

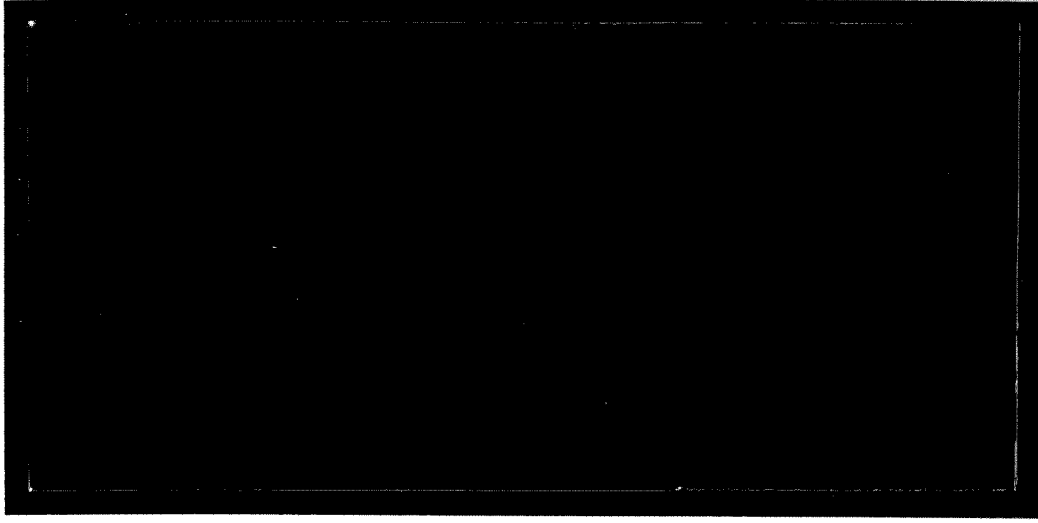
DUP

2003-14



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

**DERİN ÇEKME İMALAT TEKNİĞİNİN
AÇIK (EXPLICIT) SONLU ELEMANLAR
METODUYLA ANALİZİ**

PROJE NO: MİSAG-142

PROF.DR. BİLGİN KAFTANOĞLU

EYLÜL 2002
ANKARA

ÖNSÖZ

Sonlu elemanlar analiz yöntemi yük altındaki yapı ve malzemelerin davranışlarını modelleyen bir sayısal yöntem olup, uzunca bir süreden beri kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, bilgisayar ortamında modellenen parçalar için işlem parametrelerinin herbirinin ayrı ayrı etkisi az bir masrafla ve kısa süreler içerisinde ölçülebilmektedir.

Başlangıçta daha çok iki boyutlu analizler gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanmaktaydı. Daha sonra üç boyutlu fakat karmaşık olmayan simetrik parçaların analizinden elde edilen sonuçlar tatmin edici görüldü. Sözü geçen bu çalışmalar kapalı (implicit) sonlu elemanlar algoritmasını kullanmaktaydı. Zamanla bu algoritmanın karmaşık parça geometrileri için yetersizliği görülmeye başlandı. Simetrik olmayan parçalar için işlem süreleri fazlasıyla artmakta ve hatta kimi zaman sonuca ulaşamamakta, ulaşılsa bile tatminkar olmaktan uzak kalmaktaydı. Açık (explicit) algoritma bu sırada devreye girdi. Bilgisayar programında yapılabilecek bazı hesap değişiklikleri çözüm süresini oldukça azaltmasının yanısıra elde edilen sonuçlar da deneysel verilerle kıyaslanabilecek kadar iyiydi.

Şimdiye dek geliştirilmiş olan algoritma ve programların ticari veya sanayi gizlilik içinde olması; bazı uygulamalarda kapalı algoritmanın deneysel yöntemlerle elde edilmiş sonuçlarla iyi uyum sağlamaması; bunların üçüncü şahıslar tarafından geliştirilmeye açık olmaması nedenleri ile bu proje önerilmiş idi.

Bu çalışmamızda, sonlu elemanlar analizi yapılacak parçanın üç boyutlu geometrik modeli hazırlanır ve kabuk tipi sonlu elemanlar kullanarak parçalara bölünür. Bu parçaların herbiri köşe ve kenarları üzerinde düğümsel noktalara sahiptir. Sözü geçen noktaları kullanarak parçaya etki eden yüklerin değerleri girilir. Ayrıca parçanın hangi yönde ilerleme serbestliğine sahip olduğu ve ne şekilde tutulduğu bilgileri de aynı şekilde işlenir. Tüm bunlar sınır şartlarını meydana getirir. Bu noktaların yük altındaki yer değişim miktarları elemanların birim şekil değiştirme miktarlarıyla ilişkilendirilir.

Açık algoritma yardımıyla, dinamik denge denkleminde yer alan birim şekil değiştirme hız ve ivmelerinin birim zaman aralığındaki değerleri bir önceki birim şekil değiştirme miktarı kullanılarak hesaplanır. Bu sayede oldukça sadeleştirilmiş ve hızlı çözümler elde edilir. Birim şekil değişimleri bünye denklemleriyle birlikte malzemenin gerilme miktarlarının hesaplanmasını sağlar. Malzeme modelleri de bu aşamada hesaba katılır. Sürtünme ve temas algoritmaları yukarıda sözü geçen işlemlerle paralel, iterasyona sokularak kullanılır. Sonuç olarak deformasyona uğramış parça geometrisi elde edilir. Malzemenin kalınlığındaki değişimler, birim şekil değiştirme miktarları ve gerilmeler sayısal olarak hesaplanır. Böylece parça kalitesi hakkında bir yorum yapılabilir. Parça için seçilen malzeme, kalıp parça geometrileri, sürtünme hakkında iyileştirmelere gidilebilir. Deneysel verilerle yapılacak kıyaslama hazırlanan bilgisayar programının güvenilirliği ve uygulamadaki esnekliği hakkında bilgi verir.

Projeye verdiği destek için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu – Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri Araştırma Grubu'na (TÜBİTAK-MİSAG) teşekkür ederim.

Prof. Dr. Bilgin Kaftanoğlu

İÇİNDEKİLER

SAYFA NO.

1. Giriş.....	1
2. Teori.....	1
2.1. Sanal Yer Değiştirme İlkesi.....	1
2.2. Sonlu Elemanlar Denklemleri.....	2
2.3. Kabuk Elemanlar.....	3
2.4. Sayısal İntegral.....	4
2.5. Malzeme Özellikleri.....	5
2.6. Açık Metod.....	5
3. Açık Sonlu Elemanlar Metodu Analiz Programı: EFEM.....	6
4. Örnek Problem Üzerinde Gerçekleştirilen Simülasyonlar.....	8
5. Deneyle.....	12
6. Sonuç.....	16

ŞEKİLLER

SAYFA NO.

Şekil 1. Kabuk eleman.....	3
Şekil 2. 5 mm derinlikteki parçanın simülasyon resimleri.....	9
Şekil 3. 10 mm derinlikteki parçanın simülasyon resimleri.....	10
Şekil 4. 15 mm derinlikteki parçanın simülasyon resimleri.....	11
Şekil 5. Simülasyonda kullanılan kalıp parçaları.....	12
Şekil 6.a. 5 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi.....	13
Şekil 6.b. 10 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi.....	13
Şekil 6.c. 15 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi.....	14
Şekil 7. 5, 10 ve 15 mm zımba ilerlemelerinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarlarının kıyaslanması.....	14
Şekil 8. Zımbanın uyguladığı yük miktarının, zımba ilerlemesine bağlı olarak değişimi.....	15
Şekil 9. Derin çekilmiş parçaların resmi.....	15

ÖZET

Derin çekme yöntemi saç levhalardan kalıplar yardımı ile üç boyutlu ürünler elde etmeye yaramaktadır. Bu imalat yönteminin en önemli uygulama alanları arasında otomotiv sanayiinde kaporta, savunma sanayiinde mühimmat, ev eşyaları sektöründe ise çamaşır makinası, bulaşık makinası gibi ürünlerin üretimi bulunmaktadır.

Bu üretim sürecine başlamadan önce ürün tasarımı, bunu üretecek kalıpların tasarımı gelmektedir. Ancak ilk tasarımı yapınca, bu tasarımın başarılı olup olmayacağını belirleyebilecek ve plastik şekil değişikliği ve kararsızlık analizini modelleyebilecek bir araca ihtiyaç vardır. Aksi halde yapılan tasarım başarısız olabilir ve üretilen kalıplar da boşuna yapılmış olur.

Bu projede simetrik ve simetrik olmayan levhaları üretilecek ürünlerin teorik ve bilgisayar ortamında modellenmelerinin sonlu elemanlar yöntemi ve açık (explicit) algoritmalar geliştirilerek uygulanmasından bahsedilmektedir. Bu proje, kapalı (implicit) yöntemler kullanılarak yapılan çalışmaların bir devamıdır. Üç boyutlu ürünlerin plastik uzama ve birim şekil değiştirme dağılımları elde edilmiştir.

