

# ÇİFT BAZLI KATI ROKET YAKITININ EKSTRÜZYON İŞLEMİYLE ŞEKİLLENDİRMESİNİN SONLU ELEMAN METODUYLA MODELLENMESİ

**Barış KALAYCIOĞLU, M. Hüsnü DİRİKOLU, Veli ÇELİK**

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450/Kırıkkale

Geliş Tarihi: 02.06.2006

## ÖZET

Bu çalışmada çift bazlı katı roket yakıtlarının üretimlerinde önemli bir aşamayı oluşturan ekstrüzyonla şekillendirme safhasının, Ansys® sonlu eleman benzetim paketi yardımıyla 3-boyutta modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Direkt ekstrüzyona tabi tutulan katı yakıtın mekanik davranışı, temel modeli oluşturmak ve sonradan gerçekleştirilecek elastoviskoplastik modellemeyle karşılaştırma yapmak üzere elastik-plastik şeklinde alınmıştır. Coulomb sürtünmeli kontakt yüzeyleri, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme davranışları ele alınan modelde, büyük şekil değiştirmeler adimsal bir çözüm yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Simülasyon yardımıyla ekstrüzyon sırasında katı yakıtta oluşan hidrostatik basınç, gerilme, gerinim ve yer değiştirme değerleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Çift bazlı katı roket yakıtı, Direkt ekstrüzyon, Sonlu eleman metodu, Elastik-plastik.

## EXTRUSION FORMING OF A DOUBLE BASE SOLID ROCKET PROPELLANT BY FINITE ELEMENT METHOD

### ABSTRACT

In this study, three dimensional modelling of extrusion forming of a double base solid rocket propellant is performed on Ansys® finite element simulation package. For the purpose of initial model construction and later comparisons with elastoviscoplastic model, the solid propellant is assumed to obey the elastic-plastic material response during the direct extrusion process. Taking into account the contact surface behavior with Coulomb friction and geometric and material nonlinearities, an incremental large strain solution methodology has been adapted in the simulation. The hydrostatic pressure, stress, strain, and displacement values during extrusion of the solid rocket propellant are obtained from the simulation.

**Key Words :** Double base solid rocket propellant, Direct extrusion, Finite element method, Elastic-plastic.

### 1. GİRİŞ

Katı yakıtların tasarım ve üretim teknolojileri ülkeler için önem arz eden bir konudur. Bu çalışmada roket yakıtının tasarım ve üretiminin önemli bir safhası olan şekillendirme aşamasının bilgisayar yardımıyla modellenmesi amaçlanmıştır. Yakıtın

şekillendirilmesi sırasında karşılaşılabilecek sorunların önceden fark edilmesine ve çeşitli çaplarda üretimi için tasarım esnekliğine olanak tanınması açısından bilgisayar yardımıyla modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Bilgisayarla modelleme yöntemleri arasında ısı analizleri için Sonlu Farklar Metodu (Finite Difference Method-SFM), ısı ve yapı analizi için Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element

Method-SEM) Clough (1960) ve ısı, akustik, elektromanyetik ve akışkanlar mekaniği için Sınır Eleman Metodu (Boundary Element Method-BEM) sayılabilir. Bu çalışmada, şekillendirme işlemi söz konusu olduğundan, SEM kullanılmıştır. Bu yöntem, maliyet ve verimlilik açısından uygun değer hedeflere ulaşılmada son zamanlarda kullanılan en önemli tasarım yaklaşımlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Katı yakıtların şekillendirilmesiyle ilgili olarak, Jana ve Arkadaşları (1987) katı yakıt taneciklerinin basınç değişimi ile hacim değişimine direnci ifade eden bulk modülü (K) arasındaki ilişkiyi hem doğrusal olmayan hem de doğrusal SEM'deki analizi yapılmış ve doğrusal olmayan analizin, deneysel sonuçlara uygunluk açısından gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Herder ve Arkadaşları 2003 ise, zamanla değişim gösteren burulma, basma ve çekme yükleri altında sıcaklık-elastisite modülü ve yine sıcaklık-kayma modülü arasındaki ilişkileri irdelemiştir. Jones ve Pierre-Louis (1985), şekil değiştirmenin zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği roket yakıtında yüksek basınç altındaki soğuma sırasında meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmenin hesaplanmasını ADINA® SEM paket programı yardımıyla deney sonuçlarına yakın seviyede hesaplayabilmişlerdir. Townend and Warren (1985), çift bazlı katı yakıtın gevşeme davranışını, yakıt içeriğinde bulunan nitrogliserin oranını değiştirerek irdelemiştir. Renganathan ve arkadaşları (1994), HTPB (Hydroxyl terminated polybutadiene) esaslı katı yakıtın, 15 dak<sup>-1</sup> ile 0.015 dak<sup>-1</sup> arasında değişen çekme hızı yüklemeleri altındaki kırılma diyagramını elde etmiştir. Borovkov ve Shevchenko (2002), titanyum malzemesinin sıcak ekstrüzyon işlemi, doğrusal olmayan SEM yardımıyla bilgisayar ortamında modellemiştir. Bu çalışmalar SEM'in ekstrüzyon ve roket yakıtı analizlerinde dünyada etkin bir şekilde kullanılabilirliğini göstermekle kalmayıp, fiziksel açıdan üretimini yönlendirdiğini de ortaya koymaktadır.

