

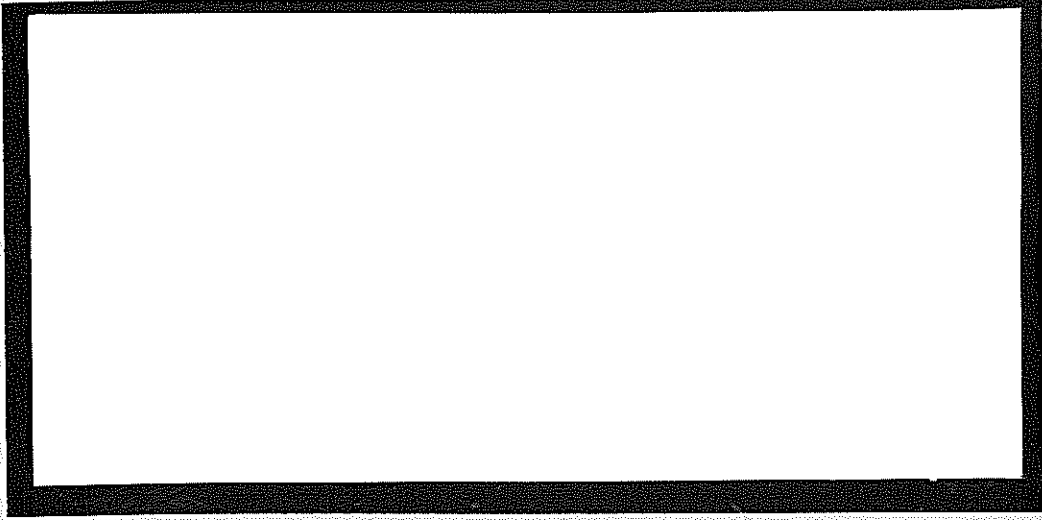


TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

1997-1381

D419



Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu

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

**METAL LEVHA ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE
SANAYİDE ÜRETİLEN PARÇALARIN
BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI**

PROJE NO: MISAG-19

**PROF. DR. BİLGİN KAFTANOĞLU
Y. DOÇ. DR. HALUK DARENDELİLER
ZAFER ŞENALP**

**HAZİRAN 1995
ANKARA**

ÖNSÖZ

Metal Levha Şekillendirme Yöntemiyle Sanayide Üretilen Parçaların Bilgisayar Destekli Tasarımı isimli proje TÜBİTAK tarafından MISAG-19 kodu altında desteklenmiştir. Bu destek bilgisayar grafiği ile ilgili yazılım ve donanım ürünlerinin sağlanmasında ve personel için kullanılmıştır. TÜBİTAK'ın bu desteği için şükranlarımızı sunarız.

Proje aynı zamanda MKEK Genel Müdürlüğü, ELSA Genel Müdürlüğü ve IBM Türk Ltd. Şirketi tarafından da desteklenmiştir. MKEK ve ELSA'nın yaptığı malzeme, personel, tesislerini kullanmak ve örnek sağlama desteği için, IBM'nin yaptığı yazılım ve donanım katkısı için şükranlarımızı sunarız.

Bu araştırma projesi Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Destekli Tasarım, İmalat ve Robotik (BİLTİR) Merkezinin alt yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilgisayarlar, çevre üniteleri, CNC tezgahları proje sırasında kullanılmıştır. Bu katkılarından dolayı BİLTİR Merkezi yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

Proje Yürütücüsü
ve
Personeli

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
KAPAK	1
ÖNSÖZ	2
İÇİNDEKİLER	3
ŞEKİL LİSTESİ	4
ÖZ	6
ABSTRACT	7
GİRİŞ	8
GELİŞME	11
SONUÇ	59
KAYNAKÇA	61
EK-1	62
BİBLİOGRAFİK BİLGİ FORMU	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Derin çekme işlemi	8
Şekil 2. Kullanılan koordinat eksenleri ve taban vektörleri	13
Şekil 3. Kare taslakların modellenmesinde kullanılan sonlu elemanlar ağı.....	19
Şekil 4. 30 mm., 50 mm. ve 71 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değiştirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.09)	22
Şekil 5. 30 mm., 50 mm. ve 71 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.09) ..	22
Şekil 6. 30 mm., 50 mm. ve 72 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değiştirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.13)	23
Şekil 7. 30 mm., 50 mm. ve 72 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.13) ...	23
Şekil 8. 30 mm., 50 mm. ve 73 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değiştirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.15)	24
Şekil 9. 30 mm., 50 mm. ve 73 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.15) ..	24
Şekil 10. Tamamen çekilmiş taslaklarda değişik sürtünme katsayıları (f) kullanılarak SEY ile elde edilen aksenal birim şekil değiştirme dağılımının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	25
Şekil 11. Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)=0.09 için elde edilen aksenal birim değiştirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması	25
Şekil 12. Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)=0.013 için elde edilen aksenal birim şekil değiştirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması	26
Şekil 13. Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)=0.15 için elde edilen aksenal birim şekil değiştirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması	26
Şekil 14. Sert alüminyum için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması	29
Şekil 15. Yarı sert alüminyum için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması	30
Şekil 16. Pirinç için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması	31

Şekil 17. Derin çekme çeliği için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması	32
Şekil 18. Paslanmaz çelik için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması	33
Şekil 19. Malzemenin şekil değiştirme karakteristiği	35
Şekil 20. 5 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	37
Şekil 21. 10 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	37
Şekil 22. 15 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	38
Şekil 23. 20 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	38
Şekil 24. 25 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	39
Şekil 25. 30 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	39
Şekil 26. 35 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	40
Şekil 27. 40 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	40
Şekil 28. Taslağın derin çekilme sırasındaki şekil değişimi	41
Şekil 29. SEY ile elde edilen derin çekmedeki şekil değiştirme'nin gerçek deneyle karşılaştırılması	42
Şekil 30. Kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	43
Şekil 31. Tüm parça üzerinde kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	43
Şekil 32. Von Mises gerilme dağılımı	44
Şekil 33. Örneğin son şekli	44
Şekil 34. Taslağın başlangıçtaki durumu	46
Şekil 35. Taslağın 5 mm çekme derinlikteki şekli	46
Şekil 36. Taslağın 10 mm çekme derinlikteki şekli	47
Şekil 37. Taslağın 15 mm çekme derinlikteki şekli	47
Şekil 38. Taslağın 20 mm çekme derinlikteki şekli	48
Şekil 39. Taslağın 25 mm çekme derinlikteki şekli	48
Şekil 40. Kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı	49
Şekil 41. Von Mises gerilme dağılımı	49
Şekil 42. Taslağın başlangıçtaki durumu	51
Şekil 43. Taslağın 5 mm çekme derinlikteki şekli	51
Şekil 44. Taslağın 10 mm çekme derinlikteki şekli	52
Şekil 45. Taslağın 15 mm çekme derinlikteki şekli	52
Şekil 46. Taslağın 20 mm çekme derinlikteki şekli	53
Şekil 47. Taslağın 25 mm çekme derinlikteki şekli	53
Şekil 48. Kalınlık yönündeki birim yer değiştirme dağılımı	54
Şekil 49. Von Mises gerilme dağılımı	54
Şekil 50. Programın algoritması	57

ÖZ

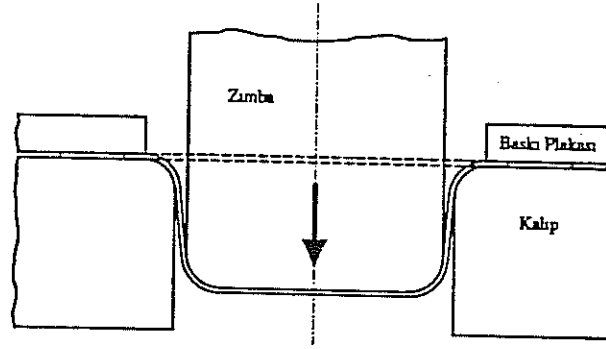
Metal levha şekillendirme yöntemi ile otomotif, savunma ve havacılık sanayi başta olmak üzere gövde ve diğer parçalar üretilmektedir. Bu parçaların tasarım ve imalatları şimdiye dek deneme/yanılma yöntemleri ile yapılmaktaydı. Geliştirilen yöntemle düz levha konumundan başlayarak zımba ve kalıp kullanılması sonucu levhaya plastik şekil değişikliği verilerek istenen parçalar elde edilmektedir. Bu sırada parça içindeki gerilmeler ve şekil değişiklikleri geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bu suretle deneme/yanılma olmaksızın parça ve kalıp tasarımları yapılabilir.

ABSTRACT

Sheet-metal forming is used in the production of body and other parts for the automotive, defence aerospace and similar industries. Up to now, design and production of such parts have been accomplished by trial and error methods. Using the sheet-metal forming process with the necessary tools such as the punch and the dies, plastic deformation is achieved and the desired geometry is obtained. The developed finite element method provides the facilities to find the stress and strain distributions in the part. Therefore it is now possible to design and produce the parts and dies without a trial and error method.

GİRİŞ

Metal levha çekme işlemlerinde malzeme genellikle büyük şekil değişimlerine uğramaktadır ve özellikle karmaşık şekilli ürünlerde deneme-yanılma yöntemi veya sayısal yöntemler kullanılmadan şekil değişimini önceden belirlemek mümkün olamamaktadır. Şekil değişimi, malzemenin mekanik özelliklerine, uygulanan zımba ve baskı plakası kuvveti ile kalıp ve taslak geometrisine bağlıdır ve aşırı çekme ve basma gerilmelerinin olduğu bölgelerdeki kararsızlıklarla sınırlıdır. Şekil 1'de simetrik bir derin çekme işleminin temel unsurları görülmektedir.



Şekil 1. Derin Çekme İşlemi

Deneme ve yanılma yöntemi ile metal levha çekme işlemlerinin analizi pahalı olmakta ve uzun zaman almaktadır. Dolayısıyla, sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Metal çekme işlemlerinin sayısal yöntemlerle analizi konusundaki ilk çalışmalardan bir tanesi Woo (1964) tarafından yapılmış ve plastisite teorileri ile izotropik malzemeler için gerilme ve yer değiştirme bağıntıları kullanılarak çözüm elde edilmiştir. Woo (1968) daha sonraki bir çalışmasında aksenal simetrik bir levha için derin çekme işleminin çözümünü elde etmiştir. Chakrabarty (1970) daire şeklindeki taslakları küre şeklindeki zımba ile kenarları sabit tutularak şekillendirme işleminin analizini yapmıştır. Benzer bir çalışmada Wang (1970) tarafından yapılmış ve küre şeklindeki zımba ile şekillendirilmiş daire şeklindeki levhalarda şekil değişimi ve gerilme dağılımı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların deneylerle ve daha önceki çalışmalarla kıyaslanması da küçük artışlarla elde edilen çözümlerin toplam şekil değiştirme teorisiyle elde edilen çözümlere göre daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. Kaftanoğlu (1966) ve Kaftanoğlu ve Alexander (1970) aksenal simetrik metal levhaların şekil değiştirme analizi için bir teori geliştirmişlerdir. Teori, kalınlık yönündeki plastik anizotropi, sürtünme, doğrusal olmayan pekleşme ön-şekil değiştirmeyi de gözönüne almaktadır. Üç ayrı kararsızlık kriteri

kullanılmıştır. Çözümler sonlu farklar yöntemi ile elde edilmiştir. Teori ve deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Wifi (1976) aksenal simetrik şekilli elastik-plastik malzemelerin, büyük şekil değişimlerin olduğu durumlarda analizi için sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir formülasyon yayınlamıştır. İzotropik ve pekleşen malzemelerin analizi için Lagrange formülasyonu kullanılmıştır. Wifi, zımbaya temas eden bir elemanın zımbaya yapıştığını ve beraber hareket ettiğini kabul etmiştir. Wang ve Budiansky (1978) değişik zımba ve kalıplar için derin çekme işleminde şekil değişimini hesaplamak amacıyla bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirmişlerdir. Mattiasson ve arkadaşları da (1987) metal levha işlemlerinin modellenmesi için membran teorisi ve toplam Lagrange formülasyonuna dayalı bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, metal şekillendirme işlemlerinin incelenmesinde en uygun yöntem olan sonlu elemanlar, aksenal simetrik metal levha çekme işlemlerinin analizinde kullanılmıştır. Metal levha şekil değiştirme işlemlerinde genellikle, büyük yer değiştirmelerin yanısıra büyük gerinimler de oluşur. Dolayısıyla, metal levhaların elastik-plastik şekil değişimi için büyük yer değiştirmelerinin ve gerinimlerin gözönüne alındığı bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir (Darendeliler ve Kaftanoğlu, 1991). Levhanın J_2 - akma teorisine uyduğu, izotropik olduğu ve pekleştiği kabul edilmiştir. Metal levha ile kalıp ve zımba arasında Coulomb tipi sürtünme olduğu varsayılmıştır (Kaftanoğlu, 1973). Geliştirilen yöntem aksenal simetrik levhaların analizinde kullanılmış ve sonuçlar deneysel sonuçlarla da kıyaslanmıştır.

Literatürde genellikle aksenal simetriğe sahip olan parçaların analizleri verilmiştir. Bu analizler bazı varsayımlar ile elde edilen analitik yöntemleri, sonlu farklar yöntemlerini ve sonlu elemanlar yöntemlerini içerir. Endüstride sıkça rastlanan aksenal simetrik parçaların (örneğin mühimmat kovanları, çamaşır makinası tamburları) yanısıra köşegenel simetriğe sahip parçalar ve hiçbir simetriğe sahip olmayan parçalar da vardır. Simetrik olmayan parçalar arasında otomotif ve uçak sanayiinde kullanılan kaporta parçaları ön sırada gelmektedir. Bu tür problemlerde önemli olan parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- (a) İncelenen parçanın geometrisini tanımlayan parametreler.
- (b) Malzemenin plastik şekil değiştirmesi ile ilgili özellikleri. Bu özellikler akma gerilmesi, şekil değiştirme pekleşmesi üssü ve anizotropi parametreleri ile ilgilidir.
- (c) Levha metal ile zımba ve kalıp arasındaki sürtünme katsayısı. Levhanın zımba ve kalıbını değişik bölgelerinde değişik değerlere sahip olabilir. Yağlama sürtünme katsayısı değiştirebilir.
- (d) İşletme ile ilgili olan zımbanın ilerleme hızı, kalıpların ve presin esnekliği, ortam sıcaklığı vb. parametreler. Bu parametreler daha az etki eden parametreler arasındadır.

Bütün bu değişkenleri gerçekçi olarak dikkate alan teorik modelleme yöntemleri yeni yeni araştırılmaya başlanmıştır. Bu arada yoğun çalışmalar Japonya, Amerika, Fransa ve Almanya'da başlamıştır. Genellikle deneysel çalışmaların ötesinde teorik modellemelerde son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Ancak geliştirilen bilgisayar yöntemi bu yöntemi geliştiren kuruluşların dışına rekabet açısından çıkarılmadığından genel kullanıma açık değildir ve zaten halen gelişme aşamasındadır. Bir ayrı sorun ise sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlanan programların bilgisayarlarda çok uzun işlem zamanı gerektirmesidir. Bu nedenle bu işe ayrılmış bilgisayar veya süperbilgisayar kullanımları gerekmektedir.

Grubumuz daha önceki yıllarda bu alanda deneysel ve sonlu farklar yöntemleri ile araştırmalar yapmıştır ve bir bilgi birikimi vardır. Son yıllarda ise sonlu elemanlar yöntemlerini geliştirerek teorik modelleme yöntemlerini uygulayabilecek hale getirmiştir. Bu projenin amacı geliştirilmiş bulunan sonlu elemanlar yöntemini ve bilgisayar programını deneylerden elde edilen ve sanayiden alınan örneklere uygulamaktır. Ancak bu çalışmaların önemli bir sınırı olan bellek ve bilgisayar hızının belirleyeceği olanaklar içinde çözümler elde edilmeye çalışılmıştır.

GELİŞME

Bu bölümde çalışmanın dayandığı teori verilmiş ve bu teorinin sonucunda yazılan bilgisayar programı ile elde edilen sonuçları deneylerle ve sanayiden alınan parçalarla karşılaştırılması yapılmıştır.

Teori

Geliştirilen sonlu elemanlar yöntemini virtüel iş prensibine dayanmaktadır, lineer olmayan kabuk teorisi kullanılmış, büyük yer değişimleri ve büyük birim şekil değişimlerini göz önüne alınmıştır.

Virtüel İş Prensibi

Virtüel iş prensibi dx gibi virtüel bir yer değiştirme için, aşağıdaki şekilde yazılabilir (Malvern, 1969, Eringen, 1962)

$$\int_{V^0} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} dV^0 = \int_{S^0} \mathbf{t}^0 \cdot \delta \mathbf{x} dS^0 + \int_{V^0} \mathbf{f}^0 \cdot \delta \mathbf{x} dV^0 \quad (1)$$

yukarıdaki denklemden \mathbf{S} ikinci Piola-Kirchoff gerilme tansörü, \mathbf{E} Lagrange gerinim tansörü, \mathbf{t}^0 şekil değişikliğine uğramamış yüzey üzerindeki kuvvet vektörü ve \mathbf{f}^0 ise şekil değişikliğine uğramamış kütleyle ait kuvvet vektörüdür ve şekil değiştirmemiş durum için eğrisel bir koordinat sistemi içinde tanımlanmıştır. Virtüel iş prensibi kütle kuvvetlerinin ihmal edildiği membran levhalar için aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\int_{V^0} S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} dV^0 = \int_{S^0} t^{0\alpha} \delta x_{\alpha} dS^0 \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemin maddesel türevi aşağıdaki eşitliği verir

$$\int_{V^0} \left(\dot{S}^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} + S^{\alpha\beta} \delta \dot{E}_{\alpha\beta} \right) dV^0 = \int_{S^0} \dot{t}^{0\alpha} \delta x_{\alpha} dS^0 \quad (3)$$

Sonlu elemanlar denklemi için gerekli olan eleman katılık matrisleri (3) nolu denklemden elde edilir ve burada bilinmeyenler düğüm noktalarının hızlardır (Malvern, 1969).

Şekil Değiştirme Geometrisi

Metal levha şekillendirme işlemlerinde kullanılan malzemelerin kalınlıkları, genellikle enleri ve genişliklerine göre oldukça küçüktür. Malzemenin kalınlığı, kalıp ve zımba çaplarına göre de küçük olduğundan kalınlık yönündeki kesme gerilmeleri ihmal edilebilir. Dolayısıyla, metal levhalar membran olarak kabul edilebilir.

Malzemenin orta yüzeyindeki bir noktanın, kartezyen bir koordinat sistemine göre t zamanındaki pozisyon vektörü $\mathbf{P}(X^a)$ ile gösterilmektedir (Şekil 2). X^a , ($a=1, 2$), orta yüzey üzerindeki eğrisel koordinatlar ve \mathbf{G}_a de bu koordinatlara karşılık gelen kovariant taban vektörleri ve \mathbf{G}_{ab} ise metrik tansörlerdir (Green and Zerna, 1968).

$$\mathbf{G}_\alpha = \mathbf{P}_{,\alpha} \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_{\alpha\beta} = \mathbf{G}_\alpha \cdot \mathbf{G}_\beta \quad (5)$$

\mathbf{G}_3 ise \mathbf{G}_1 ve \mathbf{G}_2 taban vektörlerine dik birim vektördür

$$\mathbf{G}_3 = \frac{\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2}{|\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2|} \quad (6)$$

Şekil değiştirmemiş membranın içindeki herhangi bir noktanın pozisyon vektörü, \mathbf{R} , orta yüzeyde tanımlanan koordinatlar cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir (Green and Zerna, 1968)

$$\mathbf{R} = \mathbf{P} + X^3 \mathbf{G}_3 \quad (7)$$

Şekil değiştirdikten sonra $t + dt$ zamanında orta yüzey üzerindeki aynı nokta \mathbf{p} (x^a) vektörü tarafından gösterilmekte ve orta yüzey üzerindeki koordinatlar x^a ile ifade edilmektedir. Bu koordinatlara karşılık gelen kovariant taban vektörleri \mathbf{g}_r ve metrik tansörler \mathbf{g}_{rg} aşağıda verilmiştir (Şekil 2)

$$\mathbf{g}_p = \mathbf{P}_{,p} \quad (8)$$

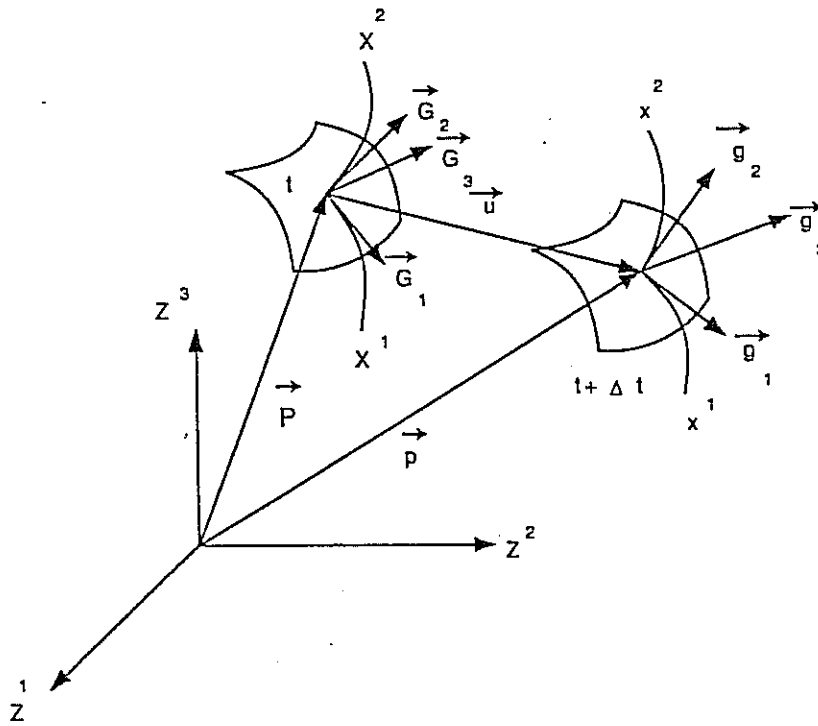
$$\mathbf{g}_{p\gamma} = \mathbf{g}_p \cdot \mathbf{g}_\gamma \quad (9)$$

\mathbf{g}_3 birim vektörü \mathbf{g}_1 ve \mathbf{g}_2 taban vektörlerine diktir

$$\mathbf{g}_3 = \frac{\mathbf{g}_1 \cdot \mathbf{g}_2}{|\mathbf{g}_1 \times \mathbf{g}_2|} \quad (10)$$