Böylece kritik bölgeler saptanabilir; ürün ve dolayısı ile kalıp tasarımları değiştirilebilir; malzeme seçimi, yağlama gibi faktörler optimize edilebilir; bilgisayar ortamında deneme-yanılma işlemi tamamlandıktan sonra gerçek üretime geçilebilir. Gene aynı şekilde, masraflarda tasarruf sağlanabilir ve verimlilik artırılabilir.

Açık (explicit) sonlu elemanlar yönteminin de tercih nedeni daha verimli olması ve işlem zamanının daha kısa olmasıdır.

Anahtar sözcükler: derin çekme, açık (explicit) sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

The process of deep-drawing is used to produce 3-D products from sheet-metal. Among the most important application areas of this process, we see auto body production in the automotive industry, shell and cartridge production in defense sector, and washing machine and dishwasher production in household industries.

Before the production of the sheet-metal products, the product and die design must be completed. When the first design is completed, it must be checked to see if it is successful or not by modeling the plastic deformation on a computer platform to find the instability areas. Otherwise the developed design can be unsuccessful and the produced dies may be scrapped.

In this project, the modeling of the plastic deformation in the deep-drawing of symmetrical parts is attempted by a finite element method using an explicit algorithm. This is an extension of the implicit algorithms used previously. This way, 3-D sheet-metal parts can be modeled and their strain distributions can be obtained. Hence critical regions are detected, and therefore product and die design can be modified with optimization of lubrication and material parameters. This way, trial and error operations can be carried out on the computer platform. Once this is finalized, real production can start. This approach provides an economy in production expenses and productivity will be improved.

The explicit finite element algorithm is preferred, because it is more efficient in terms of processing time when compared with the implicit algorithms.

Keywords: deep drawing, explicit finite element method

1. Giriş

Geliştirilen bilgisayar programı, metal şekillendirme operasyonuna maruz bırakılan malzemede meydana gelen birim uzama (strain) ve gerilme (stress) miktarlarının sayısal olarak analizinde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu analizi yönteminin uygulanması hususuyla ilgili olarak, seçilen algoritma açık (explicit) metodolojiyi içermektedir.

İlerleyen bölümlerde, proje konusu hakkındaki teori ortaya konulmuş; ilgili denklemler ile tamamlanan bilgisayar program parçalarının (modüllerinin) içerikleri verilmiştir. Daha sonra test amacıyla hazırlanan örnek problem tanıtılmış ve bu problem için elde edilen simülasyon sonuçları eklenmiştir.

Bilgisayar programının hazırlanmasında kullanılan derleyici (compiler), *Windows* altında çalışan *Microsoft FORTRAN Visual Workbench v.1.00* 'dır.

2. Teori

2.1. Sanal Yer Değiştirme İlkesi (Principle of Virtual Displacements)

Bu ilke kısaca yüke maruz kalan bünyede varolduğu farzedilen sanal yer değiştirmelerin ancak içerden ve dışardan yapılan iş miktarları aynı kaldığı takdirde gerçekleşebileceği hususunu ortaya koyar. Bir başka deyişle:

$$\begin{array}{ccc} \text{İçerden yapılan iş} & & \text{Dışardan yapılan iş} \\ \underbrace{\hspace{10em}} & & \underbrace{\hspace{10em}} \\ \int_V \boldsymbol{\tau} \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV & = & \int_V \mathbf{f}^B \delta \mathbf{u} dV + \int_{S_r} \mathbf{f}^{S_r} \delta \mathbf{u}^{S_r} dS + \sum_i \mathbf{R}_C^i \delta \mathbf{u}^i \end{array} \quad (1)$$

Bu denklemde δu sanal yer değiştirme miktarlarını (virtual displacements), $\delta \epsilon$ ise sanal birim uzama miktarlarını (virtual strains) içermektedir.

2.2. Sonlu Elemanlar Denklemleri (Finite Element Equations)

Sonlu elemanlar analizinde bünye, sonlu elemanlar (finite elements) denilen parçaların biraraya geldiği, ve bu parçaların düğüm noktalarında (nodes) birbirine bağlandığı bir yapıdan ibarettir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirme miktarları daha sonra malzemenin tümü için geçerli yer değiştirme miktarlarının hesabında kullanılır:

$$\mathbf{u}^{(m)} = \mathbf{H}^{(m)} \hat{\mathbf{U}} \quad (2)$$

Burada $\mathbf{H}^{(m)}$ Şekil fonksiyonu matrisini, "m" eleman sayısını, $\hat{\mathbf{U}}$ ise düğüm noktalarındaki yer değiştirme miktarını ifade eder.

Birim uzama miktarları da benzer Şekilde hesaplanabilir:

$$\boldsymbol{\epsilon}^{(m)} = \mathbf{B}^{(m)} \hat{\mathbf{U}} \quad (3)$$

Burada da $\mathbf{B}^{(m)}$ birim uzama - yer değiştirme matrisidir.

Malzemede oluşan gerilmeler (stresses) aşağıdaki bünye denklemiyle hesaplanır:

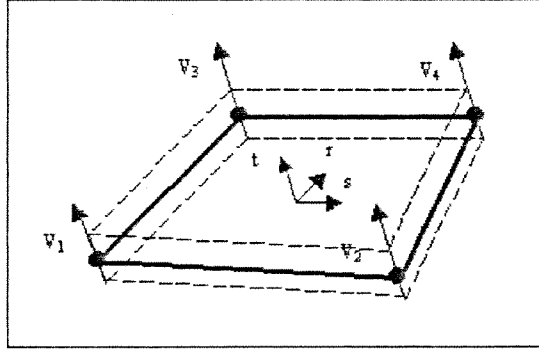
$$\boldsymbol{\tau}^{(m)} = \mathbf{C}^{(m)} \boldsymbol{\epsilon}^{(m)} + \boldsymbol{\tau}^{l(m)} \quad (4)$$

Burada $\mathbf{C}^{(m)}$ malzeme matrisi olup, $\boldsymbol{\tau}^{l(m)}$ sonlu elemanda o ana kadar biriken gerilme miktarını gösterir. Yukarıdaki denklemleri biraraya topladığımızda:

$$\begin{aligned}
& \delta \hat{\mathbf{U}}^T \left[\sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C}^{(m)} \mathbf{B}^{(m)} dV^{(m)} \right] \hat{\mathbf{U}} \\
& = \delta \hat{\mathbf{U}}^T \left[\left\{ \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}^{B(m)} dV^{(m)} \right\} + \left\{ \sum_m \int_{S_1^{(m)}, \dots, S_q^{(m)}} \mathbf{H}^{S(m)} \mathbf{f}^{S(m)} dS^{(m)} \right\} \right. \\
& \quad \left. - \left\{ \sum_m \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \boldsymbol{\tau}^{I(m)} dV^{(m)} \right\} + \mathbf{R}_c \right] \quad (5)
\end{aligned}$$

elde edilir.

2.3. Kabuk Elemanlar (Shell Elements)



Şekil 1. Kabuk eleman

Yukarıdaki şekilde bir kabuk eleman ve bunun için tarif edilen yerleşik koordinat sistemi ile düğüm noktalarındaki, orta yüzeye dik yöndeki vektörler görülmektedir. Kabuk elemanın herhangi bir noktasının, üç ayrı yöndeki koordinatları aşağıdaki denklemlerle hesaplanır:

$$\begin{aligned}
{}^1x(r, s, t) &= \sum_{k=1}^q h_k {}^1x_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^1V_{nx}^k \\
{}^1y(r, s, t) &= \sum_{k=1}^q h_k {}^1y_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^1V_{ny}^k \\
{}^1z(r, s, t) &= \sum_{k=1}^q h_k {}^1z_k + \frac{t}{2} \sum_{k=1}^q a_k h_k {}^1V_{nz}^k
\end{aligned} \quad (6)$$

Burada $h_k(r,s)$ şekil fonksiyonlarıdır ve dört düğüm noktalı kabuk eleman için aşağıdaki şekilde verilir:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{1}{4}(1+r)(1+s) \\ h_2 &= \frac{1}{4}(1-r)(1+s) \\ h_3 &= \frac{1}{4}(1-r)(1-s) \\ h_4 &= \frac{1}{4}(1+r)(1-s) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Bir önceki denklemlerde ${}^1x_k, {}^1y_k, {}^1z_k$ düğüm noktalarının kartezyen koordinatlarını, a_k aynı noktalardaki kabuk kalınlığını, ${}^1V_{nx}^k, {}^1V_{ny}^k, {}^1V_{nz}^k$ yine aynı noktalardaki yüzeye dik yöndeki vektörlerin bileşenlerini verir. Birim yer değiştirme miktarları da benzer şekilde hesaplanır. Dördüncü ve beşinci serbestlik derecelerini oluşturan döngü miktarları da burada hesaba katılır.

