini doğrudan etkiler. Alınan gereksiz önlemler beklenmeyen sonuçlar yaratabilir. Gereğinden fazla baskı plakası kuvveti uygulamak, zımba yükünü artıracak gibi, boyun verme ve yırtılma olasılığını artırır. Ancak buruşma öngörülemediğinden yeteri kadar kuvvet uygulanmaması durumunda, ürün kalitesi düşer, çoğunlukla da parça kabul edilemez nitelikte olur. Dolayısıyla tasarımcının malzemenin buruşma davranışı hakkında bilgi sahibi olması gerekmektedir.

FORMÜLASYON

Deplasman tabanlı sonlu eleman analizinde, bir elemandaki deplasman alanı, elemanın nodlarındaki deplasmanların bir fonksiyonu olarak ifade edilmeye

çalışılır. Eleman üzerindeki bir noktanın deplasman değerini nodlardaki deplasmanlarla ilişkilendiren fonksiyona şekil fonksiyonu adı verilir. Diğer taraftan deplasman bilgisi kullanılarak eleman gerilinleri hesaplanabilir: deplasmanın türevi gerilin değerini verir. Dolayısıyla deplasman ve gerilin parametreleri arasında da bilinen bir ilişki bulunur. Bu ilişki ve kabul edilen şekil fonksiyonları kullanılarak gerilinler ve nod deplasmanları doğrudan ilişkilendirilebilir.

Deplasman tabanlı dinamik-açık sonlu eleman analizi için genel formül şu şekilde verilebilir:

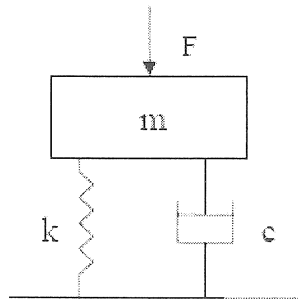
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{R}_{\text{ext}} - \mathbf{R}_{\text{int}} \quad (1)$$

Bu formülasyonda \mathbf{M} kütle matrisini, $\ddot{\mathbf{U}}$ deplasmanın zamana göre ikinci türevini, \mathbf{R}_{ext} ve \mathbf{R}_{int} ise sırasıyla dış ve iç kuvvetleri temsil etmektedir. Yukarıdaki formülasyona dinamik bir etki olarak sönümlenme kuvvetleri de eklenebilir. Bu kuvvetler elemanların hızlarıyla orantılıdır. Hızları hesaplamak için deplasman ya da ivmelenme hesaplarındakine benzer ilişkiler kullanılabilir, ancak sönümlenme matrislerini oluşturmak çok karmaşık ve zordur, çünkü sönümlenme özellikleri frekansa bağlıdır. Genel yaklaşım sönümlenme matrisini kütle ve peklik matrislerini kullanarak hesaplamaktır. Rayleigh metodu, kütle ve peklik matrislerinin lineer bir kombinasyonunu kullanır:

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{K} + \beta\mathbf{M}$$

Bu denklemde α ve β peklik ve kütle oranı sabitleri olarak adlandırılır. Deneylere göre bu sabitlerin değerleri 0.001 ile 0.01 arasında değişir. Buna dayanarak sönümlenme matrisi hesaplamalarda ihmal edilebilir. Bu ihmal analizdeki hesaplama verimini önemli ölçüde artırır. Örneğin hesaplama süresi kısalmır. Bu argümanlar ışığında bu çalışmada sönümlenme etkileri dikkate alınmamıştır.

Dinamik-eksplisit yöntemler dinamik bir problemin çözümünü temel alır. Basit bir kütle-yay-damper sistemi bu metotların temelini açıklamak için kullanılabilir.



Şekil 1. Kütle – yay – damper sistemi

Şekil 1'deki sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (2)$$

Bu eşitlikte m nesnenin kütlesi, c damperin sönümlenme katsayısı, k yayın pekliği, u , \dot{u} , ve \ddot{u} sırasıyla kütle için t anındaki anlık deplasmanı, anlık hızı ve anlık ivmesidir. $f(t)$ dış kuvvetin zaman tabanlı fonksiyonudur.