Şekil değiştirmiş membranın içindeki herhangi bir noktanın pozisyon vektörü, \mathbf{r} , ise aşağıdaki gibidir (Green and Zerna, 1968)

$$\mathbf{r} = \mathbf{p} + x^3 \mathbf{g}_3 \quad (11)$$



Şekil 2. Kullanılan koordinat eksenleri ve taban vektörleri

Şekil Değiştirme Tansörü

Şekil değiştirmemiş ve şekil değiştirmiş hallerdeki aynı malzeme noktalarını kapsayan çizgi elemanlarının uzunluğunun karelerindeki fark, yer değiştirme sırasında meydana gelen şekil değişimini gösterir (Malvern, 1969, Eringen, 1962). Şekil değiştirmemiş haldeki çizgi elemanının uzunluğunun karesi aşağıda verilmiştir

$$dS^2 = G_{\gamma\rho} dX^\gamma dX^\rho + X^3 G_{\gamma\cdot} \cdot G_{3,\rho} dX^\gamma dX^\rho + X^3 G_{3,\gamma} \cdot G_\rho dX^\gamma dX^\rho + (X^3)^2 G_{3,\gamma} \cdot G_{3,\rho} dX^\gamma dX^\rho + dX^3 dX^3 \quad (12)$$

Şekil değiştirmiş haldeki çizgi elemanının uzunluğunun karesi aşağıdaki gibidir

$$ds^2 = g_{\gamma\rho} dx^\gamma dx^\rho + x^3 g_\gamma \cdot g_{3,\gamma} dx^\gamma dx^\rho + x^3 g_{3,\gamma} \cdot g_\rho dx^\gamma dx^\rho + (x^3)^2 g_{3,\gamma} \cdot g_{3,\rho} dx^\gamma dx^\rho + dx^3 dx^3 \quad (13)$$

Lagrange gerinim tansörünün tanımı kullanılarak

$$ds^2 - dS^2 = 2 E_{KL} (X,t) dX^K dX^L \quad (14)$$

yazılır. Bu denklemlerde E_{KL} Lagrange gerinim tansörüdür. (12), (13) ve (14) numaralı denklemler kullanılarak Lagrange gerinim tansörü elde edilir

$$E_{KL} = \frac{1}{2} \{ [g_{\gamma\rho} x_{,K}^\gamma x_{,L}^\rho + x^3 g_\gamma \cdot g_{3,\beta} x_{,K}^\gamma x_{,L}^\rho + x^3 g_{3,\gamma} \cdot g_\rho x_{,K}^\gamma x_{,L}^\rho + (x^3)^2 g_{3,\gamma} \cdot g_{3,\rho} x_{,K}^\gamma x_{,L}^\rho + x_{,K}^3 x_{,L}^3] - [G_{\gamma\rho} X_{,K}^\gamma X_{,L}^\rho + X^3 G_\gamma \cdot G_{3,\rho} X_{,K}^\gamma X_{,L}^\rho + X^3 G_{3,\gamma} \cdot G_\rho X_{,K}^\gamma X_{,L}^\rho + (X^3)^2 G_{3,\gamma} \cdot G_{3,\rho} X_{,K}^\gamma X_{,L}^\rho + X_{,K}^3 X_{,L}^3] \} \quad (15)$$

Yukarıdaki denklem membranlar için şöyle yazılabilir

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \{ [(g_{\gamma\rho} x_{,\alpha}^\gamma x_{,\beta}^\rho + x^3 g_\gamma \cdot g_{3,\rho} x_{,\alpha}^\gamma x_{,\beta}^\rho + x^3 g_{3,\gamma} \cdot g_\rho x_{,\alpha}^\gamma x_{,\beta}^\rho + (x^3)^2 g_{3,\gamma} \cdot g_{3,\rho} x_{,\alpha}^\gamma x_{,\beta}^\rho + x_{,\alpha}^3 x_{,\beta}^3) - [G_{\alpha\beta} + X^3 G_\alpha \cdot G_{3,\beta} + X^3 G_{3,\alpha} \cdot G_\beta + (x^3)^2 G_{3,\alpha} \cdot G_{3,\beta}] \} \quad (16)$$

Bu çalışmada üç düğüm noktalı düzlem elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlarda şekil değiştirmemiş haldeki G_3 birim vektörü ile şekil değişiminin olduğu haldeki g_3 birim vektörünün eleman üzerindeki değişimi sıfırdır. Dolayısıyla, kartezyen bir koordinat sisteminde, 16) numaralı denklem

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} [g_{\gamma\rho} x_{,\alpha}^\gamma x_{,\beta}^\rho + x_{,\alpha}^3 x_{,\beta}^3 - G_{\alpha\beta}] \quad (17)$$

halini alır. Kartezyen koordinat sisteminde ise

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} [x_{\gamma,\alpha} x_{\gamma,\beta} + x_{3,\alpha} x_{3,\beta} - G_{\alpha\beta}] \quad (18)$$

şeklindedir. Yukarıdaki denklem, Lagrange gerinim tansörünün virtuel değişimi için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$\delta E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} [(\delta x_{\gamma})_{,\varphi} x_{\varphi,\alpha} x_{\gamma,\beta} + x_{\gamma,\alpha} (\delta x_{\gamma})_{,\varphi} x_{\varphi,\beta} + (\delta x_3)_{,\varphi} x_{\varphi,\alpha} x_{3,\beta} + x_{3,\alpha} (\delta x_3)_{,\varphi} x_{\varphi,\beta}] \quad (19)$$

Bu denklemin maddesel türevi ise aşağıdaki gibidir

$$\delta \dot{E}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} [(\delta x_{\gamma})_{,\varphi} x_{\varphi,\alpha} v_{\gamma,\theta} x_{\theta,\beta} + v_{\gamma,\theta} x_{\theta,\alpha} (\delta x_{\gamma})_{,\varphi} x_{\varphi,\beta} + (\delta x_3)_{,\varphi} x_{\varphi,\alpha} v_{3,\theta} x_{\theta,\beta} + v_{3,\theta} x_{\theta,\alpha} (\delta x_3)_{,\varphi} x_{\varphi,\beta}] \quad (20)$$

Gerilme Tansörü

Virtuel iş denkleminde, ikinci Piola-Kirchoff gerilme tansörü ve türevi kullanılmıştır. İkinci Piola-Kirchoff gerilme tansörü, Cauchy gerilme tansörü cinsinden, kartezyen bir koordinat sisteminde ifade edilebilir

$$S_{\alpha\beta} = j X_{\alpha,\gamma} T_{\gamma\rho} X_{\beta,\rho} \quad (21)$$

İkinci Piola-Kirchoff gerilme tansörünün malzeme türevi ise aşağıda verilmiştir

$$\dot{S}_{\alpha\beta} = j X_{\alpha,\gamma} \hat{T}_{\gamma\rho} X_{\beta,\rho} \quad (22)$$

Yukarıda denklemde, $\hat{T}_{\gamma\rho}$, Cauchy gerilme tansörünün Truesdell gerilme değişimidir

$$\hat{T}_{\gamma\rho} = \dot{T}_{\gamma\rho} - T_{\gamma\xi} v_{\rho,\xi} - T_{\xi\rho} v_{\gamma,\xi} + T_{\gamma\rho} v_{\xi,\xi} \quad (23)$$

Sonlu Elemanlar Yöntemi İçin Virtüel İş Denklemi

Virtüel iş prensibinin malzeme türevi (3) nolu denklemde eğrisel koordinatlar için verilmiştir. (19), (20), (21) ve (22) nolu denklemleri kullanarak ve (3) nolu denklemi dt virtuel zamanına bölerek kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki denklem elde edilir

$$\int_{V^0} j \left(\hat{T}_{\gamma\theta} \delta D_{\gamma\theta} + T_{\varphi\rho} \delta v_{\gamma,\varphi} v_{\gamma,\rho} + T_{\varphi\rho} \delta v_{3,\varphi} v_{3,\rho} \right) dV^0 = \int_{S^0} i^0_{\alpha} \delta x_{\alpha} dS^0 \quad (24)$$

burada D_{gq} şekil değiştirme hız tansörü, $u_{g,j}$ ise hız değişimidir. Truesdell gerilme tansörü simetriktir ve Cauchy gerilme tansörünün Jaumann değişimi, T^* , cinsinden yazılabilir

$$\hat{T}_{\gamma\theta} = T_{\gamma\theta}^* + v_{\xi,\xi} T_{\gamma\theta} - T_{\gamma\xi} D_{\theta\xi} - T_{\xi\theta} D_{\gamma\xi} \quad (25)$$

(25) numaralı denklem kullanılarak, (24) numaralı denklemden aşağıdaki denklem elde edilir

$$\begin{aligned} \int_{V^0} j \left[\left(T_{\gamma\theta}^* + v_{\xi,\xi} T_{\gamma\theta} \right) \delta D_{\gamma\theta} - 2 T_{\gamma\xi} D_{\theta\xi} \delta D_{\gamma\theta} + T_{\varphi\rho} \delta v_{\gamma,\varphi} v_{\gamma,\rho} + T_{\varphi\rho} \delta v_{3,\varphi} v_{3,\rho} \right] dV^0 \\ = \int_{S^0} i^0_{\alpha} \delta v_{\alpha} dS^0 \end{aligned} \quad (26)$$

Bu çalışmada yenilemeli Lagrange formülasyonu kullanılmıştır. Dolayısıyla, t zamanındaki durum referans olarak alınmış ve $t + dt$ zamanındaki halde şekil değiştirmiş durum kabul edilmiştir. Böylece

$$\tau_{\gamma\theta} = j T_{\gamma\theta} \quad (27)$$

burada $\tau_{\gamma\theta}$ Kirchoff gerilme tansörüdür ve her iki gerilme tansörünün değişimleri de aşağıda verilmiştir

$$\tau_{\gamma\theta}^* = j T_{\gamma\theta}^* + j T_{\gamma\theta} = j T_{\gamma\theta}^* + v_{\xi,\xi} T_{\gamma\theta} \quad (28)$$

Dolayısıyla, yenilemeli Lagrange tekniği şıkışmayan malzemeler için ($j @ 1$) aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \int_V \left[\tau_{\gamma\theta}^* \delta D_{\gamma\theta} - 2 T_{\gamma\xi} D_{\theta\xi} \delta D_{\gamma\theta} + T_{\varphi\rho} \delta v_{\gamma,\varphi} v_{\gamma,\rho} + T_{\varphi\rho} \delta v_{3,\varphi} v_{3,\rho} \right] dV \\ = \int_S i^0_{\alpha} \delta v_{\alpha} dS \end{aligned} \quad (29)$$

Büyük şekil değiştirme problemlerinde elastik-plastik gerilme-gerinim bağıntısı objektif olan Jaumann gerilme değişimi cinsinden ifade edilebilir (McMeeking and Rice, 1975).

$$T_{\gamma\theta}^* = C_{\gamma\theta\varphi\xi} D_{\varphi\xi} \quad (30)$$

burada $T_{\gamma\theta}^*$ Cauchy gerilmesinin Jauman değişimidir. Kullanılan malzemeler için $j @ 1$ and $j \ll 1$ olduğundan (30) numaralı denklem aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\tau_{\gamma\theta}^* = C_{\gamma\theta\varphi\xi} D_{\varphi\xi} \quad (31)$$

Böylece yenilemeli Lagrange tekniği için (29) numaralı denklem aşağıdaki şekli alır

$$\begin{aligned} \int_V \left(C_{\gamma\theta\varphi\xi} D_{\varphi\xi} \delta D_{\gamma\theta} - 2 T_{\gamma\xi} D_{\theta\xi} \delta D_{\gamma\theta} + T_{\varphi\rho} \delta v_{\gamma,\varphi} v_{\gamma,\rho} + T_{\varphi\rho} \delta v_{3,\varphi} v_{3,\rho} \right) dV \\ = \int_S \dot{i}_\alpha^o \delta v_\alpha dS \end{aligned} \quad (32)$$

Yukarıda verilen denklem matris gösterimi kullanılarak her bir eleman için aşağıdaki şekilde gösterilebilir

$$\int_V \left[\delta D^T C D - 2 \delta D^T T_1 D + \delta V_1^T T_2 V_1 + \delta V_2^T T_3 V_2 \right] dV = \int_S \delta \bar{V}^T T^o dS \quad (33)$$

buradaki T_1 , T_2 ve T_3 matrisleri (33) numaralı eşitliği sağlayacak şekilde tanımlanmıştır ve C matrisi de gerilme-gerinim bağlantısını verir. D şekil değiştirme hız vektörü, V_1 düzlem içindeki hız değişim vektörü V_2 kalınlık yönündeki hız değişim vektörü, \bar{V} düğüm noktalarının hız vektörü ve T^o dışarıdan etki eden yüzey üzerindeki kuvvet vektörüdür.

Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

Mises akma kriterine uyan ve izotropik olarak pekleşen malzemeler için Prandtl-Reuss eşitlikleri kullanılarak gerilme gerinim ilişkileri elde edilmiştir. Bu denklemler objektif bir gerilme tansörünün değişimi kullanıldığında, büyük şekil değişimleri için de geçerlidir. Elastik-plastik yükleme için gerilme-gerinim bağıntısının artışı aşağıdaki şekilde elde edilir

$$C_{ijkl} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{T_{ij}' T_{kl}'}{\frac{2}{3} \bar{T}^2 \left(1 + \frac{H}{2G} \right)} \right] \quad (34)$$

Bu eşitlikteki son grup atıldığında, gerilme-gerinim bağıntısı elastik yükleme veya yük kaldırma için kullanılır. Membranlar için gerekli gerilme-gerinim ilişkisi (34) numaralı denklem kullanılarak elde edilebilir (Yamada, Yoshimura and Sakurai 1968).

Sürtünme

Bu çalışmada, temas eden yüzeyler arasında Coulomb sürtünmesi olduğu varsayılmıştır. Elemanların içindeki gerilmeler veya dış kuvvetler kullanılarak saptanan düğüm noktalarındaki kuvvetler, şekil değiştirmiş haldeki sürtünme kuvvetinin tespit edilmesinde kullanılmıştır. Sürtünme kuvvetlerinin yönü ise, kalıp ve zimba yüzeylerinin normal vektörleri kullanılarak belirlenmiştir.

F_t 'nin düğüm noktasındaki teğet kuvvet ve F_n 'nin de aynı noktadaki normal kuvvet olduğu kabul edilirse, yüzeyler arasında hareket olmaması için

$$|F_t| \leq \mu_{static} |F_n| \quad (35)$$

şartının sağlanması gerekmektedir. Bu durumda düğüm noktasının hızı kalıp ve zimbaya göre sıfırdır. Aksi takdirde

$$|F_t| = \mu_{dynamic} |F_n| \quad (36)$$

ve

$$V = -\lambda F_n \quad (37)$$

olur ve düğüm noktası kalıp veya zimba üzerinde hareket eder. Yukarıdaki denklemde $\lambda \geq 0$ bir sabittir.

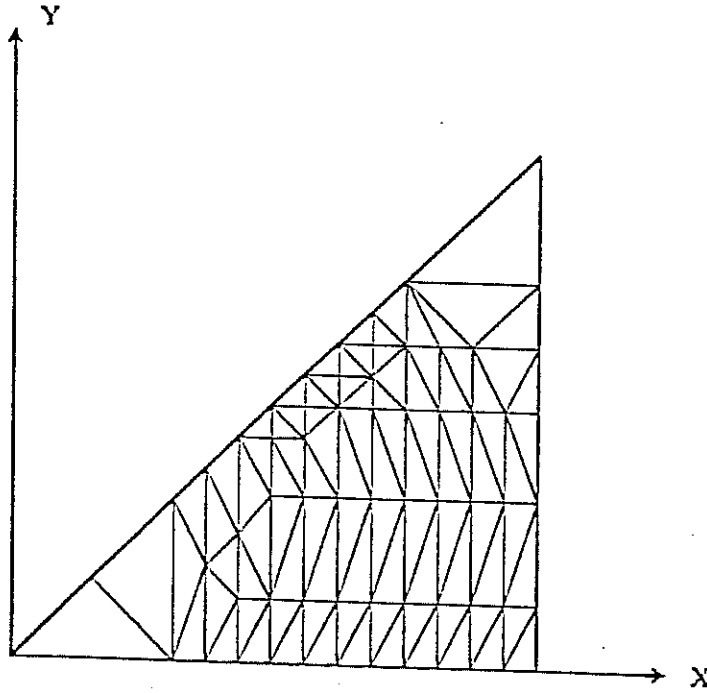
Çözüm Yöntemleri

Eleman katılık matrislerinin toplanmasından elde edilen genel katılık matrisi geometrik ve malzeme özellikleri yönünden doğrusal değildir. Dolayısıyla, malzemelerin plastik şekil

değiştirme sırasındaki özelliklerini en iyi yansıtan elastik-plastik gerilme-gerinim ilişkileri küçük artışlar için tanımlanır ve çözüm küçük artışlar için birçok kez tekrarlanarak elde edilir. Bu çalışmada, Newton-Raphson metodu kullanılmış ve sonuçlar Gauss çözüm yöntemi ile elde edilmiştir.

Yazılım

Analizi yapılacak taslak için kullanılacak katılık matrisi, (33) numaralı denklemde verilen eleman katılık matrisleri toplanarak elde edilir. Bu matrisin yukarıda anlatılan şekilde çözümünün elde edilmesi için bir yazılım da geliştirilmiştir. Bu yazılım, eksenal simetrik veya köşegenel simetrik parçaların analizinde üçgen elemanlar kullanılarak uygulanmıştır. Şekil 3 kare taslaklarda kullanılan bir sonlu elemanlar ağının sekizde birini göstermektedir. Ağ oluşturulurken şekil değişiminin fazla olduğu yerlerde daha küçük elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3. Kare taslakların modellenmesinde kullanılan sonlu elemanlar ağı.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçların Deney ve Sonlu Farklar Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlarla Karşılaştırılması

Bu bölümde deneysel çalışmaları daha önce tamamlanmış olan uygulamalar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Ayrıca, geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi bu çalışmalarda kullanılan sonlu farklar yöntemiyle de (SFY) karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmaları öncelikle aksenal simetrik olan parçalar üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu parçalardan deneysel olarak ve SFY ile elde edilen aksenal ve çevresel birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiş ve geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Belirli bir levha şekillendirme işlemi için, kalıp boyutları, kalıp malzemesi, şekillendirme işleminde kullanılacak malzemenin özellikleri, zimba kuvveti, zimba hızı, baskı plakası kuvveti, bu kuvvetin çekme ile değişimi, yağlama şekli, malzemenin şekillendirme sıcaklığı gibi faktörlerin önceden belirlenmesi gereklidir.

Metal şekillendirme işlemlerinde genellikle çok sayıda deney yapmayı gerektiren deneme ve yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntem zaman, işgücü ve malzeme kaybına yolaçmaktadır. Bu amaçla, bilgisayar destekli çözüm yöntemlerine gerek vardır.

Modelleme çalışmalarının ilk aşamasında, geliştirilen program kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslanması planlanmıştır. Dolayısıyla, deney koşullarının ve malzemelerinin benzetimi gereklidir. Deneyler sırasında bazı değişkenlerin kontrolü mümkün olabilmektedir. Örneğin zimba ve baskı plakası kuvveti kontrol edilebilmektedir. Diğer taraftan sürtünme şekil değiştirme sırasında tam olarak kontrol edilemeyen en önemli faktördür. Sürtünmeyi bütünüyle açıklayacak bir matematisel model henüz geliştirilememiştir ve sürtünme katsayısı plastik şekil değiştirme sırasında değişebilmektedir. Sürtünme önleyici maddeler uygulanan kuvvetlerin etkisiyle malzeme ile kalıp ve zimba arasından sıyrılabilir. Bu amaçla, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerde birkaç ayrı sürtünme katsayısı kullanılmış ve belirlenen koşullarda en uygun olanının seçilmesine çalışılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerde, çevresel, aksenal ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımları, taslak merkezinden başlayarak ve şekil değiştirme öncesi boyutlar göz önüne alınarak verilmiştir.