2.4. Sayısal İntegral

Yukarıdaki denklemlerde yer alan integraller, uygun noktaların seçildiği sayısal integral yöntemiyle alınır. Herbir eleman yüzeyi için ağırlıklı dört nokta (2x2) hesaba katılır. Bir başka deyişle:

$$\int F(r,s) dr ds = \sum_{i,j} \alpha_{ij} F(r_i, s_j) \quad (8)$$

Burada α_{ij} seçilen noktaya ait ağırlık miktarı, $F(r_i, s_j)$ ise fonksiyonun o nokta için aldığı değerdir.

2.5. Malzeme Özellikleri

Elasto-plastik, izotropik malzemenin eşdeğer gerilme miktarı, testlerden elde edilen malzeme katsayılarının da yer aldığı aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\begin{aligned} {}^t \tau_{ij} &= C_{ijkl}^{ep} {}^t \varepsilon_{kl} \\ &= \left(C_{ijkl}^e - \frac{4 G^2 Z_{ij} Z_{kl}}{H_d Y^2 + 2 G Z_{mm} Z_{mm}} \right) {}^t \varepsilon_{kl} \end{aligned} \quad (9)$$

Birim gerilme miktarları ($d\sigma_{ij}$) hesaplandıktan sonra bir sonraki aşamadaki toplam gerilme miktarı ${}^{t+\Delta t} \sigma = {}^t \sigma + d\sigma$ denkleminde elde edilir.

2.6. Açık (Explicit) Metod

Bu yöntemde ivme ve hız terimleri, yer değiştirme miktarları cinsinden, yaklaşık olarak, aşağıdaki şekliyle ifade edilir:

$${}^t \ddot{U} = \frac{1}{\Delta t^2} \left({}^{t-\Delta t} U - 2 {}^t U + {}^{t+\Delta t} U \right) \quad (10.a)$$

$${}^t \dot{U} = \frac{1}{2 \Delta t} \left(-{}^{t-\Delta t} U + {}^{t+\Delta t} U \right) \quad (10.b)$$

Bu ifadeler, "t" zamanı için bünye denklemine yerleştirilecek olursa:

$$M \ddot{U} + C \dot{U} = R - R_{temas} \quad (11.a)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2 \Delta t} C \right) {}^{t+\Delta t} U = {}^t R - \left(-\frac{2}{\Delta t^2} M \right) {}^t U - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2 \Delta t} C \right) {}^{t-\Delta t} U - R_{temas} \quad (11.b)$$

elde edilir. Burada R_{temas} iş parçası ile dişi-erkek kalıp parçaları ve baskı plakası arasındaki temas sebebiyle oluşan dış yüklerin değeridir. Bu yükler, ceza metodu (penalty method) olarak adlandırılan yöntemle kullanılarak hesap edilmektedir. Ayrıca seçilmesi gereken kritik zaman aralığı (Δt_{cr}) malzemeye ait elastik dalga hızının belirli iki nokta arasını katedeceği sürenin hesaplanmasıyla elde edilir.

3. Açık Sonlu Elemanlar Metodu Analiz Programı: EFEM

EFEM programı şu modüllerden meydana gelmektedir:

- SHAPE
- NODAL
- MMATRICES
- EXTLOAD
- NORMALS
- MATERIAL
- COORTRANS
- BMATRICES
- INTLOAD
- DCONT
- PCONT
- BCONT
- EXPLICIT
- STRAINS
- STRESSES

SHAPE modülünde, her bir sonlu eleman için şekil fonksiyonları, 2×2 ağırlık noktasında (weighting points) hesaplanmaktadır. Bunlar için ayrıca, eleman düzlemi üzerinde, farklı iki yönde ("r" ve "s" yönleri) türevler alınmaktadır.

NODAL modülünde ise, düğüm noktaları koordinatlarını hesaplanmaktadır.

MMATRICES modülü, kütle matris elemanlarının değerlerinin hesaplandığı yerdir.

EXTLOAD, dışarıdan etkiyen yük vektörünün hesaplanmasında kullanılır.

NORMALS'ta, herbir düğüm noktası için, birbirine dik üç ayrı yöndeki vektörler tanımlanmaktadır.

MATERIAL modülü, üç boyutlu, elasto-plastik gerilme-birim uzama (stress-strain) matrisinin hesabı için kullanılmaktadır.

COORTRANS, herbir sonlu eleman için, direngenlik (stiffness) matrisini, kabuk eleman üzerindeki lokal koordinat düzlemindeki ifadesinden, global Kartezyen koordinat düzlemindeki ifadesine çevirmekte kullanılır.

BMATRICES modülü, Jacobian, doğrusal and doğrusal olmayan birim uzama-yer değiştirme matris değerlerinin hesaplandığı yerdir.

INTLOAD'da ise gerilme vektörü kullanılarak, iç yük değerleri hesaplanmaktadır.

DCONT, PCONT ve BCONT modülleri sırasıyla, iş parçası ile dişi-erkek kalıp parçaları ve baskı plakası arasındaki temas sebebiyle oluşan dış yüklerin hesaplanmasında kullanılır. Bu kuvvetler daha sonra bünye denkleminin sağ tarafına katılır.

EXPLICIT modülünde, açık algoritma kullanılarak, bünye denkleminin sol ve sağ tarafında yer alan ifadeler eşitlenmekte ve yeni zaman aralığındaki yer değiştirme miktarları hesap edilmektedir.

STRAINS modülü, birim uzama miktarlarını hesaplar.

STRESSES ise, gerilme miktarlarının hesaplandığı yerdir.

4. Örnek Problem Üzerinde Gerçekleştirilen Simülasyonlar

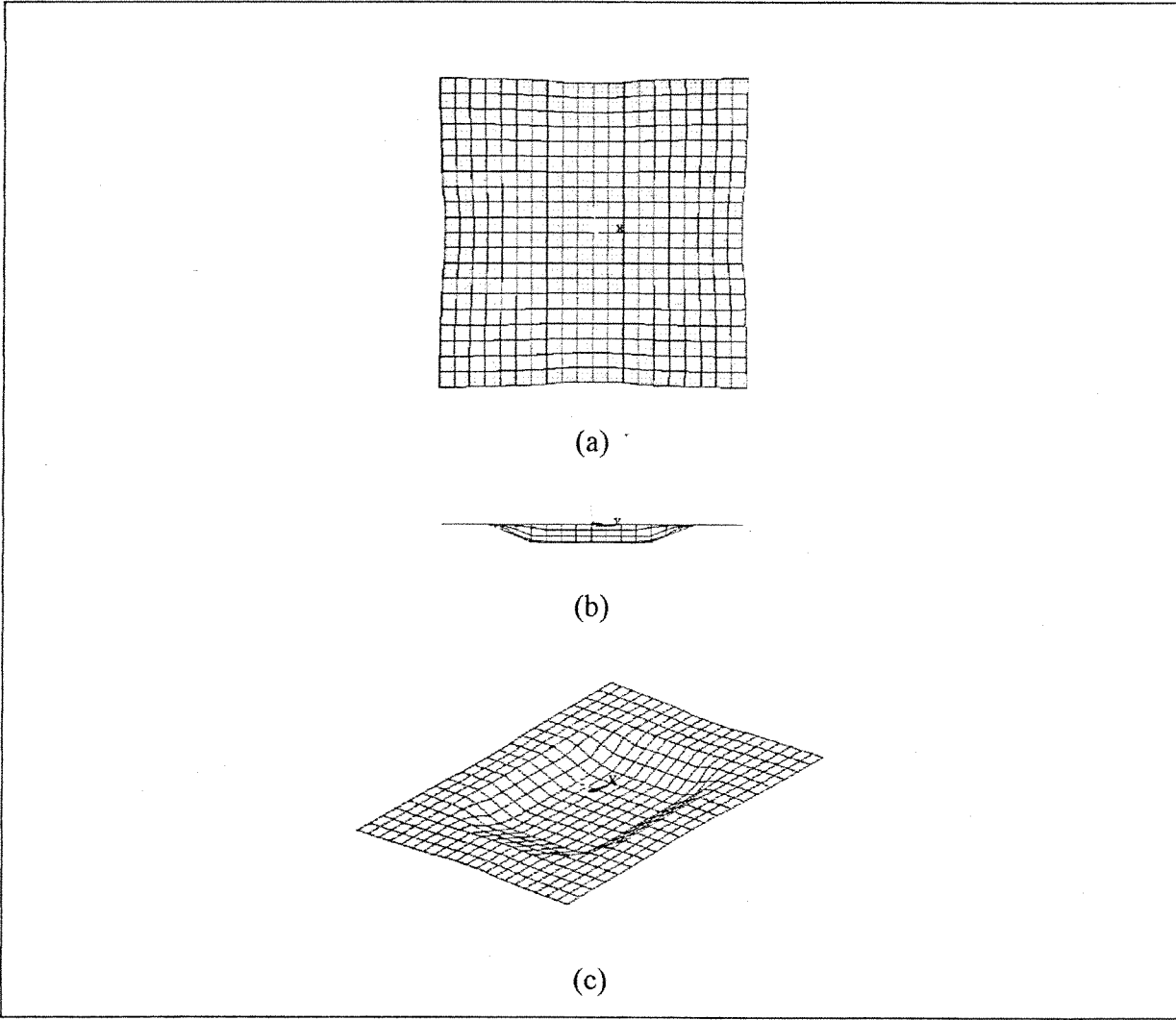
Programın ilk uygulaması, kare kesitli bir kap için gerçekleştirilmiştir. Aşağıda bu problemle ilgili kısa açıklamalar yer almaktadır:

- Ezilecek plaka, “x” ve “y” eksenlerindeki simetrisi göz önüne alınarak, dörtte bir şekilde modellenmiştir.
- Dörtte bir model için plaka yüzeyi 40×40 mm, kalınlık ise 1 mm’dir. Bu yapı 10×10 kabuk eleman örgüsü kullanılarak 100 eşit parçaya bölünmüştür. Bir başka deyişle, 121 adet düğüm noktası kullanılmıştır.
- Düğüm noktalarının başlangıç konumları ve birbirleriyle nasıl bağlandıkları programın içinde hesaplanır.

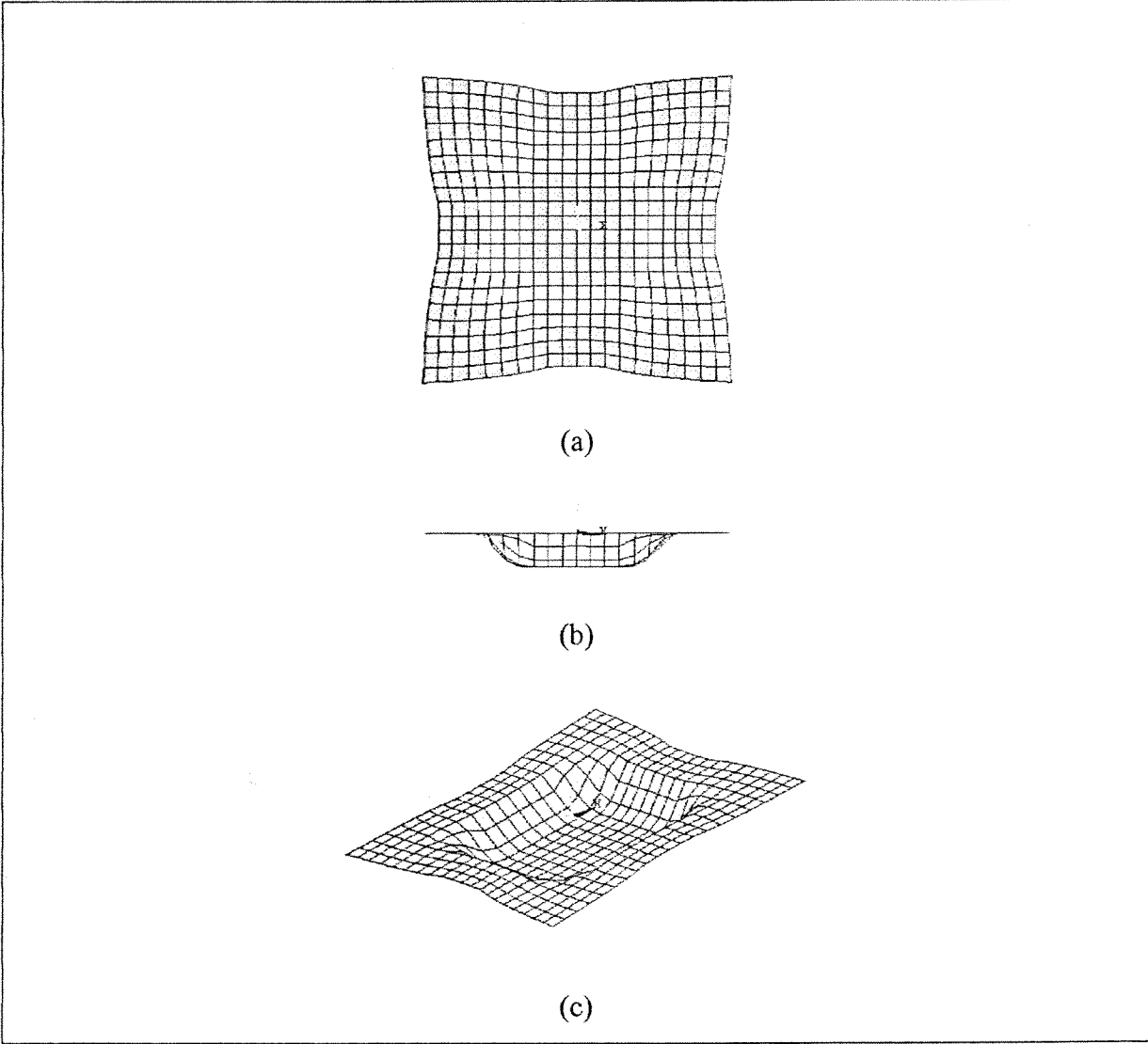
Sınır şartları değerleri (dış yükler ve yerlerini değiştirmeyen düğüm noktalarının hangileri olduğu bilgileri), ana programın içinde yer almaktadır. Zımbanın altında kalan bölgeler dışarıdan etkiyen kuvvet sayesinde birim yer değiştirme sınır şartlarına maruz bırakılırken, zımbanın bu bölgedeki noktalara uyguladığı kuvvetin miktarı, herbir zaman aralığında hesaplanabilmektedir.

- İzotropik elasto-plastik malzeme değerleri: $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0,30$, $\sigma_Y = 500 \text{ MPa}$, $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$ (başlangıç değeri) şeklinde hesaba katılmıştır.
- Zaman aralığı $1,0 \times 10^{-3} \text{ ms}$ olarak seçilmiştir. Bu değer, kritik değer olan $t_{cr} = 0,002$ milisaniyenin altındadır. ($10 \text{ [mm]} / 5000 \text{ [m/s]}$)

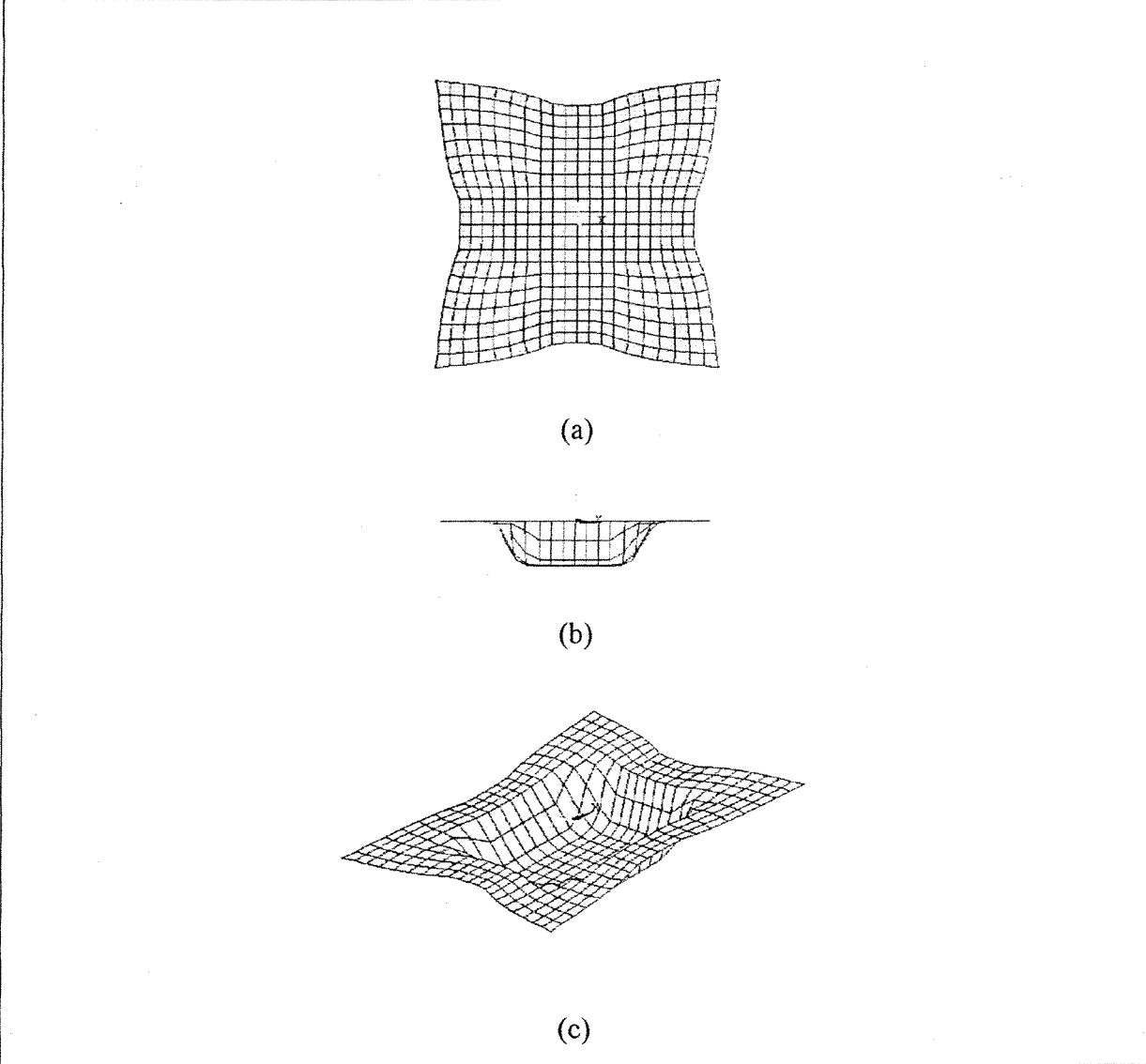
Program yukarıdaki bahsedildiği şekliyle 5, 10 ve 15 mm zımba ilerleme miktarları için çalıştırılmış ve aşağıdaki şekillerde görülen sonuçlar elde edilmiştir. (Bkz. Şekil 2, 3 ve 4) Bu sonuçlar, ANSYS sonlu elemanlar analiz programı (sürüm 5.5) yardımıyla ekranda görüntülenmiştir. Simülasyonda kullanılan kalıp parçalarının resimleri ise Şekil 5’te gösterilmiştir.