## 2. TEORİ

Bu çalışmada özet kısmında ifade edildiği gibi direkt ekstrüzyona tabi tutulan katı yakıtın mekanik davranışı, temel modeli oluşturmak ve sonradan yapılacak elasto-viskoplastik modellemeyle karşılaştırma yapmak üzere elastik-plastik şekilde alınmıştır.

Elastik-plastik analizde, sonsuz küçük bir şekil değiştirmenin elastik bileşeni  $d\varepsilon^e$  ve plastik bileşeni

ise  $d\varepsilon^p$  ile gösterilir. Dolayısıyla toplam şekil değiştirme,

$$d\varepsilon^{Toplam} = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (1)$$

şeklinde bulunur. Şekil değiştirme hali elastik bölgede olduğunda  $d\varepsilon^e$  Hooke bağıntılarıyla, plastik bölgede olduğunda ise  $d\varepsilon^e$  'nin yanında  $d\varepsilon^p$  miktarı Prandtl-Reuss akış bağıntıları yardımıyla hesaplanır (Johnson ve Mellor, 1983). Von Mises akma kuralı hesaba katıldığında, Prandtl-Reuss bağıntılarının plastik kısmı aşağıdaki hali alır.

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1^p &= \frac{d\varepsilon}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]; \\ d\varepsilon_2^p &= \frac{d\varepsilon}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \right]; \\ d\varepsilon_3^p &= \frac{d\varepsilon}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Bu denklemlerde;

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{ve}$$

$$d\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \left( (d\varepsilon_1)^2 + (d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_3)^2 \right)} \quad \text{sırasıyla von}$$

Mises etken gerilme ve etken adimsal şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. Holloman tipi deneylere bağımlı gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon})^n \quad (3)$$

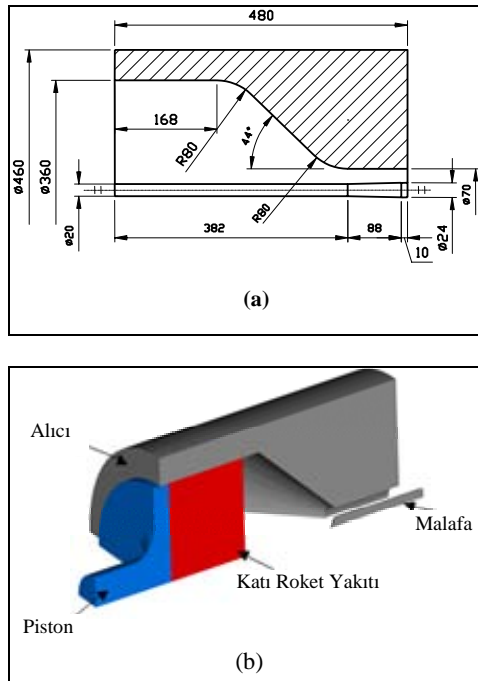
veya bu bağıntının çoklu doğrusal hali ile plastik bölgede hacmin değişmezliğini (Poisson oranı,  $\nu = 0.5$ ) ifade eden  $d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0$  bağıntısı yardımıyla malzemelerin plastik bölgede maruz kaldığı gerilme ve şekil değiştirme adımı yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. (3) ifadesinde K mukavemet katsayısını ve n ise pekleşme endeksini ifade eder. Elastik şekil değiştirme bileşeni olan  $d\varepsilon^e$  ihmal edildiği takdirde, yukarıda (1) ve (2)'de verilen Prandtl-Reuss akış bağıntıları Levy-Mises akış bağıntıları adını almaktadır. Plastik şekil değiştirmede sırasında olası Kontakt yüzeyleri Coulomb sürtünme modeli,

