

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKSTRÜZYON İŞLEMİYLE KATI ROKET YAKITI
ŞEKİLLENDİRMESİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

Barış KALAYCIOĞLU

OCAK 2005

Fen Bilimleri Enstitüsünce Yüksek Lisans Tezi Olarak Uygun Bulunmuştur.

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Doç. Dr. Saffet NEZİR

Yrd. Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

ÖZET

EKSTRÜZYON İŞLEMİYLE KATI ROKET YAKITI ŞEKİLLENDİRMESİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

KALAYCIOĞLU, Barış

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Yrd. Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Ocak 2005, 55 sayfa

Bu çalışmada çift bazlı katı roket yakıtının ekstrüzyonla şekillendirmesinin, Ansys® sonlu eleman simülasyon programı yardımıyla 3-boyutta modellenmesi yapılmıştır. Ekstrüzyona tabi tutulan katı yakıtın mekanik davranışının zamana bağlı değişimi ihmal edilmiş ancak sıcaklığa bağlılığı hesaba katılarak elastik-plastik sonlu eleman çözümü elde edilmiştir. Program yardımıyla ekstrüzyon sırasında katı yakıtta oluşan hidrostatik basınç, gerilme, gerinim ve ısı gerinim değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler şekiller üzerinde gösterilmiş ve çıkan sonuçlar sonuç bölümünde yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı roket yakıtı, ekstrüzyon, sonlu eleman yöntemi, elastik viskoplastik, elastik-plastik.

ABSTRACT

COMPUTER AIDED MODELLING OF EXTRUSION FORMING OF SOLID ROCKET PROPELLANT

KALAYCIOĞLU, Barış

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor : Asst. Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

January 2005, 55 pages

In this study, three dimensional modelling of extrusion forming of solid rocket propellant is performed on Ansys® finite element simulation program. Taking into account the temperature effects while neglecting the time dependence, the solid propellant is assumed to obey the elastic-plastic material response during the conventional extrusion process. The hydrostatic pressure, stress, strain, and thermal strain values during extrusion of the solid rocket propellant are obtained from the program. The results are shown in the form of figures and discussed in the discussion and conclusion chapter of the thesis.

Keywords: Solid rocket propellant, Extrusion, Finite element method, elastic viscoplastic, elastic plastic.

TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın hazırlanması esnasında bilgi ve tecrubesini esirgemeyen, sabırla tezin her aőamasında bŸyŸk emek harcamıő olan tez yŸneticisi, hocam Sayın Yrd. Do. Dr. M. HŸsnŸ DIRIKOLU Bey'e, değerli destek ve yardımlarını sakınmayan saygı değer hocam Makine MŸhendislięi BŸlŸm Baőkanı Prof. Dr. Veli ÇELİK Bey'e, Makine MŸhendislięi BŸlŸmŸndeki değerli hocalarıma ve çalışma arkadaőlarıma teőekkŸrlerimi sunarım.

Ayrıca en içten ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen eőime ve oğluma, hayatımın her anında maddi ve manevi her tŸrlŸ desteği vermekten kaçınmamıő babam, annem ve kardeőime, őŸkranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

SİMGELER DİZİNİ

A_0, A_1, \dots, A_5	Deplasman fonksiyonu katsayıları
B	Gerinim-düğüm deplasmanları matrisi
D	Gerinim matrisi
\vec{d}	Düğüm deplasmanları vektörü
E	Elastisite modülü
E	Elastik gerilme-gerinim matrisi
ε	Gerinim
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	X ve Y yönlerindeki gerinimler
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı
$d\varepsilon$	Sonsuz küçük gerinim
$d\bar{\varepsilon}$	Sonsuz küçük efektif gerinim
$d\varepsilon^p$	Plastik bölgede sonsuz küçük gerinim
F	Kuvvet
\vec{F}	Uygulanan dış kuvvetler
K	Direngenlik matrisi
N	Şekil fonksiyonu matrisi
σ	Gerilme
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme
σ_N	Normal gerilme
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	X, Y ve Z yönlerindeki gerilmeler
γ_{xy}	Kayma gerinimi
u	X yönündeki deplasman

\vec{u}	Deplasman matrisi
U	Toplam gerinim enerjisi
v	Y yönündeki deplasman
v	Y yönündeki deplasman hızı
v	Poisson oranı
τ_{xy}	Düzlemsel kayma gerilmesi
τ_F	Kayma gerilmesi
η	Viskozite
t	Zaman
t_r	Gevşeme zamanı
W	İş

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

1.1. Katı Yakıtlı Bir Motor Ve Temel Elemanları	3
2.1. Ekstrüzyonla Boru Üretimi	7
2.2. Ekstrüzyonda Malzeme Akışı	8
2.3. Ekstrüzyon Yöntemiyle Şekillendirilen Homojen Tip Çift Esaslı Katı	
Yakıt	8
2.4. Döküm Yöntemiyle Şekillendirilen Kompozit Yakıt Üretimi Akım	
Şeması	14
2.5. Maxwell modeli	17
2.6. Sünmede Gerinim-Zaman Diyagramı (Maxwell Modeli)	18
2.7. Gevşemede Gerilme-Zaman Diyagramı (Maxwell Modeli)	19
2.8. Kelvin-Voigt Modeli	20
2.9. Sürünmede Gerinim-Zaman Diyagramı (Kelvin-Voigt Modeli)	21
2.10. Gevşemede Gerilme-Zaman Diyagramı (Kelvin-Voigt Modeli)	22
2.11. Mühendislik Çekme Diyagramı	22
2.12. Örnek sonlu elemanlar	24
3.1. Katı yakıt ekstrüzyonu	32
3.2. Katı yakıt geometrisi	32
3.3. Katı yakıtın sıcaklıkla değişim gösteren σ - ϵ eğrileri	34
3.4. SOLID95 SEM elemanı	35
3.5. Katı yakıt SEM SOLID95 ağı	35
3.6. Model çizgileri	36

3.7. Model hacminin çeyrek görünümü	37
3.8. Model elemanları	37
3.9. Model düğümleri	38
3.10. Modeldeki kontakt-hedef yüzey elemanları	39
3.11. Modeldeki kontakt elemanları ve yüzeyleri	39
3.12. Modelin hedef elemanları	40
3.13. Modelin sınır şartları ve yüklemeleri	41
3.14. Ansys Çözüm Modülü ve parametreleri	42
3.15. Yakıtın deformasyona uğramadan önceki (a) ve sonraki görünümü (b) ...	43
3.16. Z-ekseni ekstrüzyon deplasmanları	44
3.17. Alıcı ve malafada oluşan Von Mises gerilmeleri	45
3.18. Modelde oluşan bileşke deplasmanlar	45
3.19. Modelde oluşan Hidrostatik Basınç gerilmeleri	46
3.20. Modelde oluşan Von Mises gerilmeleri	47
3.21. Modelde oluşan Von Mises gerinimleri	47
3.22. Modelde oluşan termal gerinimler	48
3.23. Modelde oluşan plastik gerinimler	49
3.24. Modelde oluşan YZ düzlemindeki kesme gerilmeleri	49

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
İÇİNDEKİLER	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Katı Yakıt ve Katı Yakıt Motorları	3
1.2. Katı Yakıtlarda Aranılan Nitelikler	4
1.3. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı	5
2. MATERYAL VE YÖNTEM	7
2.1. Katı Yakıt Üretimi	7
2.1.1. Ekstrüzyon Yöntemiyle Şekillendirme	7
2.1.1.1. Karıştırma	9
2.1.1.2. Kurutma	10
2.1.1.3. Harmanlama	10
2.1.1.4. Haddelme ve Levha Üretimi	11
2.1.1.5. Ekstrüzyon Şekillendirmesi	11
2.1.1.6. Diğer İşlemler	12
2.1.2. Döküm Yöntemiyle Şekillendirme	13
2.2. Malzemelerin Mekanik Davranışları	15
2.2.1. Elastik Davranış	15

2.2.2. Viskoelastik davranış	15
2.2.2.1.Maxwell modeli	16
2.2.2.2.Kelvin-Voigt modeli	19
2.2.3. Elastik-Plastik davranış	22
2.2.4. Elastik-viskoplastik Davranış	23
2.3. Bilgisayar Modellemesi	23
2.3.1. Ansys® Paket Programı	30
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	32
3.1. Katı Yakıt Ekstrüzyon Modeli	32
3.1.1. Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Verileri	33
3.1.2. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması	35
3.1.3. Çözümün Elde Edilmesi	41
3.2. Analiz Sonuçları	42
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	51
KAYNAKLAR	54

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 bilgisayarla 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) [1] ve ısı, akustik, elektromanyetik ve akışkanlar mekaniği için Sınır Eleman Metodu (Boundary Element Method-BEM) sayılabilir. Bu çalışmada, şekillendirme işlemi sözkonusu olduğundan dolayı, SEM yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, maliyet ve verimlilik açısından optimum hedeflere ulaşmada son zamanlarda kullanılan en önemli tasarım yaklaşımlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tez konusu olan katı yakıt şekillendirilmesiyle ilgili birebir bilimsel çalışmalara literatür araştırmasında rastlanamamıştır. Ancak katı yakıtların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırıldığı çalışmalarla ilgili özet aşağıda verilmiştir.

Jana ve Arkadaşları [2] katı yakıt taneciklerinin basınç değişimi ile hacim değişimine direnci ifade eden bulk modülü (K) arasındaki ilişkiyi hem doğrusal olmayan (non-linear) SEM yardımıyla çözümünü hem de lineer SEM'deki analizi yapılmış ve non-linear analizin, deneysel sonuçlara uygunluk açısından gerekliliğini ortaya koymuşlardır.

Herder ve Arkadaşları [3] 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 [4] şekil değiştirmenin zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği viskoelastik malzemedeki (roket yakıtı) yüksek basınç altındaki soğuma sırasında meydana gelen gerilme ve gerinimlerin hesaplanmasını ADINA® SEM paket programı yardımıyla deney sonuçlarına yakın seviyede hesaplayabilmişlerdir.

Townend ve Warren [5] çift bazlı katı yakıtın mekaniksel gevşeme davranışını, yakıt içeriğinde bulunan nitrogliserin oranını değiştirerek irdelemiştir.

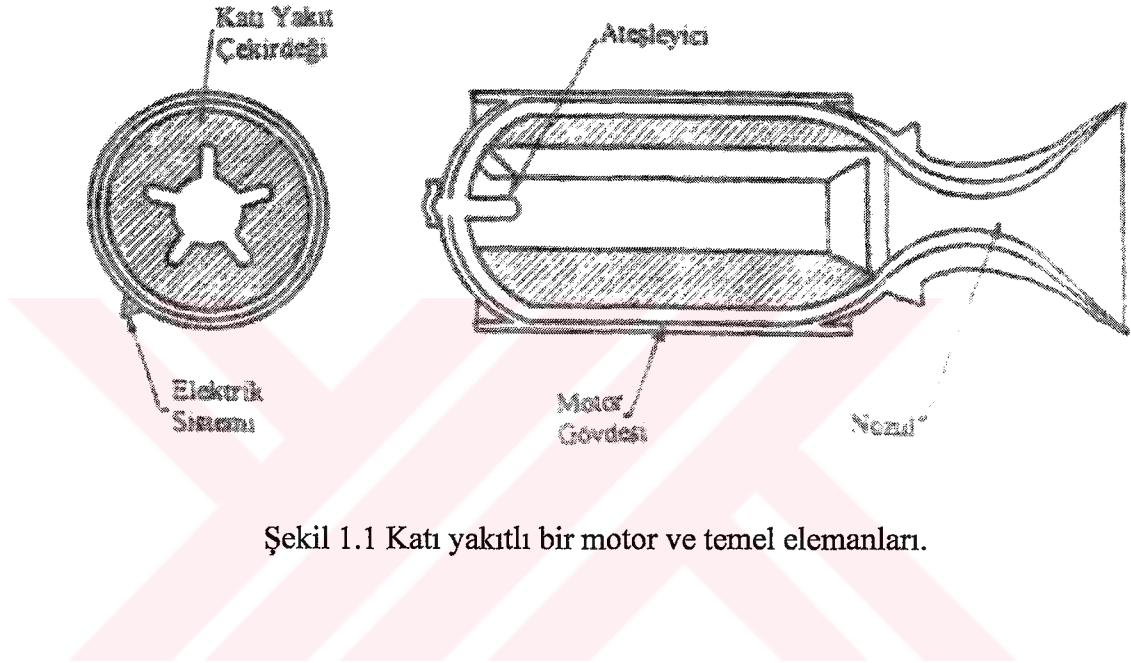
Renganathan ve arkadaşları [6], HTPB (Hydroxyl terminated polybutadiene) esaslı katı yakıtın, 15 dak^{-1} ile 0.015 dak^{-1} arasında değişen çekme hızı yüklemeleri altındaki kırılma diyagramını viskoelastik çözüm metodolojisi ile elde etmiştir.

Borovkov ve Shevchenko [7], titanyum malzemesinin sıcak ekstrüzyon işlemini, doğrusal olmayan (non-linear) SEM yardımıyla bilgisayarda ortamında modellemiştir. Bu modellemede dikkat edilecek nokta malzeme ile alıcı arasında boşluk bırakılmış olmasıdır.

Bu çalışmalar SEM metodunun roket yakıtı analizlerinde dünyada etkin bir şekilde kullanılabildiğini göstermekle kalmayıp, fiziksel açıdan üretimini yönlendirdiğini de ortaya koymaktadır.

1.1. Katı yakıt ve katı yakıt motorları

Katı yakıtlar, atmosfer içi ve uzay araştırmalarında kullanılan roket motorlarının temel elemanlarından biridir. Şekil 1.1’de bir roket motorunun iç Şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Katı yakıtlı bir motor ve temel elemanları.

Çekirdek, roket motoruna yerleştirilen geometrik katı yakıttır. Katı yakıtın kimyasal bileşimi ve Şekli roket motorunun performansını belirler. Çekirdek katı yakıt karışımının dökülmesi veya ekstrüzyonu ile Şekillendirilir. Yakıt ateşlendikten sonra yanma çoğunlukla katı yakıt tamamen bitinceye kadar devam eder. Yanma yüzeyi geometrisi ile bu yüzeyin zamanla değişimi itme kuvvetini de etkiler. Eğer, itme bütün yanma süresince sabit değerde kalıyorsa yanma yüzeyinin zamanla değişmemesi söz konusudur. Bu durumda yakıt nötr olarak tanımlanır. Yakıtlar içten yanmalı ya da silindirik tp Şekli olduğunda, zamanla artan bir yanma yüzeyine sahip olacaklardır. Bu tür yakıtlara *ilerleyen*, ubuk Şekli dıştan başlayan ve azalan

bir yanma yüzeyine sahip olduklarında ise *gerileyen* karakterdedir denir. Yakıt merkezindeki kanallar çekirdeklerin üretimini kolaylaştırır ve mekanik özellikleri iyileştirir.

Gövde, roket yakıtının şekliyle bağlantılıdır. Yüksek mukavemetli titanyum alaşımları, çelik ve fiber takviyeli kompozitler roket gövdesi olarak kullanılan malzemelerdir.

Nozulların görevi, yanma gazının ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştürerek, gerekli itme kuvvetinin elde edilmesini sağlamaktır. Günümüzde kullanılmakta olan nozullar genellikle dairesel kesitlidir.

Katı yakıtların ateşlenmesi, bir sinyalin alınmasıyla başlayan seri ve kompleks olaylardan meydana gelir. Sinyal mekanik veya elektrikli bir hareketle başlar ve bir ısı üretimi ile bu ısının yakıt çekirdeğine taşınmasıyla devam eder. Ateşlemeyi sağlayan ateşleyiciler, Alüminyum, Bor veya Magnezyum metalik yakıt elementleri ve $KClO_4$, KNO_3 veya Teflon gibi oksitleyiciler ile reçine, nitroselüloz (NC) veya bitkisel yağ gibi bağlayıcı malzeme farklı oranlarda karıştırılarak istenilen miktarlarda üretilmektedir.

1.2. Katı yakıtlarda aranan nitelikler

Katı yakıtların kullanımı açısından yanma hızının sabit olması, yanma sırasında bölgesel patlamalar yapmaması, özgül ısısının yüksek olması, zehirli ve paslandırıcı olmaması, buhar basıncının ve dolayısıyla nem oranının düşük olması, donma noktasının alçak olması, homojen olması ve kolay ve ucuz elde edilmesi istenen önemli nitelikler olarak sıralanabilir. Bu niteliklerin çoğunun katı yakıtlar

tarafından sağlanabildiği söylenebilir. Ancak, yanma hızının sıvı yakıtlarda olduğu gibi kontrol edilememesi hedef sapmalarına kolaylıkla neden olabileceğinden dolayı, katı yakıtların en önemli dezavantajı olarak dile getirilebilir.

1.3. Tez çalışmasının amaç ve kapsamı

Tez çalışması, sanayide metal ve polimerlerin üretiminde kullanılan ekstrüzyonla imalat yönteminin katı yakıtlardaki uygulamasını bilgisayar ortamında incelemektedir.

Günümüzde bilgisayar simülasyonları genelde imalat yöntemlerinin, özelde şekillendirme işlemlerinin anlaşılması ve optimize edilmesi konusunda verimli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Simülasyon yardımıyla, şekillendirme işleminin herhangi bir anını gözlemlene ve analiz etme olanağı vardır. Uygulanan kuvvet ve çevre koşullarından dolayı (sürtünme, ortam sıcaklığı vb.) şekillendirilecek parçanın herhangi bir yerindeki kritik gerilmeler, gerinimler ve sıcaklıklar önceden tespit edilebilmektedir. Bu tür geniş analizlerin deneysel yöntemlerle yapılması mümkün olsa dahi, bu hem vakit hem de ekonomik açıdan elverişsiz olmaktadır. Tez çalışması, bilgisayar uygulamalarında meydana gelen gelişmeler doğrultusunda, bunun imalat sahasında yeni çözümlere ışık tutması çabasında yürütülmüştür.

Bu amaçla, katı yakıtların yanıcı ve patlayıcı maddeler olmaları sebebiyle ürün çeşitliliklerinin arttırılması konusundaki zorlukların yakıt üretiminin modellenmesi sonucu elde edilen veriler ışığında giderilmesine yönelik çalışmalarda bulunulmuştur. Tespit çalışmalarına işlemin karakteristiklerini bilgisayar ortamında belirlemekle başlanmıştır. Simülasyon aracı olarak Ansys SEM paket programı kullanılmıştır.

Bu işlemin katı yakıtlar için bilgisayarla modellenmesi bir ilk teşkil etmesi nedeniyle katı yakıt malzemesi elastik-viskoplastik özellik göstermesine rağmen simülasyonda, elastik-plastik olarak alınmış, yine katı yakıt gerçekte rulo halinde ekstrüzyona tabi tutulmasına karşın, simülasyonda bütün olarak modellenmiştir. Sıcaklığa bağlı gerilme-gerinim değerlerinden faydalanılmış ve analiz 3 boyutlu modeller baz alınarak yapılmıştır. Ansys programı değme arayüzlerinin sürtünmeli kabul edilmesine olanak tanımıştır. Büyük şekil değişimlerin neden olduğu şekil ve malzeme non-lineerlik durumları simülasyon modelinde hesaba katılmıştır.

Hazırlanan simülasyonla katı yakıtın ekstrüzyon safhasında maruz kaldığı hidrostatik basınçlar, gerilmeler ve deplasman değerleri sunulmuştur. Son bölümde bu sonuçlarla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

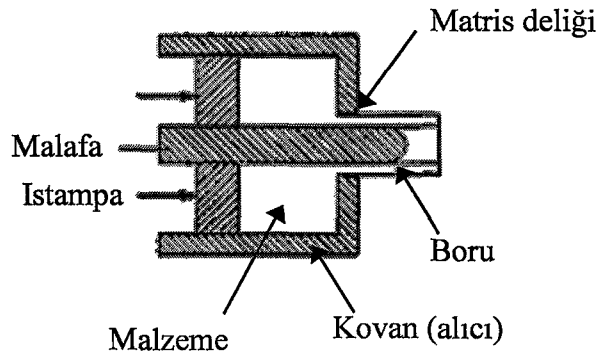
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Katı yakıt üretimi

Roket motorlarında kullanılan katı yakıtlar, ateşleme işleminden sonra düzgün olarak ve atmosfere bağlı olmaksızın yanan, devamlı olarak sıcak gaz üreten maddelerdir. Katı yakıtların bünyesinde yanma için gerekli bütün bileşenler mevcuttur. Katı yakıtlar katı ve plastik görünümüne sahiptir. Yakıtın cinsi, bileşimi, sürtünme duyarlılığı ve geometrisi şekillendirme yöntemini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu bağlamda katı yakıt üretimi, ekstrüzyon ve döküm yöntemleriyle iki şekilde imal edilir.

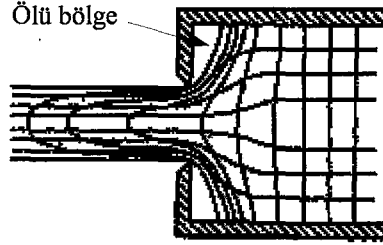
2.1.1. Ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirme

Çok genel anlamıyla ekstrüzyon, silindirik bir malzeme bloğunun (takoz), bir kovan (alıcı) içine yerleştirilerek ıstampa vasıtasıyla uygulanan basma kuvveti etkisiyle, matris deliğinden geçirilmesine denir. Bu yöntemin boru üretimi için şematik olarak gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Ekstrüzyonla boru üretimi.

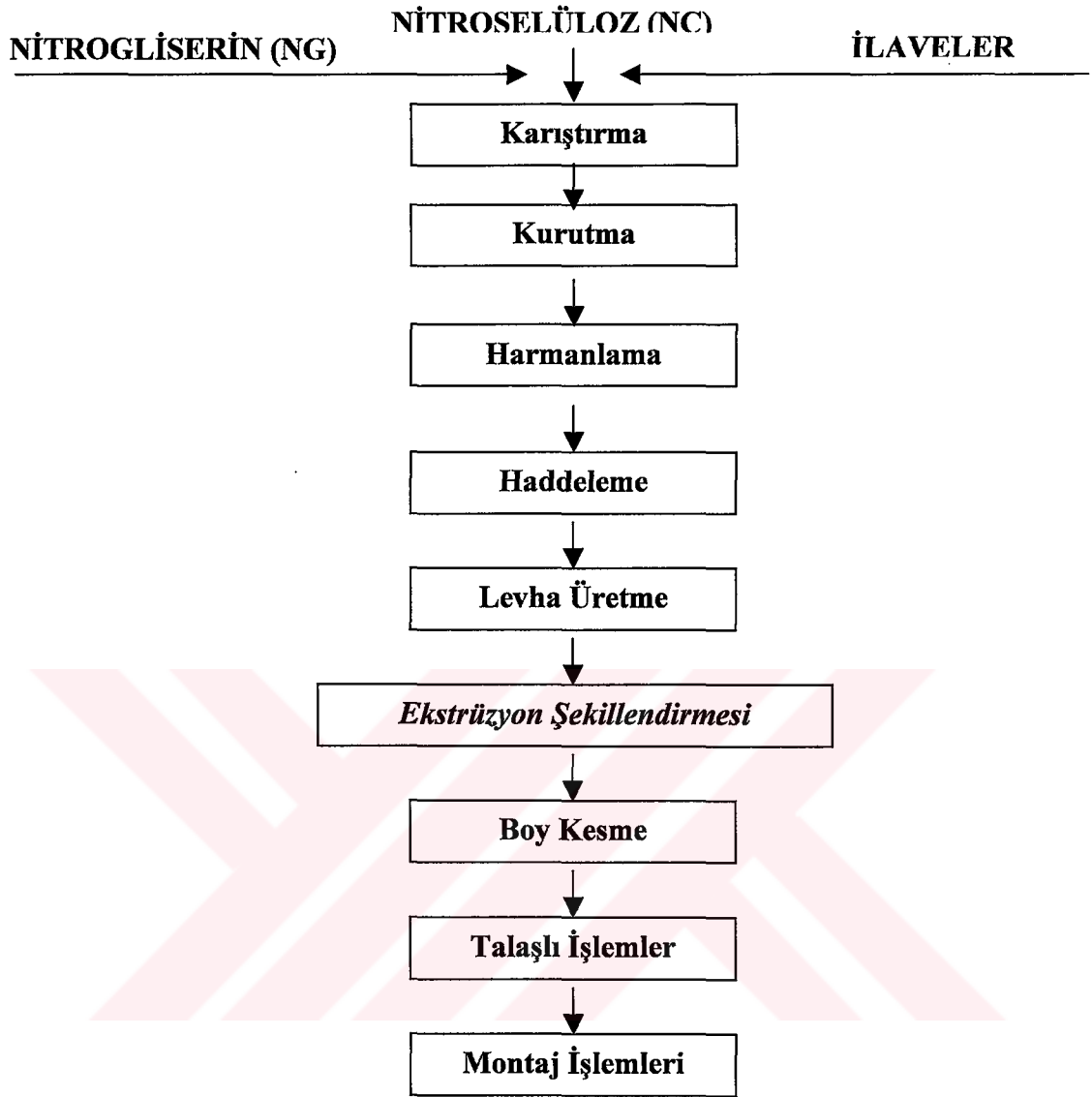
Matriste, matrisle malzeme arasındaki sürtünme nedeniyle, takozun iç kısmı dışa kıyasla daha kolay hareket eder ve sonuçta Şekil 2.2’de görülen malzeme akışı elde edilir. Bu durumda alıcı köşelerinde bir miktar malzeme hareketsiz kalır; bu malzemenin meydana getirdiği "ölü bölge" efektif matris giriş açısının 90° olmasına yol açar.



Şekil 2.2. Ekstrüzyonda malzeme akışı[8].

Takozla alıcı arasında yüksek sürtünme bulunması ve takozun dış kısmının soğuması sonucunda malzemenin akma sınırının hızla yükselmesi hallerinde malzeme akışı olumsuz yönde etkilenecek üründe kusurlar oluşur. Takozdaki yatay çizgilerin ekstrüzyon ürününde de yataylıklarını korumuş olmalarına karşın alıcıdan çıkarken önce bükülüp sonra tekrar düzeldiklerine (yani yatay hale geldiklerine) dikkat edilmelidir. Takozdaki düşey çizgiler ise, üniform olmayan şekil değişimi nedeniyle, ekstrüzyon ürününde eğriye dönüşürler ve takozdaki karelerin üründe görülen distorsiyona uğramış hali almalarına yol açarlar.

Çift esaslı katı yakıtların ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirme işleminin akış şeması Şekil 2.3’de gösterilmiş olup, detayları alt bölümlerde belirtilmiştir.



Şekil 2.3. Ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilen homojen tip çift esaslı katı yakıt.

2.1.1.1. Karıştırma

Çift esaslı katı yakıtların temel bileşenlerinden biri olan nitrogliserin (NG) patlama riski yüksek olan bir bileşiktir. Bu bileşiğin çeşitli şekillerde duyarlılığı azaltılabilir. Örneğin *fialat* bileşikler su ortamlarda karıştırılarak bu duyarlılık düşürülebilmektedir. Özellikle dietilfialat (DEP) ile NG su ortamlarda karıştırken

DEP molekülleri NG moleküllerinin çevresini sararak birbiriyle temasını keser. Hem sulu ortamda karışımın hazırlanması hem de DEP ilavesi ile sürtünmeden dolayı açığa çıkabilecek ısınmalar böylece engellenmiş olur. Sulu ortamda hazırlanan NG, DEP, NC ve yanma hızını düzenleyici ve ekstrüzyonu kolaylaştırıcı ilavelerin karışımında yüksek oranda su bulunmaktadır. Santrifüj işlemiyle karışımın nem oranı % 25-30 mertebesine düşürülür.

2.1.1.2. Kurutma

Plastik bağ oluşumu sebebiyle karışımda topaklanma meydana gelir. Bu topaklar öğütülerek 40 °C ve % 60 bağıl nem ortamında bekletilir. Böylece homojen polimerleşme reaksiyonları başlar. Hamkitle Üretim Ünitesinde üretilen hamkitle, sonraki üretim aşamalarına gönderilmeden önce roket yakıtı cinsine göre 20-25 gün süre ile difüzyon için kontrollü koşullarda, özel depolarda bekletilir.

2.1.1.3. Harmanlama

Bu işlem düşük devirli (12-14 dv./dak.) bir karıştırıcıda yapılır. Sulu ortamda karıştırılması uygun olmayan ilaveler bu aşamada harmanlanır. Özellikle karışıma yanma hızını artıran *kurşunsalisat* gibi ilaveler bu kademedeki ilave edilir. Harmanlama işlemi ile yapılan son ilavelerin homojen olarak karışması bu aşamada sağlanır.

2.1.1.4. Haddelme ve levha üretimi

Nem oranı % 10-12 seviyesine düşürülen karışımın haddelenmesi iki kademeli olarak yapılır. Birinci kademe haddelmede, karışım farklı hızlarda dönen iki merdane arasından geçirilirken yeniden karışma sağlanır. Haddelme işlemi 105 °C de yapılır. Böylece karışımın pişirilmesi ve plastik bağların tamamlanması sağlanır. İkinci kademe haddelme işleminde ise merdane hızları birbirine eşitlenir. Haddelme sıcaklığı daha düşük olup 75° C dir. İkinci haddelme ile hem homojen kalınlık elde edilmekte hem de polimerleşmenin tamamlanarak nem oranının % 0.5-0.6 seviyesine düşmesi sağlanmaktadır. Haddelme ürünü levhalar 10 cm eninde şeritler halinde kesilir, yabancı madde içeren kısımları ayıklanır ve çapı 375 mm olacak şekilde rulolar halinde sarılır. Elde edilen rulolar, ekstrüzyon preslerinde kullanılacak şarjı oluşturmaktadır.

2.1.1.5. Ekstrüzyon şekillendirmesi

Ekstrüzyon işlemi bobinler halinde sarılan katı yakıt karışımı şeritlerden, yakıt çubuğu üretimi için uygulanmaktadır. İşlem 60 °C de 140 atmosfere varan basınç altında yapılmaktadır. Gerek şekillendirme esnasındaki yüksek basınç, gerekse sürtünmeden dolayı aşırı ısınma sebebi ile tutuşmayı engellemek için karışım hazırlanırken stabilize edici karışımlar ilave edilir. Ekstrüzyon presinin aşırı ısınmaması için gövde suyla soğutulur. Ekstrüzyon kalıbının şekli istenilen yakıt geometrisine göre değişmektedir. İşlemin kolayca yapılabilmesi için karışımda düşük oranda (% 0.2) *kandilavaks* bulunmaktadır. Ayrıca işlemin 60°C'de yapılması şekillendirmeyi kolaylaştırır. Ekstrüzyon işlemi pahalı cihazlar gerektirmesine karşılık yakıt boyutu ve şeklinin tam olarak kontrol edilmesine imkan sağlar.

2.1.1.6. Diğer işlemler

Tornalama / Boy kesme ünitesinde yakıt üretiminin sekizinci aşaması olan yakıtların son ölçülerine getirilmesi operasyonu yapılmaktadır. Bu amaçla istenilen ağırlık ve ölçüde yakıt elde etmek için boy kesme, alın tornalama çap ayarlama işlemleri yapılmaktadır.

Katı yakıt üretiminin dokuzuncu aşaması olan çatlak, hava boşluğu, gözenek ve yabancı madde kontrolü X-ışını ile yapılmaktadır. X-ışını muayenesi ile roket yakıt komplelerinin performansını olumsuz yönde etkileyebilecek kırık, çatlak, boşluk yabancı madde vb. kusurlar kontrol edilmekte ve roket motoruna girecek yakıtın hiçbir kusur taşımadığı tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Son İşlem ünitesinde çift bazlı yakıt kompleşi üretiminin onuncu aşaması olan ve yakıtın roket motorunda kullanılacağı son şeklini alarak yakıt kompleşi haline dönüştüğü operasyondur. Yakıt üretim operasyonlarının tamamı başarılı olarak gerçekleştirildikten sonra yakıt kompleleri roket kompleşi oluşturulmak üzere depolanır.

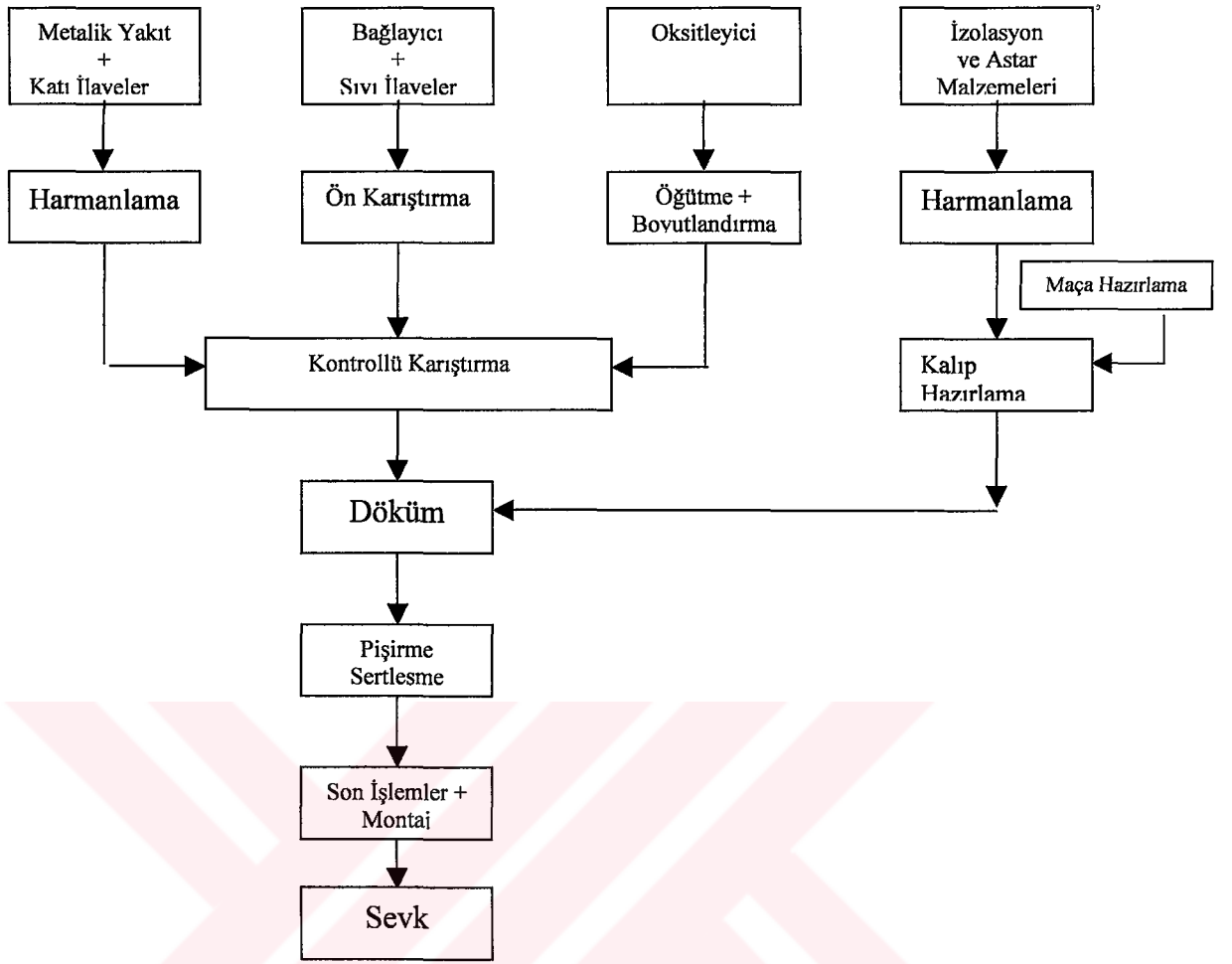
2.1.2. Döküm yöntemiyle şekillendirme

Kompozit ve kompozite değiştirilmiş çift esaslı yakıtlar, oksitleyici kristaller, metalik yakıt, bağlayıcı ve yanma hızını ayarlayan katalizörlerden meydana gelmektedir. Daha yüksek özgül itme kapasitesine sahip kompozit katı yakıtlar daha yüksek enerji ve daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. HTPS, CTPS ve PBAA bu tip kompozit katı yakıtlardandır. HTPB' de % 90 oranına kadar metalik bileşenler bulunmaktadır.

Kompozite değiştirilmiş çift esaslı katı yakıtların özellikleri homojen tip çift esaslı yakıtlara benzerlik gösterir. Üretim esnasındaki riskler metalik yakıt ve oksitleyici ilavesi sebebi ile yüksektir. Bu tür yakıtların şekillendirilmesi çoğunlukla döküm yöntemiyle yapılmaktadır. Kompozit ve kompozite değiştirilmiş katı yakıtların döküm işlem aşamaları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Metalik yakıt oranının artmasıyla yanma hızı artarken, bağlayıcı oranının azalması sonucu, yakıtın sertliği ve mukavemeti de artmaktadır. Düşük elastisite modülü ve yüksek şekil değiştirme kabiliyeti istendiği şartlarda, yakıt doğrudan motor gövdesi içerisine dökülerek şekillendirilir.





Şekil 2.4. Döküm yöntemiyle şekillendirilen kompozit yakıt üretimi akım şeması.

2.2. Malzemelerin Mekanik Davranışları

2.2.1. Elastik Davranış

Elastik davranış, bir cisimde yükleme sırasında meydana gelen şekil değiştirmelerin, yük kaldırıldığında tamamen kayboldukları davranış olarak tanımlanır. Elastik davranış küçük (metaller) ve oldukça büyük (plastikler veya elastomerler) şekil değiştirmeleri kapsamaktadır. Klasik mekanik biliminde, gerilme (σ)-gerinim (ϵ) arasındaki bağıntılara konstitütif

(malzemelerin özelliklerini ihtiva eden) bağıntılar denilmektedir. Elastik davranışın en basit konstitütif denklemi lineer olup,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilen Hooke kanunu bağıntısıdır. Denklem 2.1'deki E, malzemelerin katılığının ölçütü diye tanımlanan elastiklik veya Young modülüdür.

2.2.2. Viskoelastik Davranış

Viskoelastik malzemelerin en belirgin özellikleri, aynı anda hem elastik hem de zamana bağlılığı şekil değişimi göstermeleridir. Viskoelastik davranış, sabit gerilme altında gerinimdeki sürünme (creep) ve sabit gerinim altında gerilmekteki gevşeme (relaxation) olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, *sürünme* sabit bir gerilmenin etkisi altında, malzemenin sürekli olarak şekil değiştirmesi veya gerinim göstermesi; *gevşeme* ise belirli bir şekil değiştirme veya gerinim halinde bulunan malzeme, gerilmelerin sürekli olarak azalması olarak ifade edilir.

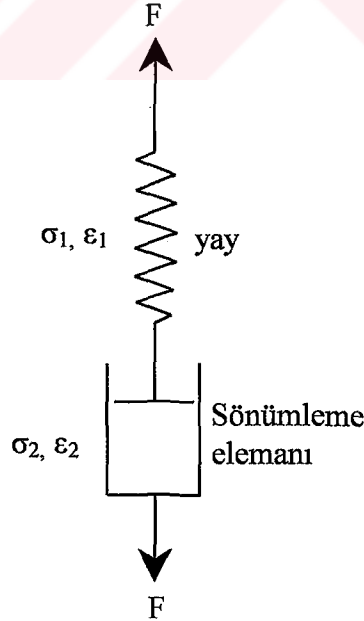
Viskoelastik malzemelerin davranışını tayin etmek için çeşitli modeller teklif edilmiştir. Bunlardan en basiti bir yay ve bir sönümlenme elemanına dayanmaktadır; yay malzemenin elastik özelliğini, sönümlenme elemanı ise akışkan özelliğini yansıtmaktadır. Yay ve sönümlenme elemanının seri şeklinde tertiplenmesi *Maxwell*, paralel şekilde tertiplenmesi *Kelvin-Voigt* modelini oluşturmaktadır.

2.2.2.1. Maxwell modeli

Bu model malzemenin gevşeme davranışını deneylere uygun olarak modelleyebilmektedir (Şekil 2.5). Sisteme bir F kuvveti tatbik edildiği durum da yay, $\sigma_1 = E \varepsilon_1$ ve sönümleme elemanı $\sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon} = \eta \cdot (d\varepsilon/dt)$ bağıntılarına göre bir şekil değiştirme gösterecektir. Benzerliği sağlamak için burada $\tau = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ yerine $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$ (Newton akış kanunu) konulmuştur. Elemanlar seri halde bulunduğundan gerilmeler her iki elemanda da eşit $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$; ancak sistemin toplam şekil değiştirmesi, elemanların şekil değiştirmelerinin toplamı, yani $\varepsilon_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ olacaktır. Son denklem

$$d\varepsilon_t/dt = d\varepsilon_1/dt + d\varepsilon_2/dt \quad (2.2)$$

ve $\varepsilon_1 = \sigma/E$ bağıntısı ile $d\varepsilon_1/dt = (1/E) \cdot d\sigma/dt$ şeklinde yazılırsa, $d\varepsilon_2/dt = \sigma/\eta$ değeri ile (2.2) denkleminde,



Şekil 2.5. Maxwell modeli.

$$d\varepsilon_t/dt=(1/E).d\sigma/dt+\sigma/\eta \quad (2.3)$$

bulunur. Yukarıdaki denklemlerde η viskoziteyi, $d\varepsilon_t/dt$ Toplam gerinim hızıdır. Denklem 2.3 bağıntısına Maxwell modeli için gerilme-gerinim denklemi denilmektedir. Bu modelin viskoelastik malzemeyi ne ölçüde ifade ettiğini belirlemek için iki ayrı durumu incelemek gerekir.

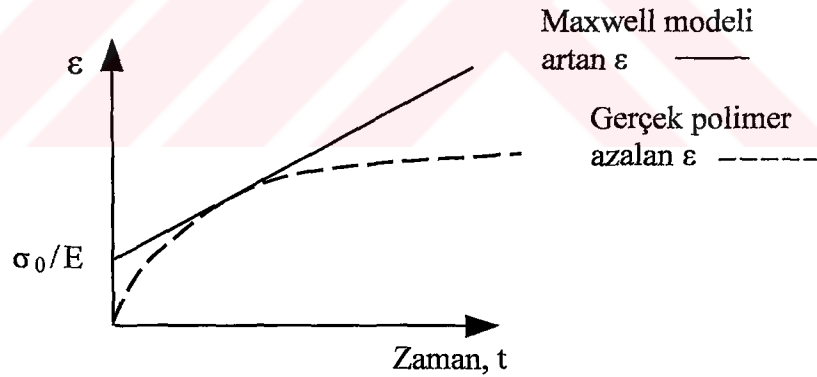
a) Sürünme (Creep):

$\sigma=\sigma_0 =$ sabit olduğundan, $d\sigma/dt=d\sigma_0/dt=0$ 'dır.

$\varepsilon =(1/E).0+\sigma_0/\eta$ ve $d\varepsilon_t/dt=\sigma_0/\eta$

$\varepsilon(t)=(\sigma_0/\eta).t$ bulunur.

Ayrıca $t=0$ 'da $\varepsilon_0= \sigma_0/E$ ' dir.



Şekil.2.6. Sürünmede gerinim-zaman diyagramı (Maxwell modeli).

Yukarıdaki grafikten de anlaşılacağı üzere malzemede sürünme durumu yani sabit bir gerilme mevcut iken Maxwell modeli zamanın artması durumunda malzemenin uzama eğrisinden uzaklaşmaktadır. Bu durum Maxwell modelinin

uzun zamanlı sürünme durumunda gerçekten saptığını ve doğru bir yaklaşım vermediğini göstermektedir.

b) Gevşeme (Relaxation)

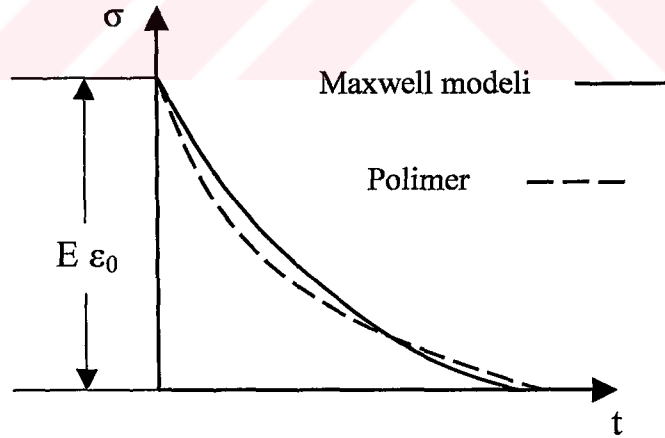
$\varepsilon_t = \varepsilon_0 = \text{sabit}$ yani $d\varepsilon_0/dt=0$ olduğu dikkate alınır, 2.3 denklemini $(1/E)d\sigma/dt + \sigma/\eta = 0$ halini alır. $t=0$ için $\sigma = \sigma_0$ koşulunda integral alındığında,

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-(E/\eta)t} \quad (2.4)$$

veya $t_r = \eta/E$ ifadesi ile

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/t_r} \quad (2.5)$$

elde edilir. Burada σ_0 başlangıçtaki gerilmedir ve t_r değerine gevşeme zamanı denir.



Şekil 2.7. Gevşemede gerilme-zaman diyagramı (Maxwell modeli)

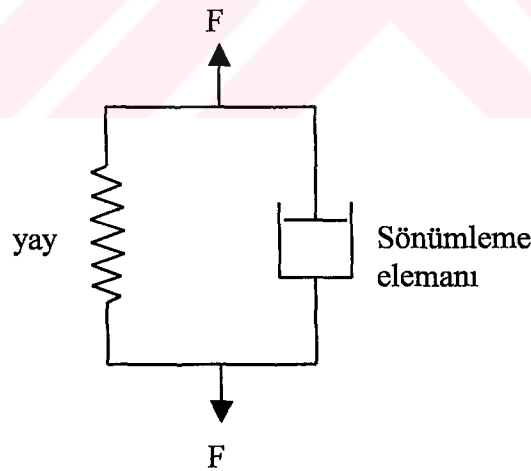
Gerilme zaman diyagramından da anlaşılacağı gibi Maxwell modeli sabit gerinimde malzemenin davranışını oldukça iyi bir şekilde yansıtmaktadır.

Bu durumda Maxwell modeli için, viskoelastik bir malzemenin gevşeme halini gerçeğe çok yakın bir şekilde modelleyebilmekte ancak sürünme durumunu zaman arttıkça doğru modelleyememektedir, denebilir.

2.2.2.2. Kelvin-Voigt modeli

Bu modelde yay ve sönümlenme elemanları Şekil 2.8’de gösterildiği gibi paralel şekilde tertiplenmektedir. Sisteme bir kuvvet uygulandığında, elemanların şekil değiştirmeleri eşit ($\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$) ve sistemin toplam gerilmesi elemanlarda meydana gelen gerilmelerin toplamı, yani $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ dir. $\sigma_1 = E \cdot \epsilon$ ve $\sigma_2 = \eta \dot{\epsilon} = \eta(d\epsilon/dt)$ ifadeleri ile

$$\sigma = E \cdot \epsilon + \eta(d\epsilon/dt) \quad (2.6)$$



Şekil 2.8. Kelvin-Voigt modeli.

elde edilir. 2.6 denklemi Voigt-Kelvin modelinin gerilme-gerinim denklemidir.

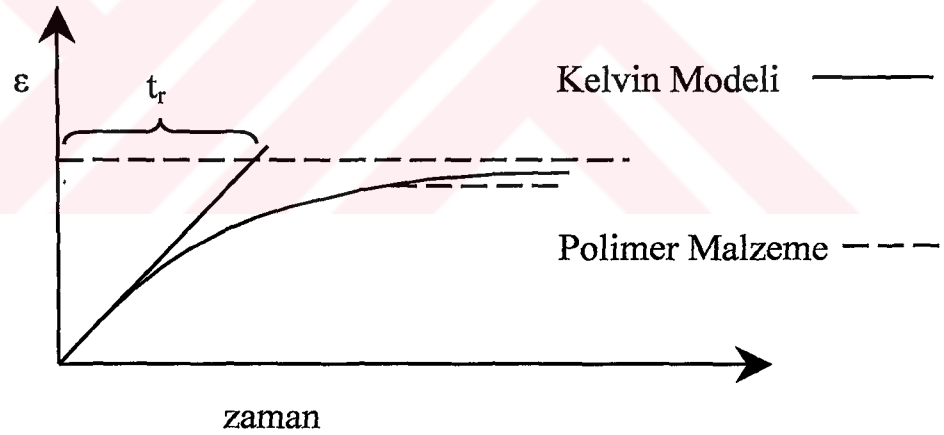
Bu modelin bir viskoelastik malzemeyi ne ölçüde ifade ettiğini belirlemek için aynı şekilde iki ayrı durumu incelemek gerekmektedir.

Sürünme (creep):

$\sigma = \sigma_0 =$ sabit olduğu dikkate alınır ve (2.6) denklemini $t=0, \varepsilon=0$ koşulunda integrali alınır.

$$\varepsilon(t) = (\sigma_0/E)[1 - e^{-(E/\eta)t}] = (\sigma_0/E) [1 - e^{-t/t_r}] \quad (2.7)$$

(2.7) bağıntısı elde edilir. Burada $t_r = \eta/E$ gecikme zamanı adını alır. (2.7) bağıntısına göre, sisteme bir σ_0 gerilmesi uygulandığında şekil değiştirmeler ani değil de $t_r = \eta/E$ gecikme zamanına bağlı olarak yavaş yavaş büyümektedir.



Şekil 2.9. Sürünmede gerinim-zaman diyagramı (Kelvin-Voigt modeli).

Şekil 2.9'dan da görüldüğü üzere Kelvin-Voigt modeli viskoelastik bir malzemenin sürünme davranışını oldukça iyi bir şekilde modelleyebilmektedir. Burada $t \rightarrow \infty$ olduğunda Kelvin-Voigt modeli $\varepsilon = \sigma_0/E$ değerini vermektedir.

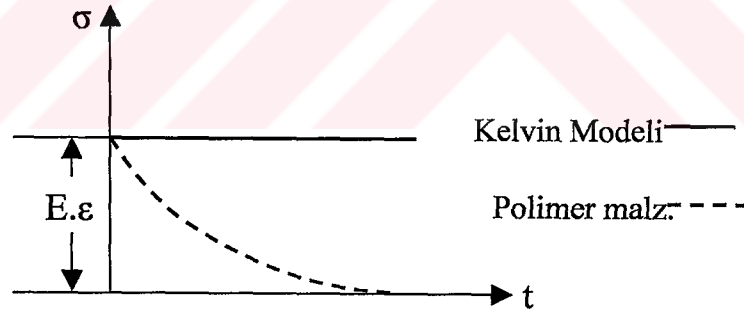
b) Gevşeme (Relaxation):

$\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{sabit}$ ve $d\varepsilon / dt = 0$ olacağından bu durumda (2.6) denklemi, (2.1)'deki gibi,

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2.8)$$

(2.8) denklemi haline gelir. (2.8) denklemi aslında elastik bir malzemenin gerilme-gerinim denklemini vermektedir. Ama bu denklemin aynı zamanda viskoelastik bir malzemenin gevşeme halini anlattığı gözden kaçmamalıdır.

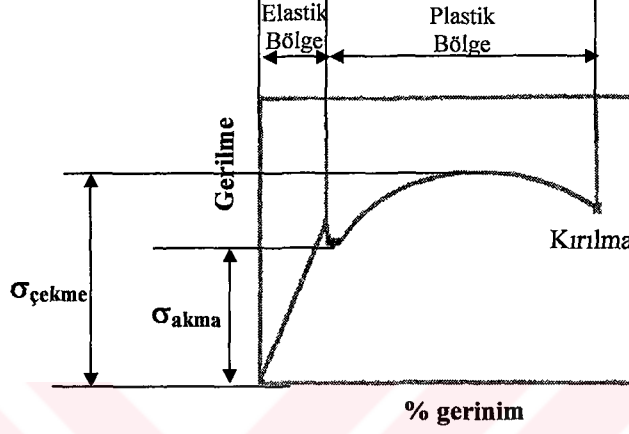
Sonuç olarak, Kelvin-Voigt modelinin sürünme halini gerçeğe yakın modellediği ancak gevşeme olayını gerçekten uzak bir şekilde modellediği söylenebilir.



Şekil 2.10. Gevşemede gerilme-zaman diyagramı (Kelvin-Voigt modeli).

2.2.3. Elastik-Plastik davranış

Elastik-plastik davranış; bir cisimde yükleme sırasında meydana gelen şekil değiştirmelerin, yük kaldırıldığında kaybolmadıkları davranış olarak tanımlanır. Malzemede elastik bölge aşıldığında plastik şekil değişimi başlar.



Şekil 2.11. Mühendislik çekme diyagramı.

Basit çekmede, plastik alanda, çekme eğrisinin maksimum noktasından önce herhangi bir noktadaki toplam şekil değiştirme, elastik bileşen ile plastik bileşenin toplamından ibarettir. Sonsuz küçük bir gerininin ($d\varepsilon$) plastik bileşeni $d\varepsilon^P$ ile gösterilirse, $d\varepsilon^P$ miktarı ile gerilmeler arasındaki bağıntılar akış denklemleri olarak anılır. Bu denklemler aşağıda asal gerilmeler ve asal gerilme doğrultularında oluşan asal plastik gerinim bileşenleri cinsinden verilmiştir.

$$d\varepsilon_1 = d\varepsilon_1^P = \frac{d\varepsilon}{\sigma} \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$d\varepsilon_2 = d\varepsilon_2^P = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \right] \quad (2.9)$$

$$d\varepsilon_3 = d\varepsilon_3^P = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

Denklem 2.9 yardımıyla malzemelerin plastik bölgede maruz kaldığı gerilme veya gerinim adımı yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

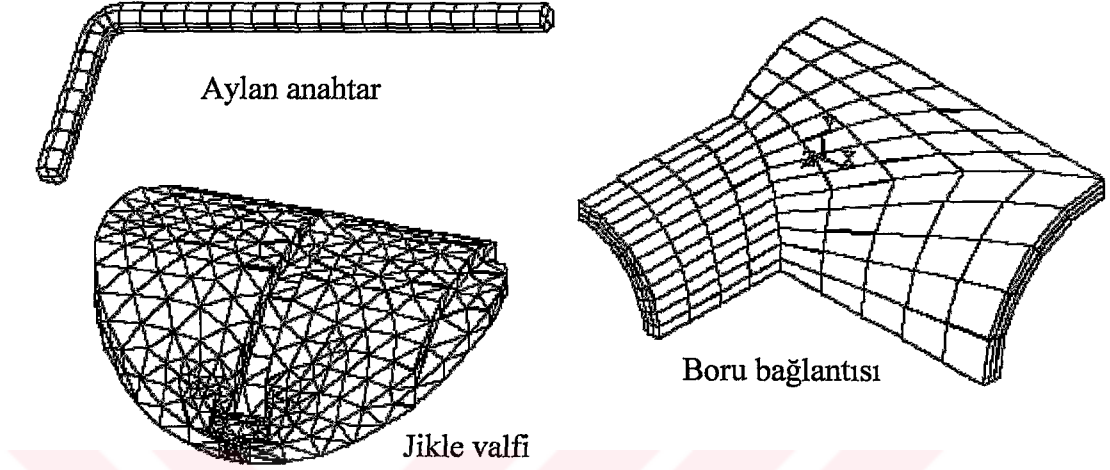
2.2.4. Elastik-viskoplastik davranış

Viskoplastiklik, plastik davranışının zamana veya gerinim hızına bağlı olarak değiştiği malzemeleri modellemede kullanılmaktadır. Perzyna [9], Peirce [10] veya Anand [11] modellerinden, Perzyna ve Pierce modelleri ortam sıcaklıklarındaki viskoplastikliği, Anand modeliyse metallerin yüksek sıcaklıklardaki sürünme durumunu modellemekte kullanılmaktadır.

2.3. Bilgisayar Modellemesi

Bilgisayar modelleme aracı olarak SEM yönteminin uygulanacağı, Giriş bölümünde belirtilmiştir. SEM, karmaşık nonlinear problemlerin daha basit lineer duruma indirgenerek çözüldüğü bir sayısal analiz yöntemidir. SEM'in kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok yapının kolayca incelenebilmesi mümkün olabilmektedir.

SEM’de kompleks yapı, *sonlu eleman* denilen küçük parçalara bölünür. Şekil 2.12’de üç ve dört düğümlü sonlu elemanlara bölünmüş örnek makina elemanları gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Örnek sonlu elemanlar.

Problemin çözümü bu elemanlar bazında tahmin edilir. Analizin sonucu genellikle yapıdaki gerilme ve deplasman dağılımları şeklindedir. SEM ile problem çözümünde aşağıdaki adımlar takip edilir:

1. Problem tanımlanır. Yapı ve üzerindeki yüklemeler çizilir.
2. Yapının şekli modellenir.
3. Oluşturulan model elemanlara bölünür.
4. Modele sınır koşulları (yük ve deplasmanlar) uygulanır.
5. Elemanlar arası bağıntılardan çıkan denklemler çözülür.
6. Sonuçlar incelenir.

1, 2, 3 ve 4 adımlarına analiz öncesi (preprocessing), 5. adıma analiz (solution) ve 6. adıma da analiz sonrası (postprocessing) aşamalar denir.

Bir çok sonlu eleman (2 boyutlu Üçgen, dörtgen, 3 boyutlu küp, piramit vs.) türü mevcuttur. Elemanların deplasmanları elemanların köşelerinde yer alan düğüm noktalarının deplasmanlarından ve elemanların yüzeyleri için tanımlanan ve deplasman fonksiyonları denilen basit polinomlardan elde edilir. $u(x,y)$ ve $v(x,y)$, düğümün sırasıyla x ve y koordinatları cinsinden yatay ve düşey yöndeki deplasmanları olmak kaydıyla, 3 düğümlü ve 2 boyutlu üçgen bir sonlu eleman için deplasman fonksiyonu:

$$\begin{aligned} u(x,y) &= A_0 + A_1 x + A_2 y \\ v(x,y) &= A_3 + A_4 x + A_5 y \end{aligned} \quad (2.10)$$

ve örneğin 4 düğümlü dörtgen bir eleman için ise:

$$\begin{aligned} u(x,y) &= A_0 + A_1 x + A_2 y + A_3 x y \\ v(x,y) &= A_4 + A_5 x + A_6 y + A_7 x y \end{aligned} \quad (2.11)$$

şeklinde verilebilir. 2-B'taki gerinimler;

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu denklemler matris;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

veya vektörel;

$$\varepsilon = D \vec{u} \quad (2.14)$$

şeklinde verilebilir. u ve v deplasman vektörlerinin, $u_n(x_n, y_n)$ ve $v_n(x_n, y_n)$

$n=1,2,3,\dots$, düğüm deplasmanları cinsinden gösterimi ise,

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

veya vektörel olarak

$$\vec{u} = N \vec{d} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir. N *şekil fonksiyonu matrisi*, \vec{u} *deplasman matrisi* ve \vec{d} *düğüm deplasmanları vektörü* olarak adlandırılır. Bu durumda gerinimler;

$$\varepsilon = D\vec{u} = DN\vec{d} = B\vec{d} \quad (2.17)$$

şekline dönüşür. $B = DN$ matrisine *gerinim-düğüm deplasmanları matrisi* denir. Elastik deformasyon söz konusu olduğunda, yapıdaki σ gerilmeleri ile ε gerinimleri arasında, 2 boyut ve düzlem gerinim düşünülecek olursa,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

veya denklem 2.1’de verildiği gibi,

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.19)$$

şeklindeki *Hooke Kanunu* bağıntısı vardır. E matrisine *elastik gerilme-gerinim matrisi* denir. Bu durumda gerilmeleri, bilinmeyen düğüm deplasmanları cinsinden yazabiliriz:

$$\sigma = EB\vec{d} \quad (2.20)$$

Deplasmanlar, *Virtüel İş Prensibinden* (uygulanan sanal dış kuvvetlerin yapı üzerine yaptığı işin, dolayısıyla yapıda depolanan elastik gerinim enerjisine eşit olduğu yaklaşımı) hesaplanır. Elastik gerinim enerjisinin birim hacimdeki değeri, Gerilme-Gerinim diyagramının elastik kısmının altındaki alana eşittir. Böylece, depolanan toplam gerinim enerjisi:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV \quad (2.21)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_V (E \boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T E \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \vec{d}^T \int_V B^T E B dV \vec{d}$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Uygulanan \vec{F} dış kuvvetlerinin yapı üzerine yaptığı toplam W işi:

$$W = \frac{1}{2} \vec{F} \vec{d} \quad (2.22)$$

'dir. $W = U$ bağıntısından:

$$\frac{1}{2} \vec{F} \vec{d} = \frac{1}{2} \vec{d}^T \int_V B^T E B dV \vec{d} \quad (2.23)$$

veya sadeleşmeden sonra

$$\vec{F} = \int_V B^T E B dV \vec{d} \quad (2.24)$$

elde edilir.

$$K = \int_V B^T E B dV \quad (2.25)$$

değerine *direngelik matrisi* denir. Bu durumda

$$\vec{F} = K \vec{d} \quad (2.26)$$

denklemler sistemi elde edilir. Sınır koşullarının uygulanmasından sonra uygun bir nümerik yöntemle denklemler sistemi bilinmeyen deplasmanlar için çözümlenir. Daha sonra gerinim ve sonra da gerilmeler bulunur.

SEM'in en zor ve zaman alıcı kısmı ön analiz aşamasıdır. Modelin ve sonlu eleman ağının oluşturulması, doğru yük ve sınır koşullarının konması bu aşama için gereken adımlardır. Ağ'ın otomatik oluşturulması, ağ'ın analiz için en uygunu olacağını gerektirmez. Gerçek probleme denk gelecek sınır koşullarını belirleyip bunları modele uygulamak kolay değildir. Bununla birlikte, SEM analiz aşaması otomatik gerçekleştirilir. Analiz sonrası aşama ise güçlü görsel efektlerle desteklenebilir.

SEM'in lineer olmayan problemler için de güçlü bir analiz aracı olduğunu belirtmek gerekir. Şekil bazında nonlinear olabilecek yapılarda, sehimlerin büyük oranlara çıktığı durumlarda ve dolayısıyla sehimlerin küçük olduğu farzedilerek ihmal edilen ikinci dereceden terimlerin de hesaba katılması gerekir. Malzeme bazında nonlinear olabilecek yapılarda ise malzemenin mekanik davranışındaki nonlinear durum ele alınır. Malzemenin akmaya uğradıktan sonraki halinin nonlinear olduğu ve gerilme ve gerinimin doğrusal bir bağıntıyla birbirine bağımlı olmadığı bilinmektedir. Nonlinear problemler uygulanan toplam yükün parçalara bölünüp adimsal olarak uygulanmasıyla çözümlenir. Bu yaklaşım problemin lineerleştirilmesi anlamına gelmektedir. Her bir yük adımında, malzemenin gerilme-gerinim

diyagramının davranışına ve yapıda meydana gelen gerilme düzeyine bağlı olarak etken elastisite modülü değişir. Her bir adımda ulaşılan gerilme düzeyine bağlı olarak dirençlilik matrisi de değişir. Sonlu elemanlar analizinde bu matrisin köşegen elemanlarının negatif veya çok büyük olması engellenir. Aksi takdirde analizde numerik hatalarla veya salımlarla karşılaşılabilir.

2.3.1. Ansys® Paket Programı

Sonlu elemanlar analizinde problem teşkil eden herhangi bir yapı, eleman denilen küçük kısımlara bölünür ve bir bilgisayar programı aracılığı ile matris hesaplamaları kullanılarak analiz edilir. Ansys® [12] çeşitli uygulama alanlarında, SEM analizi yapan bir paket programıdır. Ansys başka bir çok SEM paket programı gibi, pahalı üretimler ve deneyler olmaksızın bir tasarım mühendisinin, modelinin ısı, mekanik vb. davranışlarını görebilmesine imkan tanır ve bunun neticesinde ürün geliştirme maliyetini azaltır. Bu paket programı, tez çalışmasının yürütüldüğü ortamda kendisine erişebilme imkanının olmasının yanında, kalıp ve şekillendirilecek yakıtın nonlineer mekanik davranışlarını ve kontakt arayüzlerini modelleyebilecek ve daha sonra animasyonlarını yapabilecek araçları içinde barındırdığından dolayı seçilmiştir.

Herhangi bir problem Ansys paket programında analiz edilirken önemli bir kısım adımlara dikkat etmek gerekmektedir. Bunların başında model boyutları, ısı ve malzeme özellikleri tanımlanırken doğru birim sisteminin kullanılmasıdır. Yanlış birimler, yalnız malzeme davranışını etkilemez, ayrıca elde edilecek sonuçlarda da hatalara neden olabilir. Bu amaçla boyutlar milimetre (mm) ve kuvvetler Newton (N)

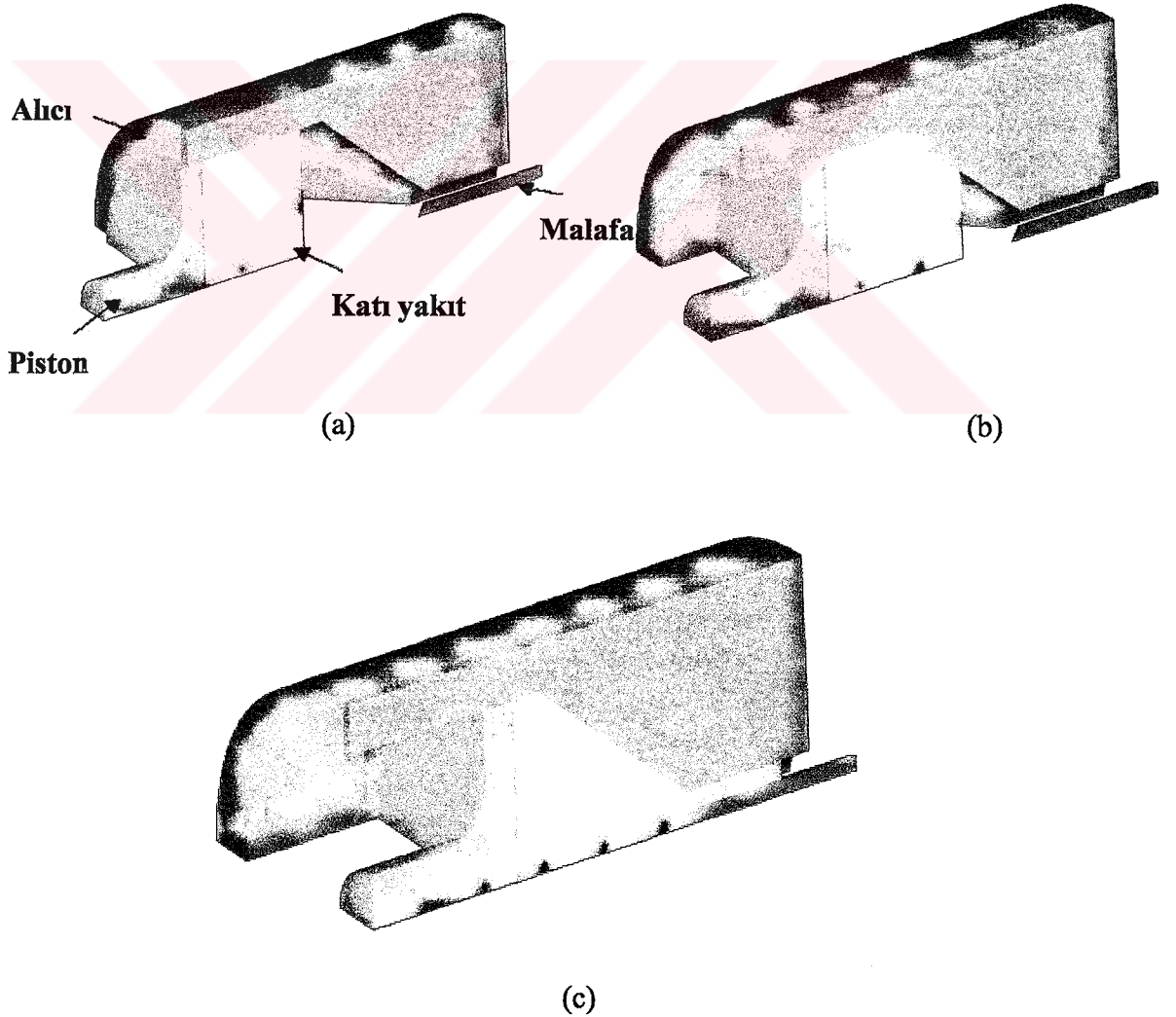
olarak alınmış olup, standart olarak kabul edilen diğer bütün birimler bu temel iki birim cinsine dönüştürülmüştür. Bunun yanında sonuçların hassas olması açısından sonlu eleman ağının kritik kabul edilebilecek kesit değişim bölgelerinde daha yoğun olması sağlanmalıdır.



3. ARAŞTIRMA BULGULARI

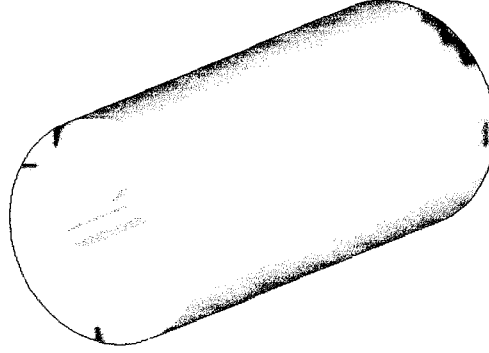
3.1. Katı Yakıt Ekstrüzyon Modeli

Katı yakıt, 360mm çapında ve 105mm kalınlığında rulo şekline getirilerek, alıcı bölümüne yerleştirilmektedir. Alıcının sıcaklığı 60°C'dir. Alıcıya yerleştirilen rulo halindeki yakıtta 140Bar 'lık bir piston basıncı uygulanarak, yakıt alıcının çıkış bölümüne itilmekte, böylelikle yakıtın çapının ve profilinin istenilen hale gelmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.1a,b ve c'de bu işlemler 3 aşamada gösterilmektedir.



Şekil 3.1a,b ve c. Katı yakıt ekstrüzyonu.

Şekil 3.2’de, katı yakıtın ekstrüzyon sonrasında istenilen çap ve profildeki şekli görülmektedir.



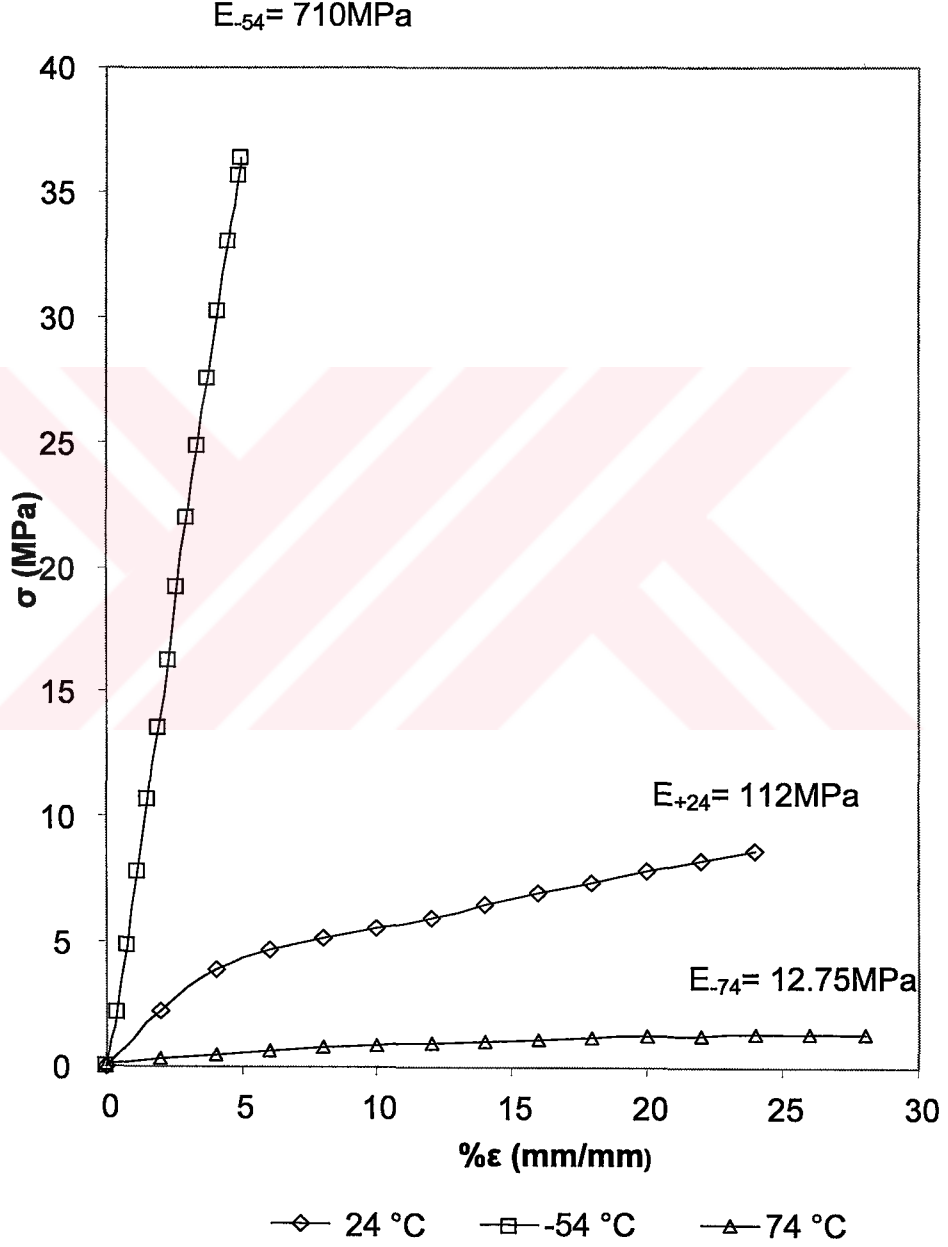
Şekil 3.2. Katı yakıt geometrisi.

3.1.1. Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Verileri

Katı yakıt ekstrüzyon modellemesinde iki ayrı malzeme vardır. Alıcı ve malafa, çelik malzemedен üretilmiştir. Çelik malzeme elastik olup, elastisite modülü, $E=200.000$ MPa ve Poisson oranı $\nu=0.3$ olarak kabul edilmiştir.

İkinci malzeme katı yakıttır. Katı yakıt için yoğunluk 1.66gr/cm^3 , viskozite $2.75 \cdot 10^{-3}$ Pa-s, patlama ısısı 836 kCal/gr, alevlenme sıcaklığı $165-180^\circ\text{C}$, patlama basıncı 140 Bar, ısı iletim katsayısı 45 W/m² K, elastisite modülü ($+74^\circ\text{C}$): 12.75 MPa ve Poisson oranı 0.49997 olarak alınmıştır. Bu değerlerle katı yakıt malzemesi, elastik-plastik malzeme modelini sağladığı kabul edilmiştir. Elastik plastik model tetikleme, Ansys programında nonlinear malzeme durumu için MISO seçeneğinin $+74^\circ\text{C}$ ’deki ($+60^\circ\text{C}$ ’deki değerler mevcut olmadığından) gerilme-gerinim verileri girilerek ve geometrik nonlinear durumu için ise NLGEOM, ON seçilerek sağlanmıştır.

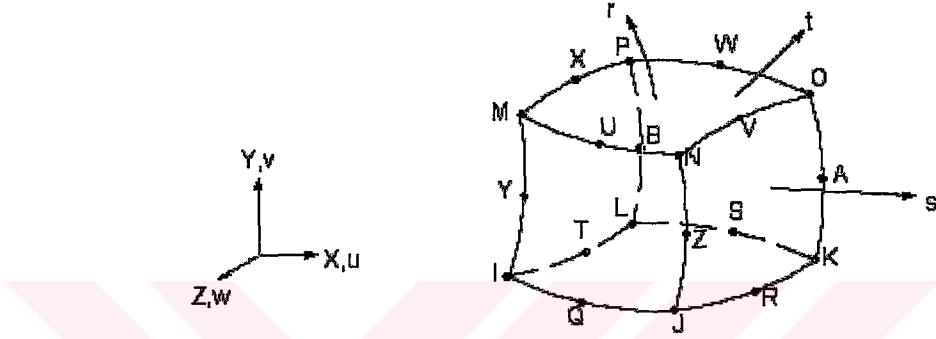
Şekil 3.3’de, laboratuarda katı yakıt çekme numunelerinin çekme cihazında değişik sıcaklıklarda çekilmesi sonucu elde edilmiş gerilme-gerinim eğrileri gösterilmektedir. Ekstrüzyon şartlarına uyan +74°C’deki diyagramdır.



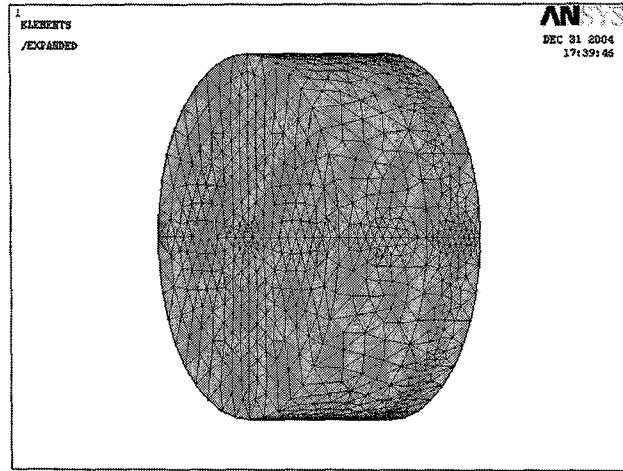
Şekil 3.3. Katı yakıtın sıcaklıkla değişim gösteren σ - ϵ eğrileri

3.1.2. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması

Bölüm 2.3'te anlatılan analiz öncesi aşamada modelin oluşturulması sırasıyla aşağıda şekillerle gösterilmiştir. Modellerde kullanılan eleman, 3 boyutlu 20 düğümlü termal ve yapı analizi özellikli SOLID95 olup, geometrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. SOLID95 SEM elemanı.

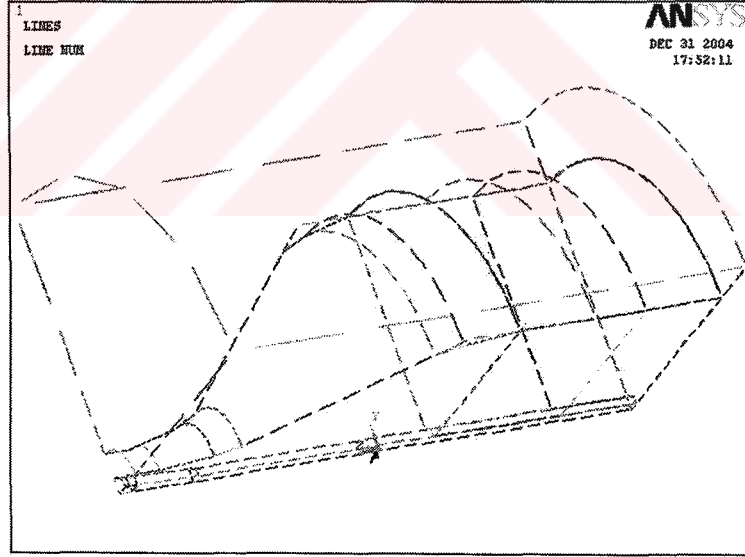


Şekil 3.5. Katı yakıt SEM SOLID95 ağı.

Bu eleman kullanılarak Şekil 3.5'te gösterildiği gibi katı yakıtın modeli

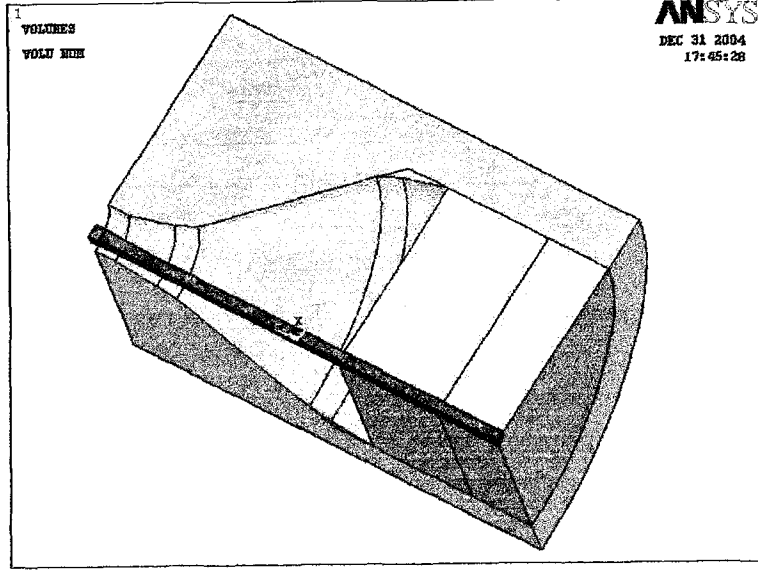
oluşturulmuştur. Yakıt modelinin dış çapı önceden belirtildiği gibi 360mm ve genişliği ise 105mm ve rulo yerine katı bir silindir olarak varsayılmış olup, ortasında malafa çapının giriş kısmı kadarlık ($\phi 20\text{mm}$) bir delik bulunmaktadır. Bu deliğin nihai çapının $\phi 24\text{mm}$ olması istenmektedir. Şekil 3.2’de gösterildiği delik yıldız geometrili değil, düz silindir biçiminde modellenmiştir. Katı yakıtın tam modeli, 26000 adet SOLID95 elemanından ve 40552 düğümünden oluşmaktadır.

Şekil 3.6 ‘da daha sonra yüzey alanlarını oluşturmada kullanılacak model çizgileri gösterilmiştir. Analiz edilecek problem yakıt alan merkezine göre simetrik olduğundan, işlemci hızı açısından sadece çeyreği analiz edilecektir. Çizgiler istenilen eleman boyutuna bağlı olarak Şekil’den görülebileceği gibi parçalara ayrılmıştır.



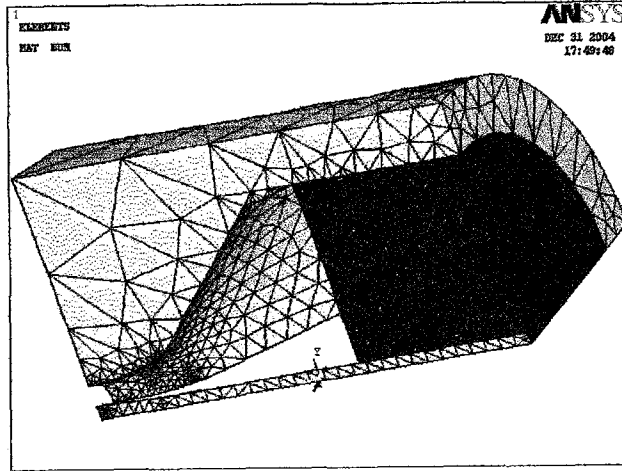
Şekil 3.6. Model çizgileri

Model çizgileriyle oluşturulan alanlardan SEM modelinin üç boyuttaki çeyrek hacmi meydana getirilmiştir (Şekil 3.7).

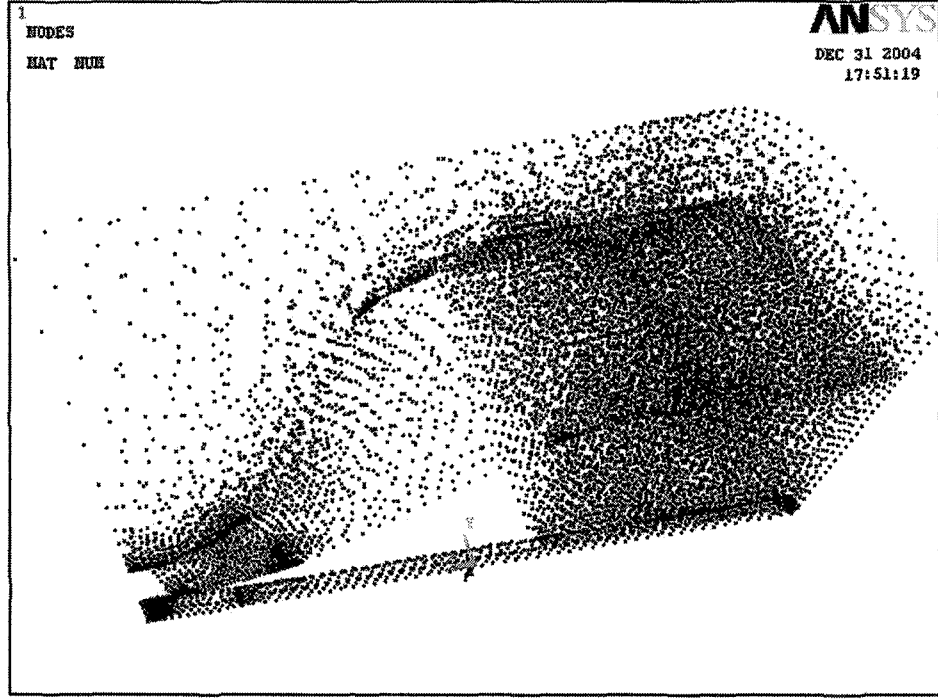


Şekil 3.7. Model hacminin çeyrek görünümü.

Oluşturulan hacmin SOLID95 elemanlarına bölünmüş hali Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.9’da ise modelin düğümlerle ifade edilmiş biçimi gösterilmektedir. Bu çeyrek modelde toplam 10441 eleman ile 21556 düğüm bulunmaktadır.

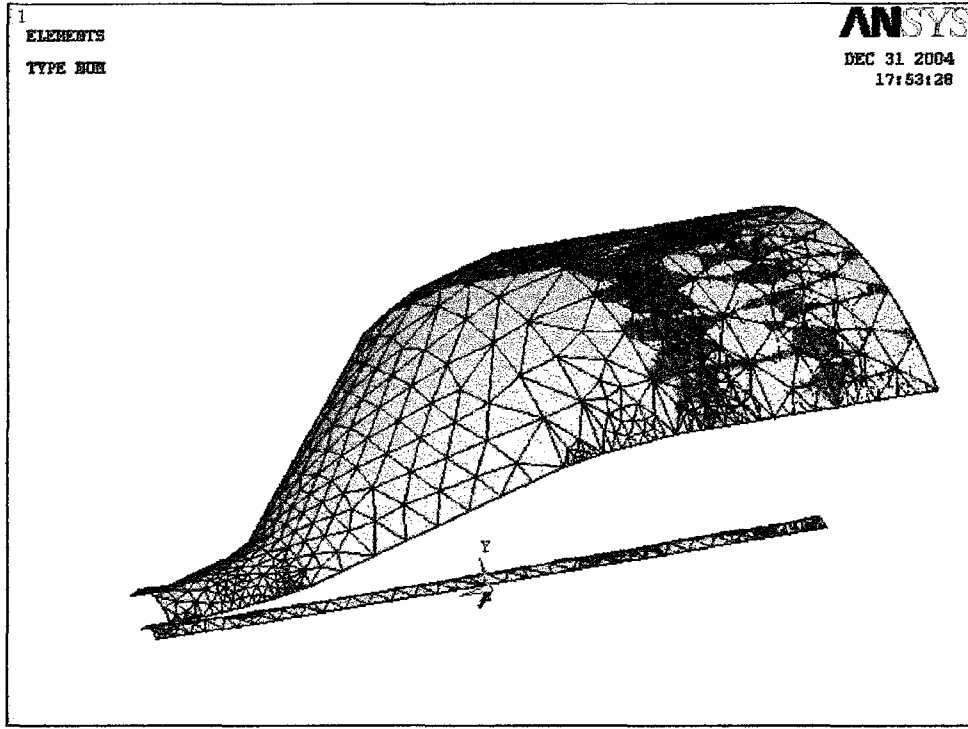


Şekil 3.8. Model elemanları.

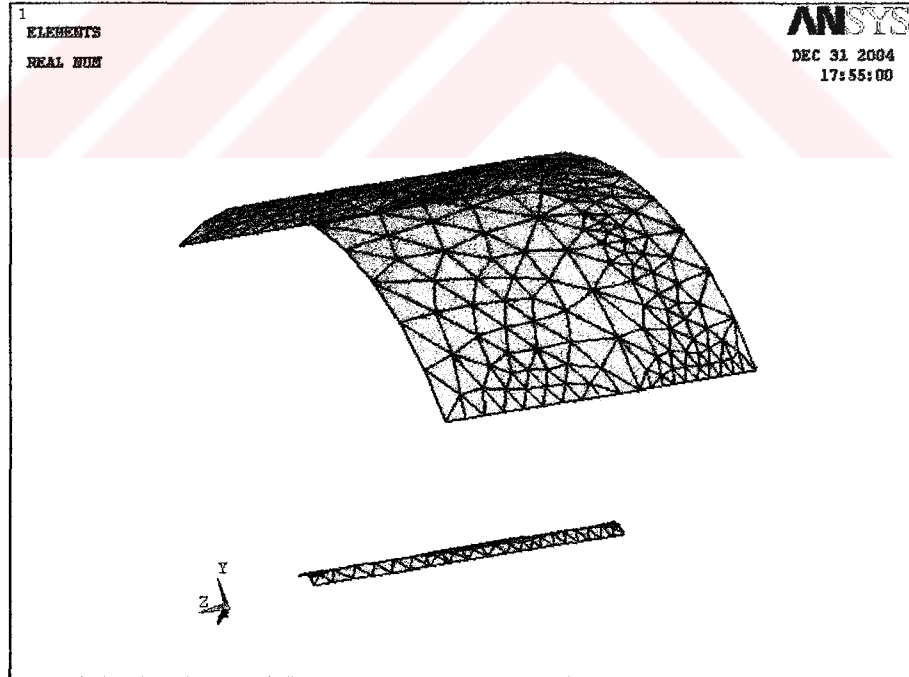


Şekil 3.9. Model düğümleri.

SEM modellemesinde sürtünme durumu modelin gerçeğe yatkınlığı 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 yağlanması da göz önünde tutularak $\mu=0.01$ alınmıştır [13]. Sözü edilen algoritmayla elde edilen kontakt yüzey elemanları (CONTA174 ve TARGE170) Şekil 3.10 da ve yakıtın iki yüzeyinde yer alan CONTA174 elemanları (555 adet) Şekil 3.11 de gösterilmiştir.

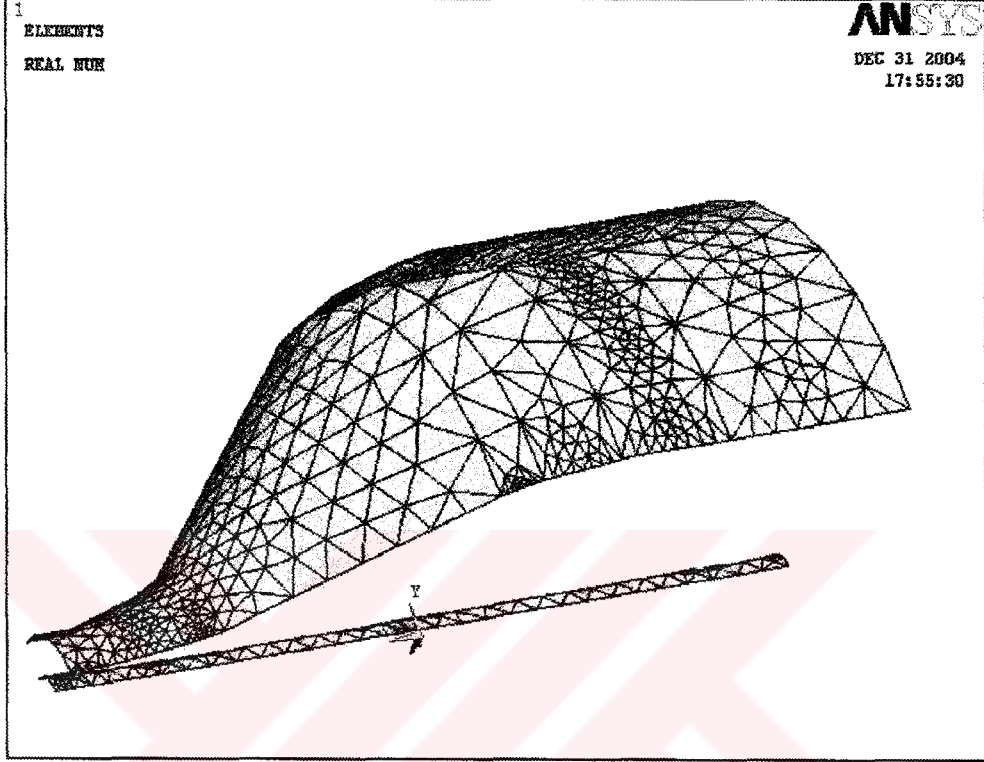


Şekil 3.10. Modeldeki kontakt-hedef yüzey elemanları



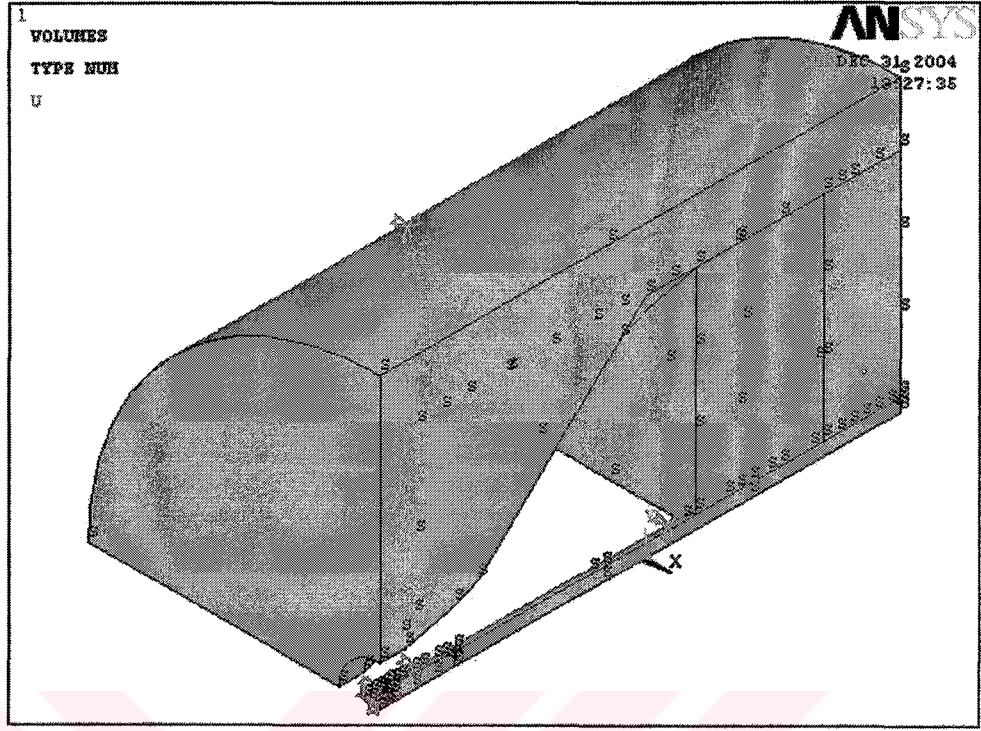
Şekil 3.11. Modeldeki kontakt elemanları ve yüzeyleri

Ayrıca alıcının iç yüzeyi ile beraber malafanın dış yüzeyinde konumlanan TARGE170 elemanları (1258 adet) Şekil 3.12 de belirtilmiştir.



Şekil 3.12. Modelin hedef elemanları.

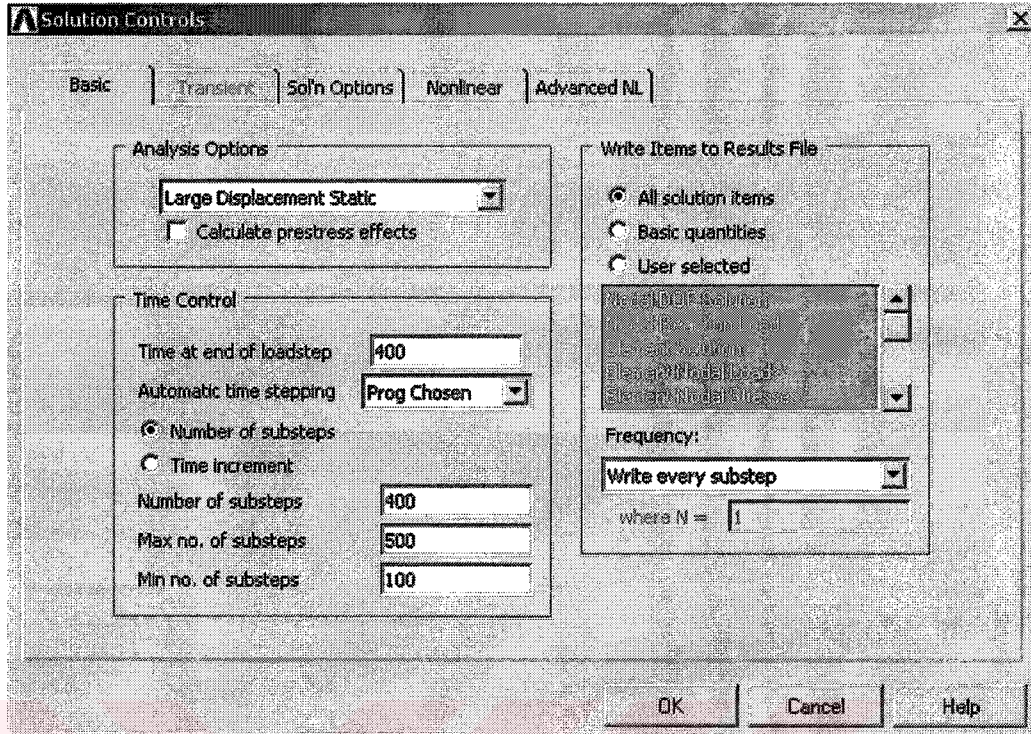
Sınır şartları ve yüklemelerin uygulanma biçimi Şekil 3.13’da verilmiştir. Şekilde S harfiyle gösterilen yüzeyler çeyreğe bölünmüşlükten dolayı simetrisi ifade etmektedir. Alıcı ve malafanın X, Y ve Z eksenleri boyunca hareketleri sınırlandırılmıştır. Katı yakıtta, Z eksenini boyunca piston hareketini belirtmek üzere 250mm’lik bir deplasman verilmiştir. Isı değişiminden kaynaklanan genişleme gerinimlerini hesaba katmak üzere, yakıt yüzeyindeki sıcaklık 347°K ve merkezdeki delik yüzeyindeki sıcaklık ise 273°K verilerek termal sınır koşulları oluşturulmuştur.



Şekil 3.13. Modelin sınır şartları ve yüklemeleri.

3.1.3. Çözümün Elde Edilmesi

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı üzere analiz öncesi (preprocessing) işlemleri tamamlanan SEM modelinin nonlinear çözümünü elde etmek için Şekil 3.14'te verilen modül devreye alınır. Analiz seçeneklerinden nonlinearlığı ifade etmek üzere statığe yakın ve büyük deplasman "*large displacement static*" seçeneği alınmıştır. Nonlinear çözüm için 400 adet yük adımı (*Loadstep*), her bir adımda da 100 ile 500 adet arasında alt adım (*Substep*) kullanılmıştır. Bu sayede her bir yük adımı içerisinde yer alan integrallerin hassasiyeti artırılmış olmaktadır. Her bir yük adımının sonuçlarının sabit diskte kaydedilmesi için "*write every substep*" seçeneği kullanılmıştır. Geriye kalan, çözüm yöntemi, yakınsama kriterleri ve program bitimi ile ilgili analiz parametreleri, Ansys'in tavsiye ettiği değerler olarak alınmıştır.

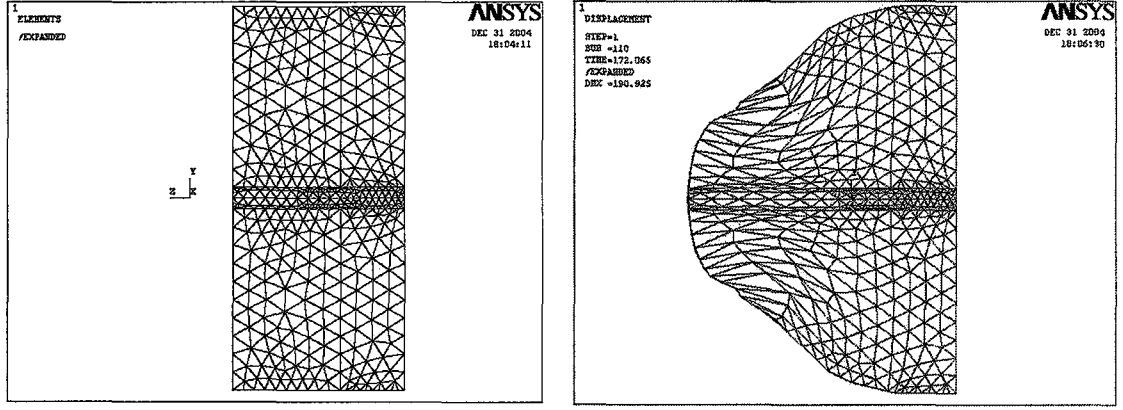


Şekil 3.14. Ansys Çözüm Modülü ve parametreleri.

3.2. Analiz Sonuçları

Çözümün elde edilme süresi, sözkonusu 400 yük adımı ve Pentium IV 2.8 GHz işlemci, 512 MB DDR-400MHz RAM ile 80GB harddisk'e sahip bir kişisel bilgisayar için 30470 saniye olmuştur. Çalışma zamanı girilen adım sayısına bağımlı olarak değişmektedir. Adım sayısı 400'ün üzerinde bir değerde alındığında, buna paralel olarak çözüm zamanı da artmaktadır.

Şekil 3.15a da ilk hali verilmiş katı yakıt malzemesinin ekstrüzyon işlemi sonucunda elde edilen sayısal çözüm malzeme akışı, Şekil 3.15b de gösterilmektedir.

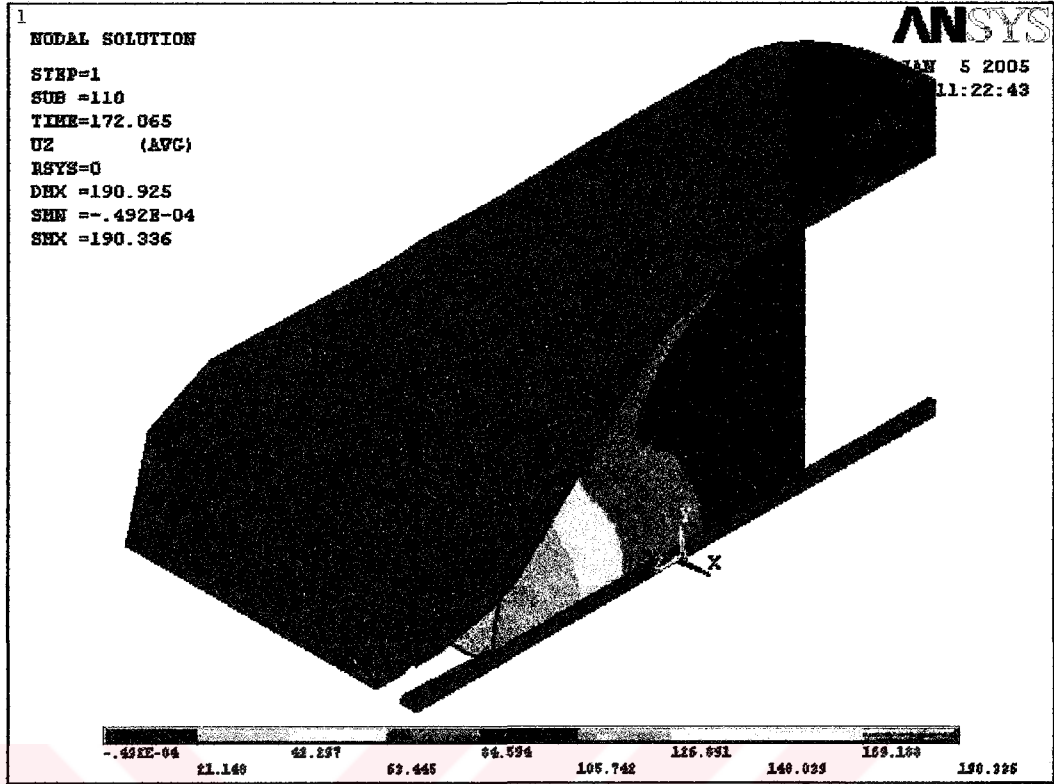


(a)

(b)

Şekil 3.15a,b. Yakıtın deformasyona uğramadan önceki (a) ve sonraki görünümünü (b).

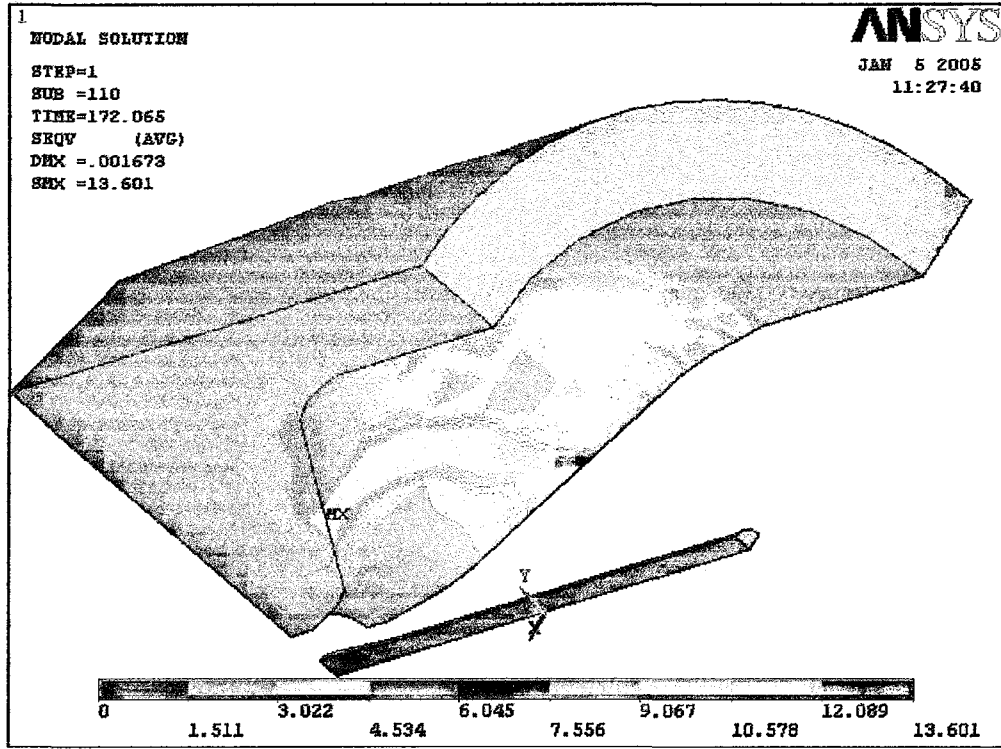
Yakıtın, alıcı ve malafa sistemindeki Z-yönü deplasmanları Şekil 3.16'da verilmiştir. Nonlineer sınır koşulu olan 250mm'lik Z-ekseni yakıt deplasmanı ile başlanan analiz neticesinde Poisson oranı ($\nu \approx 0.5$) etkisi dolayısıyla 190.336mm'lik nihai deplasman elde edilmiştir. Bu arada yakıt ağı kontak algoritmasının sınırlayıcı parametre değerlerini aşmış alıcı ağına dalmıştır. Bu ancak SEM analizi çerçevesinde ortaya çıkabilecek bir sonuçtur. Pratikte ancak deneme sınamayla veya tecrübeye dayanarak elde edilebilecek bir sonuca SEM analiziyle böylece ulaşılmıştır. Modelin, yakıt ve alıcı arasında Poisson etkisini hesaba katacak kadar bir aralığın bırakılması ve dolayısıyla kademeli bir kontakt yüzeyinin oluşturulması sayesinde katı yakıtın malafa-alıcı deliğinden istenilen çapta elde edilmesi mümkün olabilecektir.



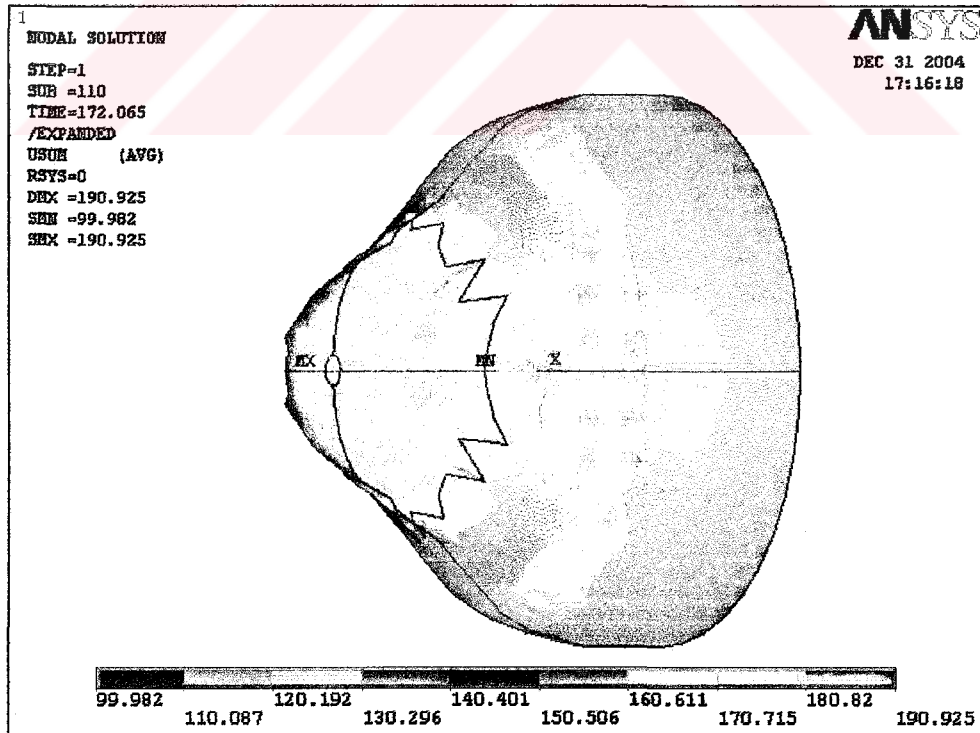
Şekil 3.16. Z-ekseni ekstrüzyon deplasmanları.

Alıcı ve malafa sistemi için, hacim değişimi enerjisi hariç tutulmak kaydıyla, sadece şekil değişimiyle ilgili malzemede depolanan gerinim enerjisinden (gerilme-gerinim grafiğinin elastik bölge altında kalan alan, rezilyans modülü) yola çıkarak hesaplanan ve malzemenin plastik bölgeye geçiş (akma miktarı) oranını ifade eden von Mises efektif gerilmeleri Şekil 3.17’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.

Katı yakıtta meydana gelen maksimum bileşke deplasmanın 190.925mm olduğu Şekil 3.18’de gösterilmektedir.

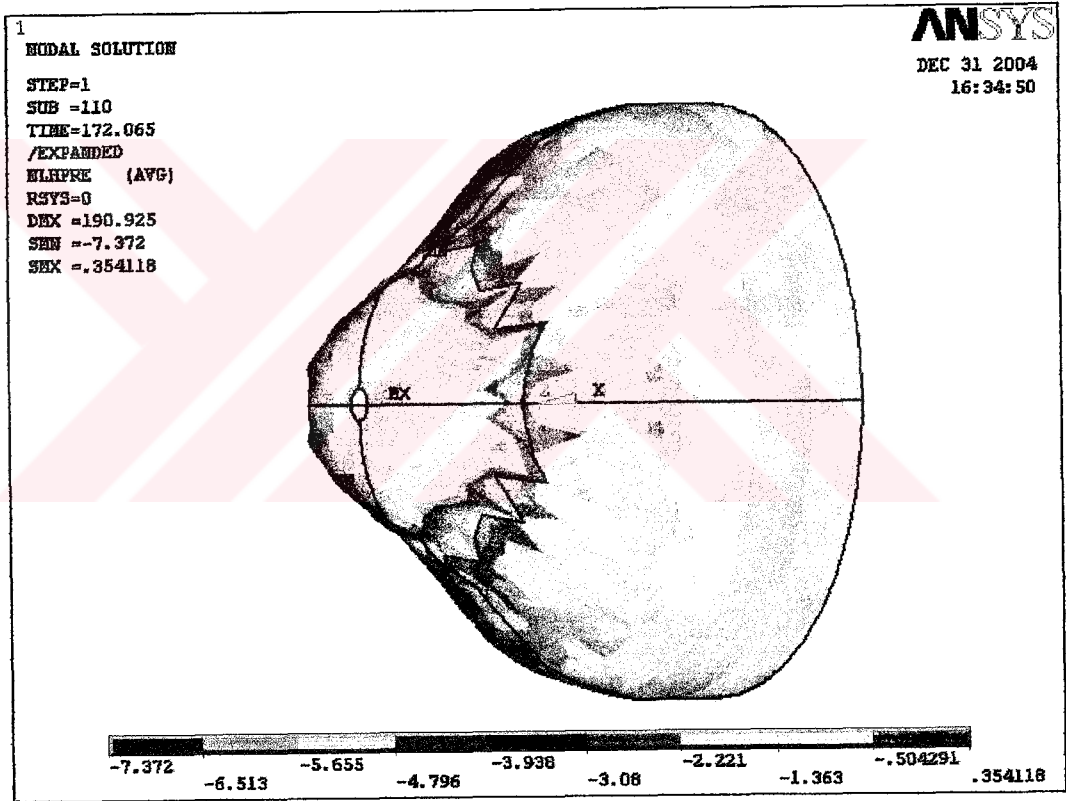


Şekil 3.17. Alıcı ve malafada oluşan Von Mises gerilmeleri.



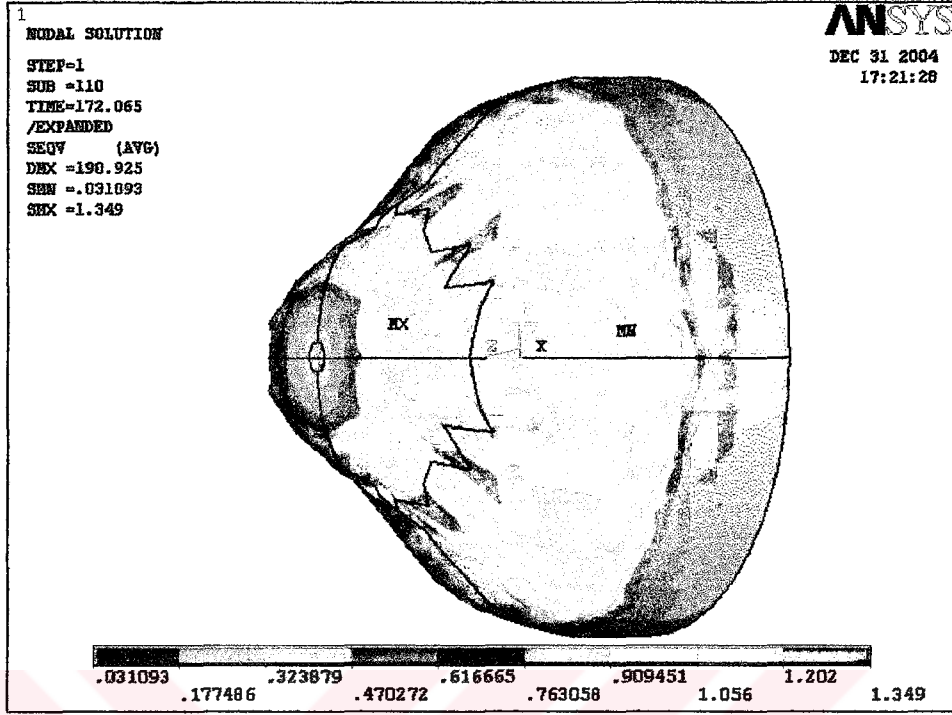
Şekil 3.18. Modelde oluşan bileşke deplasmanlar.

Hidrostatik basınç gerilmeleri, şekil değişimini meydana getiren kayma gerilmelerinin olmadığı durumda ve üç yöndeki asal gerilmelerin toplamının ortalaması olarak hesaplanır. Hidrostatik basınç gerilmeleri sadece hacim değişimiyle, diğer bir ifadeyle malzemenin sıkıştırılabilirliğiyle ilgili olan gerilmelerdir. Yakıt üzerindeki hidrostatik basıncın en büyük değerinin -7.372 MPa (=73.72 Bar) olduğu Şekil 3.19'dan görülebilmektedir. Pratikte yakıtta uygulanan 140 Bar'lık basıncın patlamaya neden olmadığı bilinmektedir. Neticede yakıtın ekstrüzyon işlemi ile üretilebileceği bu modelden anlaşılabilir.

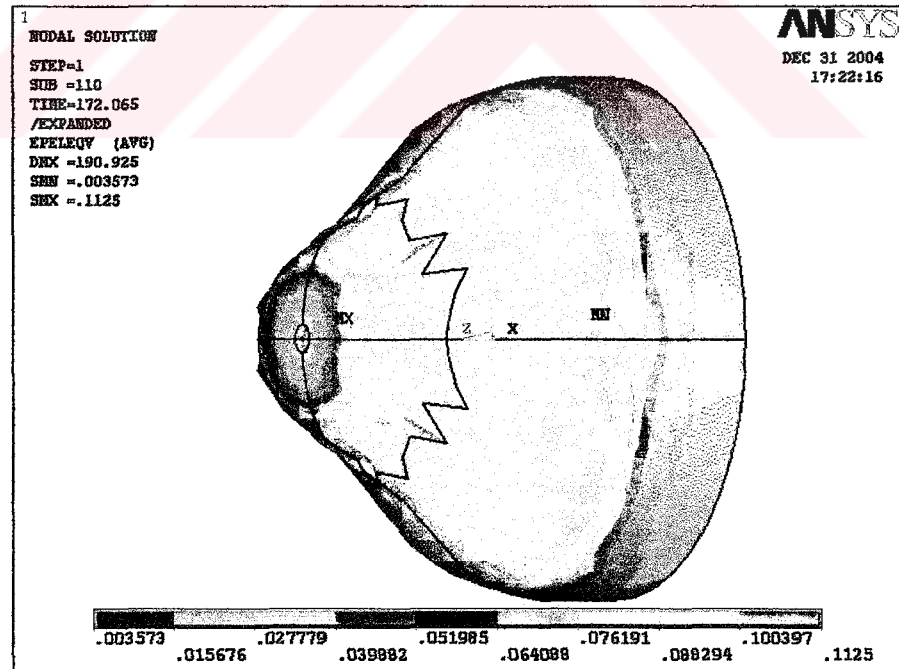


Şekil 3.19. Modelde oluşan Hidrostatik Basınç gerilmeleri.

Yakıttaki Von Mises gerilmeleri Şekil 3.20'de verilmiş olup, yakıtın konik kısımda 1.349 MPa'lık maksimum değerle plastik bölgeye geçiş yaptığı görülmektedir.



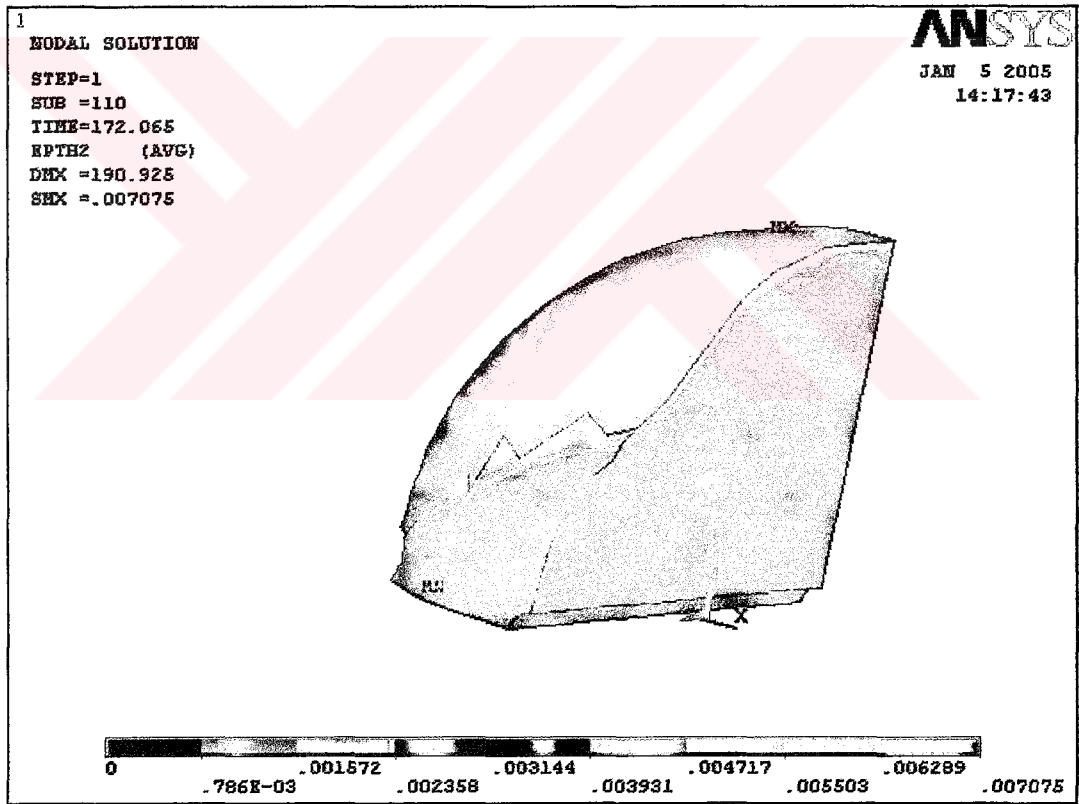
Şekil 3.20. Modelde oluşan Von Mises gerilmeleri.



Şekil 3.21. Modelde oluşan Von Mises gerinimleri

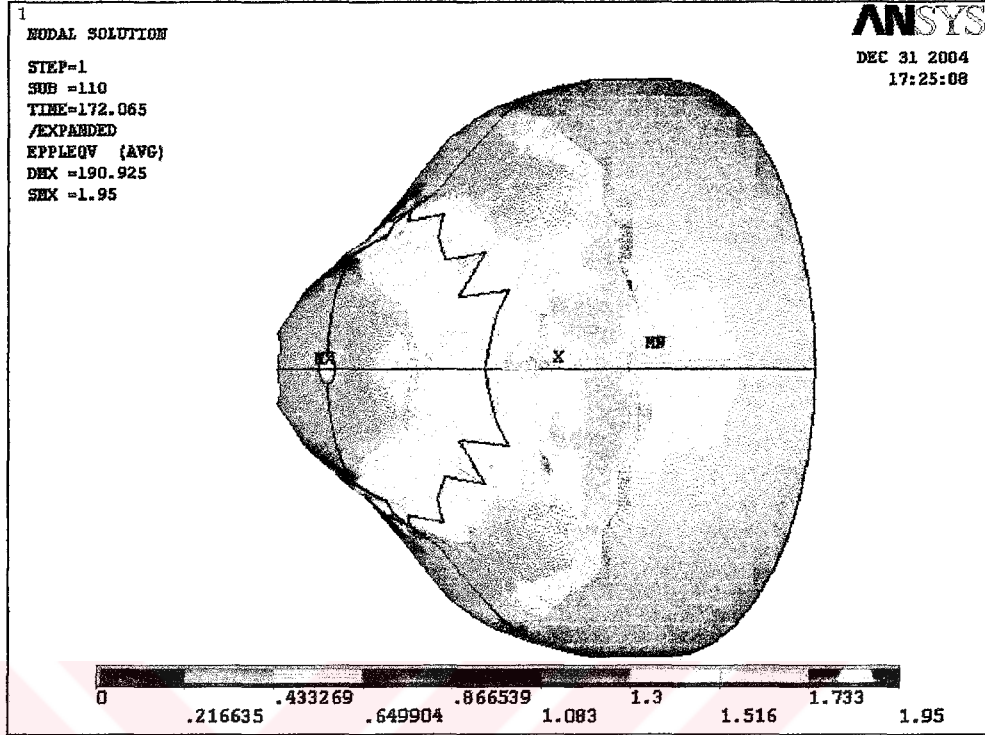
Plastik bölgeye geçiş sırasında oluşan Von Mises gerinimleri Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Von Mises gerilmeleri daha önce Şekil 3.20’de verilen konik kısımda, plastik bölgeye geçişin 0.1125 mm/mm’lik maksimum gerinim değeriyle yüzeyde tamamlandığı Şekil 3.21’de daha net görülebilmektedir.

Isı değişiminden dolayı oluşan ve genleşme oranını ifade eden termal gerinimler Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Maksimum 0.007075 mm/mm değerine sıcaklık sınır koşulunun tanımlandığı yüzeyde ulaşılmaktadır.

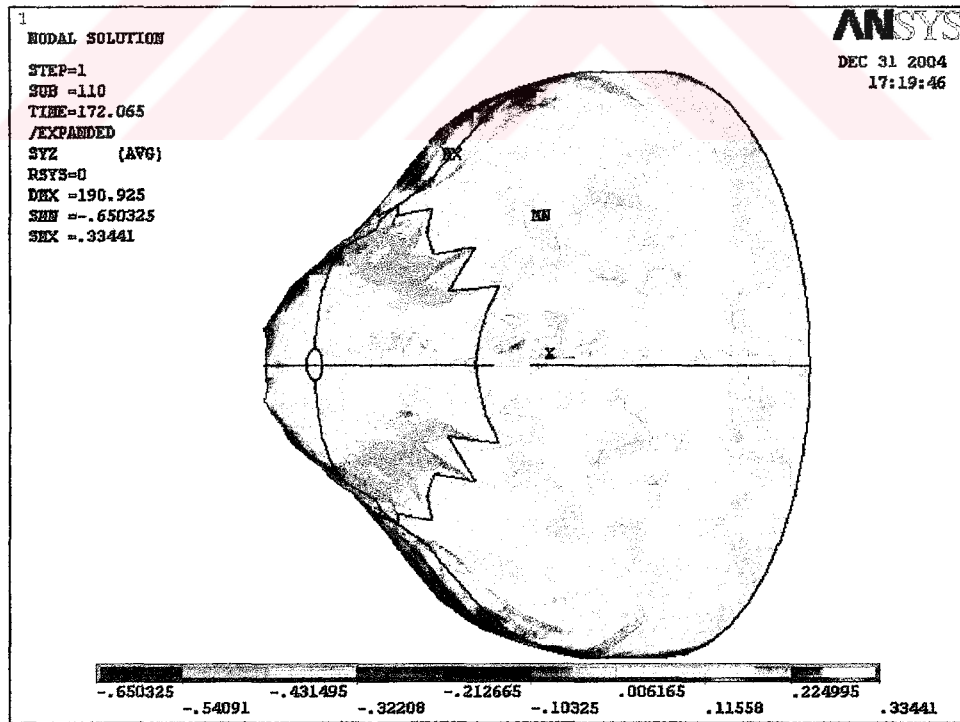


Şekil 3.22. Modelde oluşan termal gerinimler.

Plastik bölgedeki gerinimler Şekil 3.23'de verilmiştir.



Şekil 3.23. Modelde oluşan plastik gerinimler.



Şekil 3.24. Modelde oluşan YZ düzlemindeki kesme gerilmeleri

Son olarak, katı yakıt ile alıcı ve malafa arayüzeylerinde meydana gelen kayma gerilmeleri Şekil 3.24'de gösterilmiştir. Kontakt oranını da ifade eden bu gerilmelerin, yakıtın kaymada akma mukavemeti olan ($\approx 0.577 \times 48 \text{MPa} =$) 0.278 MPa değerini ancak birkaç lokal noktada ortaya çıkan 0.33441 MPa maksimum değeriyle aşmakta ve dolayısıyla plastik kayma yapmakta, geriye kalan bölgelerde elastik kayma gerçekleşmektedir.

Tartışma ve Sonuç bölümünde, bu bölümde elde edilen bulgular değerlendirilecektir.



4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Malzemelerin şekillendirilmesinde ekstrüzyon kullanılan üretim yöntemlerindedir. Katı roket yakıtları üretiminin bir aşaması da bu yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ekstrüzyon yöntemiyle katı roket yakıtı şekillendirmesi bilgisayar ortamında modellenmiştir. Bilgisayar modelleme yöntemi olarak sonlu eleman metodu (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.

Alıcı ve malafa malzemesi çelik ve elastik olarak alınmıştır. Sınır koşulu olarak, alıcı ve malafanın dış yüzeylerinin X , Y ve Z koordinatlarında hareketsiz olduğu kabul edilmiştir. Katı yakıtta sadece Z yönünde 250 mm'lik bir deplasman verilmiştir. Yakıtın modellemesinde Ansys programında nonlinear malzeme durumu için çoklu doğrusal izotrop pekleşme (MISO) ve geometrik nonlinear durum için ise NLGEOM, ON yaklaşımları kullanılmıştır. Analizin ana noktalarından birini teşkil eden kontakt yüzeyler, alıcı-katı yakıt ve katı yakıt-malafa arasında tanımlanmıştır. Bu tanımlamada Coulomb modeli ($\tau_F = \mu \sigma_N$) kullanılmış olup, $\mu=0.01$ alınmıştır. Katı yakıt ekstrüzyonu sıcak ortamda yapıldığından dolayı, yakıtın $+74^\circ\text{C}$ 'deki gerilme gerinim verileri kullanılmış ve ısı analizi için katı yakıt yüzeyine $+74^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır.

Modelin geometrik ölçüleri ve sonlu eleman tipine ait bilgiler modelleme bölümünde verilmiştir. Kullanılan Ansys paket programında yapılan nonlinear çözüm sonucunda katı yakıtın ekstrüzyon şekillendirmesine ait simülasyon, hidrostatik basınç, gerilme ve termal ile mekanik gerinim değerleri elde edilmiştir.

Katı yakıt, alıcı ve malafanın baz alındığı simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçları aşağıda belirtildiği şekilde sıralayabiliriz:

- Yakıt malzemesi gerçekte zamana bağlı elastik-viskoplastik mekanik özelliğe sahip olmasına karşın, modeli oturtmak için zamana bağımlı etki ihmal edilmiş ve yakıt malzemesinin mekanik özellikleri elastik-plastik olarak kabul edilmiştir. İlerde yapılacak çalışmalarda zamana bağlı etkinin hesaba katılması, bu bağlamda yakıtla ilgili gerekli girdi verilerinin temini yerinde olacaktır.
- Modellemede yakıt alıcı içinde tam kontakt halindedir. Bunun neticesinde yakıt konik bölüme gelene kadar sürtünmesiz ortamda hareket etmesi gerekirken fazladan sürtünme kuvvetlerine maruz kalmıştır. Ayrıca, yakıt ile alıcı arasında hiç boşluk bulunmadığından konik bölümde yakıt uç kısımlarından daralmaya başlarken arka kısımlarında Poisson etkisinden dolayı genişleyememiştir. Bu nedenle, yakıt alıcı ağının içine bir miktar girmek durumunda kalmıştır. Alıcının yakıt giriş bölümü yakıtın çapından daha geniş tutularak, yakıtın alıcı içinde daha rahat yol alabilmesi, gerekli genişlemeyi yaparak alıcı ağına girmemesi ve çıkış bölüme ulaşması sağlanabilir.

- Gerçek ekstrüzyon işleminde yakıt alıcı içine rulolar halinde yerleştirilmektedir. Modellemede ise yakıt silindirik bir blok olarak alınmıştır. Yakıtın tek parça halindeki ekstrüzyonu rulo halindeki ekstrüzyona göre daha zordur. Modellemede yakıtın fiziksel durumu gerçekteki benzer bir yapıda olması sonuçları daha da gerçekçi olmasına yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışmasıyla çok karmaşık bir doğaya sahip katı yakıt ekstrüzyon şekillendirmesi probleminin sonlu eleman yöntemiyle modellenebileceği gösterilmiştir. Bir sonlu eleman modeli, uygulamaları ancak malzeme ve sürtünme modelleri ile beraber sınır şartlarının gerçeğine yakın tanımlanması oranında başarıya ulaşabilir.



KAYNAKLAR

1. R. W. Clough “The Finite Element in Plane Stress Analysis”, Proc. 2nd ASCE Conf. On Electronic Computation, Pitsburg, PA, 1960.
2. M. K. Jana, K. Renganathan and G. Venkateswara Rao “Effect of bulk modulus variation with pressure in propellant grain elastic stress analysis” Computers & Structures, V. 26, 1987, pp. 761-766
3. G. Herder, F.P.Weterings, and W.P.C. de Klerk “Mechanical Analysis on Rocket Propellant” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, V. 72, pp. 921-929, 2003
4. Irving W. Jones, E. Pierre-Louis “A linear thermoviscoelastic material model for solid rocket motor structural analyses”Computers & Structures, V. 21, 1985, pp. 235-243
5. D.J. Townend, R.C. Warren “Relaxation in Double Base Propellants” V. 26, January 1985, pp 79-83
6. M. K. Jana, K. Renganathan and G. Venkateswara Rao “A method of non-linear viscoelastic analysis of solid propellant grains for pressure load”Computers & Structures, V. 52, 3 July 1994, pp. 61-67
7. A. I. Borovkov, D. V. Shevchenko “Non-Linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process” www.fea.ru.
8. L. Çapan, Metallere Plastik Şekil Verme Yöntemleri, 3. basım, Çağlayan Kitapevi, 1999.

9. Perzyna, P. Fundamental problems in viscoplasticity, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 9, Academic Press, New York, pp. 313-377 (1968).
10. Peirce, D., Shih, C.F., and Needleman, A., A tangent modulus method for rate dependent solids, *Computers & Structures*, Vol. 18, pp. 975–888 (1984).
11. Anand, L., "Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 104, pp. 12-17 (1982).
12. ANSYS theory manual for release 5.6.
13. Mielnik E.M., *Metalworking science and engineering*, N.Y.:McGraw-Hill, 1991.
14. S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 2nd Ed. Addison-Wesley, 1991.