Eksenel Simetrik Parçalar

Geliştirilen sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çalışmalardan eksenel simetrik bir alüminyum malzemenin modellenmesi örnek olarak verilmiştir:

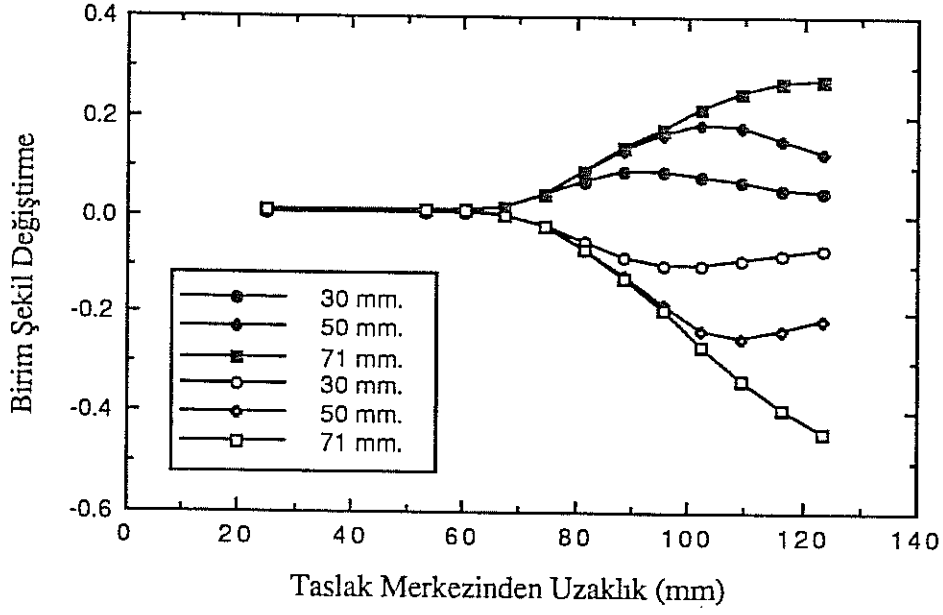
Kullanılan malzemenin özellikleri :

Malzeme	: Alüminyum (AA1100-0)
Elastik Modül	: 68.9 Gpa
Poisson Oranı	: 0.3
Akma Mukavemeti	: 0.058 GPa
Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi	: $\sigma = 0.161 \epsilon^{0.2297}$

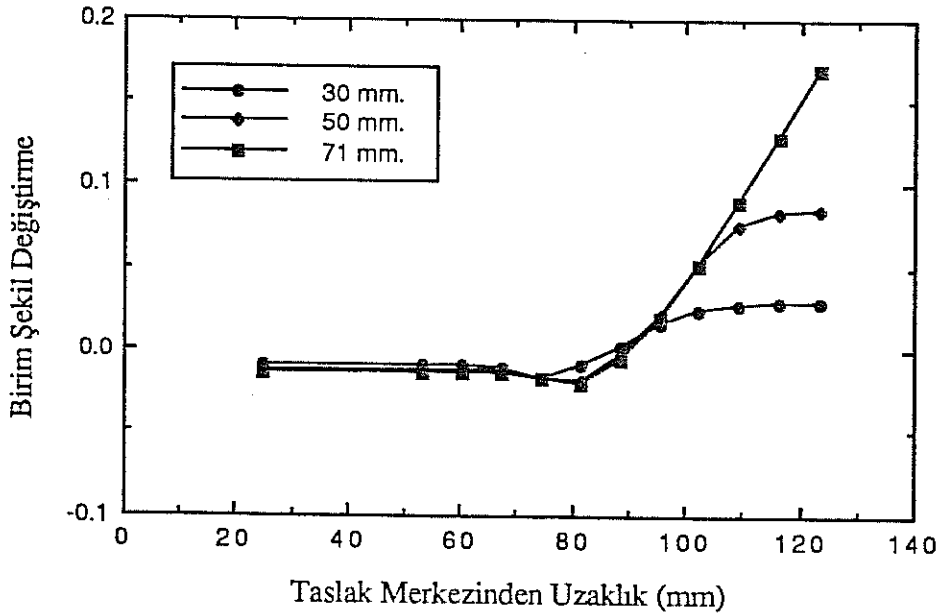
Kalıp ve taslak geometrisi :

Taslak Çapı	: 254 mm
Zımba Çapı	: 152.4 mm
Kalıp İç Çapı	: 158.24 mm
Zımba Profili Yarıçapı	: 20.07 mm
Kalıp Profil Yarıçapı	: 16.0 mm
Baskı Plakası Kuvveti	: 38.2 kN

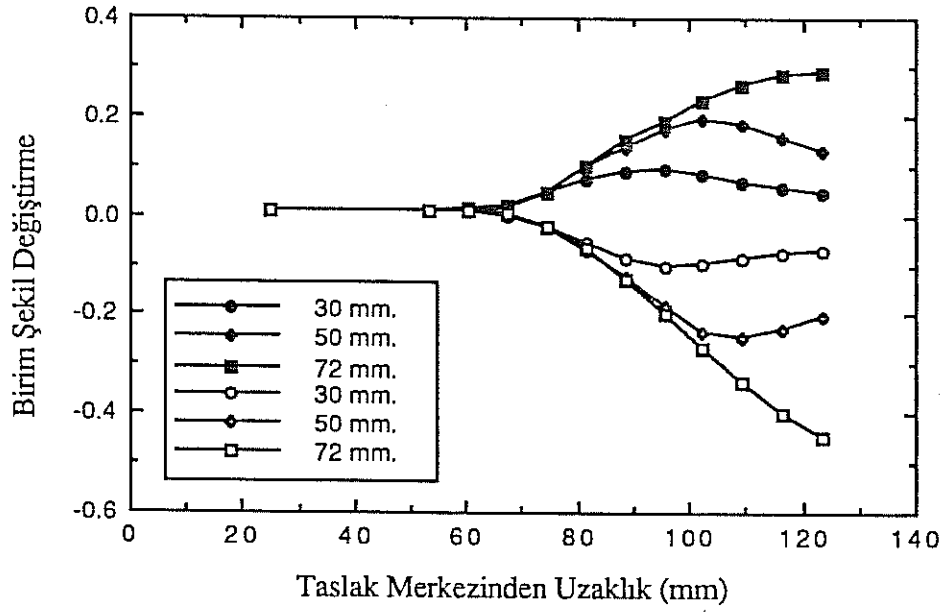
Sonlu elemanlar yöntemiyle benzetim üç ayrı sürtünme katsayısı kullanılarak yapılmıştır; $f=0.09$, $f=0.13$ ve $f=0.15$. Şekil 4, Şekil 6 ve Şekil 8'de eksenel ve çevresel birim şekil değiştirme dağılımları ile Şekil 5, Şekil 7 ve Şekil 9'da kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımları, sırasıyla $f=0.09$, $f=0.13$ ve $f=0.15$ için verilmiştir. Şekil 10 'da her üç sürtünme katsayısı için elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslanmasını gösterilmiştir. Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'de üç sürtünme katsayısı için sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) bulunan sonuçlar sonlu farklar yöntemiyle (SFY) elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.



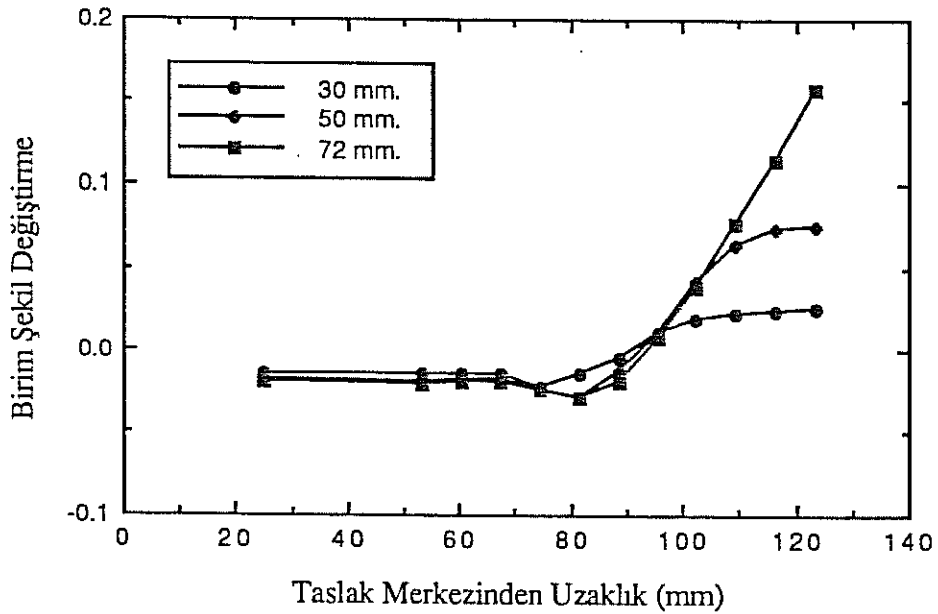
Şekil 4: 30 mm., 50 mm. ve 71 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değişirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.09).



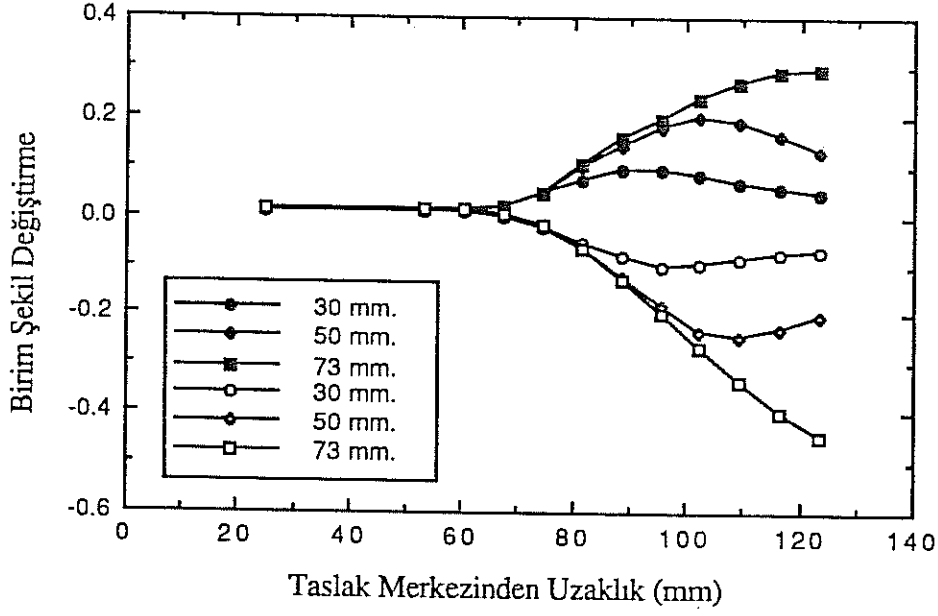
Şekil 5: 30 mm., 50 mm. ve 71 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.09).



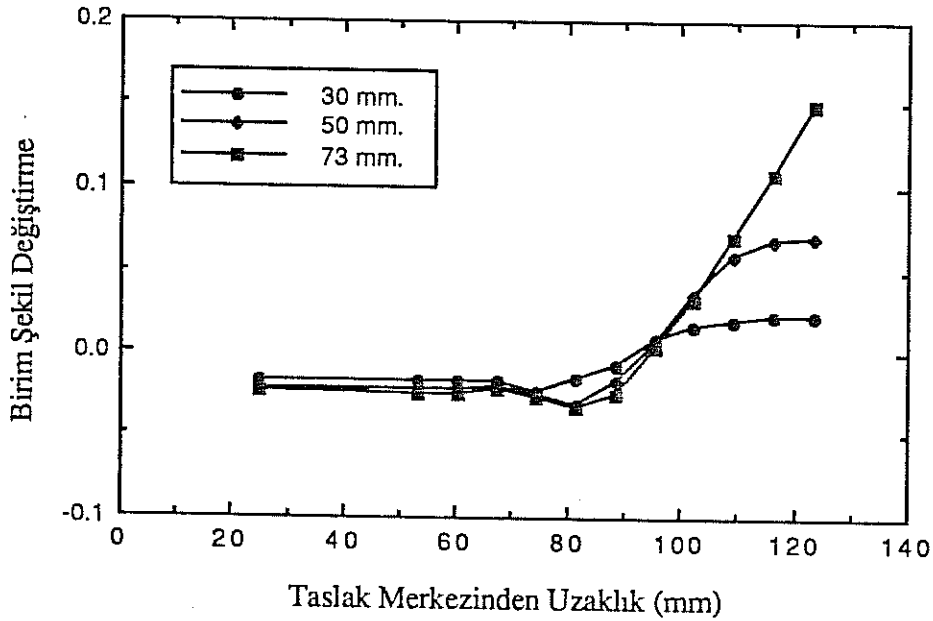
Şekil 6: 30 mm., 50 mm. ve 72 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değiştirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.13).



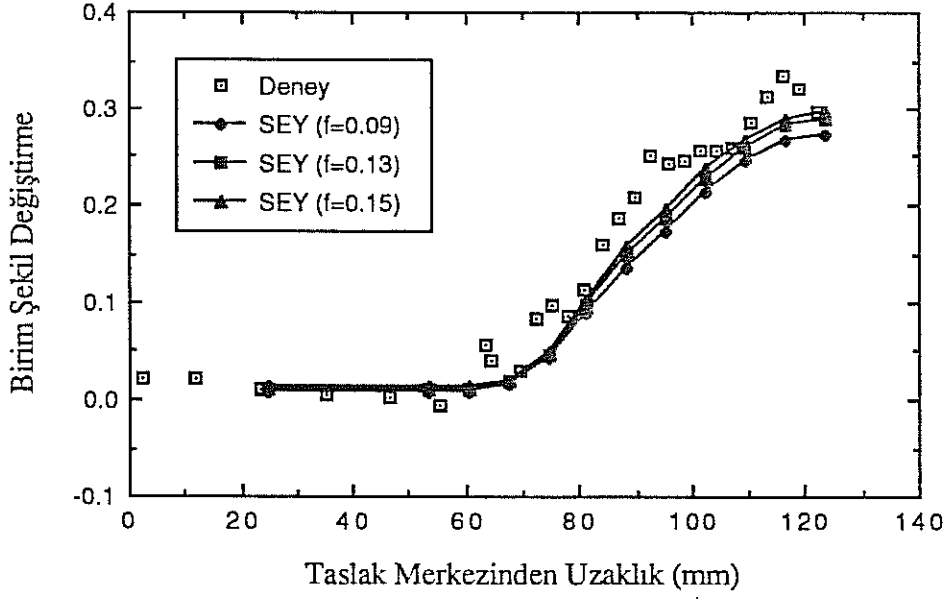
Şekil 7: 30 mm., 50 mm. ve 72 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.13).



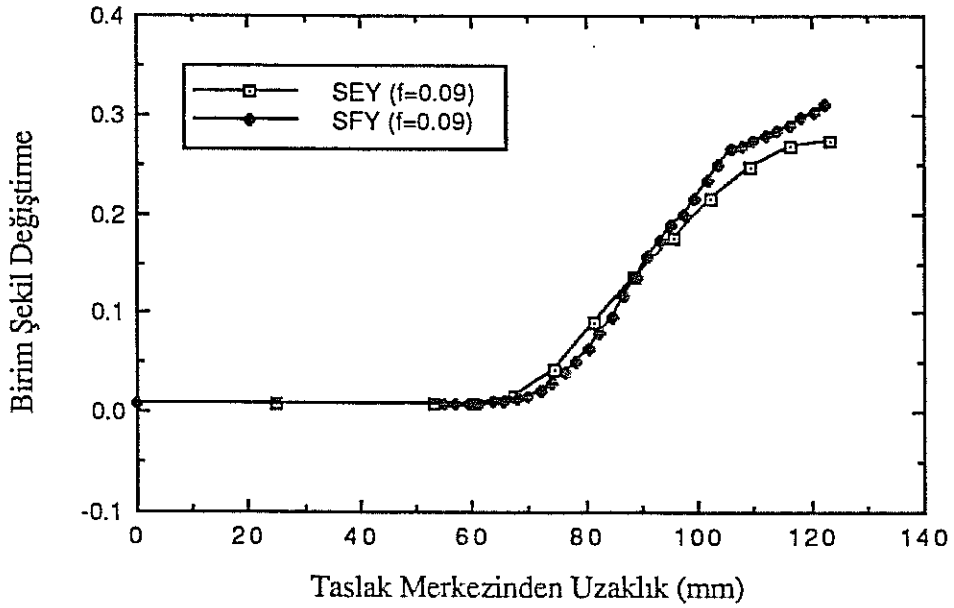
Şekil 8: 30 mm., 50 mm. ve 73 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen aksenal (dolu noktalar) ve çevresel birim şekil değiştirme (boş noktalar) dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.15).



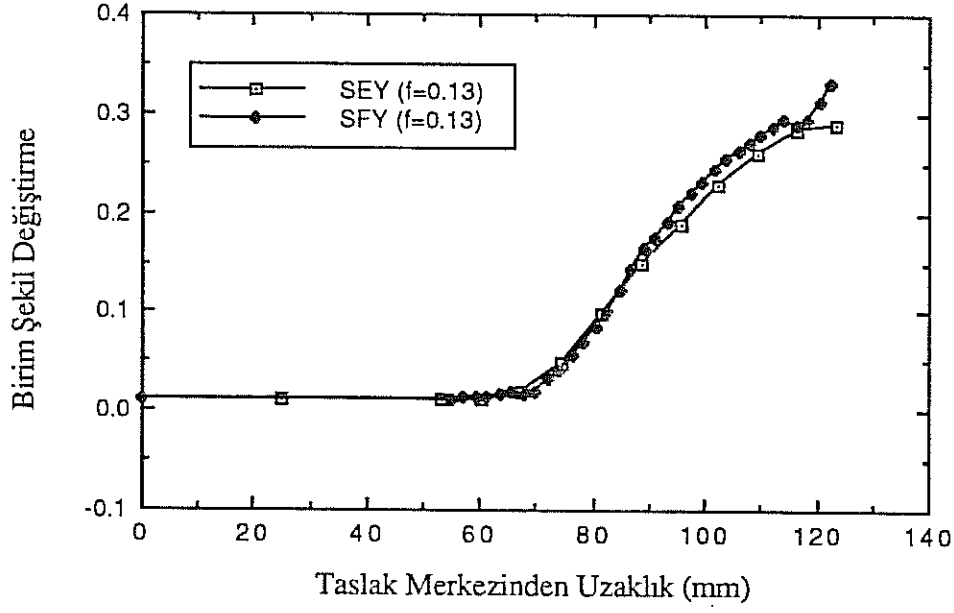
Şekil 9: 30 mm., 50 mm. ve 73 mm. (tamamen çekilmiş) olan çekme derinliklerinde SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması (sürtünme katsayısı=0.15).



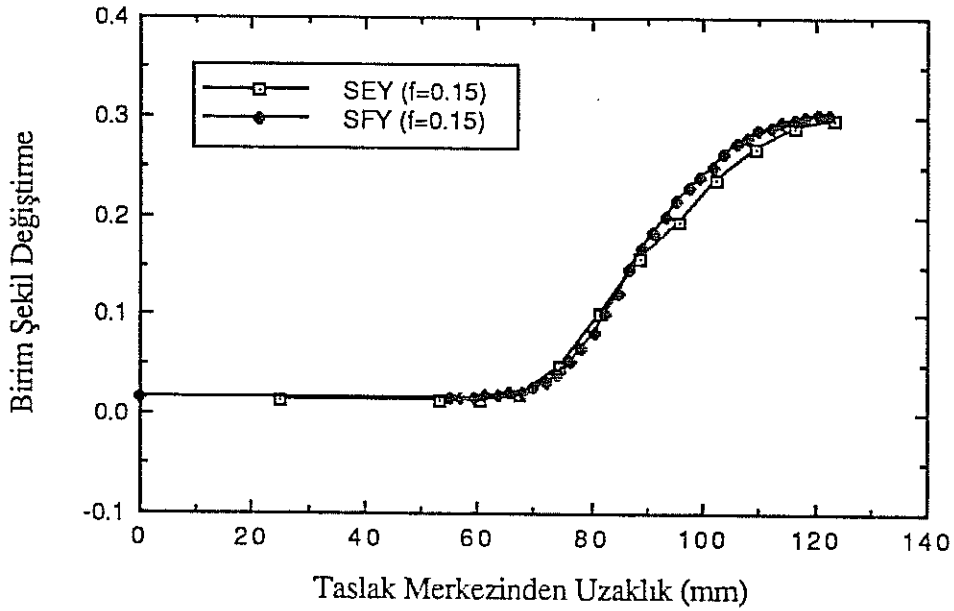
Şekil 10: Tamamen çekilmiş taslaklarda değişik sürtünme katsayıları (f) kullanılarak SEY ile elde edilen aksel birim şekil değiştirme dağılımının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.



Şekil 11: Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)= 0.09 için elde edilen aksel birim değiştirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması.



Şekil 12: Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)= 0.013 için elde edilen aksenal birim şekil değişirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması.



Şekil 13: Tamamen çekilmiş taslaklarda SEY ile sürtünme katsayısı (f)= 0.15 için elde edilen aksenal birim şekil değişirme dağılımının SFY sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Köşegenel Simetrik Parçalar

Sonlu elemanlar yöntemiyle, sert ve yarı sert alüminyum, pirinç, derin çekme çeliği ve paslanmaz çelik kullanılarak mevcut olan kalıplara uygun kare şeklindeki taslaklar derin çekme işlemi için modellenmiştir.

Kalıp ve taslak geometrisi :

Taslak Boyutları	: 80 mm x 80 mm
Zimba Boyutları	: 40 mm x 40 mm
Kalıp Açıklığı	: 42 mm x 42 mm
Zimba Profili Yarıçapı	: 5.0 mm
Kalıp Profili Yarıçapı	: 5.0 mm
Baskı Plakası Kuvveti	: 5 kN
Sürtünme katsayısı	: $\mu_z = \mu_k = 0.04$
	(sırasıyla zimba ve kalıp için)

Kullanılan malzemeler için taslak kalınlıkları ve yırtılmanın başladığı çekme derinlikleri aşağıda verilmiştir:

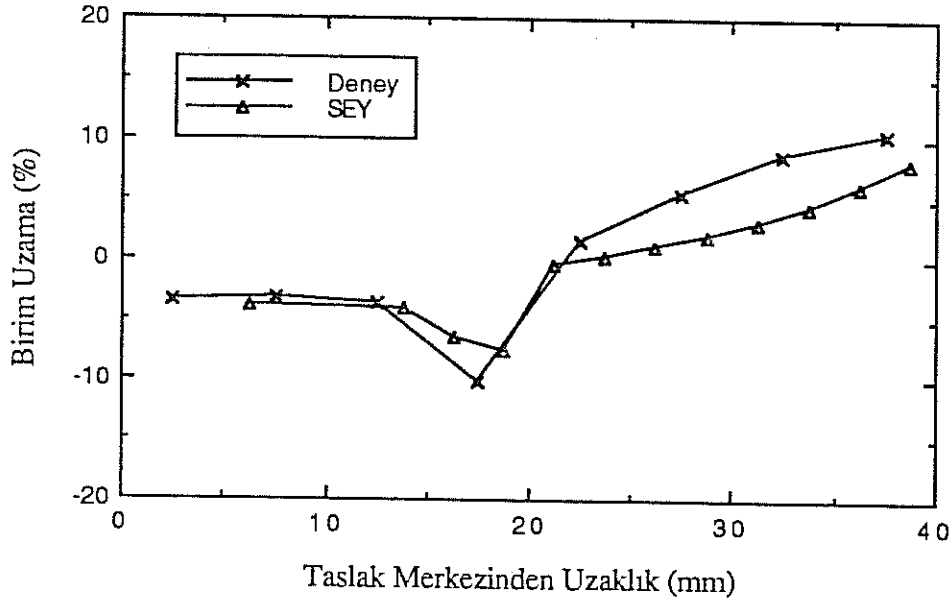
1. Sert alüminyum
Başlangıçtaki levha kalınlığı : 1.10 mm
Yırtılmanın başladığı çekme derinliği : 12.88 mm
2. Yarı sert alüminyum
Başlangıçtaki levha kalınlığı : 1.04 mm
Yırtılmanın başladığı çekme derinliği : 13.13 mm
3. Pirinç
Başlangıçtaki levha kalınlığı : 1.00 mm
Yırtılmanın başladığı çekme derinliği : Tamamen çekildi
4. Derin çekme çeliği
Başlangıçtaki levha kalınlığı : 0.75 mm
Yırtılmanın başladığı çekme derinliği : Tamamen çekildi

5. Paslanmaz elik

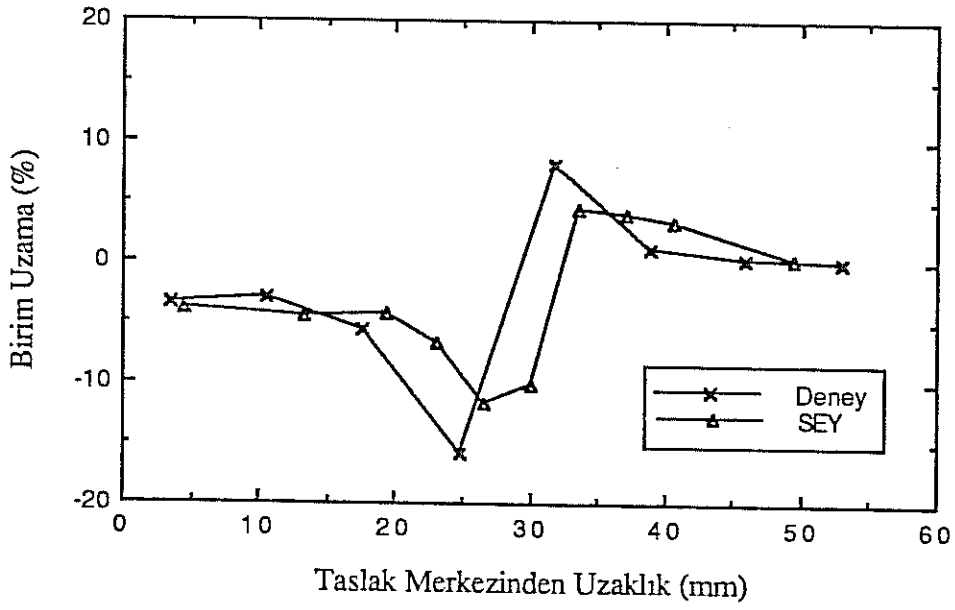
Başlangıçtaki levha kalınlığı : 0.8 mm

Yırtılmanın başladığı çekme derinliği : Tamamen çekildi

Şekil 14'de sert alüminyum için 12.88 mm'lik çekme derinliğindeki, Şekil 15'de yarı-sert alüminyum için 13.13 mm'lik çekme derinliğindeki, Şekil 16'da pirinç için 20 mm'lik çekme derinliğindeki, Şekil 17'de derin çekme çeliği için 20 mm'lik çekme derinliğindeki ve Şekil 18'de paslanmaz elik için 20 mm'lik çekme derinliğindeki kenarların orta noktaları ve köşegenler arasında kalınlık yönündeki birim şekil değişimi dağılımları verilmiştir.