Hareket denklemi, merkezi fark yöntemi kullanılarak çözülebilir:

$${}^t\ddot{u} = \frac{1}{\Delta t^2} \left({}^{t+\Delta t}u - 2{}^tu + {}^{t-\Delta t}u \right) \quad (3a)$$

$${}^t\dot{u} = \frac{1}{2\Delta t} \left({}^{t+\Delta t}u - {}^{t-\Delta t}u \right) \quad (3b)$$

(3) denklemlerini (2) denklemine yerleştirip yeniden düzenlenirse

$$\left(\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right) {}^{t+\Delta t}u = \quad (4)$$

$$f(t) - k{}^tu + \frac{2m}{\Delta t^2} {}^tu - \left(\frac{m}{\Delta t^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right) {}^{t-\Delta t}u$$

$t + \Delta t$ anındaki deplasmanların çözümü, t ve $t - \Delta t$ anlarındaki bilinen deplasman konfigürasyonlarına bağlıdır. Bu zaman bölümlenme tasarımına hareket denkleminin dinamik açık integrasyonu denir. Kapalı integrasyon tekniklerinde çözüm, $t + \Delta t$ anındaki bilinmeyen deplasman değerlerine de bağlıdır.

Yukarıdaki çözüm planı deplasman tabanlı sonlu eleman analizinin genel denklemine de uygulanabilir. Aynı prosedürler (1) denklemine adapte edilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir [10]:

$$\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} {}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = \mathbf{R}_{\text{ext}} - \mathbf{R}_{\text{int}} + \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} {}^t\mathbf{U} - \frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} {}^{t-\Delta t}\mathbf{U} \quad (5)$$

Bu denklem bilinen ${}^t\mathbf{U}$ ve ${}^{t-\Delta t}\mathbf{U}$ değerleri kullanılarak, ${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}$ için çözülebilir. $t = 0$ anındaki deplasman, hız, iç ve dış kuvvetler bilinmektedir, ancak ilk adımda $t = -\Delta t$ anındaki deplasman değerleri de çözüm için gerekmektedir. Bu bilgi aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir [10]:

$${}^{-\Delta t}\mathbf{U} = {}^0\mathbf{U} - \Delta t {}^0\dot{\mathbf{U}} + \frac{\Delta t^2}{2} {}^0\ddot{\mathbf{U}} \quad (6)$$

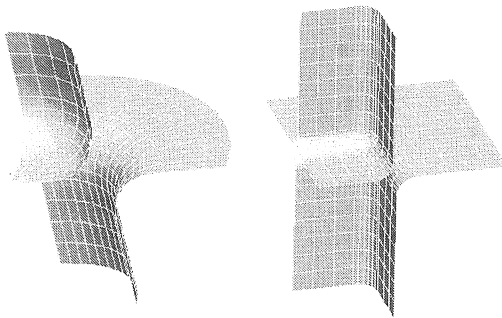
$t = 0$ anındaki ivmeler ise genel denklemin, bu an için çözülmesiyle bulunur:

$$\mathbf{M} {}^0\ddot{\mathbf{U}} = {}^0\mathbf{R}_{\text{ext}} - {}^0\mathbf{R}_{\text{int}} \quad (7)$$

Hesaplama verimliliğini arttırmak amacıyla kütle matrisi yerine diagonal kütle matrisi kullanılabilir. Böylece denklem (5) için faktörizasyon ihtiyacı ortadan kalkar.

ANALİZ

Bu çalışmada dairesel ve kare olmak üzere iki değişik çekme işlemi modellenmiştir. Ayrıca kare çekme işlemi için baskı plakası kullanılarak simülasyonlar da gerçekleştirilmiştir. Baskı plakası kullanılan ve kullanılmayan simülasyonların doğrulaması deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca baskı plakası kullanılmayan simülasyonlar, PAM-STAMP programıyla yapılan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Dairesel ve kare çekme işlemleri simetrik olduğu için, takımların ve malzemenin $\frac{1}{4}$ 'ü modellenmiştir. Zımba hızı 10 mm/dak alınmıştır. Her iki durumda da çekme işlemi 15 mm derinliğe kadar sürdürülmüştür. Malzeme kalınlığı 1 mm'dir.