$$\tau_f = \mu \sigma_n \quad (4)$$

yardımla hesaba katılabilir. (4) bağıntısında,  $\tau_f$  sürtünme gerilmesini,  $\sigma_n$  normal gerilmeyi ve  $\mu$  sürtünme katsayısını göstermektedir. Plastik şekillendirmede ortaya çıkan doğrusal olmayan geometrik ve malzeme davranışları ise adımsal çözüm yaklaşımıyla hesaba katılır. Bu bölümde verilen temel elastik-plastik analizin sonlu eleman metoduna uygulanma biçimi geniş bir biçimde literatürde bulunmaktadır (Bathe, 1995).

### 3. EKSTRÜZYON MODELİ

Katı yakıt ekstrüzyon kalıbı ve işlem modeli, Şekil 1a ve 1b'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Katı yakıt ekstrüzyon kalıbı (a) ve ekstrüzyon işlemi (b).

Alıcı ve malafa, çelik malzemeden olup özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

İkinci malzeme katı yakıt olup, ekstrüzyonu 74 °C'de gerçekleştirilmektedir. Katı yakıt için bu sıcaklıktaki mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

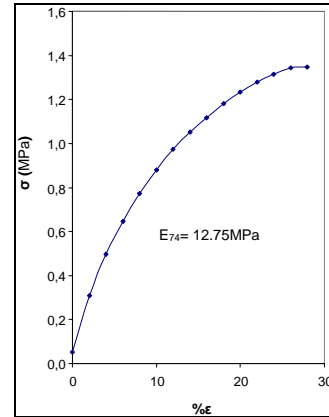
Tablo 1. Alıcı ve Malafa Malzemesinin Mekanik Özellikleri.

Malzeme	Elastisite Modülü, E (GPa)	Poison oranı, $\nu$
Çelik	200	0.3

Tablo 2. Katı Yakıtın 74 °C'deki Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.

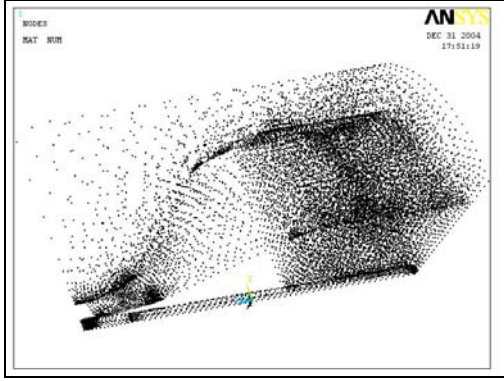
Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ )	1.66
Viskozite, $\eta$ (Pa-s)	7570
Alevlenme sıcaklığı (°C)	165-180
Patlama basıncı (Bar)	140
Şekil değiştirme hızı hassasiyet faktörü, $m$	0.4
Elastisite modülü (MPa)	12.75
Poison oranı (Shiang-Woei Chyuan, 2003)	0.49997

Tablo 2'de belirli bir şekil değiştirme ve şekil değiştirme hızında malzemede pekleşmenin yanında yumuşama olasılığını hesaba katan Perzyna elasto viscoplastik modelleme (Perzyna, 1966), (Carter and Warren, 1987) için gerekli malzeme özellikleri de verilmiştir. Ansys® (Ansys Theory Manual 6.) paket programında, elastik plastik model tetiklemesi, doğrusal olmayan malzeme durumu için çoklu doğrusal pekleşme seçeneği (MISO, Multi Linear Isotropic Hardening) ve katı yakıtta ait +74°C'deki gerilme-şekil değiştirme verileri girilerek sağlanmıştır. Büyük şekil değişimleri ve dönmelerden kaynaklanan doğrusal olmayan geometrik hal için "NLGEOM, ON" (Nonlinear Geometry, On) seçeneği devreye alınmıştır. Şekil 2'de, laboratuvar katı yakıt çekme numunelerinin çekme cihazında 74°C'de ASTM D638-64T standardına göre (ASTM 1964) test edilmesi sonucu elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir.