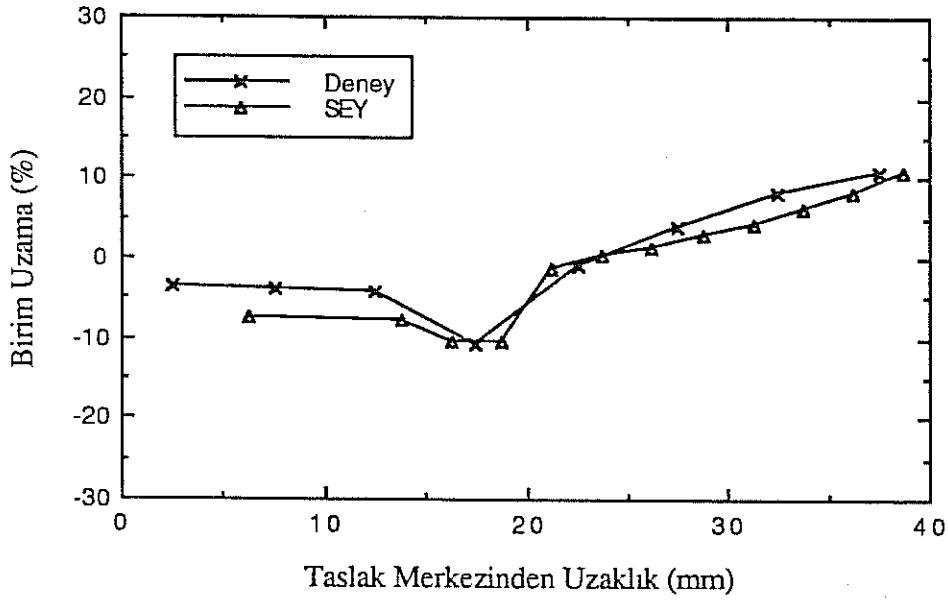


(a)

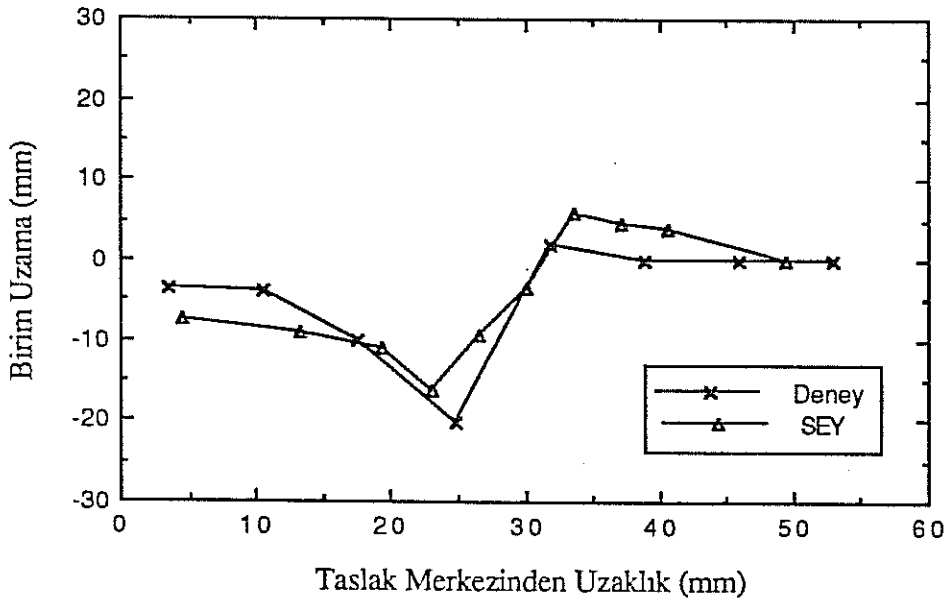


(b)

Şekil 14: Sert alüminyum için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması.

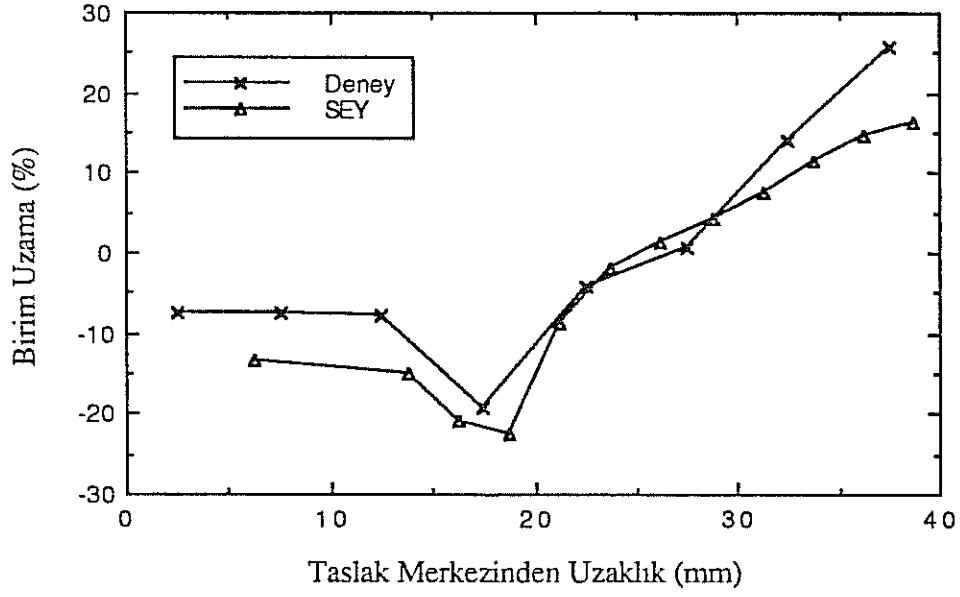


(a)

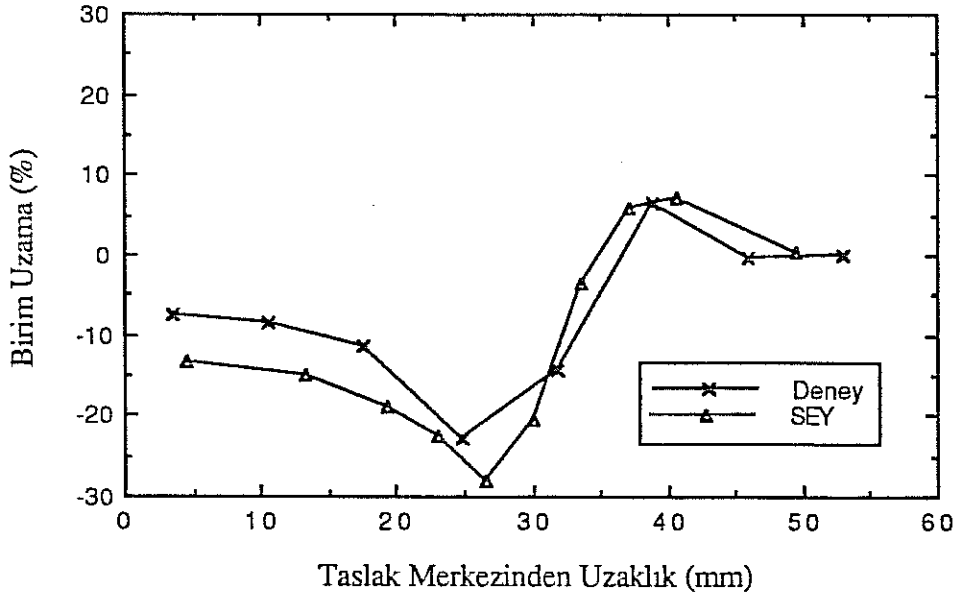


(b)

Şekil 15: Yarı sert alüminyum için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması.

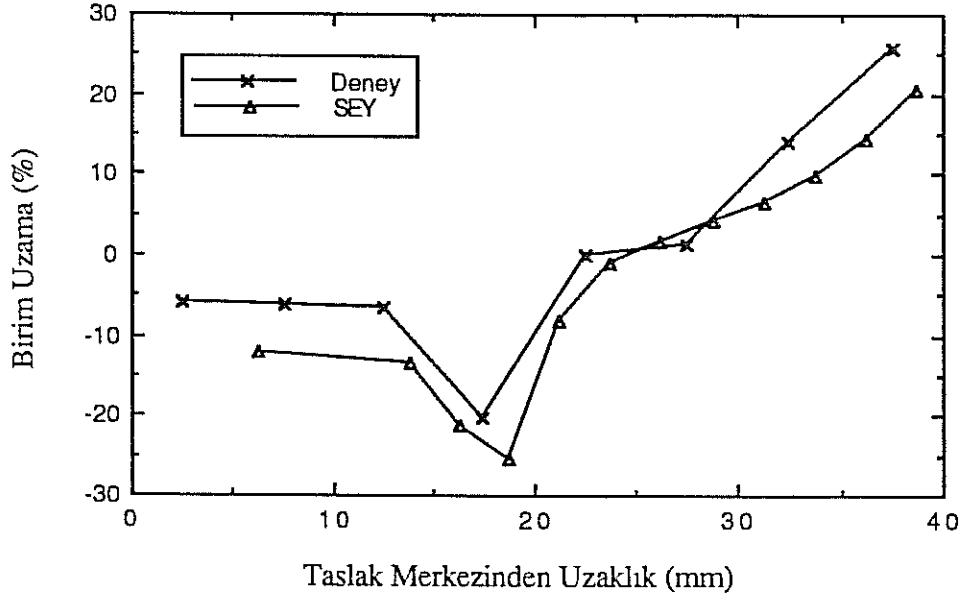


(a)

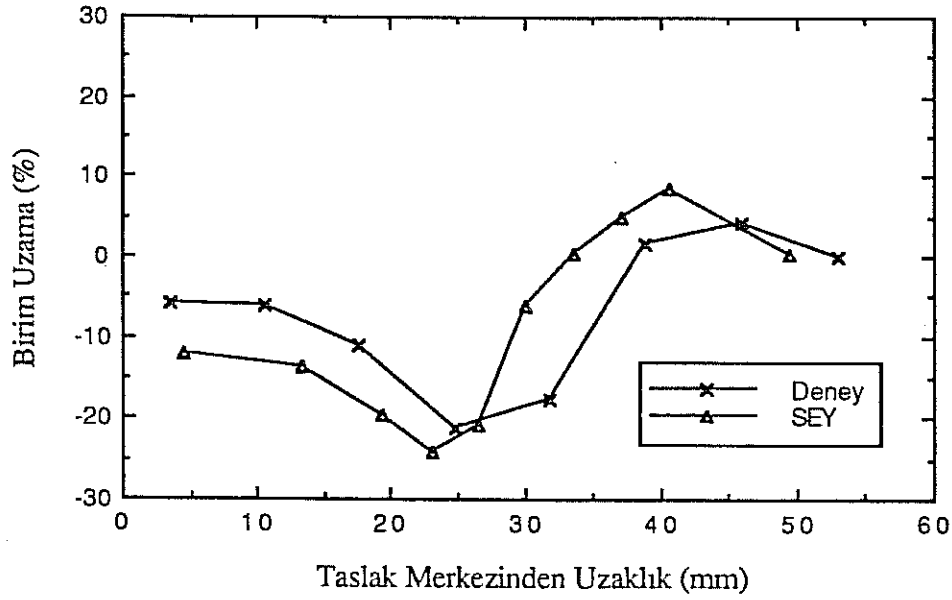


(b)

Şekil 16: Piriç için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması.

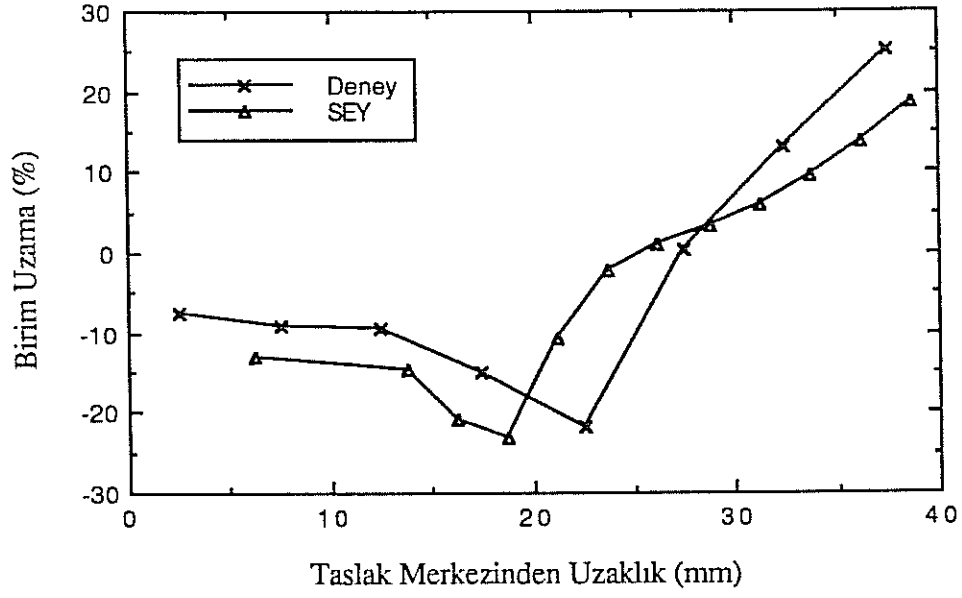


(a)

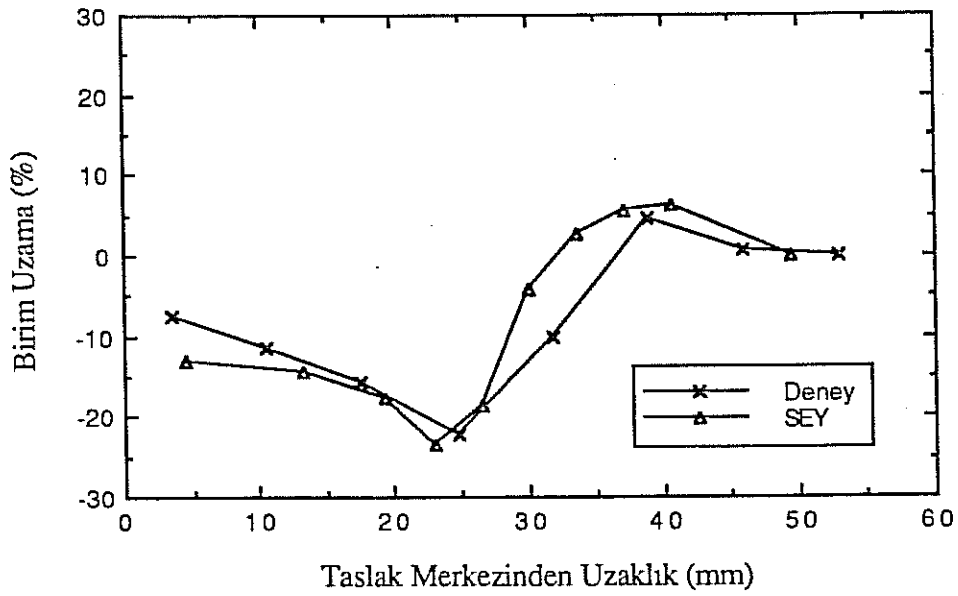


(b)

Şekil 17: Derin çekme çeliği için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması.



(a)



(b)

Şekil 18: Paslanmaz çelik için deney ve SEY ile elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değişiminin (a) kenarların orta noktaları arasında (b) köşegenler arasında karşılaştırılması.

Sonuçların Değerlendirilmesi

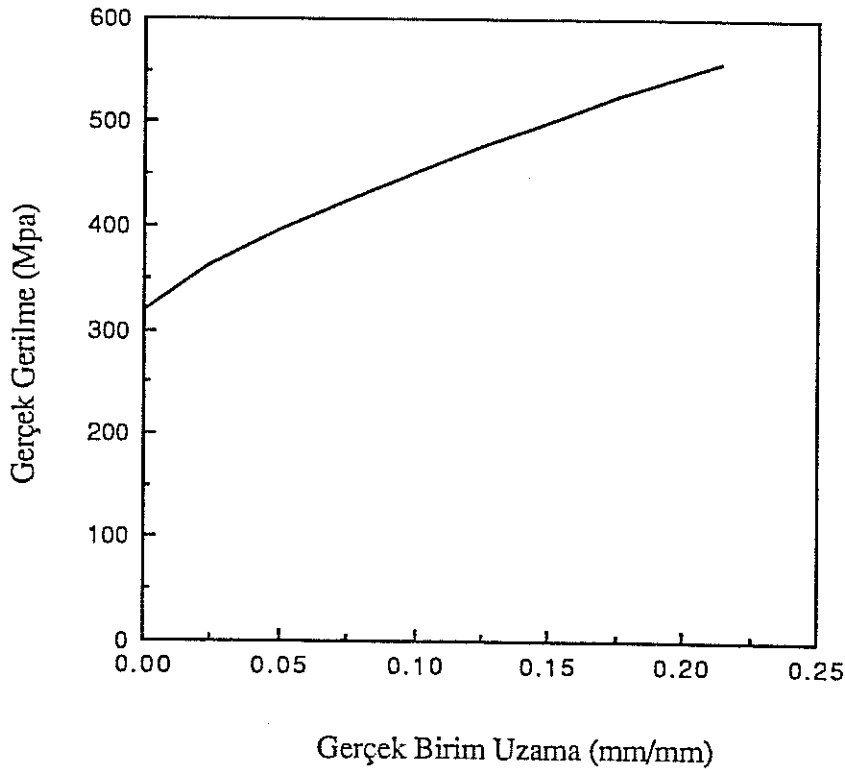
Geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar, deney sonuçlarıyla ve aynı taslak için elde edilmiş sonlu farklar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan kalıp ve taslakların malzeme ve geometrik özellikleri SEY ile modellemede kullanılmıştır. Deneylerde dairesel ve kare taslaklar çekilmiştir. Ayrıca, sanayiden alınan örnek parçaların üzerinde de SEY ile hesaplamalar yapılmıştır. Taslakların bir yüzü, birim şekil değiştirme miktarının saptanabilmesi amacıyla bir ağ oluşturacak şekilde çizilmiş ve düğüm noktaları taslak çekilmeden önce ve sonra ölçülmüştür. Böylece hesaplanan birim şekil değiştirme değerleri SEY ile elde edilen birim değiştirme değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiklerle verilmiştir. Sürtünme koşullarının modellenmesindeki güçlükler ve deneysel birim şekil değiştirme miktarlarının ölçümlerinden kaynaklanan hataların, sonuçlardaki Şekil 14-18'de görülen farklara neden olduğu düşünülmektedir. Bu hataların, deneyler ve SEY ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 0.05 logaritmik birim şekil değiştirmenin altında kaldığı görülmektedir. Deneylerde ve SEY'de kullanılan ağlar daha sıklaştırıldığında hata payları daha da düşebilecektir. Ancak 0.05 logaritmik birim şekil değiştirme düzeyindeki hataların da sanayideki uygulamalar açısından kabul edilebilir bir düzeyde olduğu söylenebilir.

Sonlu Elemanlar Yönteminin Sanayi Örneklerine Uygulanması

Eksenel Simetrik Parçalar

Sanayi örnekleri Makina Kimya Endüstrisi Kurumundan seçilmiştir. Bunlar savunma sanayiine dönük ve stratejik öneme sahip eksenel simetrik silindirik parçalar olup mühimmat yapımında kullanılmaktadır. Yurt dışından getirilen bu tür mühimmatların yerli teknoloji geliştirerek analizleri, bunları üretecek kalıpların tasarımları ve hatta bu kalıpların üretimleri de yapılarak MKEK'ye teslim edilmiştir.