Şekil 2. Kalıp ve zımba modelleri

Simülasyonlar 4 değişik çözüm ağı büyüklüğü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı büyüklükleri ve bunlara karşılık gelen eleman ve nod sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Analizde kullanılan eleman ve nod sayıları

Eleman Büyüklüğü (mm)	Dairesel Malzeme		Kare malzeme	
	Nod	Eleman	Nod	Eleman
5	113	104	81	64
3	276	262	196	169
2	625	604	441	400
1	2433	2392	1681	1600

Malzeme modeli olarak elasto-plastik model kullanılmıştır [7]. Plastik akış simülasyonu için Swift kanunu formülasyonlara adapte edilmiştir. Swift kanununda kullanılan sabitler Şenalp [11] tarafından yapılan deneyler dikkate alınarak seçilmiştir. Sabitler için kullanılan değerler Tablo 2'de gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı, Şenalp'in deneylerine göre bütün simülasyonlarda 0.04 olarak alınmıştır.

Tablo 2. Malzeme sabitleri

A (kN/mm ²)	0.667
B (mm/mm)	0.054
n	0.361
Y (kN/mm ²)	0.268
E (kN/mm ²)	200
v	0.3

Baskı Plakası ile Kare Çekme Simülasyonu

Bu simülasyonlarda 40x40 mm kare malzeme, 20x20 mm kare bir kalıp kullanılarak çekilmiştir. Malzemeyi modellemek için kullanılan elemanların büyüklüğü 3 mm, 2 mm ve 1 mm'dir. 250 kgf sabit baskı plakası kuvveti uygulanmıştır. Çekme işlemi 15 mm çekme derinliğine kadar sürdürülmüştür. Malzemelerin 10 mm ve 15 mm çekme derinlikteki deforme durumları Şekil 3'de gösterilmiştir.

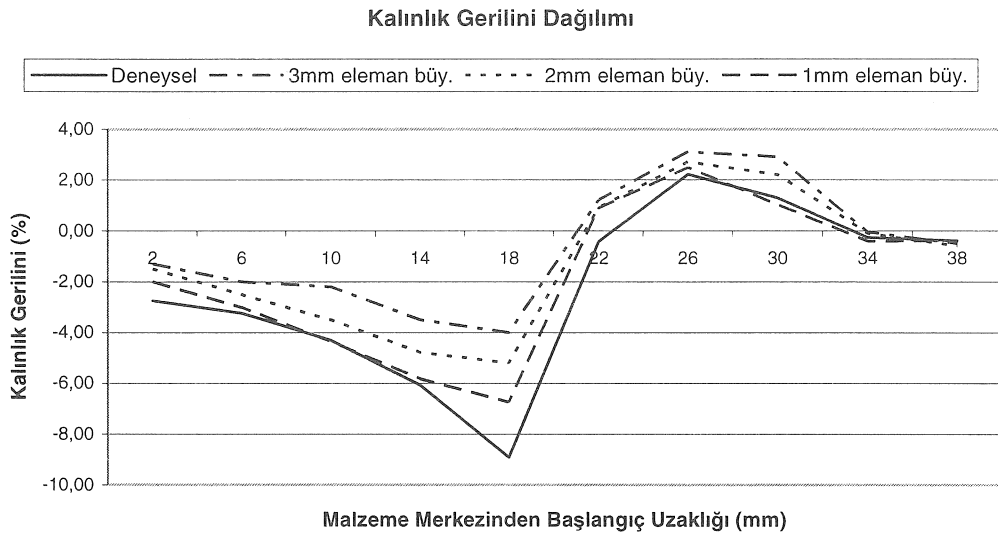
Simülasyon sırasında çekme işleminin çeşitli dönemlerinde malzeme kalınlığı değerleri okunarak, bu değerler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4'de 10 mm çekme derinliğinde, malzemenin köşegeni üzerindeki kalınlık değerlerinin, her üç eleman büyüklüğü ve deneysel sonuçlar için grafiksel karşılaştırılması yapılmıştır.