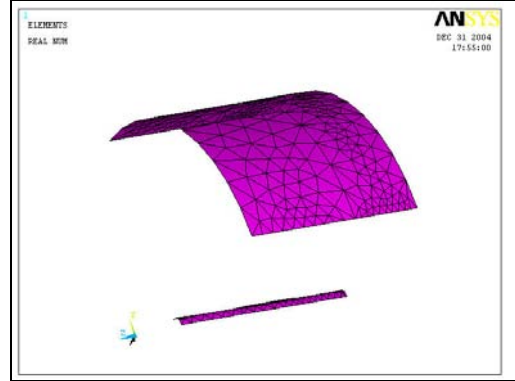


Şekil 2. Katı yakıtın 74 °C sıcaklıktaki  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi.

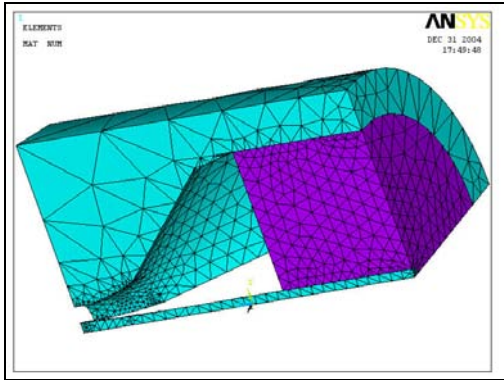
Modellerde kullanılan eleman, 3 boyutlu 20 düğümlü termal ve yapı analizi özellikli SOLID95 olup, oluşturulan hacmin SOLID95 elemanlarına ve düğümlerine bölünmüş hali Şekil 3 ve 4'de verilmiştir. Bu çeyrek modelde toplam 10441 eleman ile 21556 düğüm bulunmaktadır. Katı yakıtın tam modeli, 26000 adet SOLID95 elemanından ve 40552 düğümden oluşmaktadır.



Şekil 3. Model düğümleri.



Şekil 6. Katı yakıtın kontakt elemanları.

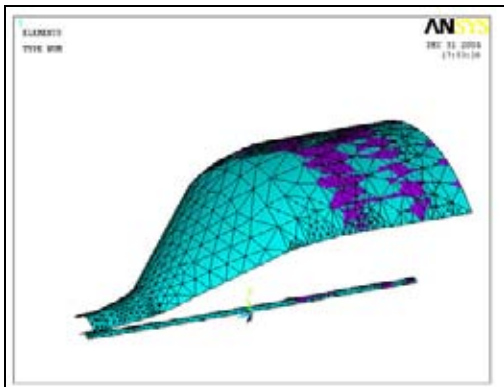


Şekil 4. Model elemanları.

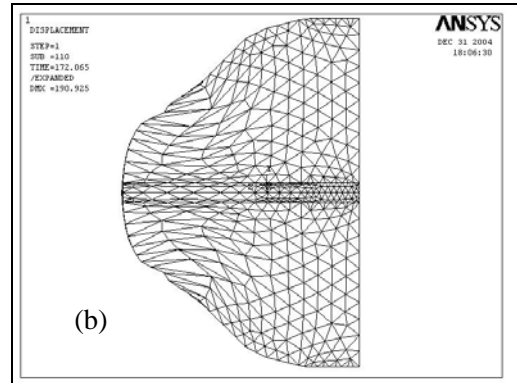
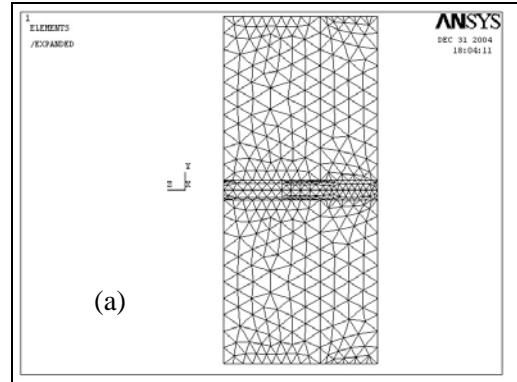
#### 4. ANALİZ SONUÇLARI