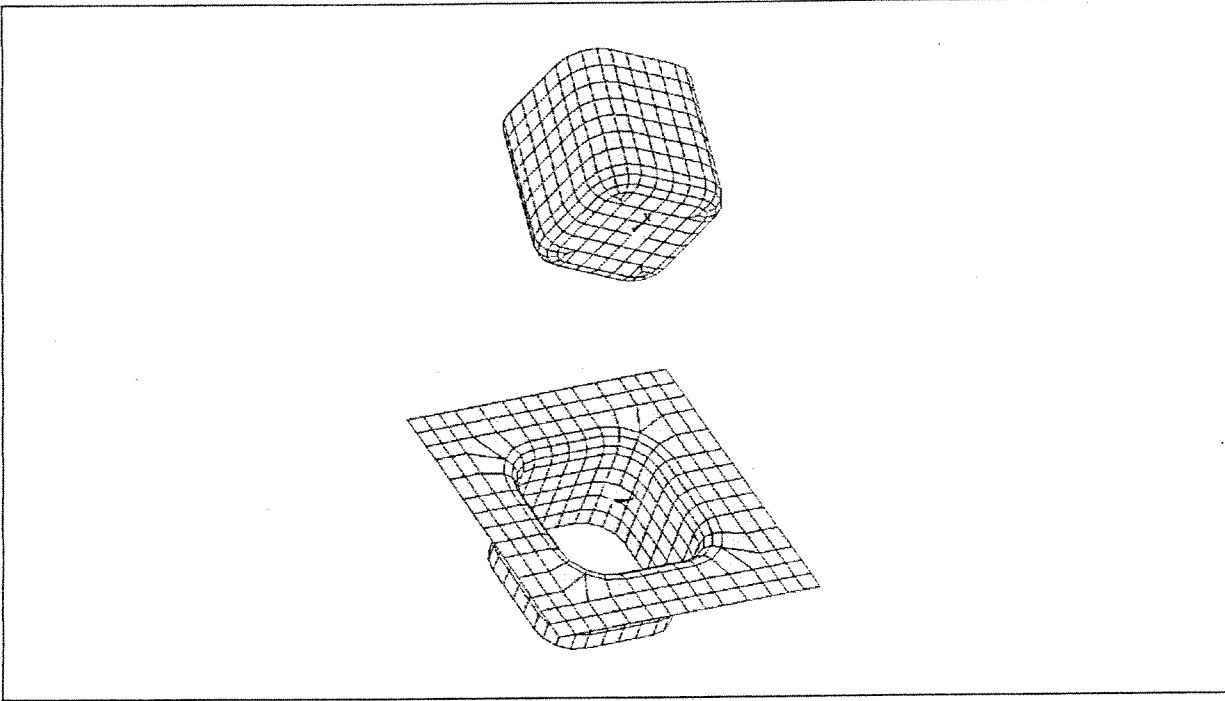
Şekil 2. 5 mm derinlikte çekilen parçanın simülasyon resimleri
Sırasıyla: (a) Üstten, (b) yandan ve (c) üç eksendeki görüntüler



Şekil 3. 10 mm derinlikte çekilen parçanın simülasyon resimleri
Sırasıyla: (a) Üstten, (b) yandan ve (c) üç eksendeki görüntüler



Şekil 4. 15 mm derinlikte çekilen parçanın simülasyon resimleri
Sırasıyla: (a) Üstten, (b) yandan ve (c) üç eksendeki görüntüler