Baskı Plakası Kullanılmayan Kare Çekme Simülasyonu

Bu simülasyonlarda 40x40 mm kare malzeme, 20x20 mm kare bir kalıp kullanılarak çekilmiştir. Malzemeyi modellemek için kullanılan elemanların büyüklüğü 3 mm, 2 mm ve 1 mm'dir. Baskı plakası kuvveti uygulanmamıştır. Çekme işlemi 15 mm çekme derinliğine kadar sürdürülmüştür. Malzemelerin 10 mm ve 15 mm çekme derinlikteki deforme durumları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Derinlik	Eleman Büyüklüğü		
	3 mm	2 mm	1 mm
10 mm			
15 mm			

Şekil 3. Baskı plakası kuvveti uygulanan kare malzemenin deformasyonu



Şekil 4. 10 mm çekme derinliğinde köşegen üzerindeki kalınlık gerilimleri

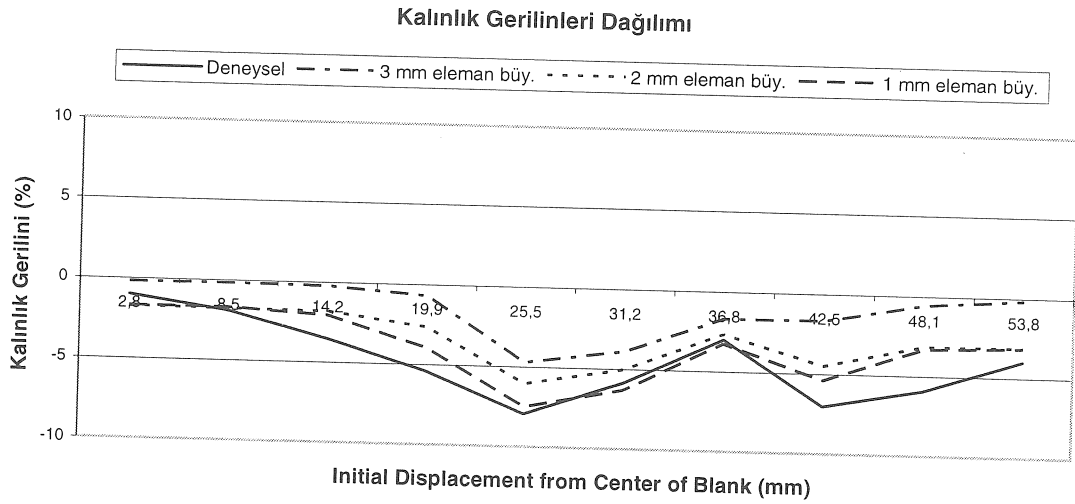
Baskı plakası kuvvetinin uygulanmadığı bu simülasyonlarda da çekme işlemi esnasında malzeme kalınlığı değerleri okunarak, deneysel verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 6'da 10.5 mm çekme derinliğinde, malzemenin köşegeni üzerindeki kalınlık gerilimi değerlerinin, malzemenin merkezine olan ilk uzaklıklarına göre dağılımı grafiksel olarak gösterilmiştir.

Baskı Plakası Kullanılmayan Dairesel Çekme Simülasyonu

Bu simülasyonlarda 40 mm çaplı dairesel malzeme, 20 mm çaplı dairesel bir kalıp kullanılarak çekilmiştir. Malzemeyi modellemek için kullanılan elemanların büyüklüğü 5 mm, 3 mm, 2 mm ve 1 mm'dir. Baskı plakası kuvveti uygulanmamıştır. Çekme işlemi 15 mm çekme derinliğine kadar sürdürülmüştür. Malzemelerin 10 mm ve 15 mm çekme derinlikteki deforme durumları Şekil 7'de gösterilmiştir.