Bu imalat uygulaması için özel ve sonunda ısıl işlem görebilecek bir çelik gerekmiştir. Bu çelik yaklaşık Ç 4140 (St-60) özelliklerini taşımaktadır ve yapılan çekme deneylerinde eşdeğer gerilme ve birim şekil değiştirme özellikleri bulunmuş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu çelik için gerçek gerilme-gerçek birim uzama eğrisi Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19: Malzemenin şekil değiştirme karakteristiği.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) modellemesinde kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir :

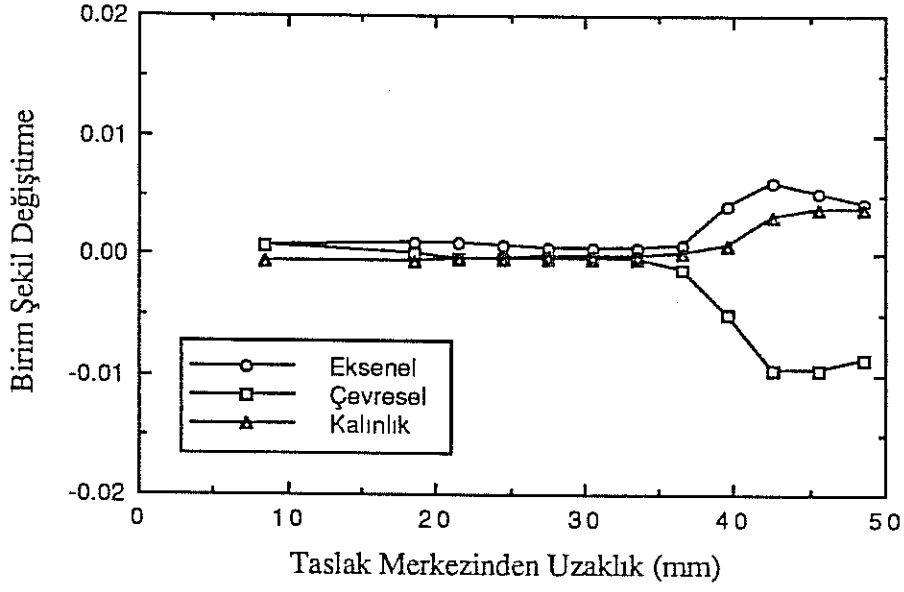
Kullanılan malzemenin özellikleri :

Malzeme	: Çelik
Elastik Modül	: 210 Gpa
Poisson Oranı	: 0.3
Akma Mukavemeti	: 0.309 GPa
Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi	: $s = 0.309 + 0.769 e^{0.765}$

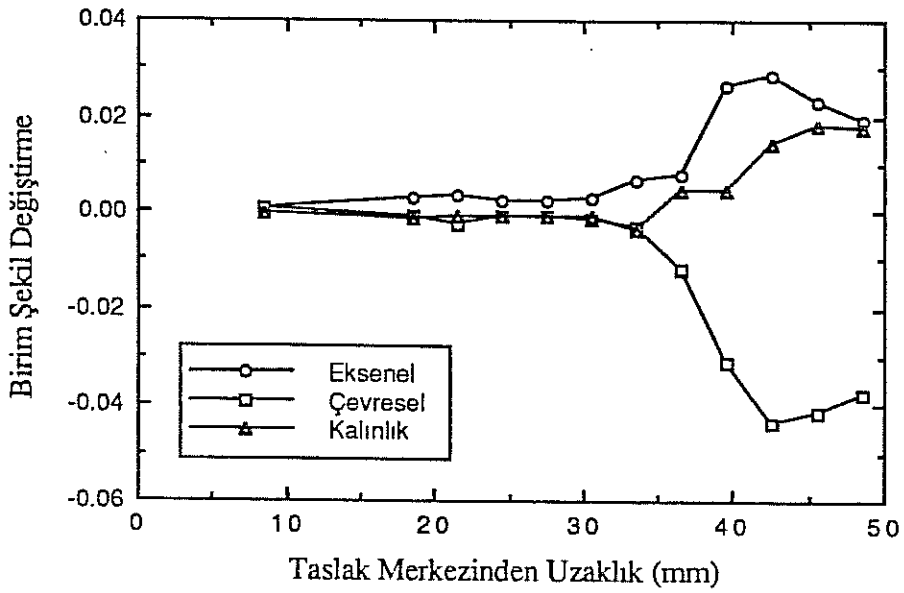
Kalıp ve taslak geometrisi :

Taslak Çapı	: 94.7 mm
Zimba Çapı	: 45.0 mm
Kalıp İç Çapı	: 55.0 mm
Zimba Profili Yarıçapı	: 5.0 mm
Kalıp Profil Yarıçapı	: 17.5 mm
Baskı Plakası Kuvveti	: Uygulanmadı
Sürtünme Katsayısı	: 0.06 (kalıp)
Sürtünme Katsayısı	: 0.3 (zimba)

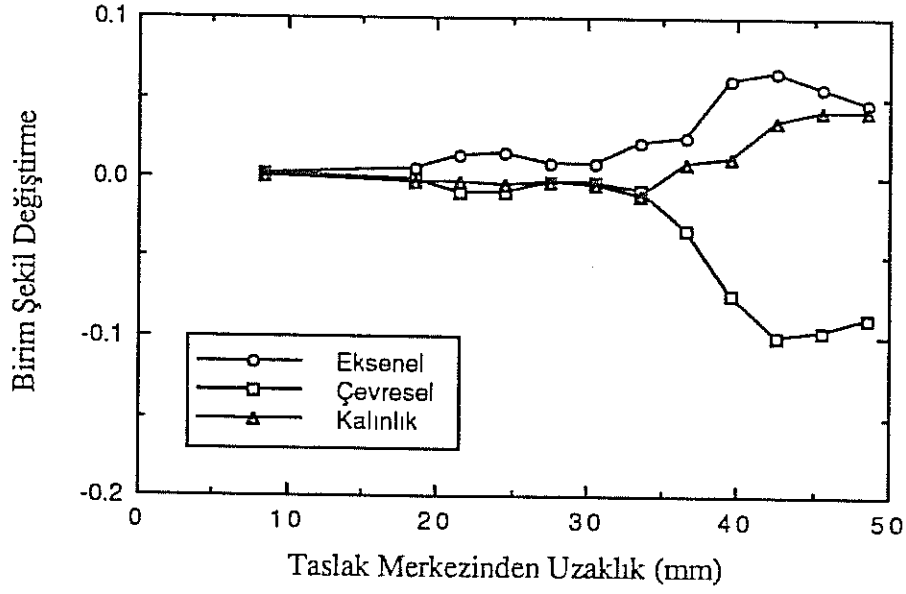
Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar ile düzlemsel bir taslağın adım adım plastik şekil değiştirmesi elde edilmiştir. Şekil 20'de 5 mm, Şekil 21'de 10 mm, Şekil 22'de 15 mm, Şekil 23'de 20 mm, Şekil 24'de 25 mm, Şekil 25'de 30 mm, Şekil 26'da 35 mm, Şekil 27'de 40 mm taslak derinliği için elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımları görülmektedir. Taslağın derin çekilme sırasındaki şekil değişimleri ise 5 mm, 15 mm ve 25 mm için Şekil 28'de verilmiştir.



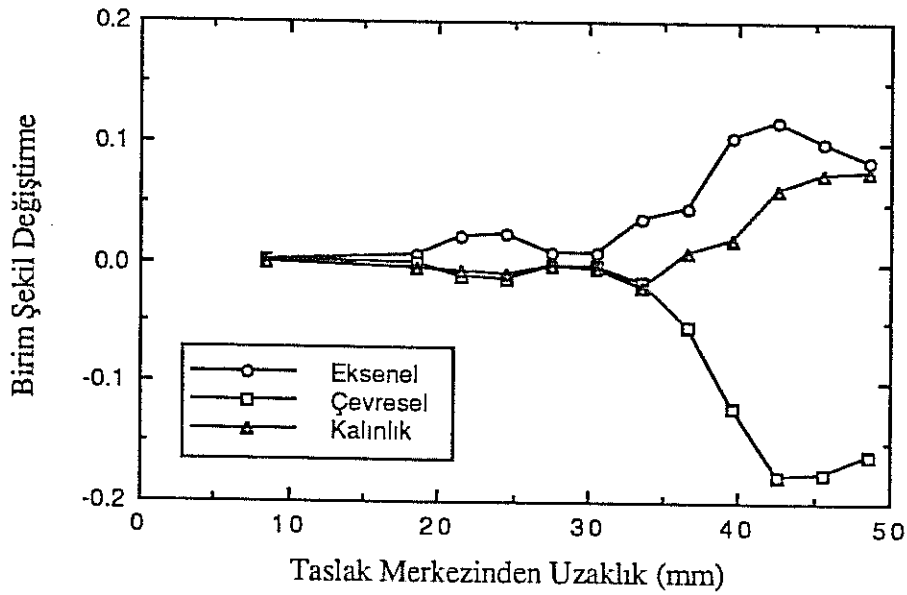
Şekil 20: 5 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değişirme dağılımı.



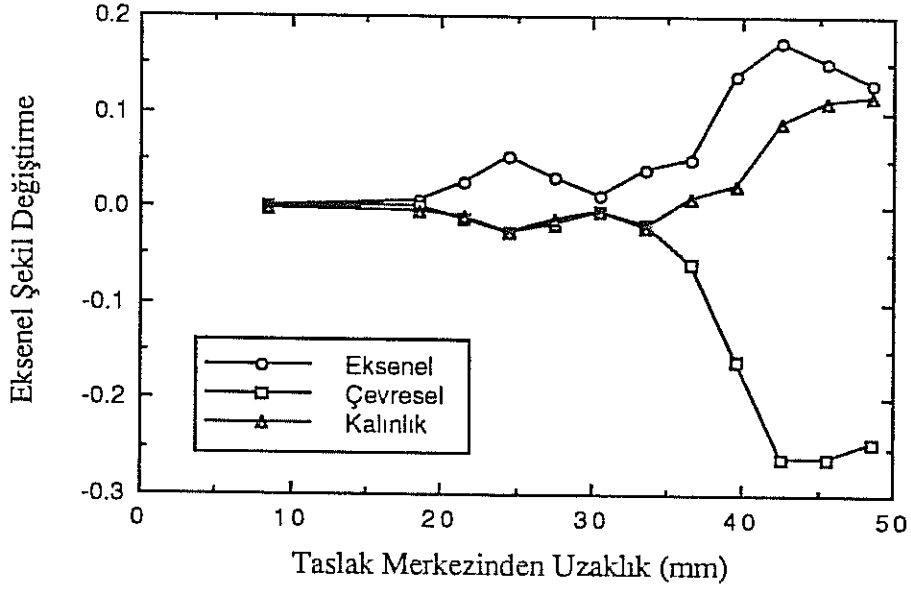
Şekil 21: 10 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değişirme dağılımı.



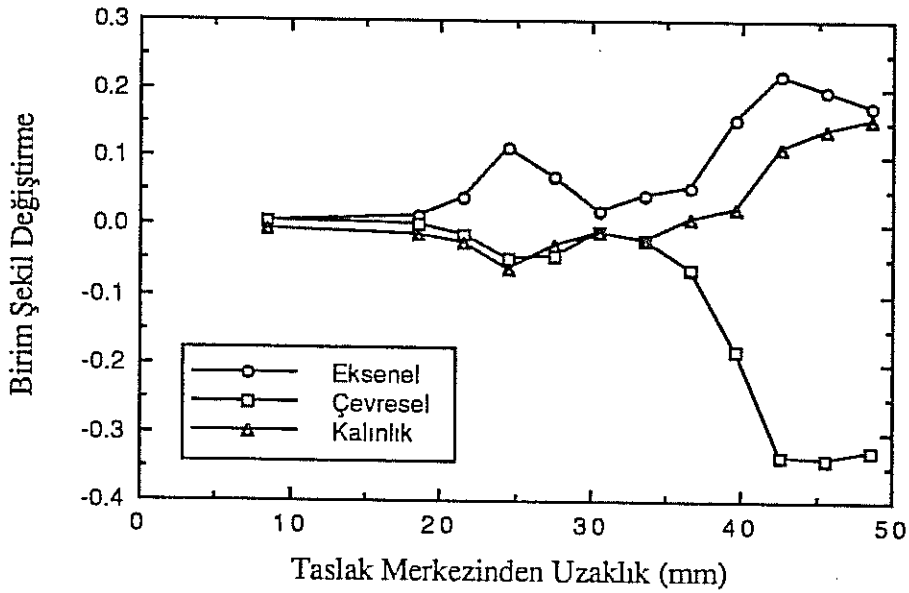
Şekil 22: 15 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



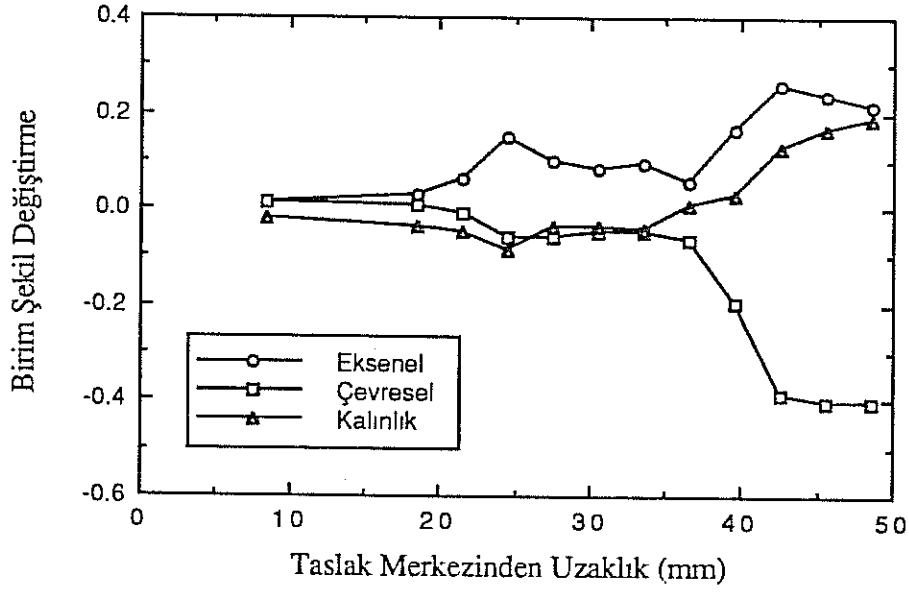
Şekil 23: 20 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



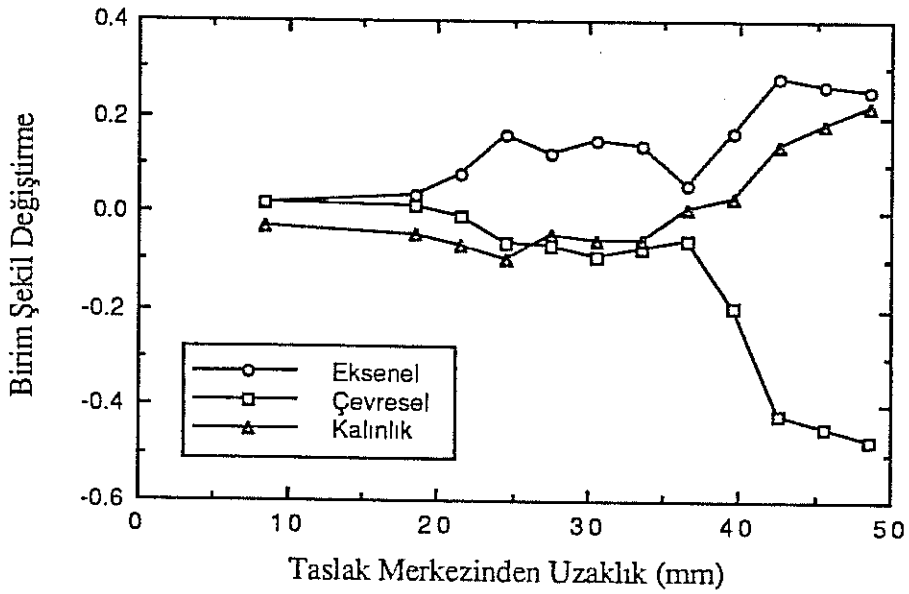
Şekil 24: 25 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen eksenel, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



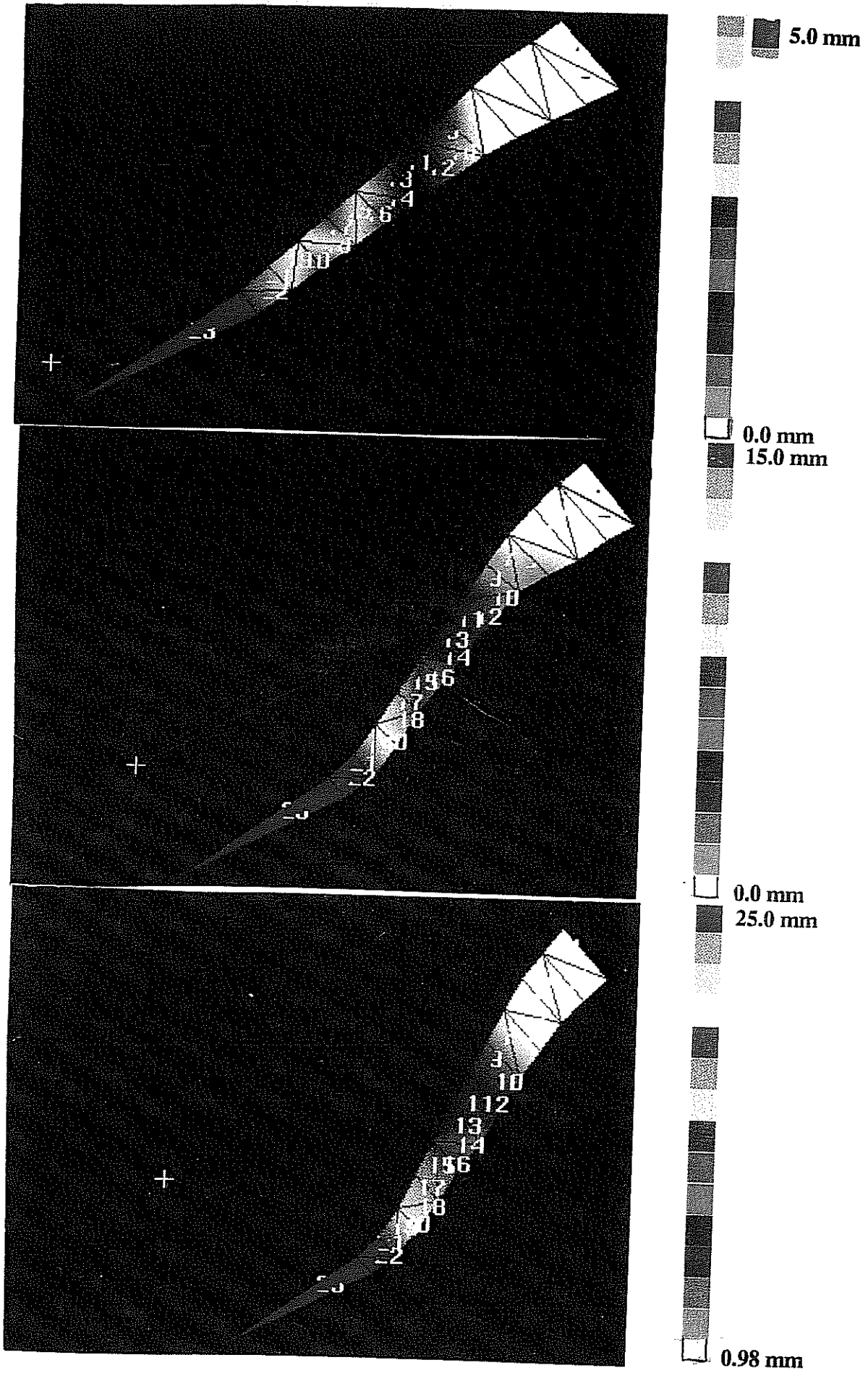
Şekil 25: 30 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen eksenel, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 26: 35 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değişirme dağılımı.



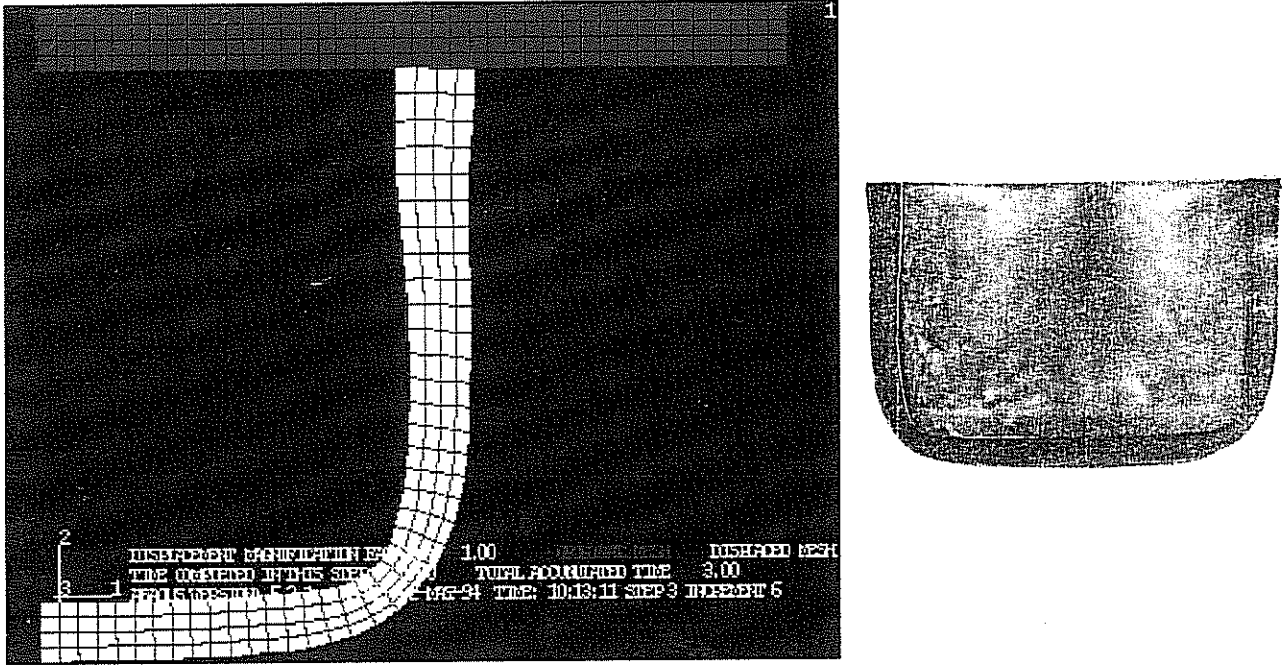
Şekil 27: 40 mm çekme derinliğinde SEY ile elde edilen aksenal, çevresel ve kalınlık yönündeki birim şekil değişirme dağılımı.