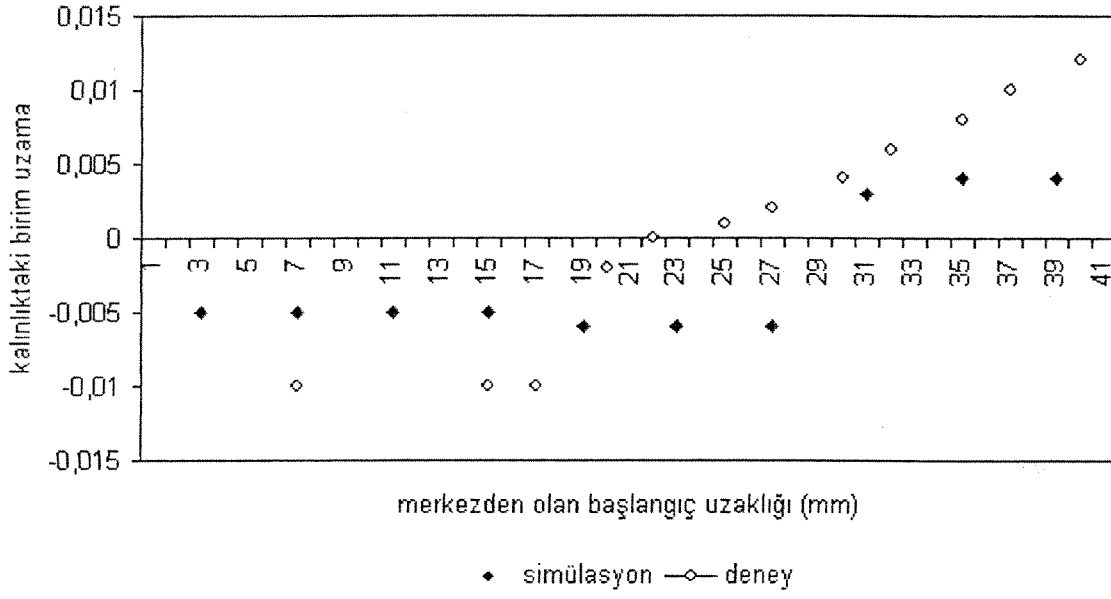


Şekil 5. Simülasyonda kullanılan kalıp parçaları

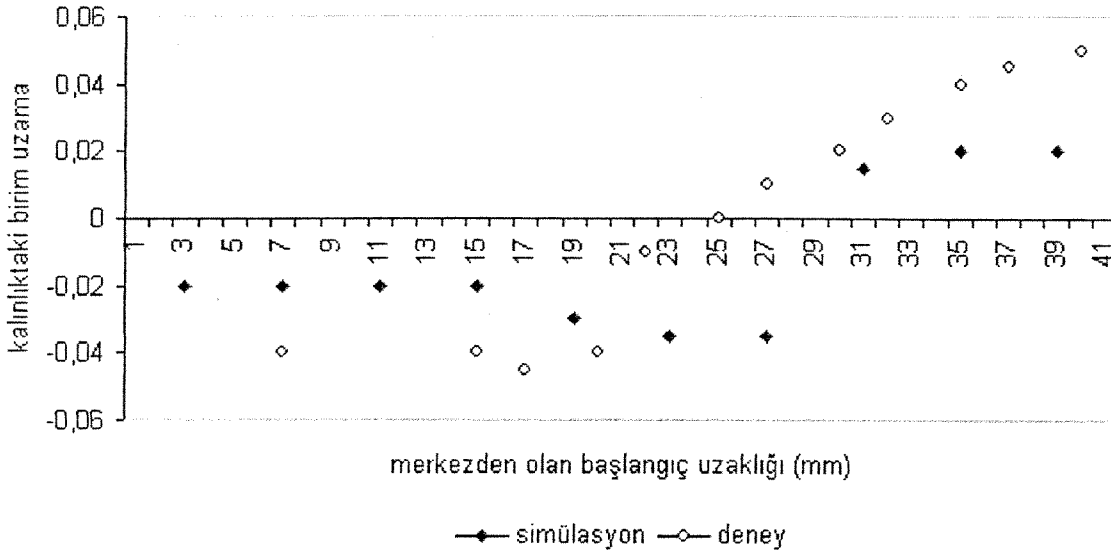
Şekil 6.a, b ve c'de, sırasıyla 5, 10 ve 15 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının (yüzde olarak) merkezden olan uzaklığa göre değişimi grafikleri yer almaktadır. Şekil 7'de ise, bu değişimlerin birbirleriyle kıyaslanması gösterilmiştir. Son olarak Şekil 8'de, zımbanın uyguladığı yük miktarının zımba ilerlemesine bağlı olarak değişimi grafiği görülmektedir.

5. Deneyler

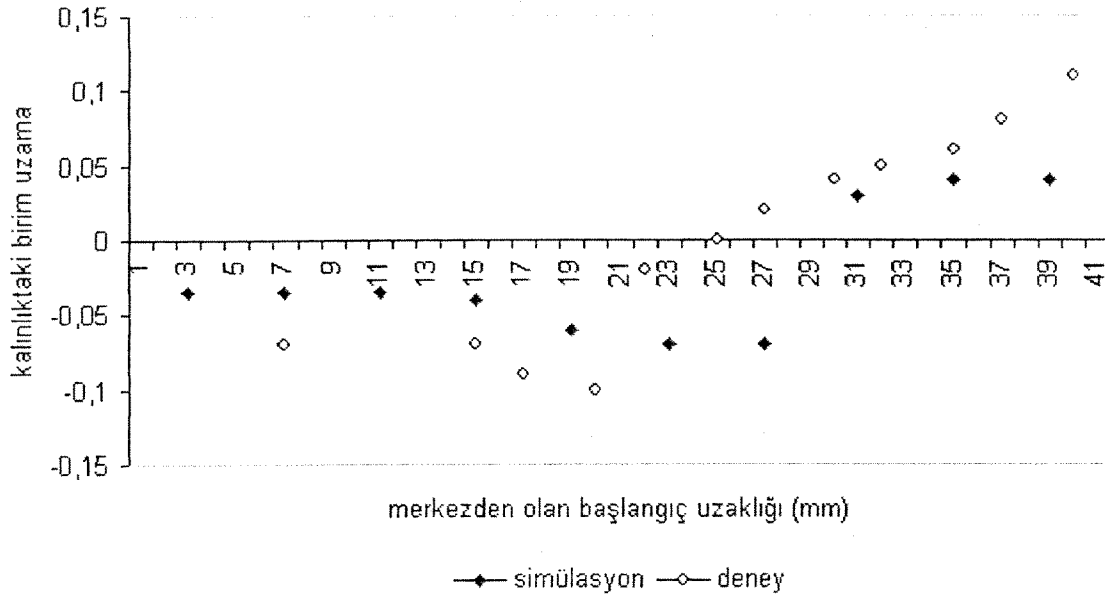
O.D.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Test Laboratuvarı'nda, derin çekme presinin yardımıyla, plakalar farklı derinliklerde ezilmiştir. Derin çekilen bazı parçaların resmi Şekil 9'da görülebilir.



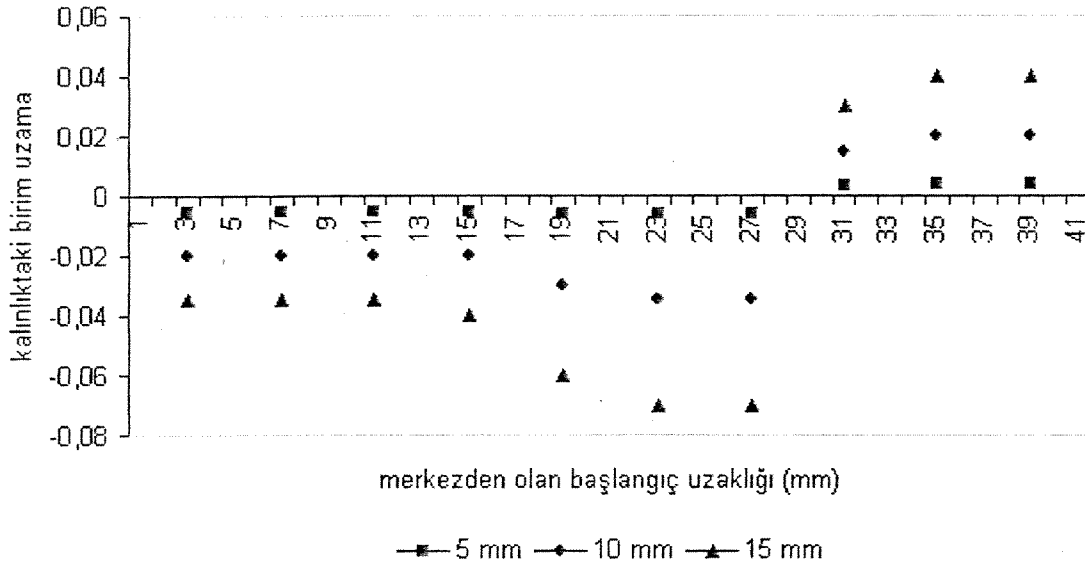
Şekil 6.a. 5 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi



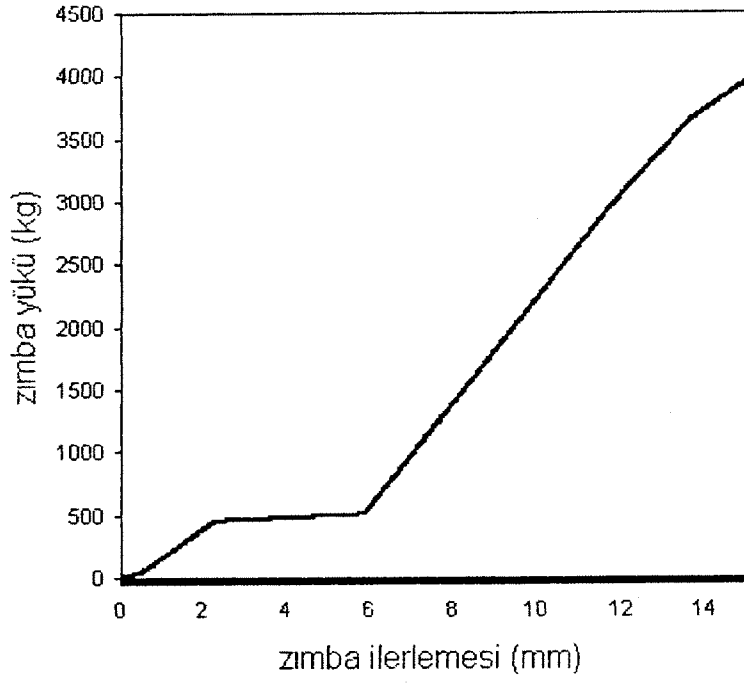
Şekil 6.b. 10 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi



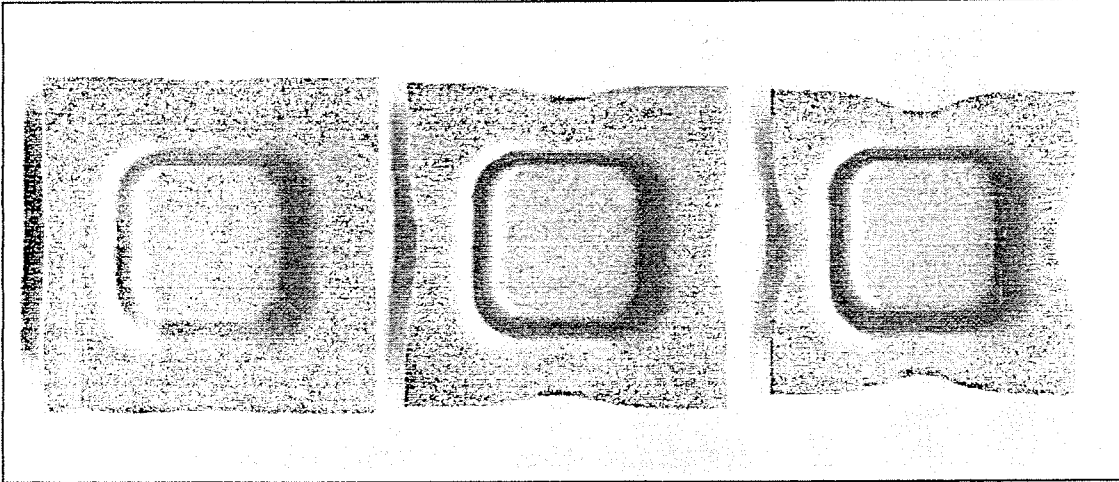
Şekil 6.c. 15 mm zımba ilerlemesinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarının, merkezden olan başlangıç uzaklığına göre değişimi



Şekil 7. 5, 10 ve 15 mm zımba ilerlemelerinin ardından, kalınlıktaki birim uzama miktarlarının kıyaslanması



Şekil 8. Zımbanın uyguladığı yük miktarının, zımba ilerlemesine bağlı olarak değişimi



Şekil 9. Derin çekilmiş parçaların resmi

6. Sonuç

Simülasyon sonuçları deneysel bulgularla uyum içerisinde. Kalınlıktaki birim uzama miktarlarının göreceli biraz daha az çıkması ve bunların hesaplandığı noktalar için grafiğin hafifçe sağa doğru kaymış olması durumunun, kullanılan sonlu eleman örgüsünün daha da sıklaştırılması yoluyla çözülebileceği düşünülmektedir. Ne var ki, eldeki bilgisayar imkanlarıyla bu çözüme gidilememiş; farklı bir simülasyon, bilgisayar kapasitesini aştığı için yapılamamıştır.

Zımbanın uyguladığı yükün artışıdaki eğilim 0-15 mm derin çekme aralığında tatmin edicidir. Yük belli bir noktadan sonra sabit bir değere kavuşmaktadır. Bu hususla ilgili olarak yapılabilecek bir iyileştirme, temas algoritmasındaki bazı parametrelerin aldıkları değerlerde gidilebilecek değişikliklerdir. Yalnız bu durumda, deneme-yanılma yöntemiyle gerçekleştirilecek olan yeni denemeler fazlasıyla zaman alıcı olacaktır.

Sonuç olarak, açık yöntem kullanılarak hazırlanan programla, dört kenarlı, dört düğüm noktalı, herbir noktada beş serbestlik dereceli kabuk elemanlara yer verilerek, simetrik bir parçanın simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sayısal integraller Gauss metoduyla alınmıştır. İzotropik, elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Yer değiştirme ve birim uzama miktarları hesaplanmıştır. Yeni bir temas algoritması uygulanmıştır. İş parçasının, baskı plakası kullanarak tutulduğu durumlar incelenmiştir.

Bilgisayar programına yeni ilaveler yapılarak sürekli olarak güncellenmesi ve geliştirilmesi çalışmaları devam edebilir. Bu sayede ileride, karmaşık geometrilere sahip malzemeler için (arabaların kaporta parçaları vb.) uygulamalar tasarlanabilir.

REFERANSLAR

- [1] Meinders T., Carleer B. D., Geijselaers H. J. M., Huétink J., "The implementation of an equivalent drawbead model in a finite element code for sheet metal forming," *Journal of Material Processing Technology*, vol.83, 1998, pp.234-244.
- [2] Hughes T.J.R., Liu W.K., "Implicit-explicit finite elements in transient analysis: Implementation and numerical examples," *Journal of Applied Mechanics*, vol.45, June 1978, pp.375-378.
- [3] Saran M. J., Wagoner R. H., "A consistent implicit formulation for nonlinear finite element modeling with contact and friction: Part I - Theory," *Journal of Applied Mechanics*, vol.58, June 1991, pp.499-506.
- [4] Haug E., Di Pasquale E., Pickett A.K., Ulrich D., "Industrial sheet metal forming simulation using explicit finite element methods," *Int. VDI Conf., Zurich*, May 14-16, 1991, pp.1-31.
- [5] Belytschko T., Lu Y.Y., "Explicit multi-time step integration for first and second order finite element semi-discretizations," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.108, no.3-4, 1993, pp.353-383.
- [6] Li Y.-F., Nemat-Nasser S., "An explicit integration scheme for finite-deformation plasticity in finite-element methods," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol.15, 1993, pp.93-102.
- [7] Yun Y.M., "An explicit finite element formulation for very large deformations based on updated material reference frame," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol.13, no.2-3, 1993, pp.209-224.

- [8] Shim H.B., Yang D.Y., "Elastic-plastic finite element analysis of deep drawing processes by membrane and shell elements," *Journal of Manufacturing Science and Engineering (Transactions of the ASME)*, vol.119, no.3, 1997, pp.341-349.
- [9] Bathe K.J., Bouzinov, P.A., "On the constraint function method for contact problems," *Computers and Structures*, vol.64, no.5-6, 1997, pp.1069-1085.
- [10] Chappelle D., Bathe K.J., "Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures," *Computers and Structures*, vol.66, no.1, 1998, pp.19-36.
- [11] Martins P.A.F., Barata Marques M.J.M., "Plane strain rigid plastic finite element formulation for sheet metal forming processes," *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.207, 1993, pp.167-171.
- [12] Zhou Y., Jonas J.J., Szabó L., Makinde A., Jain M., MacEwen S.R., "Incorporation of an anisotropic (texture-based) strain-rate potential into three-dimensional finite element simulations," *Int. J. Plasticity*, vol.13, no.1-2, 1997, pp.165-181.
- [13] Kutt L.M., Pifko A.B., Nardiello J.A., Papazian J.M., "Slow-dynamic finite element simulation of manufacturing processes," *Computers and Structures*, vol.66, no.1, 1998, pp.1-17.
- [14] Lee S.W., Yoon J.W., Yang D.Y., "A stress integration algorithm for plane stress elastoplasticity and its applications to explicit finite element analysis of sheet metal forming processes," *Computers & Structures*, vol.66, no.2-3, 1998, pp.301-311.
- [15] Nordlund P., Häggblad B., "Prediction of wrinkle tendencies in explicit sheet metal-forming simulations," *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, vol.40, no.22, 1997, pp.4079-4095.
- [16] Krysl P., Belytschko T., "Object-oriented parallelization of explicit structural dynamics with PVM," *Computers and Structures*, vol.66, no.2-3, 1998, pp.259-273.

[17] Li M., Sha D., Tamma K. K., "Linear Complementary Formulations Involving Frictional Contact for Elasto-Plastic Deformable Bodies," *Journal of Applied Mechanics*, vol.64, 1997, pp.80-89.

[18] Eterovic A. L., Bathe K. J., "On the Treatment of Inequality Constraints Arising from Contact Conditions in Finite Element Analysis," *Computers and Structures*, vol.40, no.2, 1991, pp.203-209.

[19] Şenalp Z. A., Kaftanoğlu B., "Prediction of Wrinkling Behavior for Nonaxisymmetric Sheet Metal Parts by the Use of Finite Element Method," *Proc. 2000 ASME IDTEC/CIE: 26th Design Automation Conf. (DETC2000/DAC-14539)*

[20] Germain Y., Chung K., Wagoner R.H., "A rigid viscoplastic finite element program for sheet metal forming analysis," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.31, No.1, 1989, pp.1-24.

[21] El Khaldi F., De Bernardi R., Ogura O., "Sheet Metal Forming: State-of-the-Art Application Methodology and Simulation Streamlining," (Journal unknown), pp.27-41.

[22] Altenburger C. A., "Some Factors in Physical Properties that Influence Deep Drawing Behavior," (Journal unknown), pp.73-79.

[23] Tousley F. M., "Application and Testing of Body Sheet," (Journal unknown), pp.81-85.

[24] (Author unknown), "Automated Mesh Generation for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming," (Journal unknown), pp.1-18.

[25] Danckert J., "The residual stress distribution in the wall of a deep-drawn and ironed cup determined experimentally and by FEM," *CIRP Annals*, Vol.43, No.1, 1994, pp.249-252.

[26] Arrieux R., Brunet M., Vacher P., Nhat T.N., "A method to predict the onset of necking in numerical simulation of deep drawing operations," *CIRP Annals*, Vol.45, No.1, 1996, pp.255-258.

[27] Zhao H., "A Constitutive Model for Metals Over a Large Range of Strain Rates: Identification For Mild-Steel and Aluminum Sheets," *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, vol.230, no.1-2, 1997, pp.95-99.

[28] Nemat-Nasser S., Chung D.-T., "Explicit Constitutive Algorithm for Large-Strain, Large-Strain-Rate Elastic-Viscoplasticity," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.95, no.2, 1992, pp.205-219.

[29] Malone J. G., Johnson N. L., "A Parallel Finite Element Contact/Impact Algorithm for Non-Linear Explicit Transient Analysis: Part I - The Search Algorithm and Contact Mechanics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.37, no.4, 1994, pp.559-590.

[30] Malone J. G., Johnson N. L., "A Parallel Finite Element Contact/Impact Algorithm for Non-Linear Explicit Transient Analysis: Part II - Parallel Implementation," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.37, no.4, 1994, pp.591-603.

[31] Nakamachi E., Dong X., "Study of Texture Effect on Sheet Failure in a Limit Dome Height Test by Using Elastic/Crystalline Viscoplastic Finite Element Analysis," *Journal of Applied Mechanics*, vol.64, 1997, pp.519-524.

[32] Zikry M.A., "An Accurate and Stable Algorithm for High Strain-Rate Finite Strain Plasticity," *Computers and Structures*, vol.50, no.3, 1994, pp.337-350.

[33] Nikishkov G.P., Kawka M., Makinouchi A., Yagawa G., Yoshimura S., "Porting An Industrial Sheet Metal Forming Code To A Distributed Memory Parallel Computer," *Computers and Structures*, vol.67, no.6, 1998, pp.439-449.

[34] Nordlund P., "Adaptivity and wrinkle indication in sheet metal forming, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*," No.161, 1998, pp.127-143.

- [35] Kaftanoğlu B., Alexander J.M., "On quasistatic axisymmetrical stretch forming," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.12, 1970, pp.1065-1084.
- [36] Majlessi S.A., Lee D., "Deep drawing of square-shaped sheet metal parts. Part 1: Finite element analysis," *Journal of Engineering for Industry*, Vol.115, No.1, 1993, pp.102-109.
- [37] Majlessi S.A., Lee D., "Deep drawing of square-shaped sheet metal parts. Part 2: Experimental study," 1993, *Journal of Engineering for Industry*, Vol.115, No.1, 1993, pp.110-117.
- [38] Chung K., Kirit S., "Finite element simulation of sheet metal forming for planar anisotropic metals," *Int. J. Plasticity*, v.8, n.4, 1993, pp.453-476.
- [39] Chung K., Barlat F., Brem J.C., Lege D.J., Richmond O., "Blank shape design for a planar anisotropic sheet based on ideal forming design theory and FEM analysis," *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol.39, No.1, 1997, pp.105-120.
- [40] Micari F., Fratini L., Lo Casto S., Alberti N., "Prediction of ductile fractures occurrence in deep drawing of square boxes," *CIRP Annals*, Vol.45, No.1, pp.259-262.
- [41] Anand L., Balasubramanian S., "Polycrystal plasticity: Application to earing in cup drawing," *CIRP Annals*, Vol.45, No.1, pp.263-268.
- [42] Weinmann K.J., Kernosky S.K., "Friction studies in sheet metal forming based on a unique die shoulder force transducer," *CIRP Annals*, Vol.45, No.1, pp.269-272.
- [43] Kaftanoğlu B., "Plastic Analysis of Flange Wrinkling in Axisymmetrical Deep-Drawing," (Journal unknown), pp.21-28.
- [44] Shim H. B., Yang D. Y., "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Deep Drawing Processes by Membrane and Shell Elements," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.119, 1997, pp.341-349.

- [45] Zywicz E., Puso M. A., "A General Conjugate-Gradient-Based Predictor-Corrector Solver for Explicit Finite Element Contact," *Int'l. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol.44, 1999, pp.439-459.
- [46] Danckert J., Nielsen K. B., "Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure on the Flange," *CIRP Annals 2000*, vol.49, pp.217-220.
- [47] Tekkaya A. E., "State-of-the-Art of Simulation of Sheet Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.103, 2000, pp.14-22.
- [48] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Baldoukas A. K., "Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit-Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics - Part 1. Deep-Drawing of Cylindrical Cups," *Journal of Materials Processing Technology*, vol72, 1997, pp.48-60.
- [49] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Baldoukas A. K., "Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit-Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics - Part 1. Deep-Drawing of Square Cups," *Journal of Materials Processing Technology*, vol72, 1997, pp.110-116.
- [50] Jung D. W., Yang D. Y., "Step-wise Combined Implicit-Explicit Finite Element Simulation of Autobody Stamping Process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.83, 1998, pp.245-260.
- [51] Jourdan F., Jean M., Alart P., "An Alternative Method Between Implicit and Explicit Schemes Devoted to Frictional Contact Problems in Deep Drawing Simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.80-81, 1998, pp.257-262.
- [52] 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.

- [53] Taylor L., Cao J., Karafillis A. P., Boyce M. C., "Numerical Simulations of Sheet-Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.50, 1995, pp.168-179.
- [54] Nakamachi E., "Sheet-Forming Process Characterization by Static-Explicit Anisotropic Elastic-Plastic Finite-Element Simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.50, 1995, pp.116-132.
- [55] Rebelo N., Nagtegaal J.C., Taylor L.M., Passmann R., "Comparison of implicit and explicit finite element methods in the simulation of metal forming processes," *Num. Meth. Industrial Forming Processes*, Rotterdam, 1992, Chenot, Wood and Zienkiewicz (eds.), pp.99-108.
- [56] Dokainish M.A., Subbaraj K., "Survey of Direct Time-Integration Methods in Computational Structural Dynamics. I. Explicit Methods," *Computers and Structures*, vol.32, no.6, 1989, pp.1371-1386.
- [57] Darendeliler H., *Computer-Aided Deformation Analysis of Deep-Drawing*, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Mechanical Engineering Department, Ankara, December 1991.
- [58] 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.
- [59] Johnson W., Mellor P. B., *Engineering Plasticity*, Ellis Horwood Ltd., 1983.
- [60] Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd ed., John Wiley and Sons Inc., 1989.
- [61] Bathe K.-J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall Inc., 1982 (and 1996).

[62] Belytschko T., Liu W. K., Moran J. B., *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, John Wiley and Sons Ltd., 2000

[63] Owen D. R. J., Hinton E., *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pineridge Press Ltd., 1980.

[64] Makinouchi A., *Development Of Dynamic-Explicit Elastic-Viscoplastic Finite Element Method For Sheet Forming Simulation*, RIKEN, Osaka University, Japan, Sept. 1993.

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU
(BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU)

Proje Kodu: MİSAG-142		
Proje Başlığı: Derin Çekme İmalat Tekniğinin Açık (Explicit) Sonlu Elemanlar Metoduyla Analizi		
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof. Dr. Bilgin Kaftanoğlu (Proje Yürütücüsü) S. Savaş Kırmıoğlu (Yardımcı Araştırmacı)		
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü 06531-Ankara		
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:		
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 22.11.1999 - 22.09.2002		
Öz (en çok 70 kelime): <p>Derin çekme yöntemi sac levhalardan kalıplar yardımı ile üç boyutlu ürünler elde etmeye yaramaktadır. Bu üretim sürecine başlamadan önce ürün tasarımı, bunu üretecek kalıpların tasarımı gelmektedir. Ancak ilk tasarımı yapılırken, bu tasarımın başarılı olup olmayacağını belirleyebilecek ve plastik şekil değişikliği ve kararsızlık analizini modelleyebilecek bir araca ihtiyaç vardır. Aksi halde yapılan tasarım başarısız olabilir ve üretilen kalıplar da boşuna yapılmış olur. Bu projede simetrik ve simetrik olmayan levhaları üretilecek ürünlerin teorik ve bilgisayar ortamında modellenmelerinin sonlu elemanlar yöntemi ve açık (explicit) algoritmalar geliştirilerek uygulanmasından bahsedilmektedir. Bu proje, kapalı (implicit) yöntemler kullanılarak yapılan çalışmaların bir devamıdır. Üç boyutlu ürünlerin plastik uzama ve birim şekil değiştirme dağılımları elde edilmiştir. Böylece kritik bölgeler saptanabilir; ürün ve dolayısı ile kalıp tasarımları değiştirilebilir; malzeme seçimi, yağlama gibi faktörler optimize edilebilir; bilgisayar ortamında deneme-yanılma işlemi tamamlandıktan sonra gerçek üretime geçilebilir. Masraflarda tasarruf sağlanabilir ve verimlilik artırılabilir. Açık (explicit) sonlu elemanlar yönteminin de tercih nedeni daha verimli olması ve işlem zamanının daha kısa olmasıdır.</p>		
Anahtar Kelimeler: derin çekme, açık (explicit) sonlu elemanlar yöntemi		
Projenin Kaynaklanan Yayınlar:		
Bilim Dalı:	Üretim Yöntemleri	ve CAD/CAM
Doçentlik Bilim Dalı Kodu:	332 451	332 453