Derinlik	Eleman Büyüklüğü		
	3 mm	2 mm	1 mm
10 mm			
15 mm			

Şekil 5. Baskı plakası kuvveti uygulanmayan kare malzemenin deformasyonu



Şekil 6. 10.5 mm çekme derinliğinde köşegen üzerindeki kalınlık gerinleri

Baskı Plakası Kuvvetinin Bulunmasına Yönelik Simulasyonlar

Bu simülasyonlarda 40 mm çaplı dairesel malzeme, 20 mm çaplı dairesel bir kalıp kullanılarak çekilmiştir. Malzemeyi modellemek için kullanılan elemanların büyüklüğü 1 mm'dir. Uygulanan baskı plakası kuvveti değiştirilerek, dalga sayısının artan kuvvetle değişimi incelenmiş, ayrıca hangi kuvvet büyüklüğünde buruşma davranışının gerçekleşmediği araştırılmıştır. Çekme işlemi 15 mm çekme

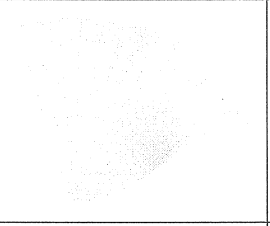
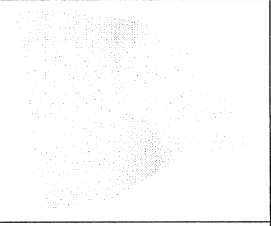
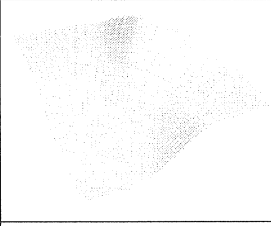
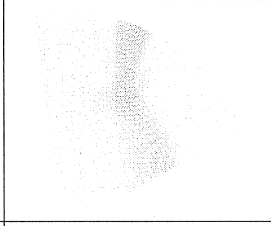
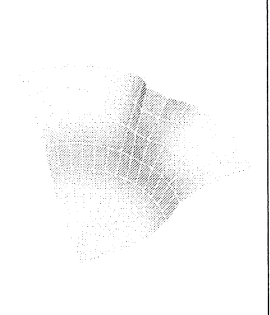
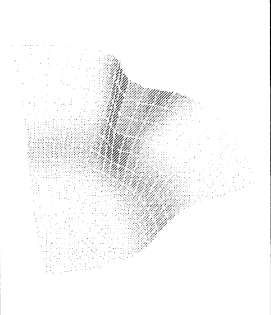
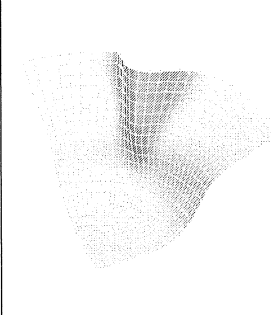
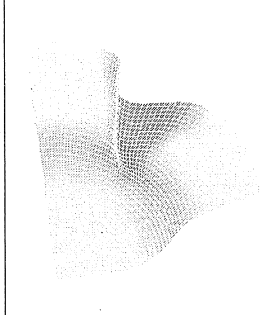
derinliğine kadar sürdürülmüştür. Uygulanan baskı plakası kuvvetleri sırasıyla 25 kgf, 50 kgf, 100 kgf, 150 kgf, 200 kgf and 215 kgf 'tur. Malzemelerin 15 mm çekme derinliğindeki deforme durumları Şekil 8'de gösterilmiştir.

SONUÇ

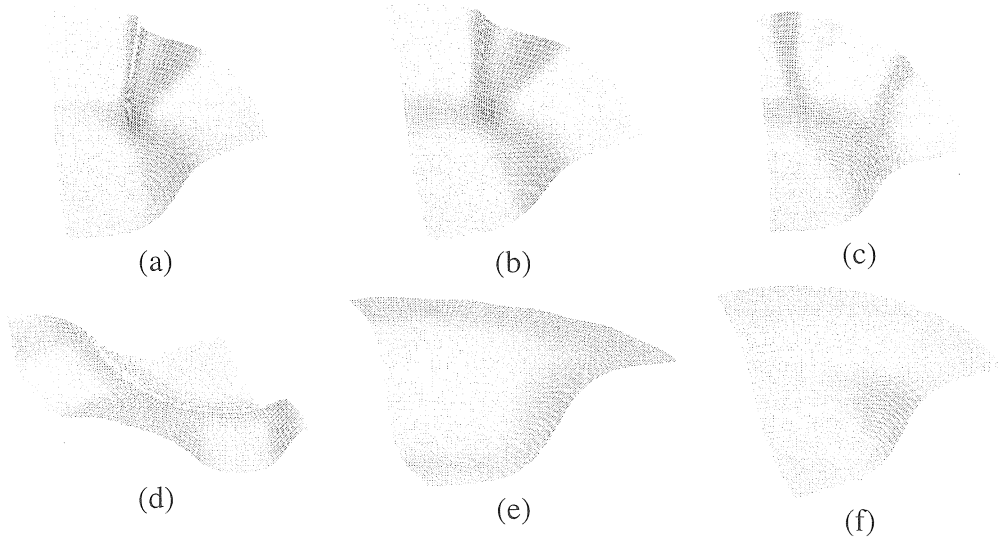
Bu çalışmada, derin-çekme operasyonlarındaki buruşma davranışını analiz etmek için bir program geliştirildi. Program eleman nodlarındaki deplasman

değerlerini hesap etmektedir. Bu deplasman değerleri kullanılarak gerilim ve gerilim değerleri hesaplanmaktadır. Nod deplasmanları ANSYS programında görüntülenebilecek şekilde düzenlenmektedir. Program kare ve dairesel derinçekme operasyonlarının değişik eleman büyüklükleri ile analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonuçlar deneysel verilerle ve PAM-STAMP programı ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Kare ve dairesel çekme operasyonları için yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde, beklendiği gibi eleman boyutu küçüldükçe sonuçların deneysel değerlere ve PAM-STAMP sonuçlarına yakınsadığı görülmüştür. Sonuçların PAM-STAMP programında aynı eleman büyüklükleri ile gerçekleştirilen analizlerle karşılaştırılması neticesinde, sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir (Bkz Şekil 9).

Derinlik	Eleman Büyüklüğü			
	5 mm	3 mm	2 mm	1 mm
10 mm				
15 mm				

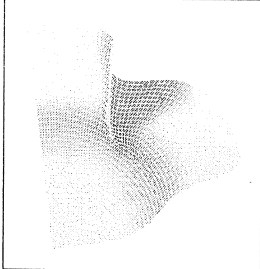
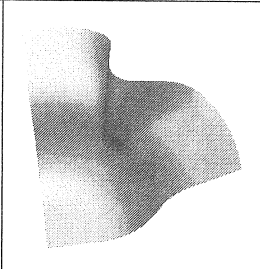
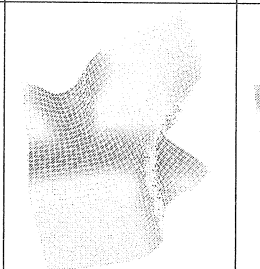
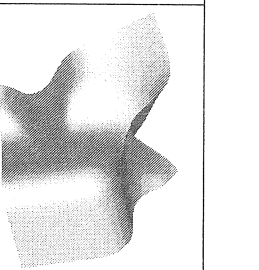
Şekil 7. Baskı plakası kuvveti uygulanmayan dairesel malzemenin deformasyonu



Şekil 8. 15 mm derinlikte malzeme deformasyonu a) 25kgf b) 50 kgf c) 100 kgf d) 150 kgf e) 200 kgf f) 215 kgf baskı plakası kuvvetleri için

Kare çekme operasyonları için gerçekleştirilen analizler esnasında, 5 mm eleman büyüklüğü ile gerçekleştirilen simülasyonların kabul edilebilir sonuçlar vermediği görülmüştür. Bunun sebebi bu eleman büyüklüğünün çok kaba bir çözüm ağı yaratması olmuştur. 3 mm eleman büyüklüğünde bile simülasyon sonucu elde edilen deforme olmuş

malzeme görünümünde, ağ genişliğinden kaynaklanan küçük bozulmalar görünmektedir. Buradan hareketle 2 mm'den büyük elemanların kare çekme simülasyonları için uygun olmadığı sonucuna varılabilir.