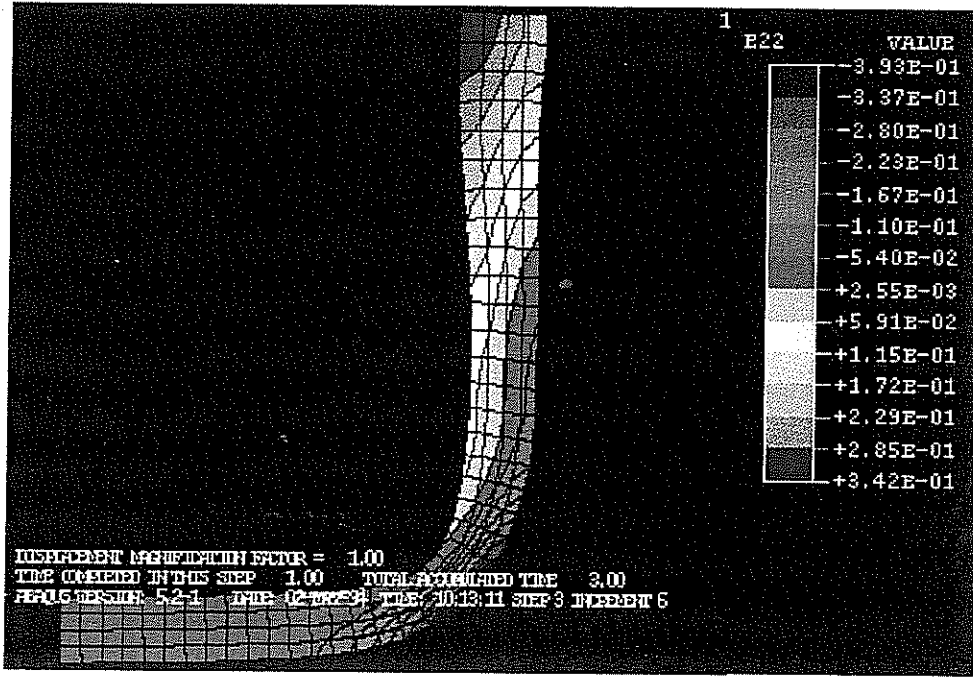
Şekil 28: Taslağın derin çekilme sırasındaki şekil değişimi.

Derin çekme işleminin SEY ile elde edilen son aşaması ve yapılan deney sonucu elde edilen parçanın ikiye kesildikten sonraki kesit görüntüsü Şekil 29'da verilmiştir. Bu şekilde ilk taslak kırmızı ile şekil değişikliğine uğramış taslak ise beyaz ile gösterilmiştir. Gerçek malzeme ile SEY sonuçları karşılaştırıldığında şekil değişikliğinin çok yakın hesaplanabildiği görülmektedir.

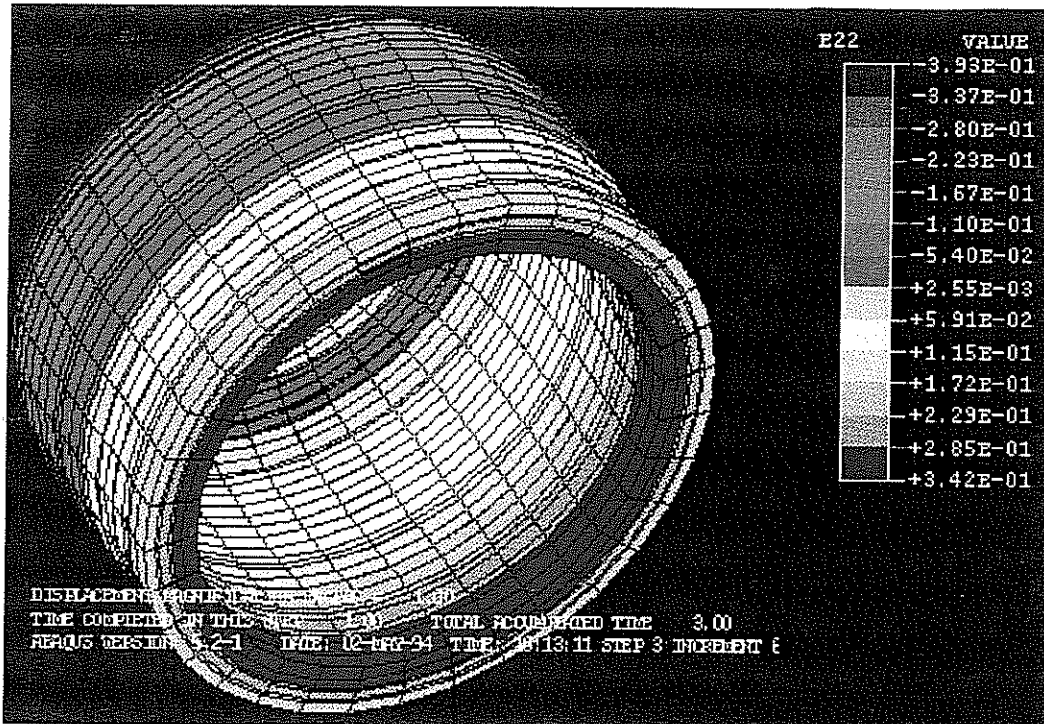
Şekil 30 aynı örnekte elde edilen kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımını göstermektedir. En kalın (kırmızı) dan en ince noktaya (mavi) dağılım görülmektedir. Kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımının tüm parça üzerindeki görüntüsü ise Şekil 26'da verilmiştir. Aynı örnek üzerindeki Von Mises gerilme dağılımı Şekil 31'de ve parçanın son şekli ise Şekil 32'de verilmiştir.



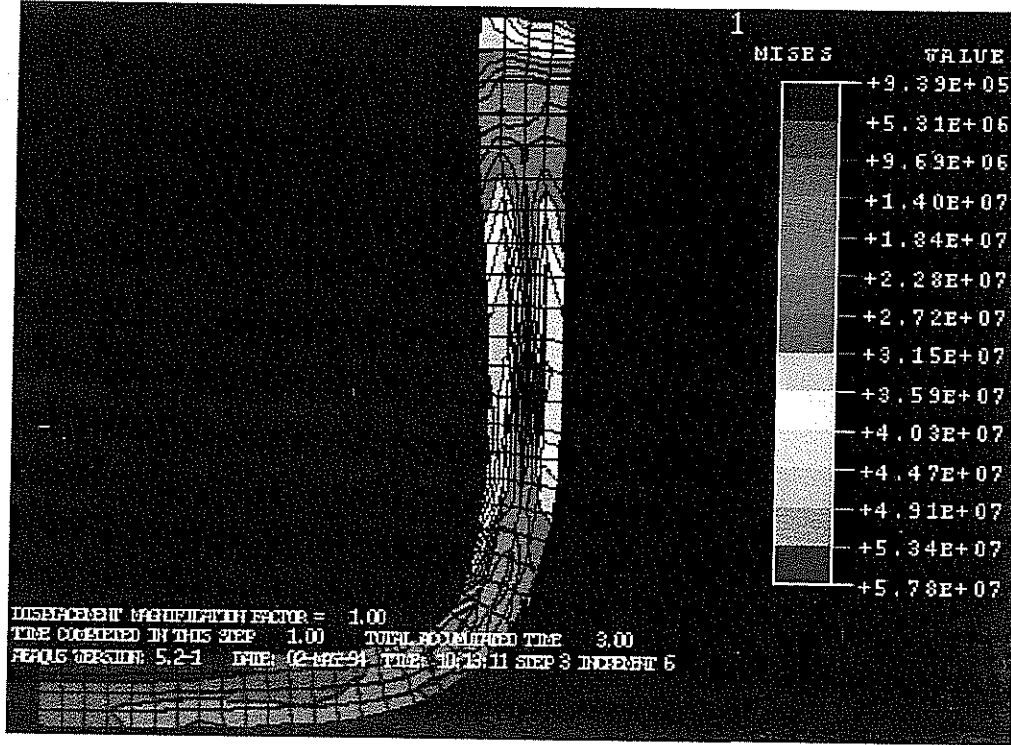
Şekil 29: SEY ile elde edilen derin çekmedeki şekil değiştirme'nin gerçek deneyle karşılaştırılması



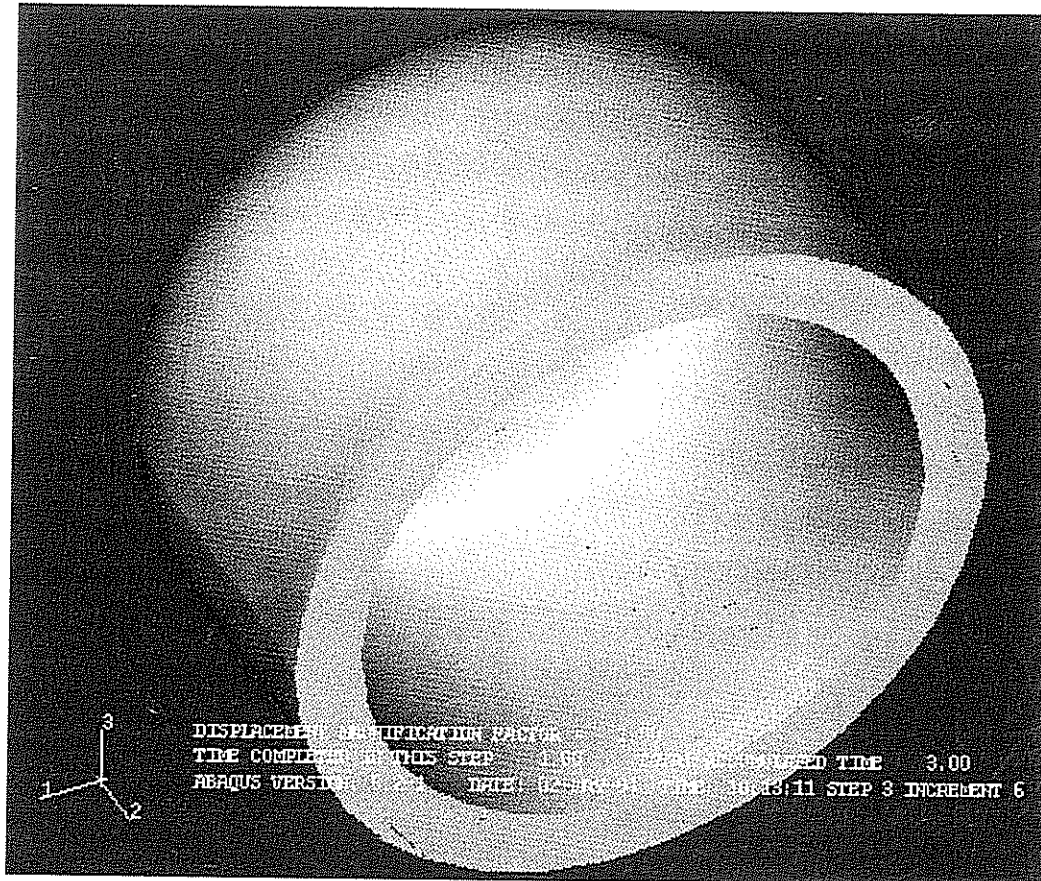
Şekil 30: Kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 31: Tüm parça üzerinde kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 32: Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 33: Örneğin son şekli.

Köşegenel Simetrik Parçalar

İşbirliği yapılan sanayi kuruluşlarından alınan ve köşegenel simetriye sahip iki parçanın derin çekme modellemeleri yapılmıştır. Önceki aksenal simetriğe sahip örneklerde de olduğu gibi düz metal levhadan başlanılarak zımba hareketi ile plastik şekil değiştirme sağlanmış, sonlu elemanlar ağının şekil değiştirmeleri ve bu parçalar üzerinde meydana gelen gerilmeler ile birim şekil değiştirmeler renkli grafikler ile gösterilmiştir.

Köşegenel simetriye sahip ve dikdörtgen şeklindeki taslak ile ilgili veriler aşağıdadır.

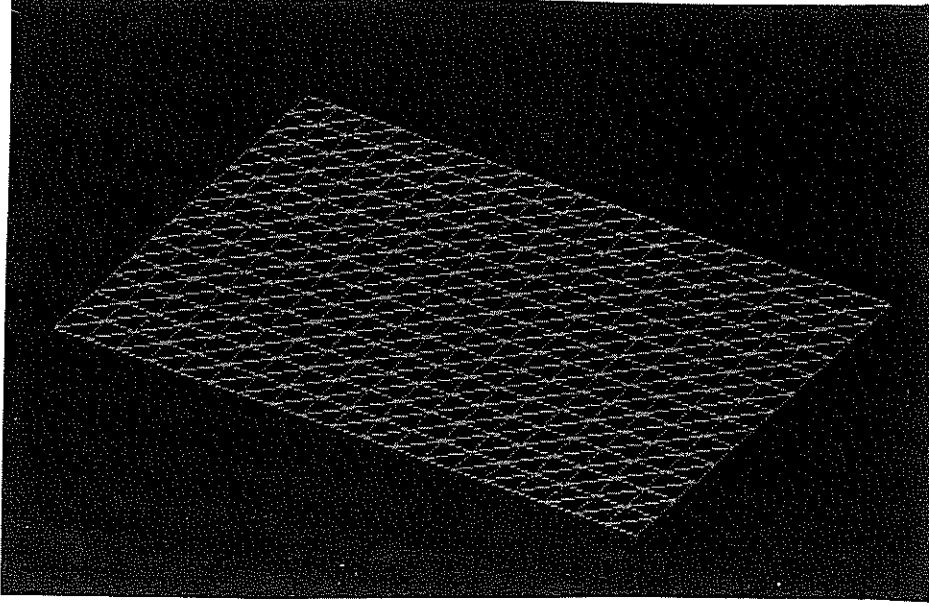
Kullanılan malzemenin özellikleri :

Malzeme	: Derin Çekme Çeliği
Elastik Modül	: 207 GPa
Poisson Oranı	: 0.33
Akma Mukavemeti	: 0.2 GPa
Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi	: $\bar{\sigma} = 524 (\bar{\epsilon} + 0.04)^{0.24}$

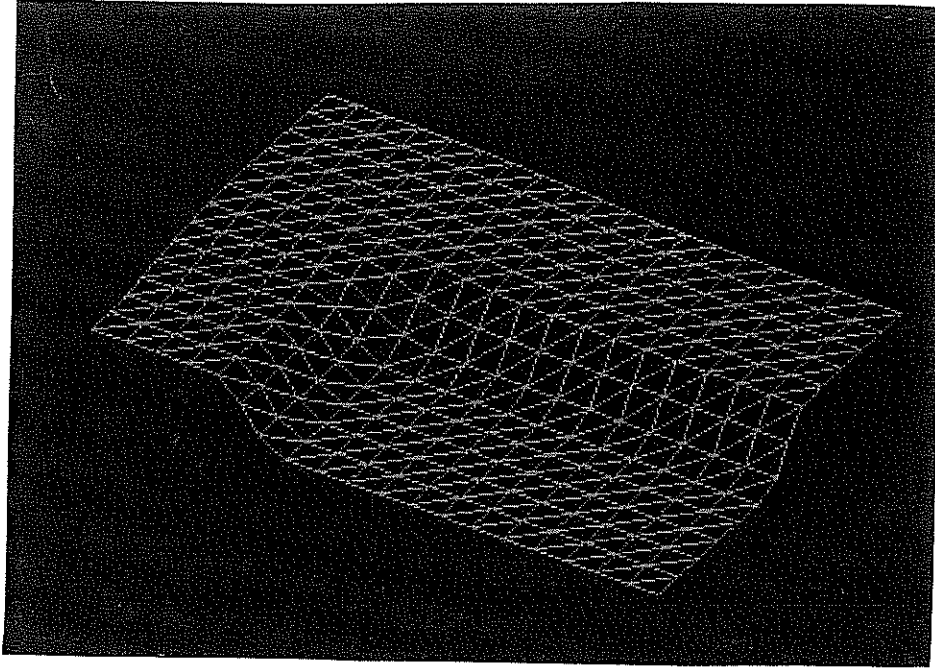
Kalıp ve taslak geometrisi :

Taslak Boyutları	: 134 mm x 190 mm
Zımba Boyutları	: 64 mm x 130 mm
Kalıp İçi Boyutları	: 68 mm x 134 mm
Zımba Profili Yarıçapı	: 5 mm
Kalıp Profil Yarıçapı	: 10 mm
Sürtünme Katsayısı	: 0.06 (kalıp)
Sürtünme Katsayısı	: 0.3 (zımba)

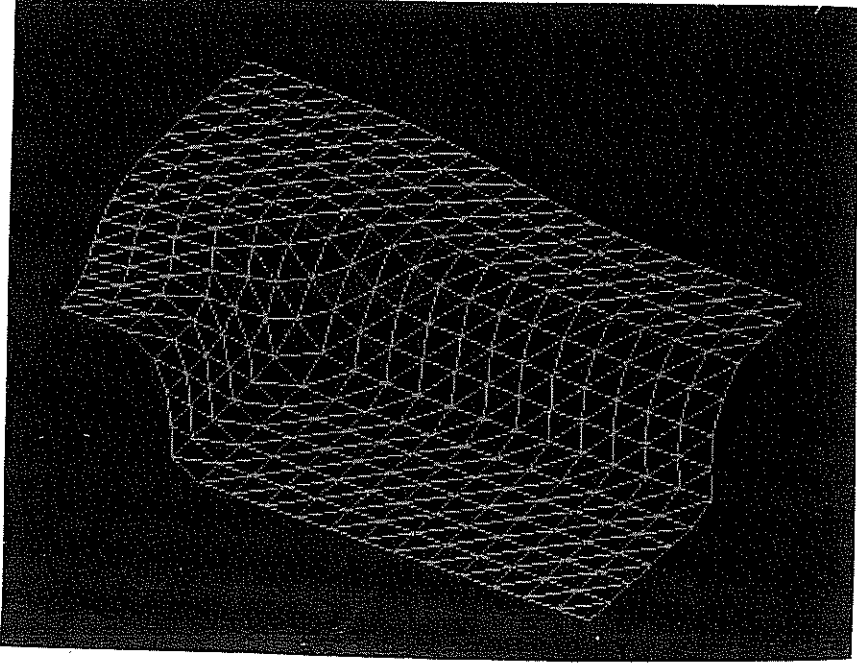
Taslağın başlangıçtaki durumu Şekil 34'de gösterilmektedir. Taslağın 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm çekme derinliklerindeki şekil değiştirmiş hali, sırasıyla Şekil 35 ve Şekil 39 arasında verilmiştir. Şekil 40 kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımını ve Şekil 41 ise parça üzerindeki Von Mises gerilme dağılımını göstermektedir.



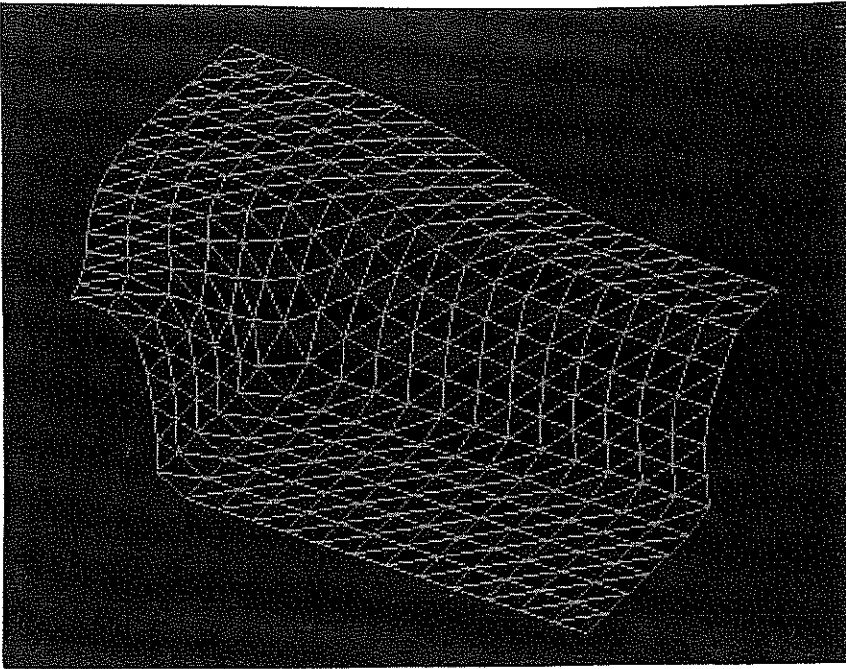
Şekil 34: Taslağın başlangıçtaki durumu.



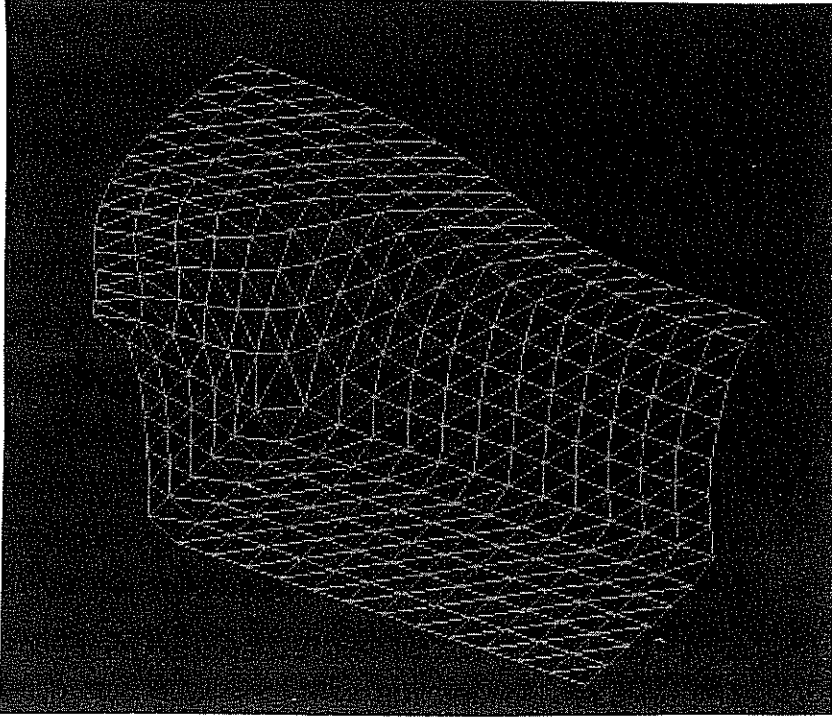
Şekil 35: Taslağın 5 mm çekme derinlikteki şekli



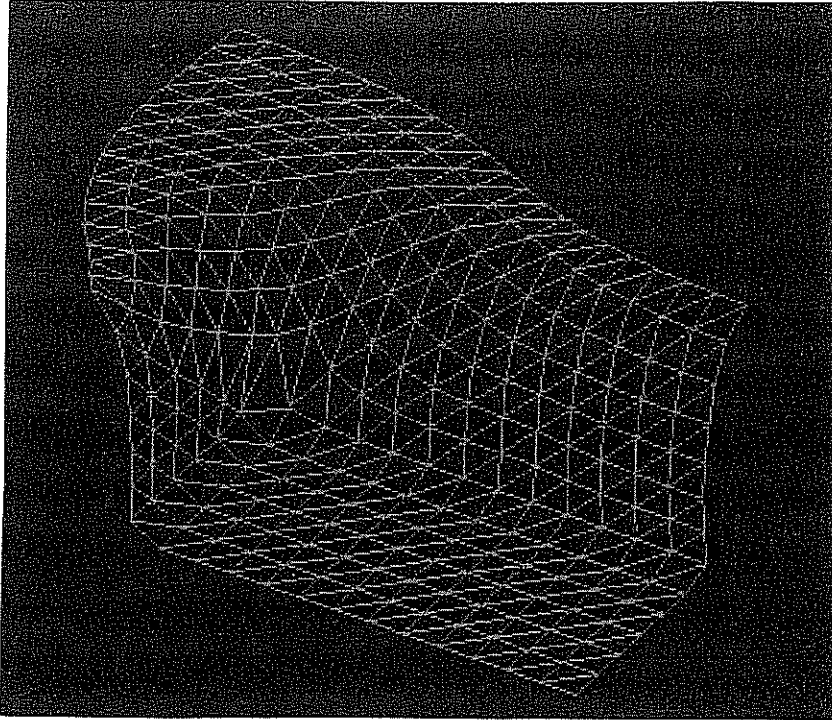
Şekil 36: Taslağın 10 mm çekme derinlikteki şekli.