Çözümün elde edilme süresi, 400 yük adımı ve Pentium IV 3.0 GHz işlemci, 2000 MB DDR-400MHz RAM 80GB harddisk'e sahip bir kişisel bilgisayar için 16470 saniye olmuştur. Yük adım sayısı 400'ün üzerinde bir değerde alındığında, buna paralel olarak çözüm zamanı da artmaktadır. Şekil 7a'da ilk hali verilmiş katı yakıt malzemesinin ekstrüzyon işlemi benzetimi sırasında elde edilen malzeme akışı, Şekil 7b'de gösterilmektedir.

SEM modellemesinde sürtünme durumu modelin gerçeğe yakınlığı açısından oldukça önemlidir. Ansys programında kontakt yüzeylerini tanımlama ve buradaki sürtünme katsayısını girme, Kontakt yüzey-Hedef yüzey (Contact surface-Target surface scheme) olarak adlandırılan bir algoritmayla gerçekleştirilmektedir. Sürtünme katsayısı çelik/plastik malzeme durumu için ve yakıtın sabunlanıp yağlanması da göz önünde tutularak  $\mu=0.01$  alınmıştır (Michael, 2001). Sözü edilen algoritmayla elde edilen kontakt yüzey elemanları (CONTA174 ve TARGE170) Şekil 5 ve Şekil 6'da (toplam 555 adet) gösterilmiştir.

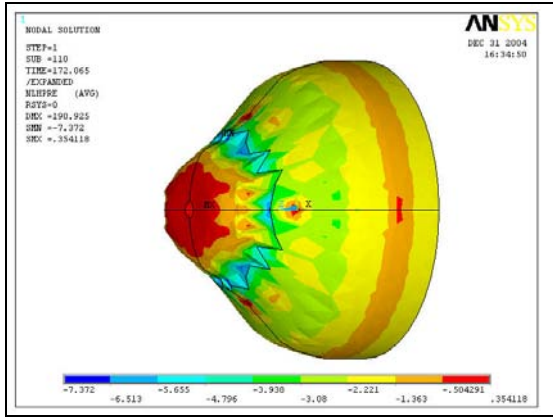


Şekil 5. Kalıp ve malafadaki kontakt elemanları.



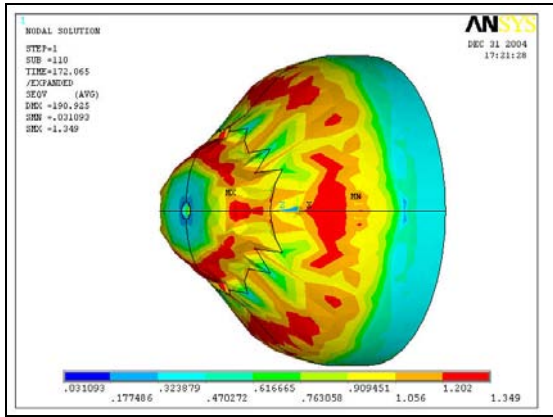
Şekil 7. Yakıtın deformasyona uğramadan önceki (a) ve sonraki görünümü (b).

Hidrostatik basınç, şekil değişimini meydana getiren kayma gerilmelerinin olmadığı durum ve üç yöndeki asal gerilmelerin toplamının ortalaması olarak hesaplanır. Hidrostatik basınç sadece hacim değişimiyle, diğer bir ifadeyle malzemenin sıkıştırılabilirliğiyle ilgili olan değerlerdir. Çözümün sonlandığı benzetim adımında yakıt üzerindeki hidrostatik basıncın en büyük değerinin  $-7.372$  MPa ( $=-73.72$  Bar) olduğu Şekil 8'den görülebilmektedir.



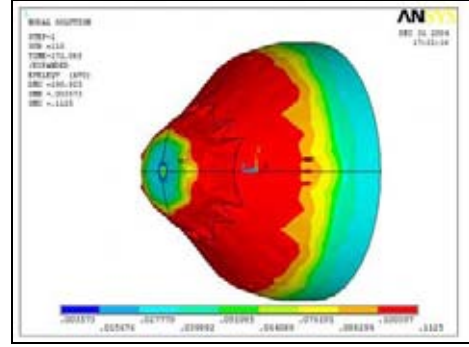
Şekil 8. Modelde oluşan Hidrostatik Basınç gerilmeleri.

Yakıtta Von Mises efektif gerilmeleri Şekil 9'da verilmiş olup, yakıtın konik kısmında  $1.349$  MPa'lık maksimum değerle plastik bölgeye geçiş yaptığı görülmektedir.

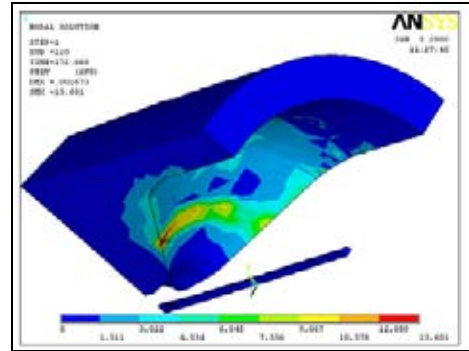


Şekil 9. Yakıtta oluşan von Mises gerilmeleri

Plastik bölgeye geçiş sırasında oluşan Von Mises şekil değiştirmeleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Von Mises gerilmeleri daha önce Şekil 9'da verilen konik kısımda, plastik bölgeye geçişin  $0.1125$  mm/mm'lik maksimum şekil değiştirme değeriyle yüzeyde tamamlandığı, Şekil 10'da daha net görülebilmektedir.



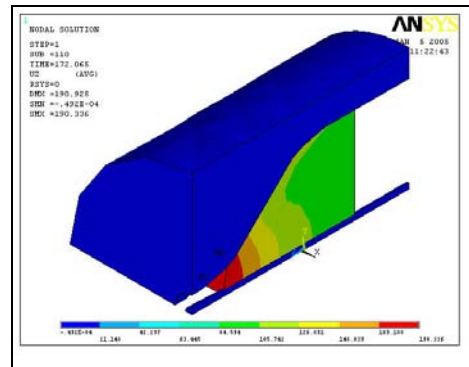
Şekil 10. Yakıtta oluşan von Mises şekil değiştirmeleri



Şekil 11. Alıcı ve malafada oluşan von Mises gerilmeleri.

Alıcı ve malafa sistemi için Von Mises efektif gerilmeleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Hacmin daraldığı kısımda maksimum  $13.601$  MPa gerilme değeri hesaplanmıştır. Bu değer herhangi bir çelik malzemenin akma mukavemetinin altında olduğundan, alıcının elastik bölgede kaldığı görülebilmektedir.

Yakıtın, malafa doğrultusundaki yer değiştirmesi Şekil 12'de verilmiştir. Sınır koşulu olan  $250$  mm'lik yakıt yer değiştirmesi ile başlayan analiz neticesinde ancak  $190.336$  mm'lik nihai yer değiştirme elde edilebilmiştir.



Şekil 12. Malafa doğrultusundaki yakıt yer değiştirmeleri.

Analizler sırasında çözümün tamamlanamadığı ve yakıt ağıının kontakt algoritmasının sınırlayıcı parametre değerlerini aşır, alıcının ağına daldığı durumlara da rastlanmıştır. Bu ancak SEM analizi çerçevesinde ortaya çıkabilecek bir sonuçtur. Elastik plastik malzeme modelinin katı yakıt için yetersizlik teşkil ettiğinin göstergesi olan bu nedene ilaveten, modelin yakıt ve alıcı arasında Poisson etkisini hesaba katacak kadar bir aralığın bırakılmaması da neden olmuştur. Pratikte ancak tecrübeye dayanarak elde edilebilecek bu sonuca SEM analiziyle böylece ulaşılmıştır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, karmaşık bir doğaya sahip katı yakıt ekstrüzyon şekillendirmesi bilgisayar ortamında modellenmiştir. Bilgisayar modelleme aracı olarak SEM seçilmiş olup, paket programı olarak Ansys® kullanılmıştır. SEM modeli, katı yakıt, alıcı (kalıp) ve malafadan olmak üzere 3 parçadan oluşmaktadır. Hesaplama zamanı açısından ve modelin elverişli olmasından dolayı çeyrek model kullanılmıştır. Modelin geometrik ölçüleri ve sonlu eleman tipine ait bilgiler modelleme bölümünde verilmiştir. Kullanılan Ansys paket programında yapılan elastik plastik doğrusal olmayan benzetim sonucunda katı yakıtın ekstrüzyon şekillendirmesine ait nihai olmayan, hidrostatik basınç, gerilme, şekil değiştirme ve yerdeğiştirme değerleri elde edilebilmiştir. Çalışmanın başlangıcında amaçlanan temel benzetim modeli oluşturulmuştur. Ayrıca elastik-plastik modelin katı yakıt malzemesini ekstrüzyon sırasında ancak sınırlı oranda modelleyebildiği ve bundan sonraki adımda elastoviskoplastik malzeme modelinin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

## 6. TEŞEKKÜR

Devam eden bu çalışma, DPT Araştırma Projesi (2003K120770) kapsamında yürütülmektedir. MKE Elroksan A.Ş.'ye teknik ve DPT'ye mali desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

## 7. SİMGELER DİZİNİ

E	Elastisite modülü
$\varepsilon$	Gerilim
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	X ve Y yönlerindeki gerinimler
$d\varepsilon$	Sonsuz küçük gerinim

$d\bar{\varepsilon}$	Sonsuz küçük efektif gerinim
$d\varepsilon^p$	Plastik bölgede sonsuz küçük gerinim
$\sigma_n$	Normal gerilme
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme
$\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$	Asal gerilmeler
$\nu$	Poisson oranı
$\tau_F$	Sürtünme gerilmesi
$\mu$	Sürtünme katsayısı
K	Mukavemet katsayısı
n	Pekleşme katsayısı

## 8. KAYNAKLAR

- Anonymus, 1964. Tentative Method of Test for Tensile Properties of Plastics, ASTM, Issued 1964.
- Ansys Theory Manual for Release 6.
- Bathe K. J. 1995. Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Borovkov A.I., Shevchenko D.V. 2002. Non-linear finite element modeling of the titanium briquettes hot extrusion process. Proc. 10th Int. ANSYS'2002 Conf. "Simulation: Leading Design into the New Millennium". Pittsburgh. USA.. 7 p
- Carter R.E. and Warren R.C. 1987. Extrusion stresses, Die Swell, and Viscous Heating Effects in Double Base Propellants, Journal of Rheology, V 31 (2), p. 151-173.
- Clough R.W., 1960. The Finite Element in Plane Stress Analysis, Proc. 2nd ASCE Conf. On Electronic Computation, Pitsburg, PA.
- Herder, G., Weterings F. P. and de Klerk, W.P.C., 2003. Mechanical Analysis on Rocket Propellant, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, V. 72, pp. 921-929.
- Irving W. Jones, E. Pierre-Louis, 1985. A linear thermoviscoelastic material model for solid rocket motor structural analyses, Computers & Structures, V. 21, pp. 235-243.
- Townend D.J., Warren R.C., 1985. Relaxation in Double Base Propellants, V. 26, pp 79-83.
- Jana, M. K., Renganathan K. and Venkateswara Rao G. 1987. Effect of bulk modulus variation with

pressure in propellant grain elastic stress analysis, Computers & Structures, V. 26, pp. 761-766.

Jana M.K., Renganathan K. and Venkateswara Rao G. 1994. A method of non-linear viscoelastic analysis of solid propellant grains for pressure load, Computers & Structures, V. 52, pp. 61-67.

Johnson, W., Mellor P. B. 1983. Engineering Plasticity, E. Horwood Ltd.

Michael, J. N. (Editör). 2001. The Tribology Handbook, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann.

Perzyna, P. 1966. Fundamental problems in viscoplasticity. Advances in Applied Mechanics, vol. 9. Academic Press, New York, p. 243-377.

Shiang-Woei Chyuan, 2003. Studies Of Poisson's Ratio Variation For Solid Propellant Grains Under Ignition Pressure Loading, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80, pp. 871-877.