Dairesel Çekme		Kare Çekme	
Nümerik	PAM-STAMP	Nümerik	PAM-STAMP
			

Şekil 9. Kare ve dairesel çekme işlemleri için elde edilen sonuçların PAM-STAMP programının sonuçlarıyla karşılaştırması – çekme derinliği 15mm, eleman büyüklüğü 1mm

Kare çekme simülasyonlarının sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kalınlık gerilimleri üzerinden yapılmıştır. Eleman büyüklüğü azaldıkça, sonuçların deney değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Bu sonuç baskı plakası kullanılan ve kullanılmayan analizlerin hepsi için geçerlidir.

Buruşmayı önlemek için gerekli olan baskı plakası kuvvetini bulmak için bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda eleman boyutu olarak 1 mm seçilmiştir. Baskı plakası kuvveti 25 kgf seviyesinden başlatılarak artırılmıştır. Kuvvet arttıkça oluşan dalga sayısının arttığı gözlenmiştir. 6 simülasyon sonucunda 215 kgf baskı plakası kuvvetinin buruşmayı önlemek için yeterli olduğu gözlenmiştir.

COMPUTER AIDED MODELLING OF WRINKLING IN DEEP DRAWING

In this work, the finite element method is used to obtain the wrinkling behavior. A four noded five degree of freedom shell element is formulated. Isotropic elasto-plastic material model with Von Mises yield criterion is used. By using this shell element, the developed code can predict the bending behavior of workpiece besides membrane behavior. Simulations are carried out with four different element sizes and two different shapes (circular and rectangular). The thickness strain and nodal displacement values obtained are compared with results of a commercial finite element program and results of previously conducted experiments.

Keywords: Wrinkling, Deep Drawing, Sheet Metal Forming, The Finite Element Method, Computer Aided Metal Forming.

KAYNAKÇA

1. Johnson W., Mellor P.B., "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Ltd., 1983.
2. Kaftanoğlu B., "Plastic Analysis of Flange Wrinkling in Axisymmetrical Deep-Drawing". *Proceedings of the 21st International Machine Tool Design and Research Conference*, 1980, pp.21-28.
3. Cao J., "Prediction of Plastic Wrinkling Using the Energy Method", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.66, September 1999, pp.646-652.
4. Kawka M., Olejnik L., Rosochowski A., Sunaga H., Makinouchi A., "Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.109, 2001, pp.283-289.
5. Lejeune A., Boudeau N., Gelin J.C., "Wrinkling Predictions in Metal Forming", *Proceedings of the 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes*, Vol.1, 2002, pp.549-555.
6. Weili X., Huibao W., Yuying Y., Wang Z.R., "A Simplified Method of Wrinkling Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.121, 2002, pp.19-22.

7. Chu E., Xu Y., "An Elastoplastic Analysis of Flange Wrinkling in Deep Drawing Process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.43, 2001, pp.1421-1440.
8. Nordlund P., Häggblad B., "Prediction of Wrinkle Tendencies in Explicit Sheet Metal-Forming Simulations", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.40, 1997, pp.4079-4095.
9. Lee C., Cao J., "Shell Element Formulation of Multi-Step Inverse Analysis for Axisymmetric Deep Drawing Process", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.50, 2001, pp.681-706.
10. Bathe K.J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall Inc., 1982.
11. Şenalp A.Z., "Computer-Aided Wrinkling Analysis of Non-Axisymmetric Parts in Sheet Metal Forming", Ph.D Thesis, Middle East Technical University, Mechanical Engineering Department, Ankara, May 1998.