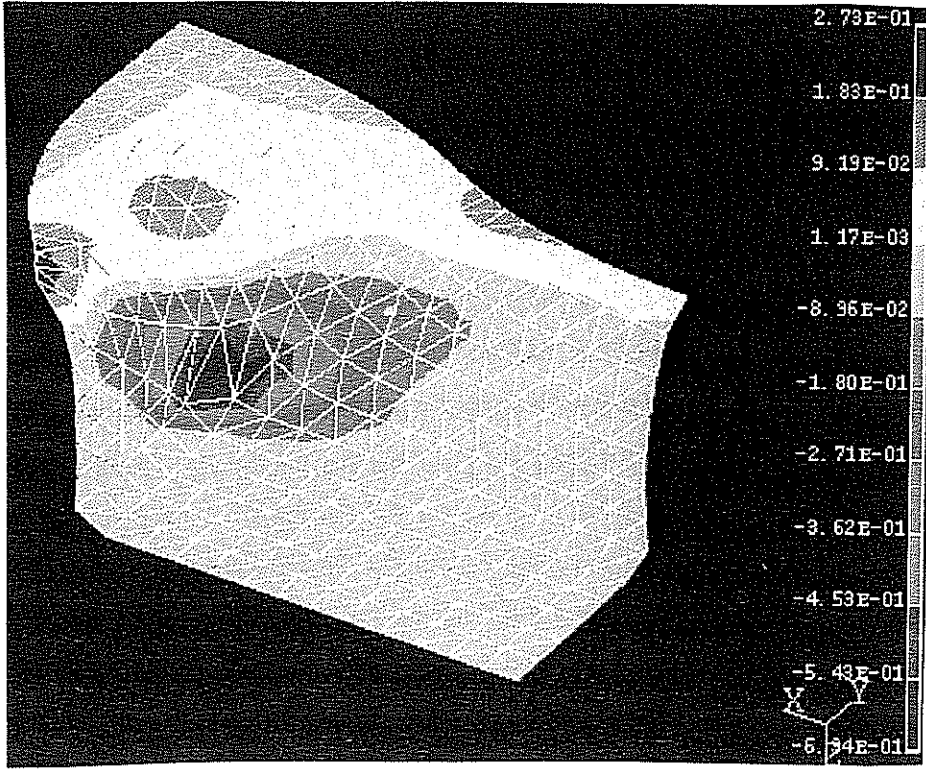
Şekil 37: Taslağın 15 mm çekme derinlikteki şekli.



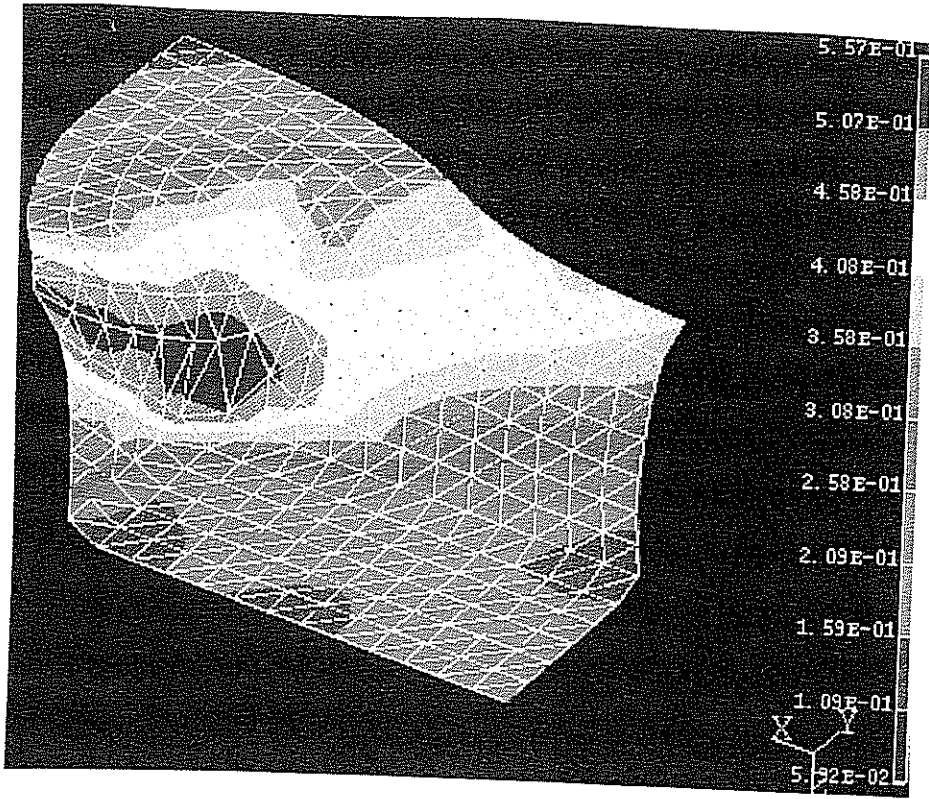
Şekil 38: Taslağın 20 mm çekme derinlikteki şekli.



Şekil 39: Taslağın 25 mm çekme derinlikteki şekli.



Şekil 40: Kalınlık yönündeki birim şekil değıştirme dağılımı.



Şekil 41: Von Mises gerilme dağılımı.

Köşegen simetriye sahip ve geliştirilen sonlu elemanlar yöntemiyle incelenen ikinci parça için kullanılan taslağın sonlu elemanlarla modellenen dörtte biri Şekil 42'de gösterilmektedir. Bu parça ile ilgili mazeme ve geometri özellikleri aşağıda verilmiştir.

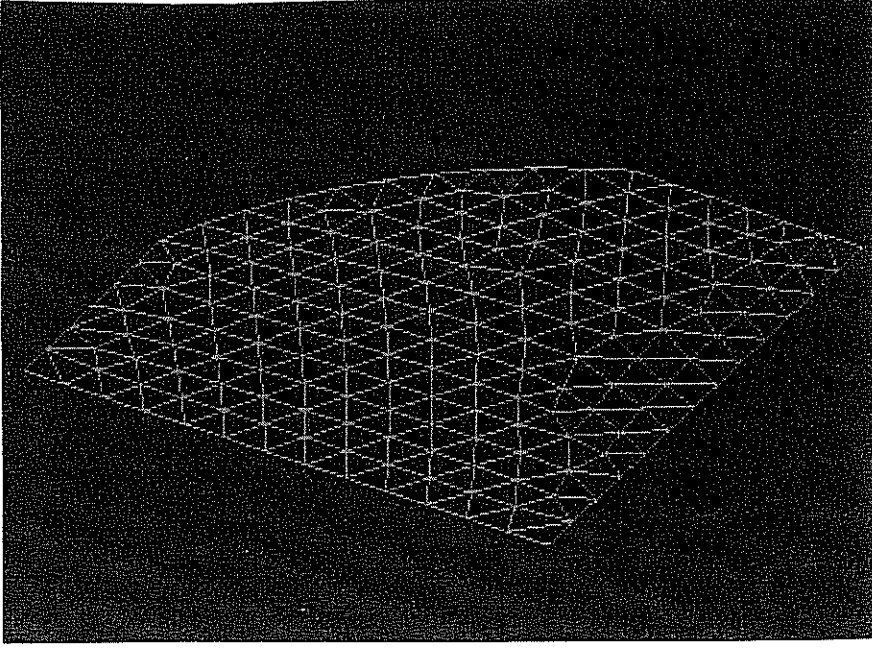
Kullanılan malzemenin özellikleri :

Malzeme	: Derin Çekme Çeliği
Elastik Modül	: 207 GPa
Poisson Oranı	: 0.33
Akma Mukavemeti	: 0.2 GPa
Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi	: $\sigma = 524 (\epsilon + 0.04)^{0.24}$

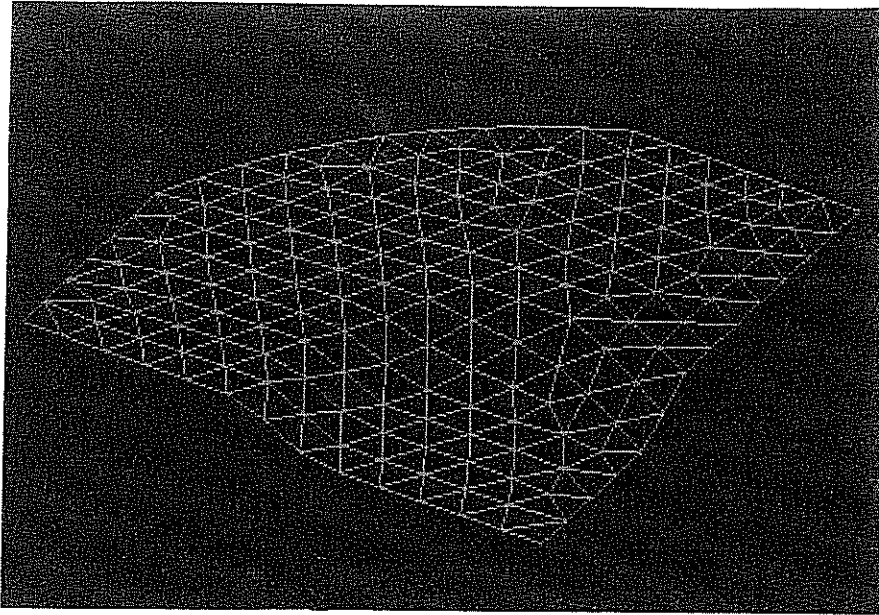
Kalıp ve taslak geometrisi :

Taslak Düz Kenar Uzunlukları	: 56 mm
Taslak Köşe Yarıçapları	: 70 mm
Zımba Boyutları	: 50 mm x 76 mm
Kalıp İçi Boyutları	: 54 mm x 80 mm
Zımba Profili Yarıçapı	: 5 mm
Kalıp Profili Yarıçapı	: 10 mm
Sürtünme Katsayısı	: 0.06 (kalıp)
Sürtünme Katsayısı	: 0.3 (zımba)

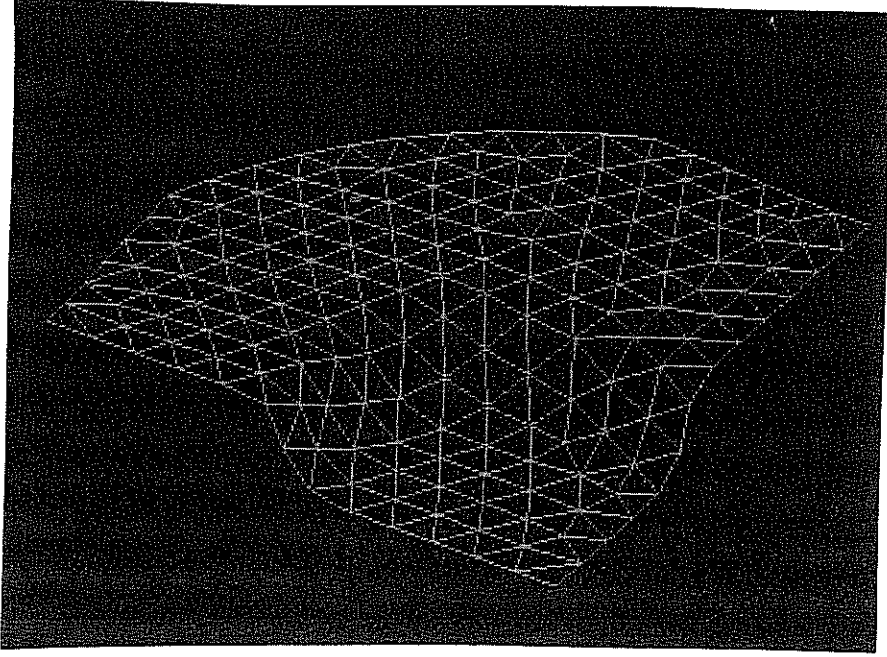
Taslağın 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm çekme derinliklerindeki şekil değiştirmiş hali, sırasıyla Şekil 43 ve Şekil 47 arasında verilmiştir. Şekil 48 kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme dağılımını ve Şekil 49 ise parça üzerindeki Von Mises gerilme dağılımını göstermektedir.



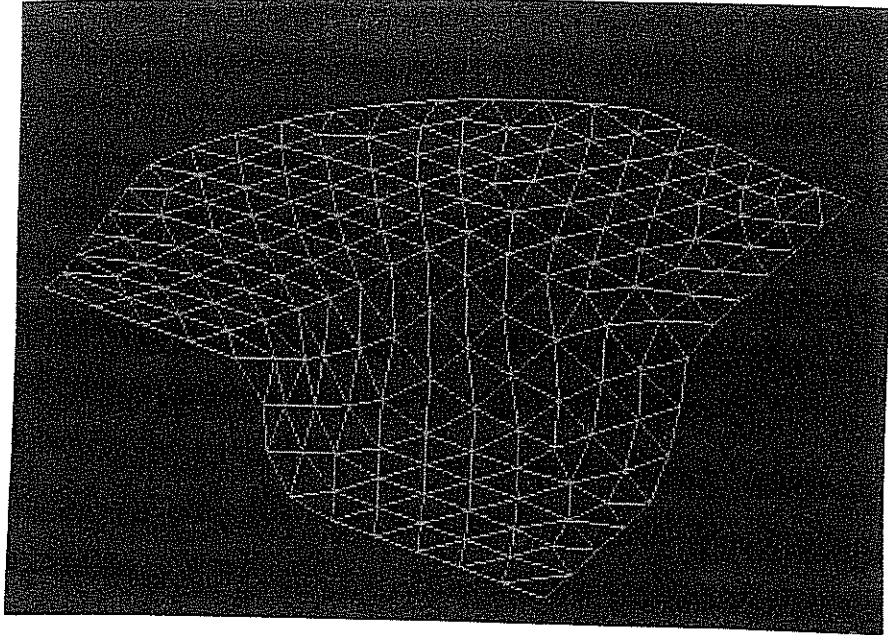
Şekil 42: Taslağın başlangıçtaki durumu.



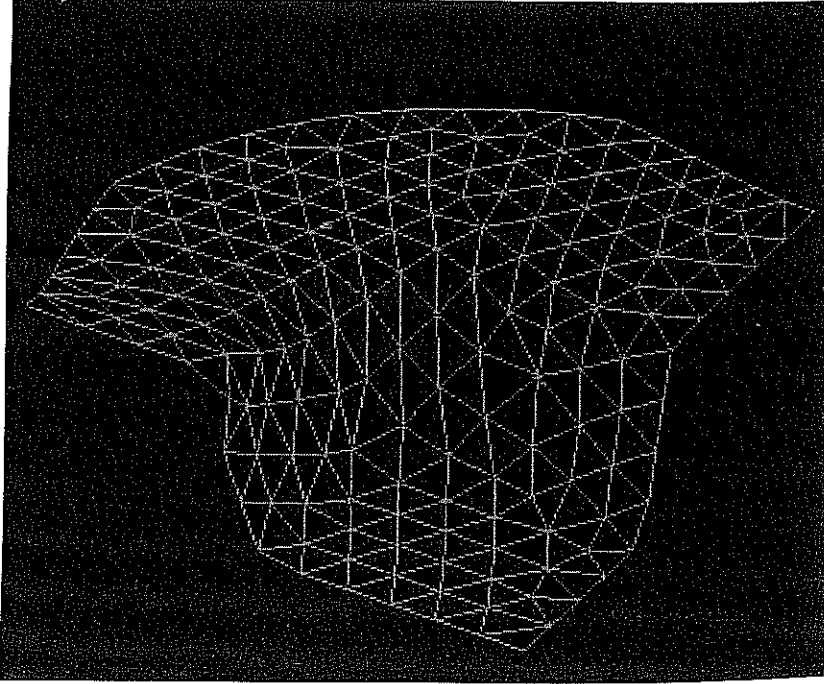
Şekil 43: Taslağın 5 mm çekme derinlikteki şekli.



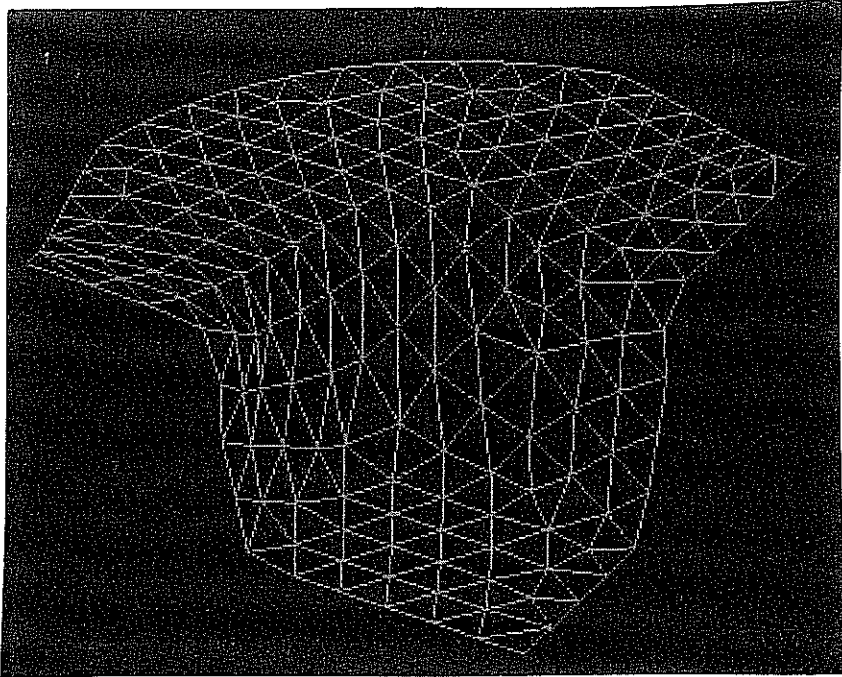
Şekil 44: Taslağın 10 mm çekme derinlikteki şekli.



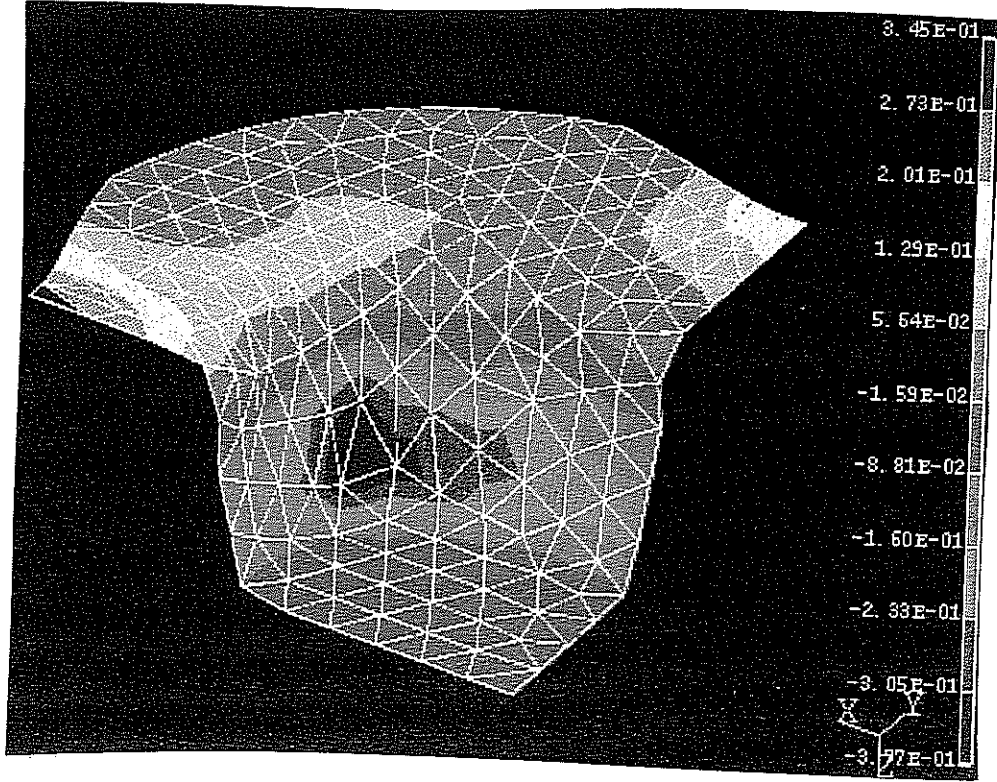
Şekil 45: Taslağın 15 mm çekme derinlikteki şekli.



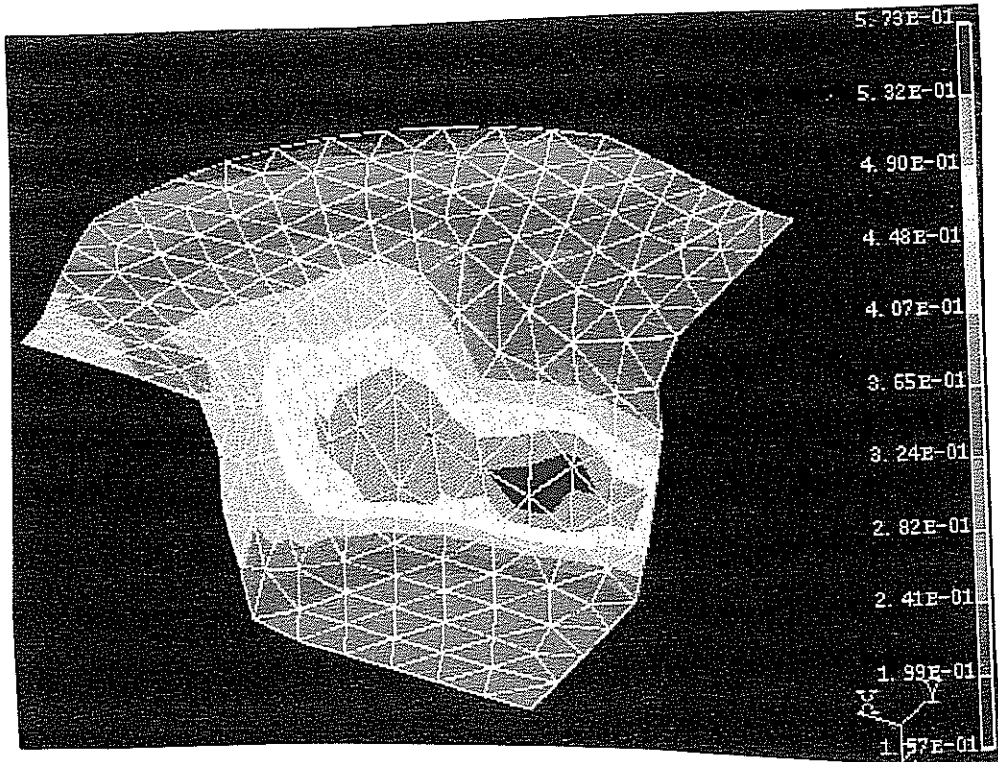
Şekil 46: Taslağın 20 mm çekme derinlikteki şekli.



Şekil 47: Taslağın 25 mm çekme derinlikteki şekli.



Şekil 48: Kalınlık yönündeki birim yer değıştirme dağılımı.



Şekil 49: Von Mises gerilme dağılımı.

Yazılım ve Donanımla İlgili Bilgiler

Donanım

Program ODTÜ-BİLTİR Merkezinde bulunan çeşitli bilgisayar ortamlarında geliştirilmiştir. Son aşamada aşağıda özellikleri verilen Silicon Graphics iş istasyonu üzerinde çalıştırılmıştır:

- IRIS 4.05a sistem
- RISC 3000 işlemci
- 16 MB RAM
- 385 MB HDD
- 10 Mips, 20 MHz

Yazılım

Geliştirilen program Fortran diliyle yazılmıştır. Programın algoritması Şekil 50'de verilmiştir. Program için gerekli taslak ile ilgili girdiler ve programdan elde edilen sayısal gerilme ve birim yer değiştirme değerlerini görüntülemek amacıyla PATRAN 2.4, PATRAN 3.0 ve IDEAS Master Series 1 ve 2 yazılımları kullanılmıştır. Program çıktılarını PATRAN ve IDEAS'a aktarabilmek amacıyla Fortran dili kullanılarak birer ara çevirici program hazırlanmıştır. Böylece sayısal gerilme ve birim yer değiştirme değerleri şekil değiştirmiş parça üzerinde renk kodları ile görüntülenmiştir.

Geliştirilen Yazılım İçin Gerekli Girdiler

- Düğüm noktalarının koordinatları ve sayısı
- Elemanların sayısı ve oluşturan düğüm noktaları
- Bir elemandaki serbestlik derecesi
- Bir düğüm noktasındaki serbestlik derecesi
- Zımbanın boyutları
- Kalıbın boyutları
- Kalıbın profil çapı
- Zımbanın profil çapı
- Taslak kalınlığı
- Malzeme özellikleri
- Baskı plakası kuvveti
- Sürtünme katsayıları
- Sınır durumları

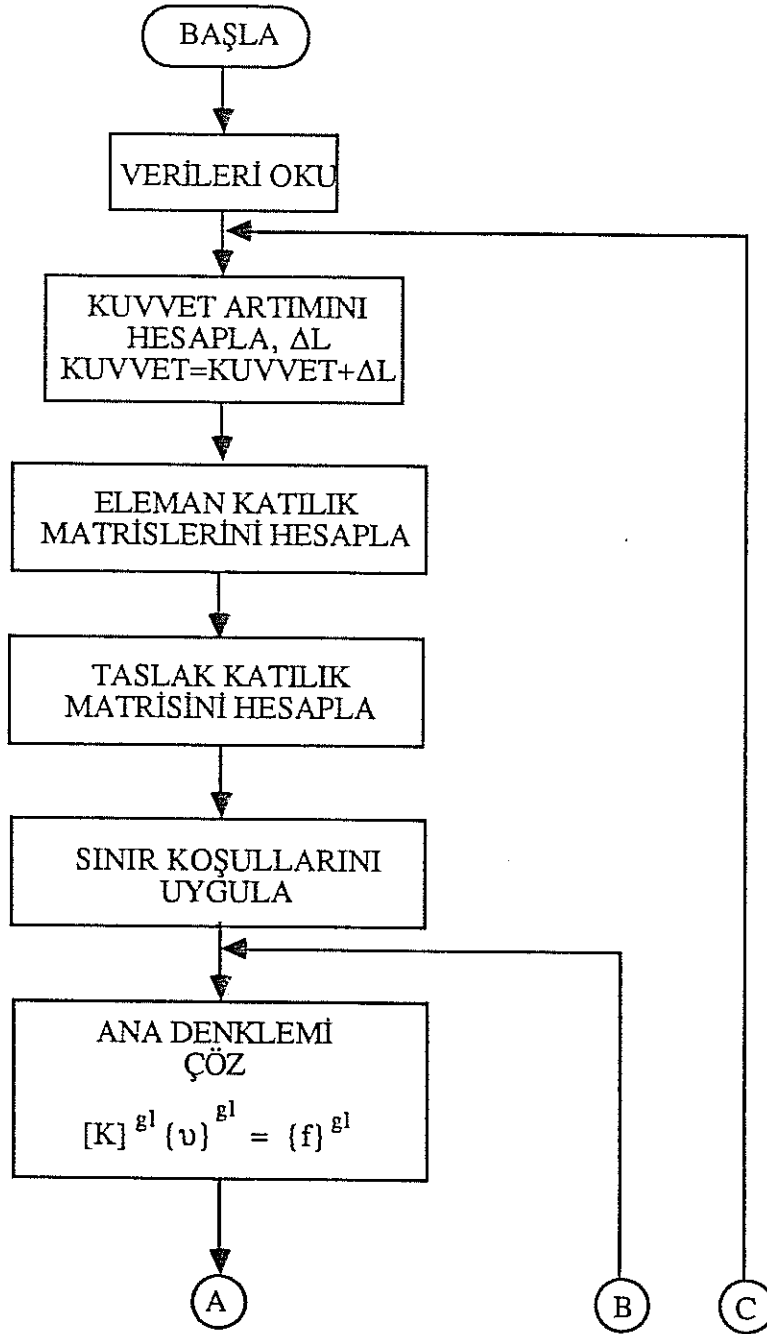
Geliştirilen Yazılımdan Elde Edilen Çıktılar

Düğüm noktaların koordinatları
Elemanlardaki birim şekil değiştirme değerleri
Elemanlardaki gerilme değerleri

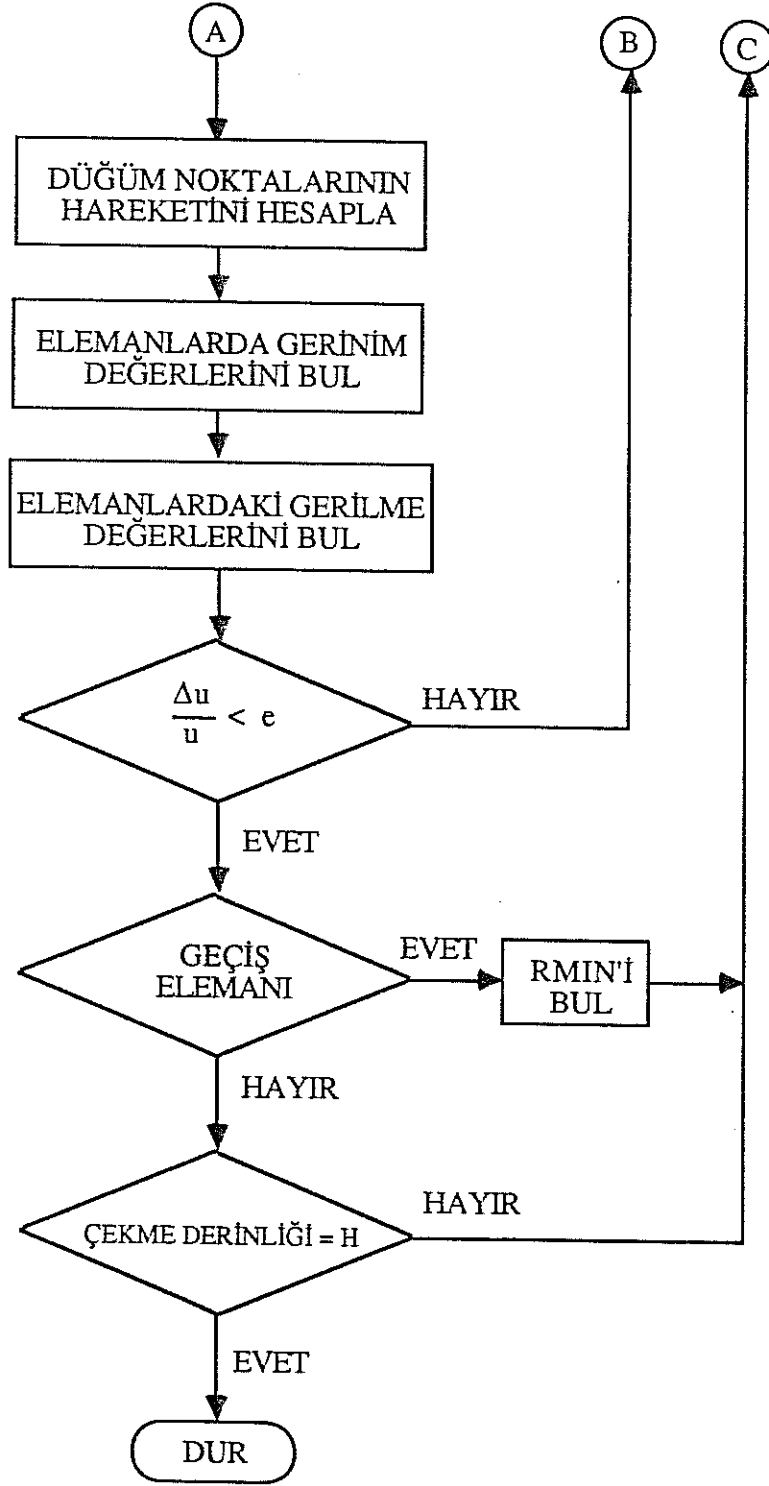
Programın Çalışma Süresi

Köşegenel simetriye sahip olan ve dörtte biri Şekil 34'de görülen taslağın 35 mm çekilmesi için programın başlangıcı ve durması arasında geçen süre, yukarıda belirtilen iş istasyonunda başka bir yazılım çalıştırılmadığında, 50 saattir. Aynı süre Şekil 42'de dörtte biri görülen taslak için ise 58 saattir. Son çıkan modellerde bu süre yaklaşık on kat daha azalmaktadır. Gigaflop mertebesinde bir süperbilgisayar kullanımı olması durumunda ise bu süre dakikalar mertebesine inmektedir. Dolayısıyla bilgisayar kullanımı deneme ve yanılma yöntemiyle kalıp üretimi işlemi ile karşılaştırıldığında, zaman kaybı ve üretim masrafları açısından daha avantajlı kalmaktadır.

Bu projede kullanılan SEY ile ilgili teorik ön çalışmalar bu proje öncesi tamamlandığından bu raporda ayrıntıya girilmemiş ve sanayi uygulamalarına ağırlık tanınmıştır (Darendeliler ve Kaftanoğlu, 1991).



Şekil 50: Programın Algoritması



Şekil 50: Programın Algoritması (devam)

SONUÇ

Geliştirilen teorik model ve sonlu elemanlar yöntemi ile metal levhaların zımba ve kalıplar yardımıyla plastik şekil değişikliğine uğratarak üretilmesinin benzetimi yapılmıştır.

1. Geliştirilen teori ve yazılım ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sanayiden alınan örnekler geliştirilen teori ve yöntem ile modellenmiş ve böylece elde edilen parçaların sonuçlar ile çok uyumlu şekil değişikliklerine uğradığı saptanmıştır.
2. Bu yöntem ile metal levha şekil değiştirme işlemlerinde zaman, işgücü, malzeme ve oldukça pahalı olan kalıpların yeniden yapılmasından oluşacak kayıpların en aza indirilmesi mümkün olmaktadır.
3. Geliştirilen yöntem aksel simetrik ve köşegenel simetrik parçaların modellenmesinde başarı ile kullanılmıştır.
4. Geliştirilen yöntem ile parçaların modellenmesi, bu amaçla kullanıma ayrılmış bilgisayarların, parçanın karmaşıklığına göre, günler mertebesinde çalışmasını gerektirmektedir. Bu yüzden çok karmaşık şekilli parçaların modellenmesi kullanılan bilgisayarların yetersizliği yüzünden yapılamamıştır. Bu tip parçalar simetriyi kullanarak ağı bir kısmının benzetiminin yapılmasını olanak vermemekte, aynı zamanda karmaşık kalıp şeklinden ötürü ağ içinde çok sayıda sonlu elemanlar kullanımını gerektirmektedirler.
5. Geliştirilen yöntemin üretilen parçaları başarıyla modellemesi kalıp yapımını kolaylaştırmakta ve kalıp için gerekli ölçüler kolaylıkla tespit edilmekte ve böylece defalarca pahalı kalıp yapılarak istenilen şeklin bulunması engellenmektedir. Bu da sanayi uygulamalarına büyük kolaylık getirmektedir. Karmaşık parçalar için günümüzün hızlı bilgisayarları kullanılarak dakikalar mertebesinde sonuçlar alınabileceğinden parça, kalıp ve işlem tasarımları hızlı bir şekilde tamamlanabilecektir.
6. Geliştirilen teori ile büyük yer değişimlerinin ve büyük birim uzamalarının olduğu membranlar başarıyla incelenmiş ve bundan sonraki benzer modellemeler, örneğin kesme gerilmelerinin de göz önüne alındığı kabuklar için gerekli formülasyonun kolaylıkla yapılacağı teori oluşturulmuştur.

İleriye Dönük Araştırma Önerileri

Metal levhaların plastik olarak şekillendirilerek üretim yapmak imalat sanayi için giderek daha cazip hale gelmektedir. Bu yöntem imalat hızını artırmakta, talaşlı imalata göre malzeme kaybını yani fireyi azaltmakta ve malzeme kalitesini artırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı rekabet gücünü olumlu yönde etkilemektedir.

Geçmişte kullanılan deneme/yanılma yöntemleri yerini giderek bu projede yapıldığı şekilde bilgisayar ve sonlu elemanlarla geliştirilen modellemelere terk edecektir. Bu proje kapsamında eksenel simetriye sahip olan parçaların modellemeleri iş istasyonlarında makul zaman sınırları içinde yapılmıştır. Ancak köşegenel simetriğe sahip olan daha zor parçaların modellenmeleri günler, bazen haftalar almıştır. Bu nedenle daha geniş bellek ve disklere sahip ve işlem hızları çok yüksek (gigaflop) olan bilgisayarlara ve ayrıca elde edilen sonuçları ekranda gösterebilecek grafik ve animasyon programlarına ihtiyaç vardır.

İkinci bir araştırma dalı ise derin çekme işlemlerinde kısmi ısıtma/soğutma kullanarak verimin artırılmasını sağlayabilecek geliştirmeler yapılmasıdır. Böyle bir çalışmada ayrıca bir ısı ve sıcaklık dağılımı boyutu da eklenebilecek ve süreç bu şekilde modellenebilecektir. Bu tür çalışmalarda da yine süperbilgisayar düzeyinde iş istasyonlarına ve grafik ve animasyon programlarına ihtiyaç vardır.

Üçüncü bir araştırma alanı da karmaşık ve eksenel simetriğe sahip olmayan parçaların üzerinde meydana gelen kırılma, buruşma ve benzeri kararsızlık olaylarının incelenmesidir.

KAYNAKÇA

Chakrabarty, J., A Theory of Stretch Forming over Hemispherical Punch Heads, *Int. J. Mech. Sci.*, 12, 315-325 (1970).

Darendeliler, H., Kaftanoğlu, B., "Deformation Analysis of Deep-Drawing by a Finite Element Method", *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, (1991), pp: 281-284.

Eringen, A. C., *Nonlinear Theory of Continuous Media*, McGraw-Hill Book Company, Inc., (1962).

Green, A. E., Zerna, W., *Theoretical Elasticity*, Oxford University Press, (1968).

Kaftanoğlu, B., Alexander, J. M., On Quasistatic Axisymmetrical Stretch Forming, *Int. J. Mech. Sci.*, 12, 1065-1084 (1970).

Kaftanoğlu, B., An Investigation of Stretch Forming in Relation to Deep-Drawing and Testing Sheet Metal, *Ph.D. Thesis*, Imperial College, London, (1966).

Kaftanoğlu, B., Determination of Coefficient of Friction under Conditions of Deep-Drawing and Stretch Forming, *Wear*, 25, 177-188 (1973).

Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, Inc., (1969).

Mattiasson, K., Saran, M., Melander, A., Schedin, E., and Gustafsson, C., Finite Element Simulation of Deep-Drawing of Low and High Strength Steel, *Advanced Technology of Plasticity*, ed: K. Lange, Vol: 1, Springer-Verlag, (1987), pp: 657-664.

McMeeking, R. M., Rice, J. R., Finite Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation, *Int. J. Solids Structures*, 11, 601-616 (1975).

Wang, N. M., Large Plastic Deformation of a Circular Sheet Caused by Punch Stretching, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 37, 431-440 (1970).

Wang, N. M., Budiansky, B., 1978, Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite-Element Method, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 45, 73-82 (1973).

Wifi, A. S. An Incremental Complete Solution of the Stretch-Forming and Deep-Drawing of a Circular Blank using a Hemispherical Punch, *Int. J. Mech. Sci.*, 18, 23-31 (1976).

Woo, D. M., The Analysis of Axisymmetric Forming of Sheet Metal and the Hydrostatic Bulging Process, *Int. J. Mech. Sci.*, 6, 303-317 (1964).

Woo, D. M., On the Complete Solution of the Deep-Drawing Problem, *Int. J. Mech. Sci.*, 10, 83-94 (1968).

Yamada, Y., Yoshimura, N., Sakurai, T., Plastic Stress-Strain Matrix and Its Application for the Solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite Element Method, *Int. J. Mech. Sci.*, 10, 343-354 (1968).

EK-1 PROJE SONUÇLARININ TÜBİTAK TARAFINDAN UYGULAYICI KURULUŞLARA DUYURULMASI

Projeden elde edilen sonuçlar uygulamaya dönüşebilecek niteliktedir. Özetle metal levhaların şekillendirilmesi ile ilgilenen sanayi kuruluşlarını ilgilendirir. Bu kuruluşlar şu çalışma alanlarına girerler:

1. Otomotif ve yan sanayi, özellikle kaporta imalatı ile ilgili kuruluşlar.
2. Havacılık sanayi. Uçak, helikopter ve roket imalatı ile ilgili alanlarda çalışan kuruluşlar.
3. Ev aletleri imalat sanayi. Öncelikle, çamaşır, bulaşık makinaları ile tencere tava v.b. imalatçılar.
4. Mühimmat ve savunma sanayine dönük imalat yapanlar.
5. Saç ve metal levha kullanarak ürün imal edenler.

Yukarıda belirtilen nitelikte sanayi kuruluşlarının ürettikleri metal levhadan üretilen ürünlerin tasarımları ve bunların üretimlerinde kullanılan zımba ve kalıpların tasarımında geliştirilen yöntemler kullanılabilir. Bu ürünler ile ilgili taslak tasarımları geliştirilen yöntemlerle optimal hale yani en az fire verecek duruma getirilebilir. Bu sayede aynı zamanda çekme oranı da artacağından daha verimli ve ekonomik bir imalat elde edilir.

Bu çalışmalar ODTÜ-BİLTİR Merkezinde yapılabilir.

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: MİSAG-19	2- Rapor Tarihi: HAZİRAN 1995
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1/12/1992 - 1/2/1995	
4- Projenin Adı: METAL LEVHA ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE SANAYİDE ÜRETİLEN PARÇALARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. BİLGİN KAFTANOĞLU Y.Doç.Dr. HALUK DARENDELİLER ZAFER ŞENALP	
5- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM, İMALAT VE ROBOTİK ARAŞTIRMA VE UYGULAMA MERKEZİ (BİLTİR) ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, ANKARA 06531	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: MKEK - TANDOĞAN, ANKARA ELSA - MAMAK, ANKARA IBM - KAVAKLIDERE, ANKARA	
6- Öz (Abstract): Metal levha şekillendirme yöntemi ile otomotif, savunma ve havacılık sanayi başta olmak üzere gövde ve diğer parçalar üretilmektedir. Bu parçaların tasarım ve imalatları şimdiye dek deneme/yanılma yöntemleri ile yapılmaktaydı. Geliştirilen yöntemle düz levha konumundan başlayarak zımba ve kalıp kullanılması sonucu levhaya plastik şekil değişikliği verilerek istenen parçalar elde edilmektedir. Bu sırada parça içindeki gerilmeler ve şekil değişiklikleri geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bu suretle deneme/yanılma olmaksızın parça ve kalıp tasarımları yapılabilir. Abstract - Sheet-metal forming is used in the production of body and other parts for the automotive, defence aerospace and similar industries. Up to now, design and production of such parts have been accomplished by trial and error methods. Using the sheet-metal forming process with the necessary tools such as the punch and the dies, plastic deformation is achieved and the desired geometry is obtained. The developed finite element method provides the facilities to find the stress and strain distributions in the part. Therefore it is now possible to design and produce the parts and dies without a trial and error method.	
Anahtar Kelimeler: DERİN ÇEKME, PLASTİK ŞEKİLLENDİRME, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler Computer-Aided Modelling of Sheet Metal Forming Proceedings of 26th ISATA Conference, Aachen Germany, 13-17 Eylül 1993.	
0- Bilim Dalı: Konstrüksiyon ve İmalat Doçentlik B. Dalı Kodu: 625.02.00 ISIC Kodu: Uzmanlık Alanı Kodu: 625.02.07	
1- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input checked="" type="checkbox"/> Sınırsız	
2- Raporun Gizlilik Durumu : <input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil	

Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz