

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMANLAR, SPH, EULER VE ALE
METODLARI İLE DÖVME SİMÜLASYONU**

**İsmail BİCAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2004**

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMANLAR, SPH, EULER VE ALE
METODLARI İLE DÖVME SİMÜLASYONU**

**İsmail BİCAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN**

**GEBZE
2004**

ÖZET

Metallerin plastik şekillendirme yöntemi ile imal edilmesi vazgeçilemez bir imalat yöntemidir. Dövme yöntemi ile imalatı işlemin doğası gereği ürünün kalitesi birçok ve birbirine bağımlı/bağımsız değişkene bağlıdır. Bu yöntem ile imal edilen ürünlerin istenilen nitelikte imali bahsi geçen değişkenlerin tespitine ve kontrol edilmesine bağlıdır. Günümüzde imalat uygulamaları genellikle deneme-yanılma esasına dayanan tecrübe ile elde edilen bilgiler ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada, maliyeti yüksek olan deneme yanılma süreci yerine bu süreçten tasarruf sağlayacak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak işlemin benzetiminin (simülasyon) yapılması anlatılmıştır. Daha sonra son yıllarda yeni gündeme gelen metodlar hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın sonunda ise klasik sonlu elemanlar yöntemi ve yeni yöntemler kullanılarak bir örnek problem üzerinde çözümler yapılmış ve yeni yöntemlerin hacim plastik şekillendirme işlemine uygulanabilirliği araştırılmıştır.

SUMMARY

Bulk metal forming process is the fundamental forming application. Lots of dependent/independent factors are effect on the product quality for forging. To ensure high product quality, must be difined and control these factors. At recent years manufacturing in the metal forming area based on try and trial philosophy. But now we have another choice. This choice is computing the simulation of process.

In this study, firstly two newly finete elements methods (ALE and SPH) introduced. After that, these methods applied on a bulk forming example. And finally, collected results discussed.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince engin bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren ve destekleyen danışmanım Sayın Yrd. Doç.Dr. Hasan KURTARAN'a, benden bir idareci ve danışman olarak yardımlarını esirgemeyen Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI'ya, mesleki bilgi ve becerilerini benden esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP'e çalışma hayatımda ve tez çalışmamda bana büyük anlayış gösterip yardım eden Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümü araştırma görevlileri, Eyyub BAĞCI, Ufuk YAVUZ, Mehmet ERMURAT ve George Washington University/NCAC araştırma görevlisi Murat BÜYÜK'e, tenisyonimiz Selahattin UYSAL'a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Ayrıca, benden yazılım ve bilgi desteğini esirgemeyen FİGES Ltd. Şti. ve Dr. Tarkan ÖĞÜT'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sevgilerini, maddi ve manevi desteklerini üzerimden esirgemeyen anneme, babama ve aileme sevgilerimle...

Ve birtaneme...

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. HACİM METAL ŞEKİLLENDİRME	3
2.1. Dövme İşleminin Tanımı	3
2.2. Kullanım Alanları	3
2.3. Dövme İşleminin Üstünlükleri	5
2.4. Dövme İşleminin Sınıflandırılması	9
2.4.1. Açık Kalıpta Dövme	9
2.4.2. Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme	10
2.4.3. Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme	10
2.4.4. İleri Ekstürüzyon Dövme	11
2.4.5. Geriye Ekstürüzyon Dövme	12
2.4.6. Yığma	12
2.4.7. İzotermal Dövme	13
3. YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU ELEMENLAR METODU İLE MODELLENMESİ	14
3.1. Giriş	14
3.1.1. Mod Süperpozisyon Metodu	15
3.1.2. Direk İntegrasyon Metodu	16
3.1.3. Mod Süperpozisyon ve Direkt İntegrasyon Metodlarının Karşılaştırılması	17
3.1.4. Kapalı ve Açık (Implicit-Explicit) Zaman İntegrasyonu Yöntemlerinin Karşılaştırılması	18
3.2. Açık (Explicit) Sonlu Elemanlar Metodu	19
3.2.1. Lagrange Formülasyonu	19
3.2.2. Virtüel İş Prensibi	20
3.2.3. Diskritizasyon Uzayı	23
3.2.4. Zaman Diskritizasyonu	26
3.2.5. Zaman Adımı Kriteri	27

3.3. Malzeme Süreklilik Denklemleri	29
3.3.1. İzotropik Elastik Malzeme Modeli	29
3.3.2. Kinematik Sertleşme Elastik-Plastik Malzeme Modeli	31
3.3.3. Gerinim Hızına Bağlı Malzeme Modeli	33
4. SPH METODU	34
4.1. Giriş	34
4.2. SPH Metodunun Temel Prensipleri	35
4.3. LS-DYNA ile SPH Metodunun Uygulanması	38
4.3.1. Denklemler	40
4.3.2. Parçacıkların İlişkilendirilmesi	41
4.3.3. Malzeme Modelleri	43
4.3.4. SPH Elemanların Kullanımı	44
4.3.5. Pratikte Uygulama	47
5. HACİM METAL ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYON UYGULAMALARI	50
5.1. Açık Kalıpta Dövme Simülasyonu Uygulaması	51
5.1.1. BDT Modeli	51
5.1.2. Lagrange Metodu İle Simülasyon	51
5.1.3. SPH Metodu İle Simülasyon	61
5.1.4. ALE Metodu ile Simülasyon	68
5.1.5. DEFORM ile Simülasyon	76
5.1.6. Sonuçların Değerlendirilmesi	85
6. SONUÇLAR/ÖNERİLER	89
KAYNALAR	91
ÖZGEÇMİŞ	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
x_i	partikülün uzaydaki konumu
t	zaman
X_i	partikülün ilk koordinatları
V_i	partikülün ilk hızları
A_i	partikülün ilk ivmeleri
$\dot{x}_i$	partikülün mevcut hızları
$\ddot{x}_i$	partikülün mevcut ivmeleri
$T_i(t)$	zorlama kuvvetleri
S_T	zorlama kuvvetlerinin uygulandığı yüzey
$d_i(t)$	tanımlanan yer değiştirmeler
S_d	cisim yüzeyi üzerinde bir parça
$b_i(t)$	dış cisim kuvvetleri
V	üç boyutlu cismin hacmi
σ_{ij}	cauchy gerilme tensörü
ρ	malzemenin mevcut yoğunluğu
n_i	S_T zorlama yüzeyine normal doğrultuda birim vektör
δx_i	eleman içindeki bir noktanın yer değiştirmesi
n	elemandaki düğüm noktası sayısı
α	düğüm noktasının numarası
N_α	α düğüm noktasındaki şekil fonksiyonu
$\delta x_{\alpha i}$	α düğüm noktasındaki yer değiştirmeler
$x_{\alpha i}$	α noktasındaki yer değiştirmeler
$\dot{x}_{\alpha i}$	α düğüm noktasındaki hızlar
$\ddot{x}_{\alpha i}$	α düğüm noktasındaki ivmeler
ξ, η, ζ	eleman içindeki local noktanın koordinatları
$\xi_\alpha, \eta_\alpha, \zeta_\alpha$	α noktasındaki koordinatlar
$[M]$	kütle matrisi
$\ddot{\mathbf{x}}$	ivme vektörü
$\{F\}$	tüm iç ve dış kuvvetlerin vektörel toplamı
t_n	zaman noktası
Δt_n	zaman adımı
Δt_e	kritik zaman adımı
l	kritik uzunluk
c	dalga hızı

E	elastisite modülü
$\hat{e}_1, \hat{e}_1, \hat{e}_1$	döndürülmüş koordinat sisteminin birim vektörleri
$\rightarrow r_{13}$	1 ve 3 noktaları arasındaki vektör
$\rightarrow r_{24}$	2 ve 4 noktaları arasındaki vektör
v	hız
v^m	kabuğun orta yüzeyindeki hız vektörü
θ	açısal hız vektörü
z	bir nokta ile eleman orta düzlemi arasındaki uzaklık
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Gerinim hızı (deformasyon hızı)
s_{ij}	değişken gerilme
ϵ_{ij}	değişken gerinim
p	basınç
ϵ_v	hacimsel gerinim
σ_{ij}	cauchy gerilmeleri
ϵ_{ij}	cauchy gerinimleri
δ_{ij}	kronecker delta
$\dot{s}_{ij}$	değişken gerilme hızları
$\dot{\epsilon}_{ij}$	değişken gerinim hızları
$\dot{p}$	basınç hızı
$\dot{\epsilon}_v$	hacimsel gerinim hızı
G	malzeme kayma modülü
K	malzeme bulk modülü
s_{ij}^∇	değişken jaumann gerilme hızları
Ω_{ij}	dönme tensörü
σ_y	akma gerilmesi
s_{ij}^e	elastik güncellenen değişken gerilmeler
s_{ij}^c	düzeltilmiş değişken gerilmeler
s_{eff}^e	elastik güncellenen değişken gerilmelerden çıkan eşdeğer gerilme
$\Delta \epsilon_{ij}^p$	plastik gerinim artımı
E_T	teğet modülü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1 Şekillendirme işlemine göre metallerde tanecik yönlenmesi	6
2.2 Açık kalıpta dövme	9
2.3 Kapalı kalıpta çapaklı dövme	10
2.4 Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme	11
2.5 İleri ekstürüzyon dövme	11
2.6 Geriye ekstürüzyon dövme	12
2.7 Yığma işlemi	12
2.8 İzotermal dövme	13
3.1. Hareket Denkleminin Çözüm Yöntemleri.[Büyük M., 2002]	15
3.2 Lagrange Uzayında Bulunan 3 Boyutlu Cisim.	20
3.3:8 Düğüm Noktalı(hexahedron) izoparametrik elemanın şekil fonksiyonları. [Hallquist J.O., 2001].	24
3.4 Malzemenin elastik-plastik davranışı ($\beta=0$ kinematik, $\beta=1$ izotropik plastik sertleşme) (Krieg,et al.)	31
4.1 Parçacık dağılımı [T. Belytschko et al., 1996]	36
4.2 Silindir geometrisi üzerine iki farklı şekilde dağıtılmış SPH elemanlar [Lacome J., 2001].	38
4.3 LS-DYNA’da SPH için program döngüsü	40
4.4 Komşu parçacıkların araştırılması	42
4.5 Başlangıç düğünleştirme uzunluğunun belirlenmesi	45
4.6 Simetri düzlemi yerine sanal parçacıkların oluşturulması	47
4.7 SPH Uygulamalarında izlenen döngü	48
4.8 Geometriden SPH modeline geçiş için sonlu elemanlar ağı kullanılmaktadır.	48
5.1 Sonlu Elemanlar modelleri hazırlanırken izlenen yol	50
5.2 ANSYS™ ve DEFORM™ için hazırlanan katı modeller.	51
5.3 ANSYS™ önışlemcisindeki parçaların görünüşü	52
5.4 Parçaların LSPREPOST™ önışlemcisindeki genel görünüşü	54
5.5 Şekillendirme işleminin gelişimi	55
5.6 0,02 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	55

5.7 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	56
5.8 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	56
5.9 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	57
5.10 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	57
5.11 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	58
5.12 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	58
5.13 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	59
5.14 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	59
5.15 0,1 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	60
5.16 Kalıp yükünün zamana göre değişimi	60
5.17 SPH modelinin genel görünümü	61
5.18 0,02 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	63
5.19 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	63
5.20 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	64
5.21 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	64
5.22 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	65
5.23 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	65
5.24 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	66
5.25 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	66
5.26 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	67
5.27 0,1 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	67
5.28 Kalıp yükünün zamana göre değişimi	68
5.29 ALE sonlu elemanlar modeli	69
5.30 ALE modelinde şekillendirme işleminin gelişimi	71
5.31 0,02 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	71
5.32 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	72
5.33 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	72
5.34 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	73
5.35 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı	73
5.36 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	74
5.37 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	74
5.38 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	75
5.39 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	75
5.40 0,1sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı	76

5.41 Kalıp yükünün zamana göre değişimi	76
5.42 Sonlu elemanlar modelinin görünüşü	77
5.43 İşparçasının şekillendirilmesi	79
5.44 0,04 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	79
5.45 0,06 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	80
5.46 0,06 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	80
5.47 0,08 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	81
5.48 0,1 sn’de parça üzerindeki gerinim dağılımı	81
5.49 0,02 sn’de parça üzerindeki gerilme dağılımı	82
5.50 0,04 sn’de parça üzerindeki gerilme dağılımı	82
5.51 0,06 sn’de parça üzerindeki gerilme dağılımı	83
5.52 0,08 sn’de parça üzerindeki gerilme dağılımı	83
5.53 0,1 sn’de parça üzerindeki gerilme dağılımı	84
5.54 Kalıp yükünün zamana göre değişimi	84

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
2.1 Dövme parçaların kullanıldığı sektörler.	4
2.2 Dövme işleminin diğer imalat metodlarına karşı üstünlükleri	6
2.3 Dövmede kullanılan çeşitli metallerin özellikleri ve kullanım alanları	7
3.1 Mod Süperpozisyon ve Direk İntegrasyon Metodları Arasındaki Farklar.	17
5.1 Parçaların eleman sayısı	52
5.2 AISI4140 çelik için Gerinim Hızına Bağlı Malzeme Modeli parametreleri	53
5.3 Parçaların sahip olduğu eleman sayısı	62
5.4 ALE sonlu elemanlar mdeline ait eleman sayıları	70
5.5 AISI4140 çeliği için kullanılan akma gerilmeleri	77
5.6 AISI4140 malzemesinin gerinme hızı ile akma gerilmesinin değişimi	78
5.7 Metodların hesaplama maliyetleri	85
5.8 Metodlara göre hesap maliyeti	85
5.9 Simülasyonlardan elde edilen maksimum kalıp yükleri	86
5.10 Kalıp yükü % fark miktarı (DEFORM çözümüne kıyasla)	87
5.11 Maksimum eşdeğer gerilmeler	87
5.12 Maksimum eşdeğer gerinmeler	88

1. GİRİŞ

Metallerin dövülerek şekillendirilmesi çağlar öncesinden bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. Malzemeye kazandırdığı özellikler sebebiyle günümüzde de vazgeçilemez bir üretim yöntemidir.

Metal şekillendirme teknolojisi deneyim odaklı bir teknolojidir. Genellikle yıllar süren deneme yanılmalara dayanan bir bilgi ve tecrübe birikimi gerektirmektedir. Fiziki bir hadise olarak bakılacak olursa plastik şekillendirme işleminin matematiksel ifade edilmesi bir hayli zordur. Malzeme akışı, malzeme ile kalıp arası sürtünmeler, plastik akma sırasında oluşan ısı ve bu ısının transferi, malzemenin mikro yapısı ile işlem şartları arasındaki ilişkiler, hesaplanması veya tahmin edilmesi çok güç değişkenlerdir. [Altan, T. et al., 1983]

Metallerin plastik şekil değişimlerini ifade eden analitik çözümler olmakla beraber bunlar karmaşık yapıların çözümü için yeterli değildir. Özellikle kalıp tasarımı ve işlem şartlarının belirlenmesi sırasında, parçanın hatasız üretimi için , başlangıç ve bitmiş parça arasındaki ilişkilerin tahmin edilmesi veya hesaplanması gerekmektedir. Genellikle kullanılan yöntem deneme yanılma ile elde edilen, tecrübeye dayanan kestirimlerin yapılmasıdır. Burada karşımıza alternatif seçenek olarak sonlu elemanlar yöntemi çıkmaktadır.[Rowe G.W., et al. 1991]

Sonlu elemanlar yöntemi 1800'li yılların sonlarında ortaya atılmış olmasına rağmen, uygulanabilmesi ancak hesaplama kabiliyeti yüksek bilgisayarların ortaya çıkmasıyla mümkün olmuştur. Günümüzde akışkan dinamiği problemlerinden insan dokularının analizine, ısı akış problemlerinden jeolojik hareket tahminine kadar bir çok farklı sahada kullanılan sonlu elemanlar yönteminin özellikle hacim metal şekillendirme işlerine uygulanması son 10 yıla dayanmaktadır. Bunun sebebi yapıda meydana gelen büyük şekil değişimlerine uyumu sağlayan 3B tekrar ağ oluşturma (remeshing) algoritmalarının ancak son yıllarda geliştirilmesi olarak gösterilebilir.[Adams V et al.,1998]

Bu çalışmada bir çok fiziki değişkene bağlı olan hacim metal şekillendirme işleminin analizi için farklı sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Son yıllarda ortaya çıkan ve metal şekillendirme dışında birçok sahada kullanılan bu yöntemlerin hacim metal şekillendirme analizlerinde karşılaşılan zorlukları aşmada kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tez çalışmasının sonunda örnek bir problem üzerinde, bahsi geçen yöntemler ile simlasyon uygulaması yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

2. HACİM METAL ŞEKİLLENDİRME

Plastik metal şekillendirme işlemi iki ana başlık altında incelenmektedir. Hacim metal şekillendirme ve saç metal şekillendirme olarak ayrılan bu iki grup işlenilen hammaddenin saç yahut kütük malzeme oluşuna göre birbirinden ayrılmaktadır. Hacim metal şekillendirme işleride kendi arasında dövme, haddeleme, ekstrüzyon ve çekme olmak üzere alt dallara ayrılmaktadır. Bu çalışmanın konusu bu alt dallardan yalnızca dövme ile metal şekillendirmeyi kapsamaktadır. [Altan T, 1983]

2.1. Dövme İşleminin Tanımı

İmalat tezgahlarının alt ve üst koçlarına monte edilmiş kalıplar arasına, dövme sıcaklığına tavllanmış veya soğuk halde yerleştirilmiş olan metal parçasının üzerine, darbe kuvvetleri uygulanarak, metal parçanın kalıcı şekil değişimine (plastik deformasyona) uğratılmasına dövme (forging) denir. Dövme işlemi işparçası sıcaklığına göre sıcak, soğuk ve ılık (warm) dövme olarak sınıflandırılmaktadır. Ağır, az adetli, hassas ölçü gerektirmeyen ve karmaşık şekiller içermeyen parçaların dövme üretiminde açık kalıplar; yüksek adetli, dar ölçü toleranslı ve karmaşık şekilli parçaların dövme üretiminde kapalı dövme kalıpları kullanılır. Dövme parça ağırlıkları birkaç gram ile 150 ton ve üzerinde olabilir.[DPT, 1995]

Konvensiyonel çekiç ve pres dövme üretimleri dışında, sıcak kafa toplama (hot upsetteing), haddeleme (roll forging), dairesel haddeleme (ring rolling), diğer karakteristik dövme türlerini ifade eder. Bu tür dövme üretimlerinin yapıldığı tezgahlar, karakter olarak çekiç ve preslerden çok farklıdır. Açık veya kapalı dövme kalıpları, yüksek alaşımlı takım çeliklerinden imal edilirler. (H13,SAE 2714 gibi.) [Çapan L, 1989]

2.2. Kullanım Alanları

Dövme yöntemi ile üretilmiş demir ve demirdışı metal aksam parçaları, otomotiv, havacılık, savunma, madencilik, ağır hizmet araçları, iş makinaları ve her

türlü makina sanayiinde kullanılırlar. Dünya'daki dövme sanayii hammaddelerini aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.[DPT, 1995]

- Yapı (imalat) çelikleri
- Paslanmaz çelikler
- Takım çelikleri
- Alüminyum alaşımları
- Bakır ve bakır alaşımları
- Magnezyum alaşımları
- Nikel alaşımları
- Titanyum alaşımları

Karbon çelikleri ve az alaşımlı çelikler olarak ikiye ayrılan, yapı çeliklerinden üretilmiş dövmeler, en fazla otomotiv sanayii ve her türlü makina imalat sanayinde kullanım alanı bulurken; paslanmaz çelik, alüminyum alaşım, titanyum alaşım ve nikel alaşım dövmeleri, ağırlıklı olarak, havacılık ve harp sanayinin en kritik aksam parçalarının üretiminde kullanılmaktadır.

Tablo 2.1 Dövme parçaların kullanıldığı sektörler.

Sektör	Kullanım Alanı
Otomotiv ve İş Makinaları	Dövme ile imal edilen parçaların sağlamlıkları bu sektör için bu tip ürünleri vazgeçilmez kılmaktadır. Dövme parçalar genellikle araçların ani ve büyük yüklere mazuz kalan ve güvenlik gerektiren, aktarma organları, tekerlek aksları, şaft, akson, viraj çubuğu gibi kısımlarında kullanılmaktadır.
El Aletleri ve Çeşitli Ekipmanlar	Sağlamlık ve korozyon dayanımı nedeniyle pense, çekiç, tornavida gibi el aletlerinin yanısıra, birçok cerrahi aletler, elektrik dağıtım

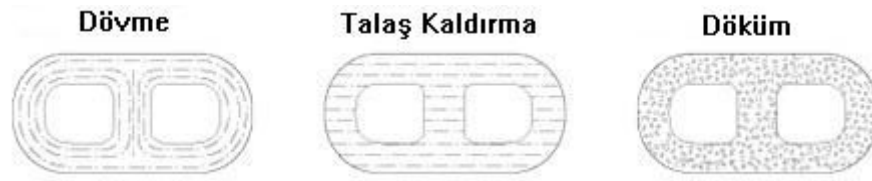
	ekipmanları, koruma baretleri gibi ekipmanlarda dövülerek imal edilmektedirler
Genel Makina Sektörü	Tekstil makinarı, elektrik jenaratörleri, celik üretim makinaları, kimya gibi bir çok sektörde kullanılan makina ve ekipmanlar dövme parçalar içermektedir.
Tesisat	Korozyon, ısıl direnci nedeniyle kimyasal madde hatları, valfler, buhar armatürleri, flanşlar v.s. dövülerek imal edilirler.
Uzay ve Havacılık	Ağırlık-mukavemet oranı ve güvenilirlik havacılık ve uzay sanayi için vazgeçilmezdir ve hayati önem taşımaktadır. Bu sebeble ticari ve savaş uçaklarının, helikopterlerin, uzay mekiklerinin, roketlerin birçok parçası demir esaslı , demir-dışı veya özel alaşımların dövülmesiyle imal edilmektedir. Kanat bağlantı parçaları, iniş takımı parçalrı, türbin motor parçaları bunlardan birkaçı olarak sayılabilir.
Savunma Sanayii	Bu sektörde dövme parçalar hayati önem taşımaktadır. Tüfek tetiğinden nükleer denizaltıların şaftlarına kadar hemen her alanda dövme ürünleri kullanılmaktadır. Muharebe tankları, güdümlü füzeler, top bataryaları, zırhlı personel taşıyıcılar v.s. birçok dövme parça kullanılarak imal edilirler.

2.3. Dövme İşleminin Üstünlükleri

İnsanlık tarihi boyunca birçok mamülde uzun ömürlülük, dayanıklılık ve güvenilirlik gibi kriterlerin sağlanması için metal malzemelerin kullanıldığını görmekteyiz. Günümüzde büyük yükler, sıcaklıklar gibi zor şartlarda çalışan parçaların imalatında dövme yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Dövme parçalar diğer imalat yöntemleriyle imal edilmiş parçalara nispetle daha mukavim ve daha güvenilirdir. Yapısında gaz boşlukları gibi kusurlar bulundurmadığından dövme parçalarda, çalışma yükleri altında beklenmedik kırılmalar meydana gelmez.

Dövmenin sağladığı üstünlükler kaybedilmeden parça hassasiyetleri yükseltmek için talaşlı imalat gibi ek işlemler uygulansa bile, döverek imalat daha ucuza mal olur.

Dövme işlemi sırasında malzeme akmaya maruz kalmaktadır. Bu sebeble yapıdaki tanecikler akış yönünde sıralanmaktadır. Sıcak dövme sırasında tekrar-kristalleşme sıcaklıklarının üzerine çıkıldığından yapıdaki kusurların çoğu ortadan kaldırılır ve homojen bir yapı elde edilir. Bu durum malzemenin darbe ve yorulma direncini arttırdığı gibi yüksek mukavemet değerlerinin elde edilmesini sağlar.



Şekil 2.1 Şekillendirme işlemine göre metallerde tanecik yönelmesi

Dövme ile sağlanan yüksek mukavemet-ağırlık oranları, mevcut tasarımda kesit kalınlıklarının azaltılmasına olanak vermektedir. Tasarımcı aynı dayanıma sahip parçayı daha hafif yahut daha ucuz malzeme kullanarak tasarlayabilmektedir. Dövme yöntemiyle çok geniş bir ağırlık aralığında ve çok değişik şekilli parçalar imal edilebilmektedir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 2.2) döverek imalat, diğer imalat yöntemleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 2.2 Dövme işleminin diğer imalat metodlarına karşı üstünlükleri

Kıyaslanan İmalat Yöntemi	Dövme işleminin Avantajları (Aynı Tip Malzeme Kullanıldığında)
Döküm	• Daha mukavim • Daha az kusurlu • Uzun ömürlü ve güvenilir • Isıl işleme daha uygun • Talebe göre uyarlanabilir.
Kaynak	• Malzeme Tasarrufu • Daha mukavim • Tasarım ve kontrol maliyeti daha düşük • Daha tutarlı ve daha yüksek metalurjik özellikler
Talaşlı İmalat	• Daha geniş ölçü ve malzeme seçeneği

	• Tanecik akışı ile sağlanan daha yüksek dayanım • Malzeme tasarrufu • Daha az ikincil operasyon gereksini
Toz Metalurjisi	• Daha mukavim yapı • Parça bütünlüğü • Daha az ikincil operasyon gereksini • Tasarımda esneklik • Daha ucuz malzeme kullanımı
Kompozit	• Daha ucuz malzeme kullanımı • Daha hızlı üretim • Daha geniş işletim sıcaklığı aralığı • Daha güvenilir işletme performansı

Kullanım sahasında ihtiyaç olan özellikler göre imal edilen parçaların imal edildikleri malzemelerde değişkenlik göstermektedir. Hemen her metal, dövme yöntemiyle imalat için kullanılabilir. Aşağıdaki tabloda(Tablo 2.3) genel metaller, özellikleri ve kullanım alanları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2.3 Dövmede kullanılan çeşitli metallerin özellikleri ve kullanım alanları

Metal	Özellikleri	Kullanım Sahası
Aluminyum	Kolayca dövülür Düşük yoğunluğa sahiptir ve iyi bir mukavemet-ağırlık oranı sağlar	İşletim sıcaklığının 200C'yi geçmediği makina aksamalarında ve uçak sanayiinde tercih edilir.
Magnezyum	Ticari metaller arasında en düşük yoğunluğa sahip olanıdır.	Genellikle 250C'nin altındaki çalışma koşullarında kullanılır. Bazı alaşımları kısa süreli olmak kaydıyla 350C civarındaki sıcaklıklar altında kullanılabilir.
Bakır-Bronz-Pirinç	Dövmeye yatkındırlar. Elektrik ve ısı iletkenlikleri yüksektir.	Korozyon direnci gerektiren kısımlarda kullanılırlar.
Adi Karbonlu Çelikler-Düşük Alaşımlı Çelikler	Malzeme maliyeti düşüktür. Kolay işlenebilir. Tatmin edici mekanik özelliklere sahiptir.	500 C' ulaşan sıcaklıklar altında kullanılabilir.

	İstenilen özellikler ısıtım işlem ile kazandırılabilir.	
Yüksek Alaşımli Çelikler	Malzeme maliyeti düşüktür. Tatmin edici mekanik özelliklere sahiptir.	Otomobil ve iş makinalarının birçok parçası için tercih edilmektedir. Biyel kolu, pistonlar, krank milleri, süspansiyon parçaları v.s.
Özel Alaşımli Çelikler	Dövme ile malzemenin akma sınırı oda sıcaklığında 2000MPa'ın üzerine çıkmaktadır.	Ulaştırma sektörü, maden sektörü endüstriyel makina aksamlarında kullanıldığı gibi yüksek dayanım gerektiren füzeler, uçaklar gibi yapılarada tercih edilir.
Paslanmaz Çelikler	Aşınma direnci çok yüksektir.	Başınçlı kaplar, buhar türbinleri, gıda ve kimyasal madde üretim tesisleri, petrokimye tesisleri ve hijyen gerektiren uygulamalarda tercih edilir. İşletim sıcaklıkları yüksek gerilim altında 700 C'ye, düşük gerilimler altında 1000 C ve üzerine kadar ulaşmaktadır.
Nikel Esalı Süper Alaşımlar	Yüksek sürünme ve kopma mukavemeti Yüksek paslanma direnci	İşletim sıcaklığının 650 ila 1000 C arasında olduğu, türbin parçaları, vanalar, ek parçaları gibi yerlerde kullanılır.
Titanyum	Yüksek mukavemet Düşük yoğunluk Mükemmel aşınma direnci Oda sıcaklığında 800-1250MPa akma direnci	550 C civarındaki uygulamalar için tercih edilir. Aynı özelliklere sahip bir yapıda çeliğe göre %40 ağırlık kazanımı sağlar. Uçakların motor ve yapısal aksamalarında, gemi parçalarında, kimya ve ulaşım sektörlerinde kullanılmaktadır.
Refraktör Metaller	Kolonbiyum, molibden, tantalyum, tungsten ve alaşımları bu guruba girerler. Yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek sürünme dirençleri vardır.	İleri kimyasal, elektrik sistemleri, nükleer tesisler gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında ve uzay-havacılık sanayiinde kullanılır.
Berilyum	Hafif, sert ve kırılmandır. Genellikler alaşım olarak	Nukleer tesislerde, ısı emiliminin olduğu

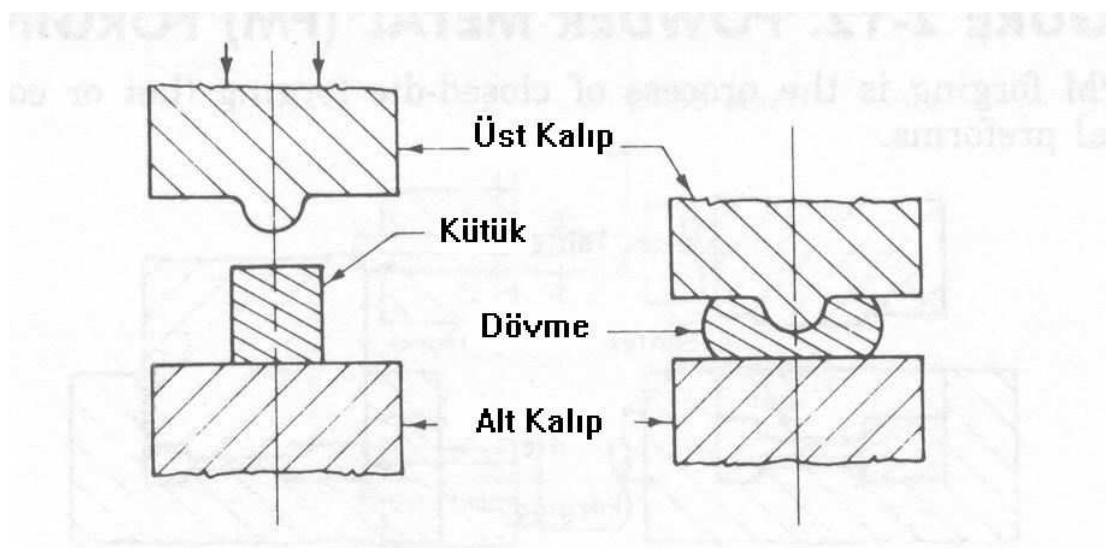
	kullanılır. Yüksek erime sıcaklığına sahiptir. Sinterlenmiş, ingot yahut toz haldeki berilyumu işlemek için özel dövme tekniklerine ihtiyaç vardır.	yapılarda kullanılır.
Zirkonyum	Yüksek aşınma direnci	Çok sınırlı sayıda imalat yapılmaktadır en büyük kullanım alanı nükleer uygulamalardır.

2.4. Dövme İşleminin Sınıflandırılması

Şekillendirilen metalin sıcaklığı, kalıpların sıcaklığı ve tipi, kullanılan tezgahın tipine göre çeşitli sınıflandırmalar yapmak mümkündür. Aşağıda en çok uygulanan dövme işlemi çeşitleri kısaca açıklanmıştır.

2.4.1. Açık Kalıpta Dövme

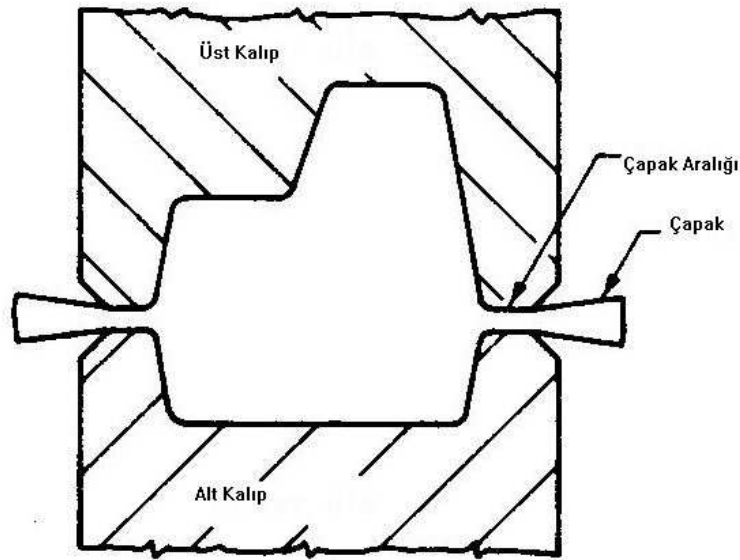
Açık kalıpta dövme bir sıcak şekillendirme işlemidir. Tavlanmış kütük (billet) pres veya çekiçlere bağlanmış olan düz veya basit şekilli kalıplar ile şekillendirilmektedir. Açık kalıpta dövme bir ön işlemdir, bitirme işlemine taslak parça oluşturmak için uygulanır. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.2 Açık kalıpta dövme

2.4.2. Kapalı Kalıpta Çapaklı Dövme

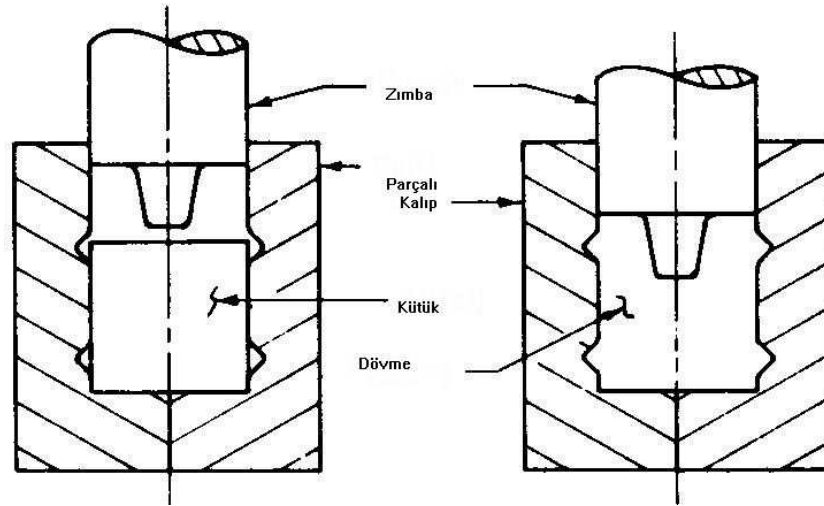
Bu işlemde kütük malzeme, istenen parçanın şeklinin (gravür) işlenmiş olduğu kalıp yarıları arasında sıkıştırılarak, kalıp boşluğunu doldurması için akmaya zorlanır. Malzemenin, kalıbı doldurmasını sağlamak üzere kullanılan kütüğün hacmi, kalıp boşluğu hacminden daha büyüktür. İşte bu fazla malzeme işlemin sonunda kalıp boşluğundan dışarıya taşırılır. Gravür dışına taşan ve daha sonra kesilerek atılan bu kısma çapak (flash) adı verilmektedir. Parça şeklinin tam olarak elde edilmesinde ve şekillendirme işlemin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesinde çapağın kontrolü çok önemlidir. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.3 Kapalı kalıpta çapaklı dövme

2.4.3. Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme

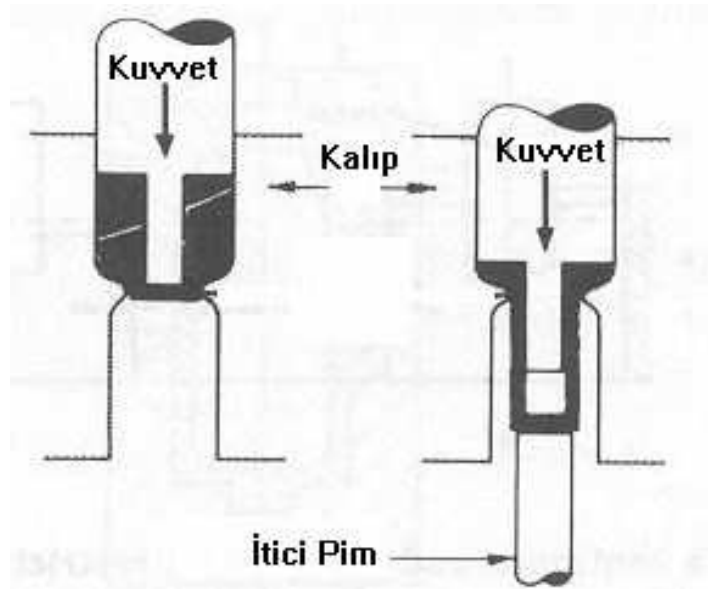
Bu işlemde kalıp boşluğunu doldurması istenen sıcak veya soğuk haldeki kütüğün hacmi dikkatle hesaplanır. Malzemenin kalıbı tam doldurması sağlanır, dışarıya taşmasına izin verilmez. Çapaksız dövme kalıpları birkaç parçadan oluşabilir. Uygulaması zordur fakat elde edilen parçalar yüksek ölçü hassasiyetine sahiptir. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.4 Kapalı Kalıpta Çapaksız Dövme

2.4.4. İleri Ekstrüzyon Dövme

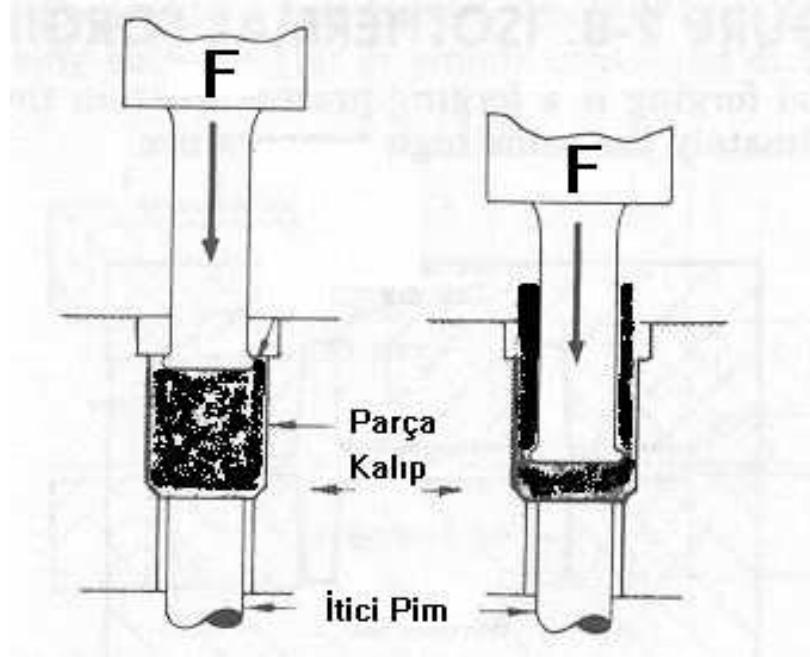
İleri ekstrüzyon dövme yönteminde hareketli üst kalıp malzemeyi (sıcak veya soğuk) sabit olan alt kalıba doğru itmekte ve kalıp boşluğundan akmasını sağlamaktadır. Malzeme kalıp hareketi yönünde akmaktadır. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.5 İleri ekstrüzyon dövme

2.4.5. Geriye Ekstürüzyon Dövme

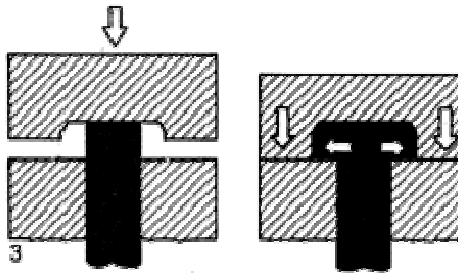
Bu işlemde hareketli üst kalıp alt kalıpta sabit duran kütüğe (sıcak veya soğuk) sabit bir basınç ile bastırılmaktadır. Uygulanan kuvvet ile malzeme hareketli kalıbın ters yönünde akmaya zorlanır. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.6 Geriye ekstürüzyon dövme

2.4.6. Yığma

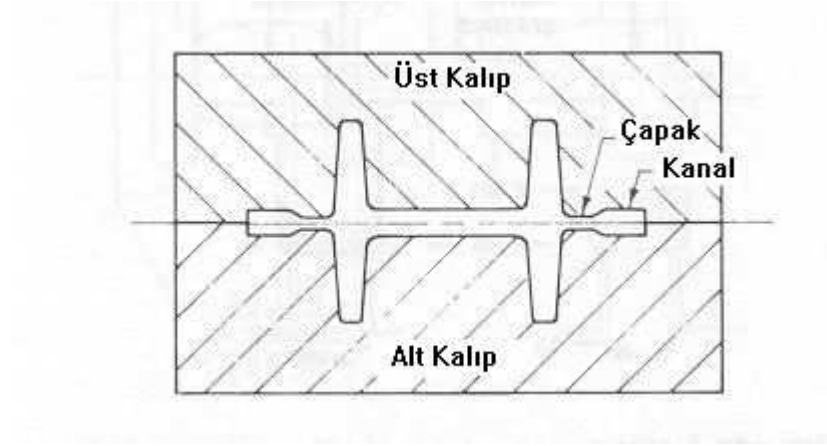
Yarımamül parçanın tümünün veya bir kısmının kesit alanını arttırmak için yapılan dövme işlemine yığma (upsetting) denir. Sıcak veya soğuk olarak uygulanmaktadır. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.7 Yığma işlemi

2.4.7. İzotermal Dövme

İzotermal dövme işleminde parça ve şekillendirmede kullanılan kalıplar, aynı veya birbirine çok yakın yüksek sıcaklıklarda tutulur. [Altan, T. et al., 1983]



Şekil 2.8 İzotermal dövme

3. YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU ELEMANLAR METODU İLE MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Metal şekillendirme prosesi tabiatı gereği hem geometri kaynaklı hemde malzeme kaynaklı olarak, doğrusal olmayan dinamik (non-linear dynamic) davranış gösteren fiziksel bir olaydır. Bu bölümde yapıların doğrusal olmayan dinamik davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile kestirimi hakkında bazı temel bilgilere yer verilmiştir. Genel hareket ve bünye denklemleri verildikten sonra sıklıkla kullanılan iki metod olan açık(explicit) ve kapalı (implicit) metodlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş ve bu iki metod avantaj ve dezavantajları ile kıyaslanmışlardır. Bölümün sonunda ise metal şekillendirme işlerinde sıklıkla kullanılan birkaç malzeme modeli hakkında bilgiler verilmiştir.

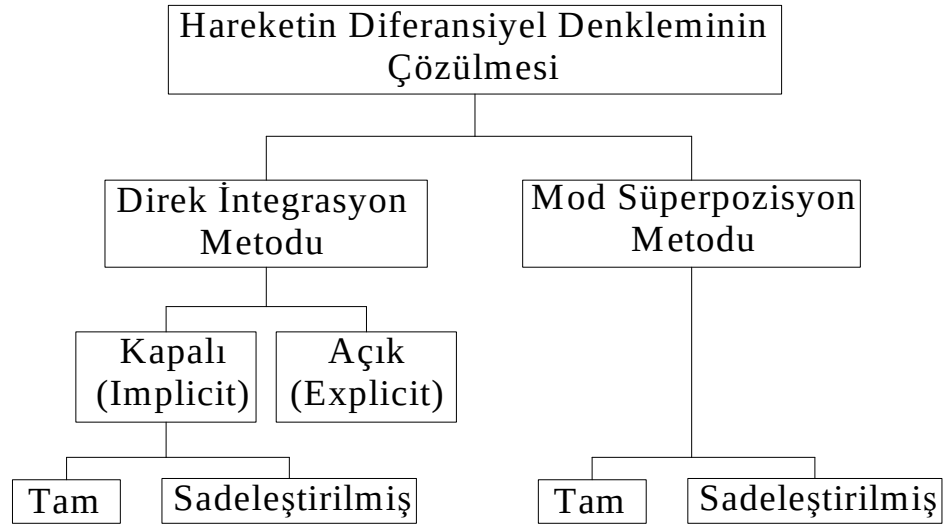
Yapıların hareketinin genel diferansiyel denklemini (Denklem 3.1) çeşitli yükleme ve sınır şartları altında nümerik olarak çözmek üzere sonlu elemanlar metodu yoğun olarak kullanılmaktadır.

$$[M]\left\{\ddot{u}\right\} + [C]\left\{\dot{u}\right\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.1)$$

Bu eşitliği iki ayrı şekilde çözmek mümkündür.

- Birinci yöntem Mod süperpozisyon metodu,
- İkinci yöntem ise Direkt integrasyon metodudur.

Bunlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir:



Şekil 3.1. Hareket Denkleminin Çözüm Yöntemleri.[Büyük M., 2002]

3.1.1. Mod Süperpozisyon Metodu

Bu metod dinamik analizlerde kullanılan bir çözüm tekniğidir. Yapının dinamik cevabının modal analiz sonucu çıkarılan mod şekillerinin toplanmasıyla elde edilmesi esasına dayanır. Doğrusal dinamik analizlerin hızlı çözümünde kullanılır.

Hareketin diferansiyel denklemini dikkate alırsak, mod süperpozisyon metodu $u(t)$ 'nin yapının mod şekillerinin doğrusal bir kombinasyonu olduğunu varsayar:

$$u(t) = [\phi]\{y\} \quad (3.2)$$

burada, $[\Phi]$ mod şekillerinden oluşan bir matristir $[\Phi] = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_\mu]$.

Hareketin diferansiyel denklemini $[\Phi]^T$ ile sadeleştirilirse:

$$[\Phi^T] M [\Phi] \left\{ \ddot{y} \right\} + [\Phi^T] C [\Phi] \left\{ \dot{y} \right\} + [\Phi^T] K [\Phi] \{y\} = [\Phi^T] f(t) \quad (3.3)$$

Bunun yanında mod şekillerinin simetrisinden:

$$[\Phi]_i^T M [\Phi]_j = [\Phi]_i^T C [\Phi]_j = [\Phi]_i^T K [\Phi]_j = 0, \quad i \neq j \quad (3.4)$$

ve:

$$[\Phi]_j^T M [\Phi]_j = 1 \quad (3.5)$$

$$[\Phi]_j^T C [\Phi]_j = 2\xi_j \omega_j \quad (3.6)$$

$$[\Phi]_j^T K [\Phi]_j = \omega_j^2 \quad (3.7)$$

Bu problemi mod sayısını gösteren ‘ m ’ ile temsil edilen tek serbestlik dereceli bir denklem sistemine dönüştürür:

$$\ddot{y}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = [\Phi]_j^T f(t) \quad (3.8)$$

Bu denklemlerin her biri $y_i(t)$ için çözülürse sonuç denklem (3.9)’daki gibi bulunacaktır:

$$u(t) = \phi_1 y_1(t) + \phi_2 y_2(t) + \dots + \phi_m y_m(t) = [\Phi] \{y\} \quad (3.9)$$

3.1.2. Direk İntegrasyon Metodu

Bu methoda, hareketin diferansiyel denklemi zaman ekseninde adım adım integre edilerek çözülür. Methoda çeşitli nümerik integrasyon algoritmaları kullanılır. Bunlardan bazıları şöyledir:

- Merkezi farklar
- Ortalama ivme
- Houbolt
- Wilson
- Newmark

En çok tercih edilen integrasyon yöntemlerinden biri olan Newmark hareketin diferansiyel denkleminin çözümüne uygulanırsa aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$[M]\{\ddot{u}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} + [K]\{u_{t+\Delta t}\} = \{F(t)\} \quad (3.10)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \Delta t + \left[(1/2 - \alpha) \ddot{u}_t + \alpha \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad (3.11)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \left[(1 - \delta) \ddot{u}_t + \delta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (3.12)$$

burada α ve δ 'nin farklı değerleri için bağıntı ortalama ivme, açık ve kapalı yöntemler arasında değişebilmektedir. Newmark yöntemi kapalı bir yöntemdir. Kullanılan integrasyon zaman adımları olan Δt 'ler, yapının dinamik cevap frekansını, eğer kullanılmış ise temas algoritmasına ait frekansı, dalga yayılımı etkilerini, plastisite gibi doğrusal olmayan karakteristikleri yakalayabilmek için yeterince küçük seçilmelidir.

3.1.3. Mod Süperpozisyon ve Direkt İntegrasyon Metodlarının Karşılaştırılması

Mod süperpozisyon ve direk integrasyon metodları arasındaki farklar

Tablo 3.1'deki gibi özetlenebilir:

Tablo 3.1 Mod Süperpozisyon ve Direkt İntegrasyon Metodları Arasındaki Farklar.

▪ Mod Süperpozisyon	▪ Direkt İntegrasyon
▪ Hareketin denklemi bütünlüştür. değildir.	▪ Hareketin denklemi bütünlüştür.
▪ Çözüm oldukça hızlıdır.	▪ Çözüm zaman alıcı olabilir.
▪ Sistemin cevabını bulmada birkaç mod yeterli ise verimlidir.	▪ Birçok farklı problemde verimlidir.
▪ Bir modal analizden gelecek özvektörlere gereksinim vardır.	▪ Özvektörlere gereksinim yoktur.

- Sadece doğrusal problemlerde kullanılır.
- Zamana bağlı analizlerde doğrusal olmayan problemler çözülebilir.
- Kaç adet moda gereksinim duyulacağını belirlemek zordur. Az sayıda mod iyi yer değiştirme değerleri verebilir ama gerilme değerlerinde sorun yaşanabilir.
- Çıkarılacak mod sayısını belirlemektense çözüm zaman adımı büyüklüğünü (Δt) belirlemek daha kolaydır.

3.1.4. Kapalı ve Açık (Implicit-Explicit) Zaman İntegrasyonu Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Zamana bağlı dinamik analizlerin çözümünde hem kapalı ve hem de açık zaman integrasyonu metodları kullanılabilir. Bu metodlar arasındaki farklar özetle şöyledir:

Tablo 3.2. Kapalı ve Açık Zaman İntegrasyonu Metodları Arasındaki Farklar.[Büyük, 2002]

Kapalı Zaman İntegrasyonu	Açık Zaman İntegrasyonu
Matrisin tersini almak gerekir.	Matrisin tersini almak gerekmez.
Ortalama ivme ve yer değiştirmeler $t+\Delta t$ zamanında hesaplanır: $\{u_{t+\Delta t}\} = [K]^{-1} \{F_{t+\Delta t}^a\}$	Merkezi farklar metodu kullanılarak ivmeler t zamanında hesaplanır: $\{a_t\} = [M]^{-1} ([F_t^{ext}] - [F_t^{int}])$ ki buradan hızlar ve yer değiştirmeler $\{v_{t+\Delta t/2}\} = \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\} \Delta t_t$ $\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} \Delta t_{t+\Delta t/2}$ olur ki burada, $\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$ ve $\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t})$
Doğrusal olmayan bağıntılar dengeleme için iteratif çözüm gerektirir (yakınsama problemleri vardır).	Doğrusal olmayan problemleri rahatlıkla çözebilir (yakınsama problemleri yoktur).
İntegrasyon zaman adımı Δt büyük tutulabilir ancak yakınsama problemleri göz önünde bulundurulmalıdır.	İntegrasyon zaman adımı Δt kritik zaman adımından küçük olmalıdır: $\Delta t \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}}$
Δt 'nin küçük olmasını gerektiren durumlar dışında oldukça verimlidir.	İntegrasyon zaman adımı Δt küçük olmak durumundadır (genellikle 1×10^{-6} saniye civarındadır).

Genellikle atalet etkileri hesaba katılmaz.	Dalga yayılımı, şok yüklemeler, ve metal şekillendirme gibi yüksek dereceden doğrusal olmayan kısa süreli problemler için faydalıdır.
---	---

3.2. Açık (Explicit) Sonlu Elemanlar Metodu

LS-DYNA, yapıların doğrusal olmayan davranışlarını yakalamak için yer değiştirme esasına dayalı, Lagrange, merkezi farklarla çalışan bir sonlu elemanlar formülasyonu kullanır. Bu formülasyon potansiyel enerji eşitliğini belirlemede Cauchy'nin birinci hareket kanununu ve virtüel iş prensibini esas alır. Potansiyel enerji denklemi öncelikle sonlu elemanlar ağı ve şekil fonksiyonlarıyla uzayda diskritize edilir. Daha sonra hareketin dinamik denklemlerini çıkarabilmek için açık (explicit) merkezi farklar metodu kullanılarak zaman içerisinde diskritize edilir. Bu metodun ayrıntıları referanstan ve LS-DYNA teori el kitabından da takip edilebilir [Bathe, 1996 ve Hallquist, 1997].

3.2.1. Lagrange Formülasyonu

Doğrusal olmayan 3 boyutlu dinamik problemlerin çözümü dış yüklerin etkisi altında kalan bir cismin deformasyon geometrisini bularak gerçekleştirilir. Bu amaçla, cisim içerisindeki her partikül x_i ($i=1,2,3$) gibi 3 koordinat değeri ile temsil edilir. Bu koordinatlar partikülün o anki uzaydaki konumunu gösterir. Lagrange formülasyonunda, mevcut koordinatlar bağımlı değişkenler, orijinal koordinatlar ($t=0$ anındaki) ise bağımsız değişkenlerdir. Sonuç olarak, her partikülün o anki koordinatları, partikülün ilk koordinatları, X_i ve o anki zaman t cinsinden ifade edilir:

$$x_i = x_i (X_i, t) \quad (3.13)$$

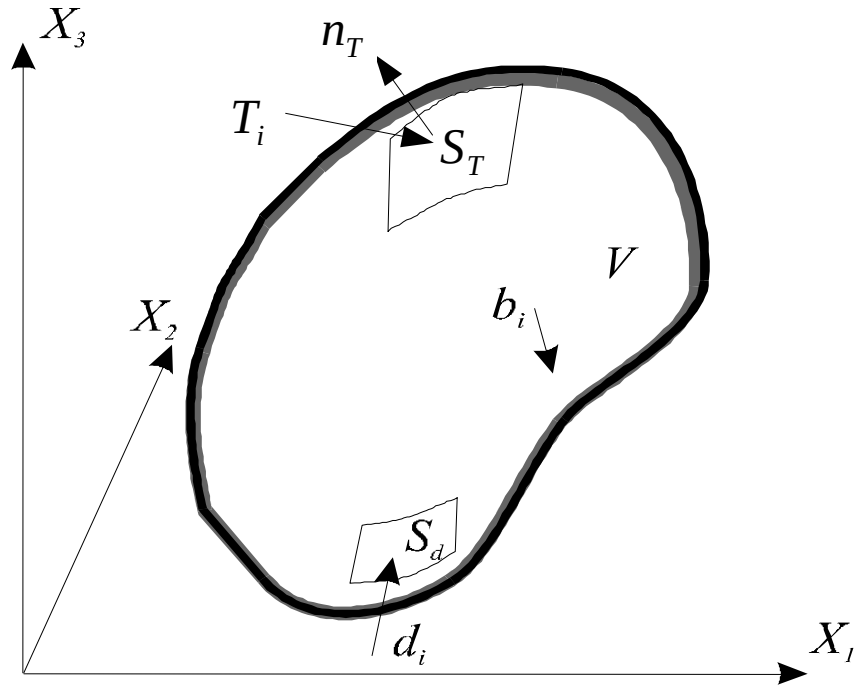
$t = 0$ anında, ilk ve mevcut koordinatlar, hızlar ve ivmeler şöyle hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} x_i (X_i, 0) &= X_i \\ \dot{x}_i (X_i, 0) &= V_i \\ \ddot{x}_i (X_i, 0) &= A_i \end{aligned} \quad (3.14)$$

burada, V_i ve A_i partikülün ilk hızını ve ilk ivmesini göstermektedir. $(\dot{})$ ve $(\ddot{})$ simgeleri zamana göre birinci ve ikinci türevleri göstermektedir. $\dot{x}_i$ partikülün mevcut hızlarını ve $\ddot{x}_i$ mevcut ivmelerini göstermektedir.

3.2.2. Virtüel İş Prensibi

Bu bölümde, 3 boyutlu genel bir problem için virtüel iş denklemi çıkarılmıştır. Bu denklem daha sonra sonlu elemanlar denklemlerinin çıkarılmasında kullanılacaktır. Şekil 3.2’de sabit (Lagrange) uzayında bulunan 3 boyutlu bir cisim görülmektedir. Cisim S_T dış yüzeyinin bir bölümünden $T_i(t)$ zorlama kuvvetlerine (birim alana etkiyen kuvvetler), S_d yüzeyi boyunca tanımlı $d_i(t)$ yer değiştirmesine ve tüm V hacmi üzerinde etkin $b_i(t)$ dış kuvvetlerine (birim hacim üzerinde etkin kuvvetler) maruz kalmaktadır.



Şekil 3.2 Lagrange Uzayında Bulunan 3 Boyutlu Cisim.

Bu problemin çözümü şu şartları da sağlamalıdır:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{x}_i = 0 \text{ cismin } V \text{ hacmi üzerinde} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{ij} n_j = T_i \text{ zorlama yüzeyi } S_T \text{ üzerinde} \quad (3.16)$$

$$x_i = d_i \text{ yer de\u0131i\u015ftirme y\u00fczeyi } S_d \text{ \u00fczerinde} \quad (3.17)$$

Burada, σ_{ij} Cauchy gerilme tens\u00f6r\u00fcn\u00fc, ρ malzemenin o anki yo\u011funlu\u011funu ve n_T S_T zorlama y\u00fczeyine normal do\u011frultuda olan birim d\u0131\u015f vekt\u00f6r\u00fc ifade eder. Denklem(3.15)Cauch'nin birinci hareket kanunudur. Denklem (3.16) S_T y\u00fczeyi \u00fczerinde her bir partik\u00fcl i\u00e7in sa\u011flanması gereken zorlama sınır \u015fartlarının denklemidir. Denklem (3.17) S_d y\u00fczeyi \u00fczerinde sa\u011flanması gereken yer de\u011fi\u015ftirme sınır \u015fartıdır. Bu denklemler problemi g\u00fc\u00e7l\u00fc (strong) formda ifade eder; yani diferansiyel denklemler cisim \u00fczerindeki ve y\u00fczeylerdeki her noktada sa\u011flanmalıdır. Problemi sonlu elemanlar metodu kullanarak n\u00fcmelik olarak \u00e7\u00f6zmek i\u00e7in problem zayıf (weak) formunda tanımlanır. Zayıf formda, \u015fartlar cisim \u00fczerindeki her noktada sa\u011flanmak zorunda de\u011ildir, bunun yerine \u015fartlar ortalama ve toplam bir kanıya cevap verecek \u015fekilde saptanır.

Zayıf formun kullanımının sonlu elemanlar \u00e7\u00f6z\u00fcm\u00fcn\u00fcn do\u011frulu\u011fu \u00fczerinde bir sınırlaması olmayacaktır. Virt\u00fcel i\u015f prensibinin kullanımından g\u00f6r\u00fclene\u011fi \u00fczere zayıf form ve kuvvetli form ba\u011ıntıları e\u015fde\u011ferdir.

\u015e\u0131l 3.2'de g\u00f6sterilen genel problemin zayıf form denklemi virt\u00fcel i\u015f prensibinden \u00e7ıkarılmıştır. S_d \u00fczerindeki yer de\u011fi\u015ftirme sınır \u015fartını sa\u011flayan rastgele bir virt\u00fcel yer de\u011fi\u015fimi δx_i bulunmu\u015ftur. Denklem (3.15)'i virt\u00fcel yer de\u011fi\u015fimi ile \u00e7arpıp ve cismin hacmi \u00fczerinde integre edersek:

$$\int_V (\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{x}_i) \delta x_i dV = 0 \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'e g\u00f6re, parantezler arasında kalan ifadenin, ge\u00e7erli herhangi bir virt\u00fcel yer de\u011fi\u015ftirme i\u00e7in, s\u0131fıra e\u015fit olması gerekir. B\u00f6ylece denklem (3.18) (3.15)'e e\u015fde\u011ferdir. T\u00fcrevin \u00f6zelliklerinden birini kullanarak:

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} = \sigma_{ij,j} \delta x_i + \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad (3.19)$$

ve denklem (3.18)'deki ilk bile\u015fende yerine koyarak:

$$\int_V \left((\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} - \sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \rho b_i \delta x_i - \rho \ddot{x}_i \delta x_i \right) dV = 0 \quad (3.20)$$

Gauss teoremi olarak bilinen ıraksama teoreminden, denklem(3.20)'deki ilk bileşen şöyle ifade edilebilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} (\sigma_{ij} \delta x_i) n_j dS \quad (3.21)$$

Zorlama yüzeyinin sınırlarını kullanarak Denklem (3.16) ve (3.21) şöyle yazılabilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} T_i \delta x_i dS \quad (3.22)$$

Gerilme tensörü simetrik olduğundan, denklem (3.20)'deki ikinci bileşen şöyle yazılır:

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV &= \int_V \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \sigma_{ji} \delta x_{j,i}) dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} \frac{1}{2} (\delta x_{i,j} + \delta x_{j,i}) dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV \end{aligned} \quad (3.23)$$

burada, $\delta \varepsilon_{ij}$ virtüel yer değişimini (δx_i) veren virtüel gerinim tensörüdür. Denklem (3.22) ve (3.23)'i Denklem (3.20)'de yerine koyarsak:

$$-\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \rho b_i \delta x_i dV + \int_{S_T} T_i \delta x_i dS = 0 \quad (3.24)$$

Denklem (3.24) Şekil 3.2'de tanımlanan genel bir üç boyutlu problem için yazılabilecek bir virtüel iş prensibi ifadesidir.

3.2.3. Diskritizasyon Uzayı

Sonlu elemanlar denklemlerini çıkarmak için bir sonraki adım uzayın bölünmesidir. Bu, cismin karmaşık şeklini eleman adı verilen daha basit şekillere bölerek elde edilir. Elemanlar birbirine köşelerindeki düğüm noktalarından bağlıdırlar. Düğüm noktaları ve elemanlar sonlu eleman ağını oluşturur. Yer değiştirme alanının sonlu eleman ağı boyunca sürekliliğini sağlamak amacıyla enterpolasyon fonksiyonları (şekil fonksiyonları olarak ta bilinirler) kullanılırlar. Bu şekil fonksiyonları eleman içerisindeki noktaların yer değiştirmesi ile düğüm noktalarının yer değiştirmesi arasında bir ilişki kurar:

$$\delta x_i = \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \delta x_{\alpha i} \quad (3.25)$$

burada, δx_i 'ler eleman içindeki bir noktanın yer değiştirmeleri, n elemandaki düğüm noktası sayısı, N_{α} α düğüm noktasındaki şekil fonksiyonu ve $\delta x_{\alpha i}$, α düğüm noktasındaki yer değiştirmelerdir.

Benzer ifadeler eleman içindeki bir noktanın koordinatları, hızları ve ivmeleri için de yazılabilir:

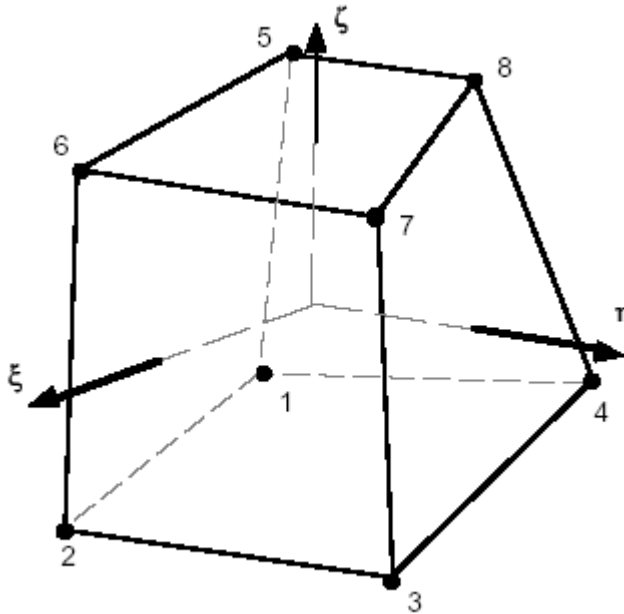
$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} x_{\alpha i} \\ \dot{x}_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \dot{x}_{\alpha i} \\ \ddot{x}_i &= \sum_{\alpha=1}^n N_{\alpha} \ddot{x}_{\alpha i} \end{aligned} \quad (3.26)$$

burada, $x_{\alpha i}$, $\dot{x}_{\alpha i}$ ve $\ddot{x}_{\alpha i}$, α düğüm noktasının sırasıyla yer değiştirmeleri, hızları ve ivmeleridir. Genellikle, şekil fonksiyonları herhangi bir noktadaki herhangi bir fonksiyonun değerini, onun düğüm noktasındaki değerini bilmesi durumunda, tahmin edebilir. Tahminin doğruluğu şekil fonksiyonuna ve fonksiyonun derecesine bağlıdır. Şekil 3.3 üç boyutlu sekiz düğüm noktalı katı bir elemanın izoparametrik fonksiyonunu göstermektedir. Elemanın merkezinde lokal bir koordinat merkezi (ξ, η, ζ) yaratılır. Eleman içindeki herhangi bir nokta, her üç doğrultuda da -1 ila +1

arasında değişen lokal koordinatlara sahiptir. Düğüm noktalarının lokal koordinatları Şekil 3.3’de görüldüğü gibi -1 ila +1’dir. Sekiz düğüm noktalı katı elemanın izoparametrik şekil fonksiyonları şöyle ifade edilebilir.

$$N_{\alpha} = \frac{1}{8} (1 - \xi \xi_{\alpha}) (1 - \eta \eta_{\alpha}) (1 - \zeta \zeta_{\alpha}) \quad (3.27)$$

burada, (ξ, η, ζ) eleman içindeki bir noktanın lokal koordinatlarıdır, $(\xi_{\alpha}, \eta_{\alpha}, \zeta_{\alpha})$, α düğüm noktasındaki koordinatlardır, ve N_{α} α düğüm noktasındaki şekil fonksiyonudur. Şekil fonksiyonları için benzer ifadeler kabuk ve kiriş elemanlar gibi başka eleman tipleri için de çıkartılabilir.



Düğüm Noktası	ξ_{α}	η_{α}	ζ_{α}
α			
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	1	1	-1
4	-1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	1	1	1
8	-1	1	1

Şekil 3.3:8 Düğüm Noktalı(hexahedron) izoparametrik elemanın şekil fonksiyonları.

[Hallquist J.O., 2001].

Sonlu eleman bağıntıları Denklem (3.24)’de verilen virtüel iş denklemini uzayda diskritize ederek bulunur. Bu, yaklaşık virtüel iş denklemini, sistemdeki her

elemanın potansiyel enerjilerin toplamı olarak yazılmasıyla elde edilir. Denklem (3.23) dikkate alınarak, Denklem (3.24) şöyle yazılabilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV_m + \int_{V_m} \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV_m - \int_{V_m} \rho b_i \delta x_i dV_m - \int_{S_T} T_i \delta x_i dS_m \right\} = 0 \quad (3.28)$$

burada, M sistemdeki toplam eleman sayısıdır, V_m elemanın hacmidir. Daha sonra, virtüel yer değiştirmeler, δx_i , ve ivmeler $\ddot{x}_i$, Denklem (3.25) ve (3.26)'deki enterpolasyonlarla değiştirilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho (N_\beta \ddot{x}_{\beta i}) (N_\alpha \delta x_{\alpha i}) dV_m + \int_{V_m} \sigma_{ij} (N_{\alpha,j} \delta x_{\alpha i}) dV_m - \int_{V_m} \rho b_i (N_\alpha \delta x_{\alpha i}) dV_m - \int_{S_T} T_i (N_\alpha \delta x_{\alpha i}) dS_m \right\} = 0 \quad (3.29)$$

burada, $\delta x_{\alpha i}$ ve $\ddot{x}_{i\alpha}$ sırasıyla virtüel yer değiştirmeler ve düğüm noktalarındaki ivmelerdir. Düğüm noktalarındaki virtüel yer değiştirmeler, $\delta x_{\alpha i}$, sabit değerlerdir ve integral dışına alınabilirler. Ayrıca, Denklem (3.28) sadece küçük virtüel yer değiştirmeler için geçerli olduğundan, $\delta x_{\alpha i}$ denklem dışına alınabilir.

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho N_\alpha N_\beta \ddot{x}_{\beta i} dV_m + \int_{V_m} N_{\alpha,j} \sigma_{ij} dV_m - \int_{V_m} N_\alpha \rho b_i dV_m - \int_{S_T} N_\alpha T_i dS_m \right\} = 0 \quad (3.30)$$

Denklem (3.30) şöyle yazılabilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho N_\alpha N_\beta dV_m \right\} \ddot{x}_{\beta i} = \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_\alpha \rho b_i dV_m + \sum_{m=1}^M \int_{S_T} N_\alpha T_i dS_m - \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_{\alpha,j} \sigma_{ij} dV_m \quad (3.31)$$

Matris formunda, Denklem (3.31) sadeleştirilirse:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\}=\{\mathbf{F}\} \quad (3.32)$$

burada, $[\mathbf{M}]$ kütle matrisi, $\{\ddot{\mathbf{x}}\}$ ivme vektörü ve $\{\mathbf{F}\}$ tüm iç ve dış kuvvetlerin vektörel toplamıdır. $[\mathbf{M}]$ kütle matrisi şöyle ifade edilebilir:

$$[\mathbf{M}]=\sum_{m=1}^M \int_{V_m} \rho N^t N dV_m \quad (3.33)$$

3.2.4. Zaman Diskritizasyonu

Denklem (3.32) hareketin sonlu eleman denklemidir ve zamana göre çözülmesi gerekmektedir. Dinamik doğrusal olmayan sonlu eleman problemlerinin çözümüne direkt integrasyon metodlarıyla ulaşılabilir. Direkt integrasyon metodlarında, sonlu eleman denklemlerinin çözümü sırasında zaman içerisinde bütün noktalar yerine bazı parça (discrete) noktalardaki çözümler aranır. Parça formunda, Denklem (3.32)'deki sonlu eleman denklemi şöyle yazılabilir:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\}_n=\{\mathbf{F}\}_n \quad (3.34)$$

burada, $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_n$, t_n anındaki bir noktanın ivme vektörüdür ve $\{\mathbf{F}\}_n$, t_n anındaki tüm iç ve dış kuvvet vektörlerinin toplamıdır. Zaman içinde iki ardışık zaman aralığı noktası (t_n ve t_{n+1}) zaman adımı (Δt_n) olarak adlandırılır ($\Delta t_n = t_{n+1}-t_n$). Zaman adımının çözümün doğruluğu üzerinde büyük bir etkisi vardır.

LS-DYNA'daki formülasyon sonlu eleman denkleminin zaman içindeki diskritizasyonu için merkezi farklar açık (explicit) metodu kullanır. Bu formülasyonda, hız vektörü zaman adımlarının yarısında hesaplanır. Başka bir ifade ile, yer değiştirme ve ivme vektörleri $t_1, \dots, t_n, t_{n+1}, \dots, t_f$ (burada t_f problemin bitiş zamanıdır) zamanlarında hesaplanırken hız vektörü $t_{1/2}, \dots, t_{n-1/2}, t_{n+1/2}, \dots, t_{f-1/2}$ zamanlarında hesaplanır. Metod yer değiştirmelerin, t_0 zamanındaki ivmelerin ve $t_{-1/2}$ anındaki (t_0 anından yarım zaman adımı önceki) hızların başlangıç değerlerinin

tahmin edilmesi ile başlar. Çözüm aşağıdaki merkezi farklar bağıntılarını kullanarak adım adım elde edilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1/2} = \dot{\mathbf{x}}_{n-1/2} + \ddot{\mathbf{x}}_n \Delta t_n \quad (3.35)$$

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \dot{\mathbf{x}}_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2} \quad (3.36)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.37)$$

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \quad (3.38)$$

Bir önceki çevrim olan $t_{n-1/2}$ anındaki hız vektöründen, t_n anındaki yer değiştirme ve ivme vektörleri hesaplanır. Bir önceki çevrimdeki bilgiden şu anki (t_{n+1}) çevrimdeki çözümü bulmak için faydalanılır. Öncelikle, Denklem (3.35)'ten $t_{n+1/2}$ anındaki hız vektörü hesaplanır. Bu vektör daha sonra Denklem (3.36)'te t_{n+1} anındaki yer değiştirme vektörünü hesaplamak için kullanılır. Daha sonra, model içerisindeki her bir elemanın gerilme ve gerinim değerleri hesaplanıp gerilmelerden türetilen iç kuvvetler bulunur. Sonrasında, düğüm noktalarının serbestlik derecelerindeki iç ve dış kuvvetler, kuvvet vektörünü elde edebilmek için toplanır. t_{n+1} anındaki ivme vektörü Denklem (3.37)'teki kuvvet vektörü kullanılarak bulunur. Son adım $\Delta t_{n+1/2}$ zaman adımının Denklem (3.38)'yü ve Δt_{n+1} zaman adımını kullanarak hesaplanmasıdır.

Merkezi farklar metodunun doğruluğu Δt^2 'inci derecedendir. Zaman adımı çok küçük olduğundan (genellikle zaman adımları 10^{-6} saniye civarındadır), zaman integrasyonu metodundan gelen hata, zaman adımları kararlılık şartını sağladığı sürece çok küçüktür.

3.2.5. Zaman Adımı Kriteri

Açık (explicit) dinamik sonlu eleman analizlerinde zaman adımlarının seçimi kritik öneme sahiptir. Büyük bir zaman adımı çözümü kararsızlığa sürüklerken küçük bir zaman adımı hesap maliyetlerini oldukça arttırır. Bu nedenle, kritik zaman adımı doğru bir şekilde bulunmalıdır. Kritik zaman adımı açık (explicit) metodun kararlılık

şartlarını sağlamalıdır, örneğin zaman adımı gerilme dalgasının her zaman adımı döngüsünde birden fazla eleman üzerinden geçmesini önleyecek kadar küçük seçilmelidir. Bu *Courant Kriteri* kullanılarak yapılabilir:

$$\Delta t_e = \frac{l}{c} \quad (3.39)$$

burada, Δt_e model içerisindeki bir eleman için kritik zaman adımıdır, l kritik uzunluktur (eleman içerisindeki en kısa kenardır) ve c dalga hızıdır. Tek boyutlu elemanlar için c dalga hızı şöyle hesaplanabilir:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.40)$$

burada, E ve ρ sırasıyla malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğudur. Dalga hızının benzer ifadeleri iki ve üç boyutlu elemanlar için de yazılabilir. Denklem (3.39) ve (3.40) birleştirilerek çubuk eleman için zaman adımı şöyle bulunur:

$$\Delta t_e = l \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (3.41)$$

Modeldeki elemanlardan en küçük zaman adımına sahip olan elemanın zaman adımı değeri her zaman adımı döngüsünde sistemin zaman adımı olarak alınır.

3.3. Malzeme Süreklilik Denklemleri

LS-Dyna™ bir çok malzeme süreklilik modeli içermektedir. Bu modeller belirli durumlar için malzemelerin davranışını hesaplara yansıtmak için kullanılmaktadır. Bu kısımda, bu tez çalışmasında kullanılan malzeme denklemleri anlatılacak ve malzeme davranışını nasıl yansıttıkları hakkında bilgi verilecektir.

3.3.1. İzotropik Elastik Malzeme Modeli

Elastik malzeme modeli LS-DYNA içerisindeki en basit ve hesap maliyeti açısından da en ucuz malzeme modelidir. Formülasyonu gerilmelerin gerinimlere göre doğrusal bir ilişki taşıması nedeniyle basittir [Büyük M., 2002]. Ayrıca, izotrop malzemeyi ifade ettiği için gerilmeler, hidro-statik basınç ve değişken (deviatorik) gerilme bileşenleri olmak üzere iki ayrı bileşen olarak ifade edilebilir. Hidro-statik basınç bileşeni elemanın şeklini koruyarak hacminin normal doğrultuda değişmesine neden olur. Değişken gerilme bileşeni hacmin korunduğu ancak elemanın şeklinin değiştiği kayma deformasyonlarına neden olur. Değişken gerilme S_{ij} , değişken gerinim ϵ_{ij} , basınç p ve hacimsel gerinim ϵ_v ifadeleri, Cauchy gerilmeleri σ_{ij} ve gerinimleri ϵ_{ij} cinsinden ifade edilirse:

$$\begin{aligned} s_{ij} &= \sigma_{ij} + p\delta_{ij} \\ \epsilon_{ij} &= \epsilon_{ij} - \frac{1}{3}\epsilon_v \\ p &= -\frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij} \\ \epsilon_v &= \epsilon_{ij}\delta_{ij} \end{aligned} \tag{3.42}$$

burada, δ_{ij} Kronecker deltadır. (δ_{ij} , $i=j$ ise 1 e ve $i \neq j$ ise 0 a eşittir). Denklem (3.42) hızlar cinsinden yazılırsa:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{ij} &= \dot{\sigma}_{ij} + \dot{p}\delta_{ij} \\ \dot{\epsilon}_{ij} &= \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}_v \\ \dot{p} &= -\frac{1}{3}\dot{\sigma}_{ij}\delta_{ij} \\ \dot{\epsilon}_v &= \dot{\epsilon}_{ij}\delta_{ij} \end{aligned} \tag{3.43}$$

burada, $\dot{s}_{ij}$ değişken gerilme hızları, $\dot{\epsilon}_{ij}$ değişken gerinim hızları, $\dot{p}$ basınç hızı ve $\dot{\epsilon}_v$ hacimsel gerinim hızıdır. Değişken hız formundaki elastik malzeme modelinin süreklilik denklemi sadeleştirilirse:

$$\begin{aligned} s_{ij}^{\nabla} &= 2G\dot{\epsilon}_{ij} \\ \dot{p} &= -K\dot{\epsilon}_v \end{aligned} \quad (3.44)$$

burada, G malzemenin kayma modülü, K malzemenin bulk modülü ve s_{ij}^{∇} değişken Jaumann gerilme hızlarıdır. Denklem (3.42)'de Cauchy gerilme hızları yerine Jaumann gerilme hızlarının kullanılmasının nedeni malzeme süreklilik denklemini serbest cisim hareketini dikkate almadan (objectivity) sağlamasıdır. Cauchy gerilme hızları referans çerçevesi değiştiğinde değişmemektedir (örneğin katı cisim dönmeleri sıfır olmayan gerilme hızlarını üretebilir) bu nedenle, bunlar malzemede serbest cisim hareketini ihlal eder ve süreklilik denklemlerinde kullanılamazlar. Diğer taraftan, Jaumann gerilme hızları, tarafsızdır ve süreklilik denklemlerinde kullanılabilirler. Jaumann gerilme hızları değişken gerilme ve gerilme hızı cinsinden ifade edilirse:

$$s_{ij}^{\nabla} = \dot{s}_{ij} - s_{ip}\Omega_{pj} - s_{jp}\Omega_{pi} \quad (3.45)$$

burada, Ω_{ij} dönme tensörüdür:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{x}_j}{\partial x_i} - \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.46)$$

Denklem (3.44)'deki Jaumann gerilme hızları ve basınç hızı değerleri değişken gerilme ve hidro-statik basınç değerlerini güncellemede aşağıdaki gibi kullanılır:

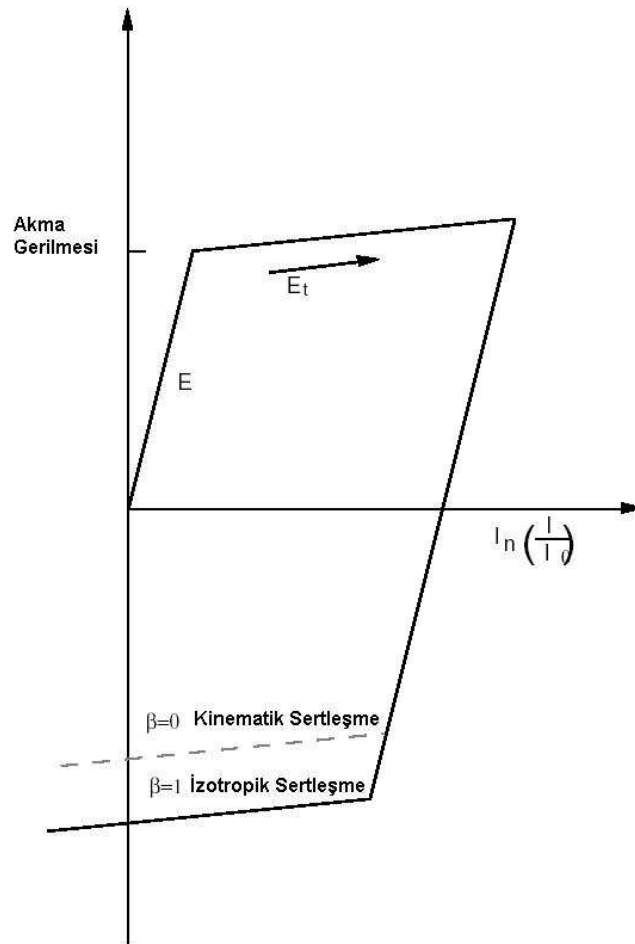
$$\begin{aligned} s_{ij\,n+1} &= s_{ij\,n} + \dot{s}_{ij} \Delta t = s_{ij\,n} + (s_{ij}^{\nabla} + s_{ip}\Omega_{pj} + s_{jp}\Omega_{pi}) \Delta t \\ p_{n+1} &= p_n + \dot{p} \Delta t \end{aligned} \quad (3.47)$$

Son adımda, Cauchy gerilmeleri değişken gerilme ve hidro-statik basınç değerleri ile Denklem (3.42) kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma_{ij\,n+1} = s_{ij\,n+1} - p_{n+1} \delta_{ij} \quad (3.48)$$

3.3.2. Kinematik Sertleşme Elastik-Plastik Malzeme Modeli

Elastik davranış için izotropik elastik modeldeki ifadeler kullanılır. Ayrıca bu malzeme modeli ile izotropik, kinematik veya ikisi arasındaki plastik sertleşme karakteri modellenebilmektedir. Bunun için ifadelerde β katsayısı kullanılmaktadır. Bu değişken 0 ile 1 değerleri arasında seçilebilmektedir. Aşağıdaki şekilde akma karakterinin β 'nin aldığı değer ile değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Malzemenin elastik-plastik davranışı ($\beta=0$ kinematik, $\beta=1$ izotropik plastik sertleşme) [Krieg,et al.1976].

İzotropik sertleşme sözkonusu olduğunda, akma yüzeyinin merkezi sabittir fakat akma yüzeyi yarıçapı plastik gerinmenin bir fonksiyonudur. Kinematik sertleşme durumunda ise akma yüzeyi yarıçapı sabit olduğu halde yüzey merkezi plastik gerinme doğrultusunda yerdeğiştirmektedir. Akma kriteri olarak bu modelde aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır. [Krieg,et al. 1976]

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ji} - \frac{1}{3} \sigma_y^2 = 0 \quad (3.49)$$

Burada;

$$\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \quad (3.50)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p \quad (3.51)$$

Ayrıca bu malzeme modeli gerinim hızına bağlı sertleşme davranışını da ifade edilebilmektedir. Bunun için Cowper & Symonds modeli kullanılmaktadır bu sertleşme modeli akma gerilmesi değerini gerinim hızına göre değiştirmektedir.

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (3.52)$$

burada p ve C malzemeye göre seçilen değişkenlerdir. $\dot{\epsilon}$ ise gerinim hızını göstermekte ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ji}} \quad (3.53)$$

E_p plastik sertleşme modülünü göstermek üzere, σ_y akma değeri, σ_0 başlangıç akma değeri ile $\beta E_p \epsilon_{eff}^p$ ifadesinin toplamıdır. E_p aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (3.54)$$

Ve ϵ_{eff}^p eşdeğer plastik gerinim :

$$\epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ji}^p \right)^{1/2} dt \quad (3.55)$$

Plastik gerinim hızı toplam gerinim hızı ile elastik gerinim hızı arasındaki fark ile elde edilir:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e \quad (3.56)$$

3.3.3. Gerinim Hızına Bağlı Malzeme Modeli

Bu malzeme modelinde akma gerilmesi σ_0 eşdeğer gerinim hızına bağlı değerler almaktadır. Bu değerler eşdeğer gerinim hızına karşılık gelen akma gerilmesi, elastiklik modülü ve teğet modülü değerlerinin eğri olarak verilmesiyle belirlenir. Eşdeğer gerinim hızı $\dot{\epsilon}$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ji}^p \right)^{1/2} \quad (3.57)$$

Ayrıca akma gerilmesi;

$$\sigma_y = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} \right) + E_p \bar{\epsilon}^p \quad (3.58)$$

Buradaki $\bar{\epsilon}^p$ ifadesi eşdeğer plastik gerinimi göstermektedir. E_p ise teğet modülü ve elastiklik modülü ile aşağıdaki (denklem 3.59) gibi bir ilişki içindedir.

$$E_p = \frac{E \cdot E_T}{E - E_T} \quad (3.59)$$

Ayrıca bu modelde hem elastiklik modülü hemde teğet modülü istendiği takdirde gerinim hızına bağlı bir fonksiyon olarak kullanılabilir.

4. SPH METODU

Klasik sonlu elemanlar uygulamaları ve bu temele dayanan paket programlar birçok yapısal probleme çözüm üretmek için yeterli seviyeye ulaşmışlardır. Fakat yüksek şekil değişimlerinin olduğu, geometrinin karmaşık ve değişken şekil aldığı metal şekillendirme problemlerinde eleman yapısının bozulması büyük bir sorun teşkil etmektedir. Aşırı çarpılan ağ yapısı yanlış değerler üretilmesine ve çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Çarpılmanın aşırı boyutlarda olduğu bazı durumlarda ise çözüm yapmak mümkün olmamaktadır. Bu sorunun aşılması için, ağ yapısının düzeltilmesi, tekrar ağ oluşturma (remeshing) gibi çözümler uygulanmaktadır.

Ağız metodların kullanılması yapıdaki ağ yapısının çarpılmasına farklı bir çözüm sunmaktadır. SPH (smoothed particles hydrodynamics) metodu ağız bir metoddur ve yapının serbest hareket edebilen parçacıklar ile temsiline dayanır. Bu parçacıklar belirli kriterler ile birbirleriyle etkileşim halindedirler.

Bu kısımda öncelikle bu metodun temel prensiplerinden bahsedilecek ve ardından LS-DYNA programı ile bu metodun kullanılması anlatılacaktır.

4.1. Giriş

Ağız metodların geliştirilmesi, korumun yasalarının uygulandığı problemlerin çözümü için son yıllardaki ortaya çıkan en büyük gelişmedir. SPH metodu astrofizik problemlerinin çözümü için ortaya konulmuş ağız Lagrange tipi bir metoddur. Diğer taraftan benzer sorunların yaşandığı, çarpışma, kırılma-kopma gibi sofistike problemlerin çözümü için kullanılabilecek bir metod olma özelliğinde göstermektedir.

Kullanıma sunduğu bazı özellikleri ile SPH metodu, klasik metodlarla modellenmesi ve uygulaması zor problemler için alternatif bir çözüm olarak göze çarpmaktadır. Problemin kinematiğini temsil etmede büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Şöyle ki yapısında ağ bulundurmadığından düzensiz geometrilerin ortaya çıktığı problemlerin hesaplanmasına olanak sağlar.

Hesaplama yönünden bakıldığında ortada, belirli akış hızlarına sahip, hareketli parçacık kümesinden oluşan bir akışkan vardır. Her SPH parçacığı ait olduğu akışkanın özelliklerini gösteren bir interpolasyon noktasıdır. Problemin tümleşik çözümü, içinde bulunan her parçacığı kapsayan ve düzgünleştirilmiş uzunluk (smooted length) adı verilen, düzenli interpolasyon fonksiyonunun hesaplanmasıyla sağlanır. Böylece akım veya parçacıklar arası kuvvetlerin denkleğini içeren korunum yasaları uygulanır.

Aşağıda SPH metodu hakkında temel prensipler verilmiştir. Diğer bölümlerde bu metodun uygulama konumuz olan metal şekillendirme işleri ile ilgili uygulamalara yer verilecektir.

4.2. SPH Metodunun Temel Prensipileri

Parçacık metodu hareket eden parçacığı ifade eden; $(x_i(t), w_i(t))_{i \in P}$ kuadratik formülüne dayanmaktadır [Lacome J., 2001]. Burada $x_i(t)$ i'nci parçacığın konumu, $w_i(t)$ i'nci parçacığın ağırlığı ve P parçacık setini göstermektedir. Parçacık v bölgesinde belirli bir karakteristik eğri üzerinde hareket etmekte ve ağırlığı hacim korumunu sağlamak için düzeltilmektedir:

$$(i) \frac{d}{dt} x_i = v(x_i, t) \quad (ii) \frac{d}{dt} w_i = \text{div}(v(x_i, t)) w_i \quad (4.1)$$

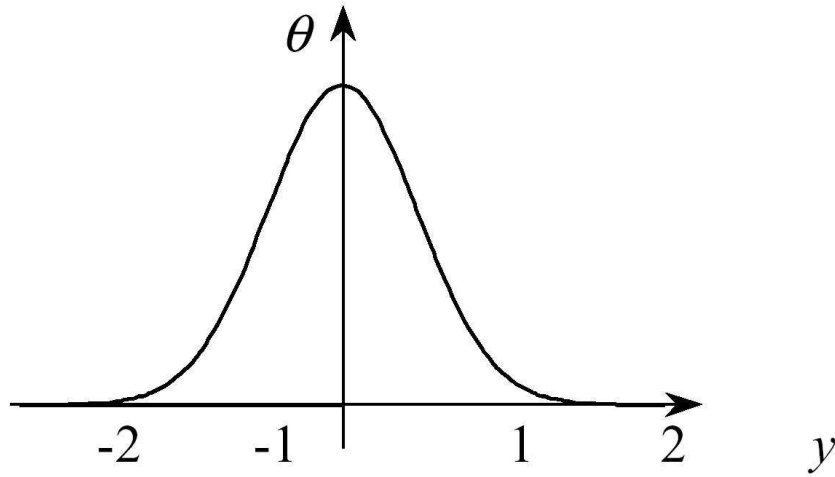
Buna göre aşağıdaki formül yazılabilir:

$$\int_{\Omega} f(x) d_x = \sum_{j \in P} w_j(t) f(x_j(t)) \quad (4.2)$$

Yukarıdaki kuadratik fonksiyon, parçacık çekirdeğinin düzgünleştirilmesiyle (smoothing particle kernel) birlikte kullanılmaktadır. Parçacık çekirdeğinin düzgünleştirilmesi θ yardımcı fonksiyonu ile yapılmaktadır. SPH eleman topluluğu basitleştirme için düzen içeren, bir kübik B-eğrisi üzerine dağılmıştır. Ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\theta(y) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}y^2 + \frac{3}{4}y^3; y \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-y)^3; 1 < y \leq 2 \\ 0; y > 2 \end{cases} \quad (4.3)$$

burada C boyuta bağılı olarak belirlenen bir katsayıyı ifade etmektedir.



Şekil 4.1 Parçacık dağılımı [T. Belytschko et al., 1996]

Yeterli elemana sahip olunduğunda, düzgünleştirilmiş parçacık çekirdeği W :

$$W(x_i - x_j, \bar{h}) = \frac{1}{\bar{h}} \theta\left(\frac{x_i - x_j}{\bar{h}}\right) \quad (4.4)$$

$\bar{h} \longrightarrow 0$ olduğunda, $W(x_i - x_j, \bar{h}) \longrightarrow \delta$ Burada, δ Dirac fonksiyonudur. $\bar{h}$ ise x_i ve x_j nin fonksiyonudur ve “parçacık çekirdeği düzgünleştirme çapı” (smoothing length of kernel) olarak adlandırılmaktadır.

Denklem (4.2) kullanılarak u nun fonksiyonu olan aşağıdaki $\prod^h u$ yaklaşım ifadesi yazılabilir:

$$\prod^h u(x_i) = \sum_{j \in \Omega} w_j(t) u(x_j) W(x_i - x_j, \bar{h}) \quad (4.5)$$

Düğüneleştirilmiş uzunluğa türev ifadesi eklendiğinde ise aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\nabla \prod^h u(x_i) = \sum_{j \in \Omega} w_j(t) u(x_j) \nabla W(x_i - x_j, \bar{h}) \quad (4.6)$$

Sonlu elemanlar veya sonlu farklar yönteminde elimizde sadece bir tane uzaysal diskritizasyon parametresi bulunmaktadır. SPH metodunun klasik metodlar karşısında ortaya koyduğu en önemli fark uzaysal tanımlama için iki parameter sunmasıdır. Bunlardan biri $\bar{h}$, düğüneleştirme uzunluğu ve diğeri Δx , ağ karakteristik uzunluğudur.

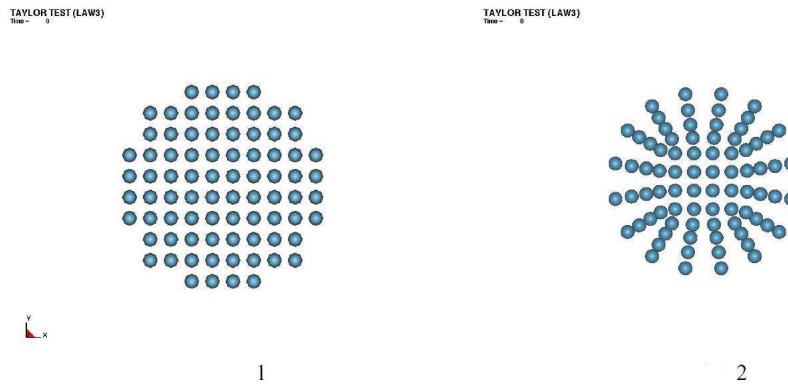
70’li yılların sonunda yeni başlayan çalışmalarda düğüneleştirme uzunluğu bütün simölasyon boyunca her eleman için sabit tutulmaktaydı. Son yıllardaki çalışmalar, bu değerin her eleman için, bulunduğu bölgeye bağlı olarak, elemene has bir değer almasının daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Düğüneleştirme uzunluğu $\bar{h}$, aslında x_i ile x_j arasındaki ortalama değeri ifade etmektedir. Erken dönemde yapılan çalışmalarda bu değer $\bar{h} = (h(x_i) + h(x_j)) / 2$ olarak hesaplanmaktaydı. $h(x_i)$ ve $h(x_j)$ ifadeleri sırasıyla x_i ve x_j parçacıklarının düğüneleştirme uzunluklarını ifade etmektedir. Bu şekilde ifade edilmesi korunum yasalarının kolaylıkla sağlanması olanak vermekteydi. [Lacome J., 2001].

Son dönemdeki çalışmalar bu yaklaşımın tutarlı olamdığını ve karalı olamayan sonuçlar üretildiğini göstermiştir. 1996 yılından bu yana tekrar normalleştirme (renormalization), hareketli en küçük kareler (moving least square) gibi yeni nesil metodlar tercih edilmektedir. Bu yaklaşımlar daha kararlı ve yakınsayan değerler vermektedir. Düğüneleştirme uzunluğu $\bar{h} = h(x_i)$ şeklinde ifade edilmektedir. Merkezinde x_i parçacığının bulunduğu ve yarıçapı $h(x_i)$ olan küresel hacmin içindeki parçacıkların ortalama değerlerini tanımlamaktadır. Bu formölasyon LS-DYNA’da kullanılmaktadır ve “toplanmış formölasyon” (gather formulation) olarak adlandırılmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu yaklaşımın en yüksek hassasiyeti sağladığı görölmüştür.

4.3. LS-DYNA ile SPH Metodunun Uygulanması

960 versiyonu ile birlikte LS-DYNA programına yeni bir parçacık eleman ilave edilmiştir. Bu yeni eleman Düzgün Akışkan Parçacık (Smooth Particles Hydrodynamics) teorisine dayanmaktadır. SPH genellikle, çok yüksek hızlarda gerçekleşen çarpışma hadiselerini modellemekte kullanılan ağsız, lagrange tipi numerik bir tekniktir. SPH metodu, çok büyük ağ çarpılmasının görüldüğü çok yüksek (3 km. ve üzeri) hızlardaki çarpma, çarpışma veya sıkıştırılabilir akışların modellenmesine olanak vermektedir.

SPH elemanları şu anda kullanılan ızgaralama (grid generation) yönteminden kaynaklanan bir gereksinim olarak koordinat ve kütle bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Parçacık dağılımı mümkün olduğunca homojen olmalıdır. Eğer homojen bir dağılım sağlanabilirse birbirine komşu SPH elemanların kütleleri eşit olacaktır. Netice olarak aynı malzeme özelliklerine, aynı başlangıç yoğunluğuna ve aynı başlangıç hacmine sahip parçacıklar ortaya çıkacaktır. Bunu sağlamanın yegane yolu düzenli bir ağ oluşturmaktır. Aşağıdaki örnekte (Şekil 4.2) görüldüğü üzere silindirik bir geometri için 2. ağ düzenini kullanmak yerine 1.'sini kullanmak daha iyi yakınsayan ve kararlı bir sonuç almayı garantilemektedir.



Şekil 4.2 Silindir geometrisi üzerine iki farklı şekilde dağıtılmış SPH elemanlar [Lacome J., 2001].

SPH elemanların kullanıldığı uygulamalarda kullanıcının bazı başlangıç şartlarını (başlangıç düzgünleştirme uzunluğu, parça numarası, parçacık kütlesi gibi)

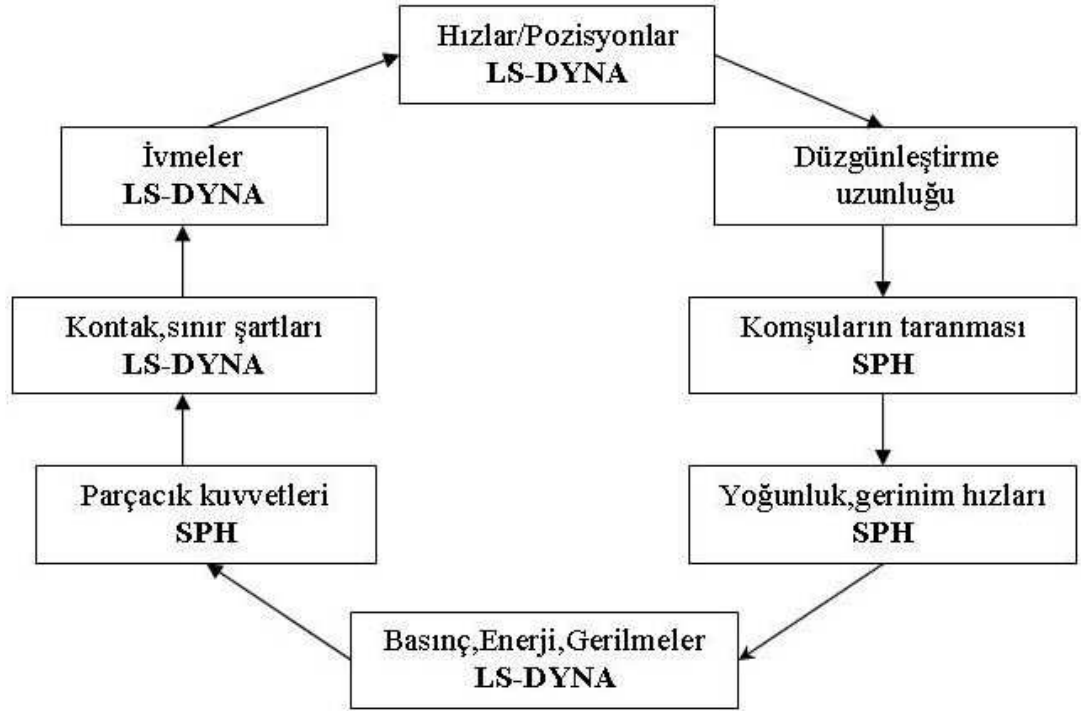
belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeble LS-DYNA programına yeni kartlar eklenmiştir. [Hallquist J.O, 2003]

***CONTROL_SPH:** hesaplama için gerekli genel control parametrelerini içerir.

***SECTION_SPH:** bütün SPH elemanlarına ait parametreleri içerir.

***ELEMENT_SPH:** herbir parçacığın parça numarasını ve kütle bilgisini içerir

SPH önışlemcisi LS-DYNA programının içerisinde yeni bir katman olarak geliştirildiği için mevcut olan unsurların hemen hepsiyle birlikte kullanılabilir. Başlangıç hızı, kontaklar v.s. gibi girdiler klasik anahtar kelimeler kullanılarak tanımlanmaktadır. Girdi dosyası oluşturulduktan sonra çözüme başlandığında program bu yeni elemanları otomatik olarak algılamaktadır. Parçacıklar arası düğüm noktalarında, kuvvetler, enerji, basınç ve diviatorik gerilimler hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar korunum yasalarını (kütle,momentum,enerji) içeren parçacık yaklaşımı ile yapılmaktadır. Parçacık elemanların bütün mekanik değerleri elde edildikten sonra bunlar LS-DYNA ana programına aktarılmaktadır. Parçacık elemanlar ile yapıda bulunan, katı veya kabuk elemanlar arasındaki ilişki LS-DYNA içerisinde bulunan “düğümnoktası-yüzey kontaklar” (node to surface contact) ile sağlanmaktadır.Aşağıdaki şekilde program içerisindeki döngü şematik olarak gösterilmektedir:



Şekil 4.3 LS-DYNA’da SPH için program döngüsü

4.3.1. Denklemler

SPH metodunda madde parçacıklar halinde temsil edilmektedir. Her parçacık belirli bir kütle (m) sahiptir ve akışkan olarak belirli bir hızla (v) hareket etmektedir. Korunum yasaları, akışkan denklemlerinin SPH formu denilen ve parçacıklar arası kuvvetlerin esas alındığı bir şekilde ifade edilir. Her parçacık bir kütle ve bir hızla sahiptir, ayrıca problemin özelliğine bağlı olarak başka bazı değerler taşıyabilir. Kütle korunumu için önerilen deklemler aşağıdaki şekildedir:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \text{div}(\mathbf{v}) \quad (4.7)$$

SPH yaklaşımı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d\rho}{dt}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}(\mathbf{x}_j) - \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)) A_{ij} \quad (4.8)$$

Momentum denklem ise:

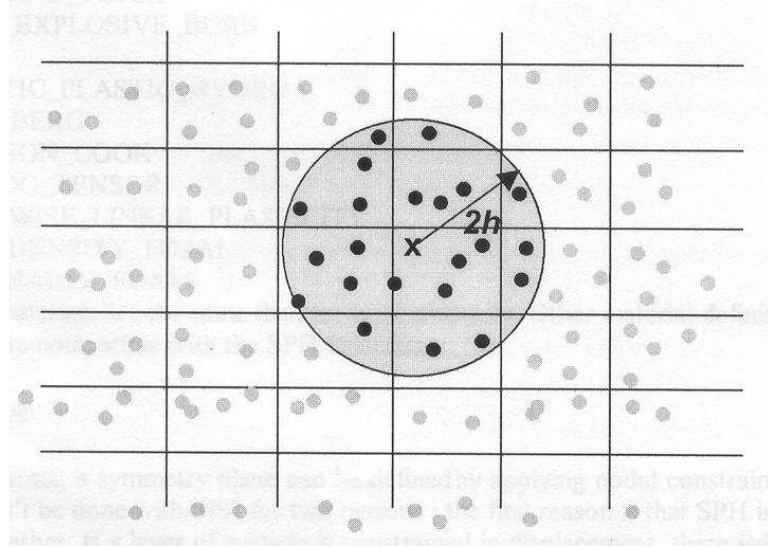
$$\frac{dv^\alpha}{dt}(x_i) = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma^{\alpha,\beta}(x_i)}{\rho_i^2} A_{ij} - \frac{\sigma^{\alpha,\beta}(x_j)}{\rho_j^2} A_{ji} \right) \quad (4.9)$$

Ve enerji denklemi:

$$\frac{dE}{dt}(x_i) = -\frac{P_i}{P_j} \sum_{j=1}^N m_j (v(x_j) - v(x_i)) A_{ij} \quad (4.10)$$

4.3.2. Parçacıkların İlişkilendirilmesi

Birbirleri ile alakalı komşu parçacıkların belirlenmesi ve yenilenmesi SPH metodunda en önemli kısımdır. Hesaplamanın herhangi bir anında hangi elemanların birbirleri ile ilişkide olacakları sorusunun cevabı sonuçların tutarlılığını önemli ölçüde etkilemektedir ve büyük önem taşımaktadır. Her parçacık, yarıçapı $2h$ olan bir ilgi bölgesine sahiptir. Direkt metod kullanıldığında, her zaman adımında bu bölge içerisinde kalan parçacıklar listelenir. N tane parçacık içeren bir küme içerisinde her parçacık için merkeze olan mesafelerin kıyası yapılır. Buda her parçacık için $N-1$ kıyas demektir. Ve N parçacık için tekrar edilir. Yani toplam olarak $N(N-1)$ kıyas yapılır. Çok sayıda parçacık içeren modellerde asıl işlemci (CPU) yükü bu işlemden kaynaklanır. Bunun yerine LS-DYNA da daha önce kontak algoritmaları için kullanılan ve "kova tipi" (bucket sort) ismi verilen bir yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemde parçacıkların bulunduğu bölge, belirli ölçülerdeki kutucuklara bölünmektedir. Sonra her parçacık için elemanın bulunduğu kutu ve civarındaki kutulardaki komşu parçacıklar araştırılmaktadır. Bu şekilde muhtemel komşu elemanlar tespit edilmiş olur. Daha sonrada bu liste içerisindeki parçacıkların merkeze olan mesafeleri tek tek hesaplanır ve $2h$ 'tan daha kısa mesafede olan elemanlar ilişkilendirilir. Hesap maliyeti gerekli olan kovaların (bucket) miktarına bağlıdır ve bu sayı eleman sayısının artışına göre yaklaşık doğrusal olarak artmaktadır. [Lacome J., 2001]



Şekil 4.4 Komşu parçacıkların araştırılması [Lacome , 2002]

Yapı uzatıldığında, sabit düzgünleştirme uzunluğu, seçilen bir parçacığın hiçbir komşusu bulunmamasına yani numerik kırılmalara neden olmaktadır. Tersini düşünüldüğünde, yapı basıldığında ise bir parçacığın çok sayıda elemanla komşu olmasına ve hesap hızının düşmesine sebep olmaktadır. İşte malzemelerdeki bu uzama ve kısılma etkilerine cevap vermek üzere 80'li yılların sonunda W. Benz tarafından “değişken düzgünleştirme uzunluğu” fikri ortaya atılmıştır. Bu fikir, parçacık yaklaşımının, ortam sürekliliğini sağlaması için, yeterli miktarda komşu eleman bulundurma esasına dayanmaktadır ve h değerinin zamana ve boyuta göre değişmesine olanak tanımaktadır. LS-DYNA’da da değişken düzgünleştirme uzunluğu değişken alınabilmektedir ve aşağıdaki gibi formülize edilmiştir:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{3} h \text{div}(\mathbf{v}) \quad (4.11)$$

Bu fikrin temelinde, her zaman adımında aynı kütleli verecek sayıda komşu parçacığı birbiriyle ilişkilendirmek suretiyle kütle korunumunu sağlamak, düşüncesi bulunmaktadır. Böylece, $2h$ yarıçaplı bir küre içerisinde birbirleriyle ilişkideki n tane parçacığın toplam kütlesi M aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$M = n * m = n * V * \rho = n * \rho * \frac{3}{4} \pi (2h)^3 \quad (4.12)$$

Hesaplama boyunca kütle sabitliğinin sağlanması gerekmektedir. Yukarıdaki ifadenin zamana göre türevi alındığında ise:

$$2h \frac{dM}{dt} = n * \frac{d\rho}{dt} \frac{32}{3} \prod h^3 + n * \rho = n * \rho * \frac{32}{3} \prod \frac{dh^3}{dt} \quad (4.13)$$

Kütlenin korunduğu kabul edildiğinde denklemin sağ tarafı sıfır olur ve yukarıdaki denklem sadeleştirildiğinde aşağıdaki formu alır:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{3} h \text{div}(\mathbf{v}) \quad (4.14)$$

$\text{div}(\mathbf{v})$ ifadesi akışı tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu ifadeye göre düzgünleştirme uzunluğu parçacıklar birbirlerinden uzaklaştıkça, yani yapı seyrekleştikçe artmakta, tersine birbirlerine yaklaştıklarında yani daha yoğun bir ortam oluştuğunda kısılmaktadır. Bunun sebebi her zaman adımımda birbirine komşu “aynı sayıda” parçacığı birbirleriyle ilişkilendirmektir. Nümerik metodların tabiatı gereği düzgünleştirme uzunluğu için alınabilecek enbüyük ve enküçük değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. LS-DYNA programında öndeğer (default) olarak başlangıç düzgünleştirme uzunluğunun 2 ve 0.2 katı şeklinde alınmaktadır. Bir çok yapısal ve akışkan problemi için bu değerler çözüm sağlamaktadır. Çözüm sırasında düzgünleştirme uzunluğu aşağıdaki değerler arasında değişebilir:

$$HMIN * h_0 < h < HMAX * h_0 \quad (4.15)$$

Burada h_0 başlangıç düzgünleştirme uzunluğunu belirtmektedir. Eğer HMIN ve HMAX değerleri 1 seçilirse, hesaplama sabit düzgünleştirme uzunluğu ile yapılır. [Lacome , 2002]

4.3.3. Malzeme Modelleri

LS-DYNA(v960) içerisinde SPH elemanlar ile kullanılabilecek malzeme modelleri aşağıda sıralanmıştır:

*MAT_ELASTIC
 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC
 *MAT_SOIL_AND_FOAM
 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN
 *MAT_NULL
 *MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO
 *MAT_STEINBERG
 *MAT_JOHNSON_COOK
 *MAT_PSEUDO_TENSOR
 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
 *MAT_LAW_DENSITY
 *MAT_CRUSHABLE_FOAM

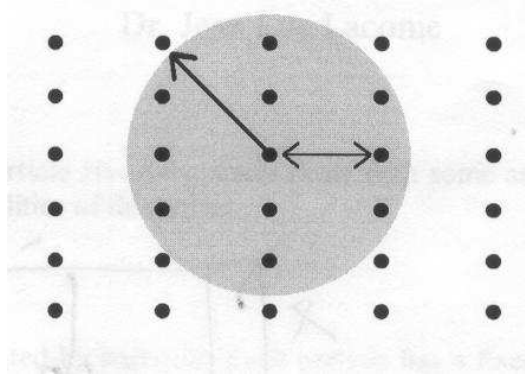
Bunların içerisinde özellikle Plastic-Kinematic ve Johnson-Cook malzeme modelleri kırılma-kopma kriterlerini içerdiklerinden ve malzemelerin sıcaklık, gerinim hızı gibi değişkenler altındaki davranışlarını dikkate aldıklarından metal şekillendirme prosesleri için uygun görülmektedir. Bu modellerden bazıları ile ilgili daha geniş açıklama 3. bölümde verilmiştir. Ayrıca 5. bölümde de bu malzeme modellerinin kullanıldığı uygulamalar sunulmuştur. [Hallquist J.O, 2003]

4.3.4. SPH Elemanların Kullanımı

Başlangıç durumunda SPH elemanlar iki tip bilgi barındırırlar, ilki mekanik özellikler ve ikincisi geometrik bilgilerdir. Mekanik özelliklerden kasıt, ELEMENT_SPH ve PART kartlarında tanımlanan yoğunluk, parçacık kütlesi ve korunum yasıdır. Geometrik bilgi ise parçacığın başlangıç konumudur. Kullanıcı tarafından tanımlanması gereken iki diskritizasyon (discretazitaion) parametresi bulunmaktadır. Bunlar Δx_i uzunlukları (parçacıklar arası mesafeler) ve SECTION_SPH kartı ile girilen CLSH katsayısıdır. Geçerli bir SPH ağı (!) iki önemli özelliği sağlamalıdır. Mümkün olduğu kadar düzenli olmalı ve kütleleri arasındaki farklar mümkün olduğunca az veya kütleler eşit olmalıdır. Şekil 4.2’de görülen yapılardan sağdaki örnek çok fazla paçacıklar arası mesafe farklılıkları göstermektedir. Bu da parçacık kütlelerinde farklara yol açar. Soldaki örnek daha düzenli ve SPH için çok daha uygundur. [Hallquist J.O, 2003]

Tek boyutlu modellerde parçacıklar X eksenine doğrultusunda olmalıdır. İki boyutlu modellerde ise parçacıklar X-Y düzlemi üzerinde tanımlanmalıdır.

SPH metodu ile klasik sonlu elemanlar yöntemi arasındaki başlıca farklarından biride ağ bulundurmadağı için geometri bilgisininin tam olarak elde edilememesidir. Başlangıç durumunda parçacıklar arasında bağlantı bulunmamaktadır ve komşu elemanlar araştırılmadan hangi parçacıkların birbiriyle ilgili oldukları bilinmemektedir. İlk geometrinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için “başlangıç düzgünleştirme uzunluğu” (initial smoothing length) değeri kullanılmaktadır. LS-DYNA başlangıç sırasında bu değeri kullanarak ilk geometriyi tespit etmektedir. Bu değer belirlenirken herhangi iki komşu parçacık arasındaki mesafe dikkate alınır. Başlangıç düzgünleştirme uzunluğu bu değerlerin en büyüğünden daha büyük seçilmelidir. En küçük uzunlukların en büyüğünden daha büyük olması gereken bu değere L , bu değer katsayısına CSLH kısaltmaları verilmiştir. Bu katsayı SECTION_SPH kartı ile tanımlanmaktadır. Ancak bu değerler girildikten sonra geometrik yapı ve komşu parçacıklar arasındaki ilişkiler tanımlanabilir. [Hallquist J.O, 2003]



Şekil 4.5 Başlangıç düzgünleştirme uzunluğunun belirlenmesi

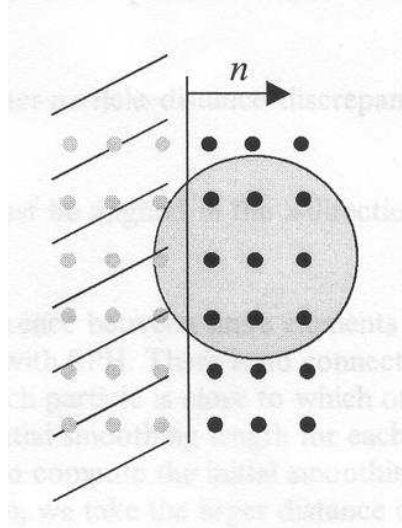
Kurulan modelde iki yada daha fazla SPH parça bulunuyorsa bunların etkileşimi için kontak tanımlamaya gerek yoktur. Parçacıklar birbirlerinin etki alanlarına girdiklerinde aralarında kontak oluşmaktadır. SPH elemanlar, kabuk veya katı elemanlar ile birlikte kullanılabilir. Bu durumda parçacıklar ile diğer elemanlar arasında temas (contact) tanımlamak gerekmektedir. Parçacıklar düğüm noktaları gibi kabul edilerek herhangi bir “düğüm noktası-yüzey”

(NODES_TO_SURFACE) kontağı kullanılabilir. Aşağıda bunlardan birkaçı sıralanmıştır:

AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE
 CONSTRAINED_NODES_TO_SURFACE
 NODES_TO_SURFACE
 TIED_NODES_TO_SURFACE

Kontakların kullanımı sırasında “yumuşak kısıtlama”(soft constraint) seçeneğinin kullanılması önerilmektedir. Bu seçenek kontak içerisinde A opsiyonel kartında bulunmaktadır. Yumuşak kısıtlama seçeneği ile kontak rijitliği düğüm noktasının kütesine ve hesaplamadaki zaman adımına göre belirlenmektedir. [Hallquist J.O, 2003]

LS-DYNA’da SPH elemanların kullanımı ile ilgili belirtilmesi gereken bir başka konu ise simetri düzlemleri ile alakalıdır. Klasik solu elemanlar yönteminde sınırdaki bulunan düğüm noktalarını kısıtlamak için simetri düzlemleri kullanılmaktadır. Bu işlem SPH elemanlara uygulanamamaktadır. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi SPH yapısında ağ bulunmadığından parçacıklar birbirleri arasından hareket edebilmektedirler. Sınırdaki elemanlar kısıtlansa bile komşu parçacıklar bunların üzerinden aşarak sınırı geçebilirler. İkinci sebep ise sınıra yakın elemanlar ile alakalıdır. Bu elemanlar sınırdaki olduklarından denge basıncı doğru hesaplanamamakta ve sınır civarında basıncın olduğundan daha düşük değerde çıkmasına sebep olmaktadır. SPH elemanları için simetri düzlemi tanımlamak için özel bir işlem yapmak gerekmektedir. Sınır civarında (2h mesafe içinde) ve sınırın diğer tarafında, karşıt sanal parçacıklar oluşturmak, çözüm olarak uygulanmaktadır. Oluşturulan sanal parçacıklar sınıra yakın olan gerçek parçacıklara karşıt tepki uygulayacaklardır. Sanal parçacıklar karşılık geldikleri gerçek parçacıklarla aynı kütle, basınç ve mutlak hıza sahiptirler .

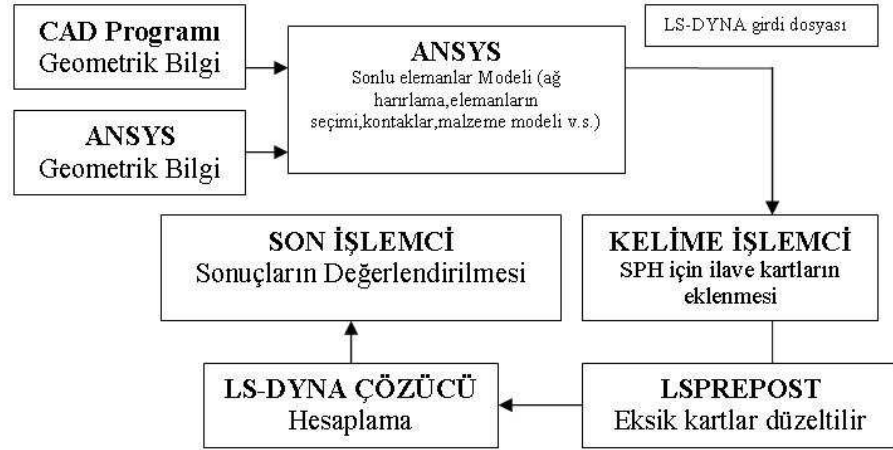


Şekil 4.6 Simetri düzlemi yerine sanal parçacıkların oluşturulması

4.3.5. Pratikte Uygulama

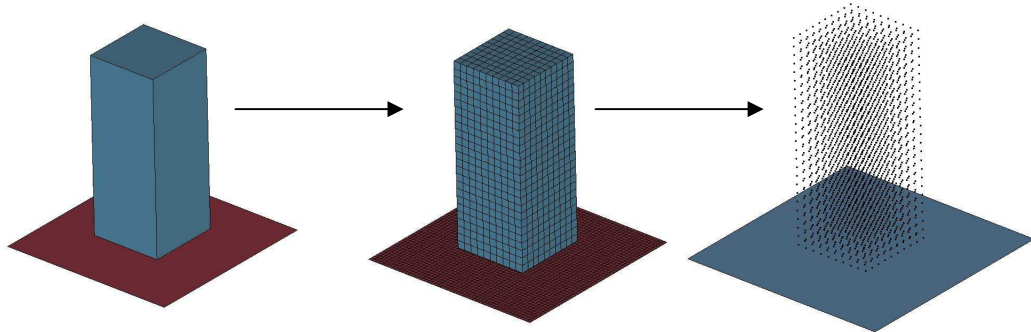
LS-DYNA ile yapılan SPH uygulamalarında kısaca aşağıdaki presedür izlenmiştir.

Ağırsız bir metod olarak tanıtılan SPH halihazırda sonlu elemanlar ağına ihtiyaç duymaktadır. Bunun sebebi SPH elemanların, sonlu elemanlar ağının düğüm noktalarından üretilmesine dayanmaktadır. Klasik sonlu elemanlar metodu geometrik modelden SPH modeline geçiş için arayüz özelliği sağlamaktadır. Herhangi bir CAD programı ile geometrik model hazırlandıktan sonra, ön-işlemci (bu çalışmada ANSYSv8.0 kullanılmıştır) ile sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Ön işlemciden alınan input dosyası elle düzeltilerek gerekli kartlar hazırlanır. Text formatında olan input dosyalarını düzenlemek için bir kelime işlemci program kullanılmıştır. Daha sonra bu ağın düğüm noktaları SPH elemanlara atanır. Böylece başlangıç geometrik değerleri (eleman koordinatları) girilmiş olur. Elemanlar için girilmesi gerekli olan bir diğer bilgi ise parçacık kütesidir. Önemli sorunlardan bir tanesi burada ortaya çıkmaktadır. Eğer ağ yapısı homojen ise yapının ağırlığı hesaplanarak, yapıyı oluşturan SPH elemanlara eşit olarak dağıtılabilmektedir. Yapı düzgün olarak ağ oluşturulamayacak kadar karmaşık ise SPH kütleleri her bir eleman için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Şu anda kullanılan güncel ön-işlemci programlar bu işlem için yeterli değildir. Bu programların geliştirilmesi ile bu sorun çözüme kavuşturulabilir.



Şekil 4.7 SPH Uygulamalarında izlenen döngü

Eleman özelliklerinin belirtildiği kartlar (ELEMENT_SPH) hazırlandıktan sonra yukarıda belirtilenler ışığında kontrol ve kontak kartları hazırlanır. Bu düzeltmeler ANSYS programından alınan ve anahtar kelimelerden oluşan LS-DYNA girdi dosyası üzerinde yapılmaktadır. Düzeltme ve düzenleme için ön-işlemci olarak LSPREPOSTv.1.0 programı kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Geometriden SPH modeline geçiş için sonlu elemanlar ağı kullanılmaktadır.

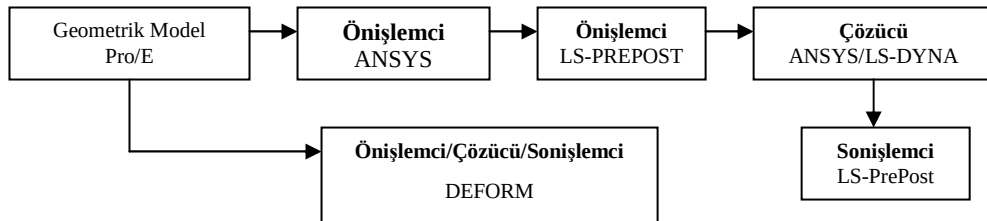
Sonuç olarak denebilir ki, yüksek hızlı çarpışmalar için ortaya konulmuş bu metod, modellenmesi zor veya imkansız sofistike problemler için bir alternatif teşkil etmektedir. SPH modelleme yapının çok ufak parçalara ayrıştığı problemler için tercih edilen bir metod olmasına rağmen, çok büyük ağ çarpılmasının yaşandığı uygulamalarda da ağsız (meshless) olduğu için, sorunsuz çalışmaktadır. SPH elemanlar, yapıyı, en az katı veya kabuk elemanlar kadar iyi temsil etmektedirler.

Fakat bu elemanlardan oluşturulmuş parçaların yüzeylerinin temsil edilmesinde bazı sorunlar vardır. Bu sorunlar sonişlemci programların geliştirilmesiyle aşılabilecektir. Burada dikkatle üzerinde durulması gereken bir diğerk hususta bu metodun çözüml maliyetini arttırmasıdır. Bu artış probleme bağılı olarak değışmektedir. Aynı eleman sayısına sahip problemler için değerler ileriki bölümlerde verilmiştir.

5. HACİM METAL ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYON UYGULAMALARI

Bu bölümde, örnek problem olarak bir açık kalıp dövme işlemi ele alınarak bu problemin değişik metodlarla çözümleri yapılmıştır. Problemin seçiminde, modellenenebilir olmasının yanısıra gerçek uygulamalara uygunluğu dikkate alınmıştır. Çözümler iki farklı ticari kod ve dört farklı metod kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan metodlar modelleme zamanı, çözüm süresi, elde edilen sonuçlar gibi kriterler ele alınarak birbirleri ile kıyaslanmışlardır. Modelleme sırasında bir kısım kabuller yapılmıştır. Bu kabullerin en önemlisi malzemenin plastik davranışı üzerinde etkili olan sıcaklık ile ilgilidir. Bütün uygulamalarda ısı transferinin olmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca şekil değişiminden ortaya çıkan sıcaklık artışı ihmal edilmiştir. Kullanılan malzeme modelleri sıcaklık değişimi etkisini içermemektedir. Bununla birlikte kullanılan ticari kodlar (ANSYS/Ls-Dyna™ ve DEFORM™) arasında malzeme modelleri transfer edilmiştir.

Örnek problem açık kalıpta kare kesitli bir parçanın dövülmesidir. Bu problem öncelikle ANSYS/LS-DYNA™ ticari yazılımı kullanılarak klasik Lagrange tipi açık (explicit) sonlu elemanlar metodu ile daha sonra sırası ile yine aynı ticari kod kullanılarak ALE ve SPH metodları ile simule edilmiştir. Son olarak sanayide kullanılan ve güvenilir kabul edilen DEFORM™ ticari yazılımı ile kapalı (implicit) sonlu elemanlar çözümü yapılmıştır. Sonlu elemanlar modellerinin hazırlanması sırasında bir çok yazılımdan faydalanılmıştır. Aşağıdaki şekil(Tablo 5.1) modellerin hazırlanması sırasında izlenen yolu göstermektedir.



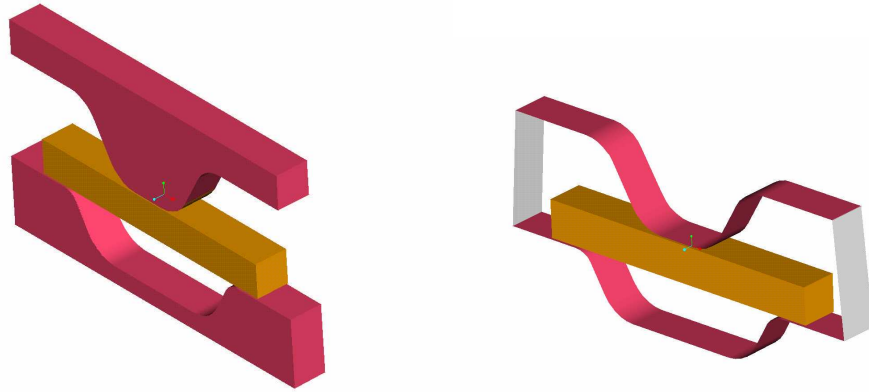
Şekil 5.1: Sonlu Elemanlar modelleri hazırlanırken izlenen yol.

5.1. Açık Kalıpta Dövme Simülasyonu Uygulaması

Uygulama problemi olarak 100x100mm kare kesitli 800mm uzunluğundaki bir parçanın açık kalıpta oda sıcaklığında dövülmesi ele alınmıştır. Alt kalıp sabit olup üst kalıp 2m/s sabit hızla -Y yönünde ilerlemektedir. Üst kalıbın ilerleme miktarı 200mm'dir. Toplam işlem süresi 0,1sn'dir. Kalıp ile işparçası arasındaki dinamik sürtünme katsayısının 0,2 statik sürtünme katsayısının 0,3 olduğu varsayılmıştır. Modellemede SI birim sistemi kullanılmıştır. Hesaplamalarda INTEL™ Pentium IV 1.90 GHz işlemcili 1GB dinamik hafızalı Windows2000Profesional işletim sistemli PC kullanılmıştır.

5.1.1. BDT Modeli

İşparçası ve kalıplar Pro/Engineer™ yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra bu katı modeller ANSYS/LS-DYNA™'da kullanılmak için ANSYS™ önişlemcisi formatında (*.anf) ve DEFORM™'da kullanılmak için ise *.stl dosya formatında kaydedilmiştir.



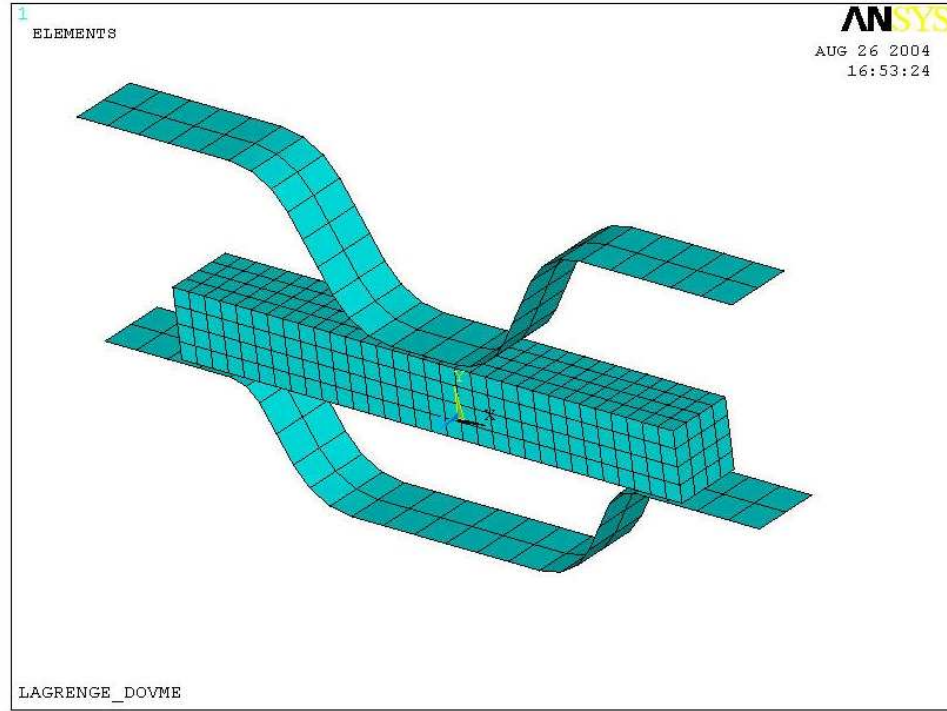
Şekil 5.2: ANSYS™ ve DEFORM™ için hazırlanan katı modeller.

5.1.2. Lagrange Metodu İle Simülasyon

5.1.2.1 Sonlu Elemanlar Modeli

ANSYS™ önişlemcisi kullanılarak geometrik modelden sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. İşparçası için Lagrange tipi katı eleman, kalıplar için ise

kabuk elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelindeki parçaların herbiri için kullanılan eleman tipleri ve sayıları aşağıdaki tabloda (Tablo 5.1) verilmiştir.



Şekil 5.3: ANSYS™ önışlemcisindeki parçaların görünüşü

Tablo 5.1: Parçaların eleman sayısı

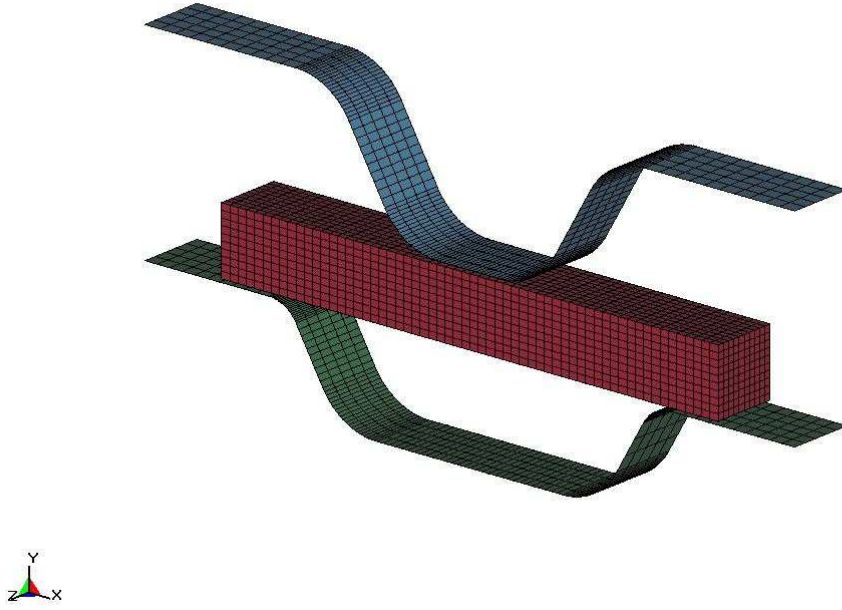
Parça Adı	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Malzeme Modeli
1-İşparçası	KATI (Lagrange)	6000	*MAT_19
2-Üst Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
3-Alt Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
	TOPLAM	7350	

Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra model LS-PREPOST™ yazılımına alınmış ve malzeme özellikleri, sınır şartları gibi veriler bu yazılım vasıtası ile girilmiştir. İşparçası malzemesi olarak ANSYS/LS-DYNA™ uygulamalarında, AISI-4140 çeliğinin gerinim “ hızına bağlı malzeme modeli ” (*MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY) kullanılmıştır. Malzeme modeli sözkonusu çeliğin 20⁰C sıcaklıktaki davranışını temsil etmektedir. Kalıplar için ise rijit (*MAT_RIGID) malzeme modeli seçilmiştir. Sınır şartları olarak işparçasın Z doğrulsundaki iki dik yüzeyinin Z ötelenme serbestlik derecesi kısıtlamıştır. Alt kalıbın 6 serbestlik derecesi de sınırlanarak sabitlenmiş, üst kalıbın ise sadece Y yönünde ötelenmesi serbest bırakılmıştır. Çözüm süresi olarak 0,1 sn verilmiştir.

Tablo 5.2: AISI-4140 çelik için Gerinim Hızına Bağlı Malzeme Modeli parametreleri [ANSYS Inc., 2003]

Yoğunluk (ρ)	Elastiklik Modülü (E)	Poisson Oranı (ν)	Tanjant Modülü (T)
7850 kg/m ³	210GPa	0.29	30MPa
	Gerinim Hızı (1/sn)	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastiklik Modülü (Gpa)
	0	207	209
	0.08	250	211
	0.16	275	212
	0.4	290	215
	1	300	218

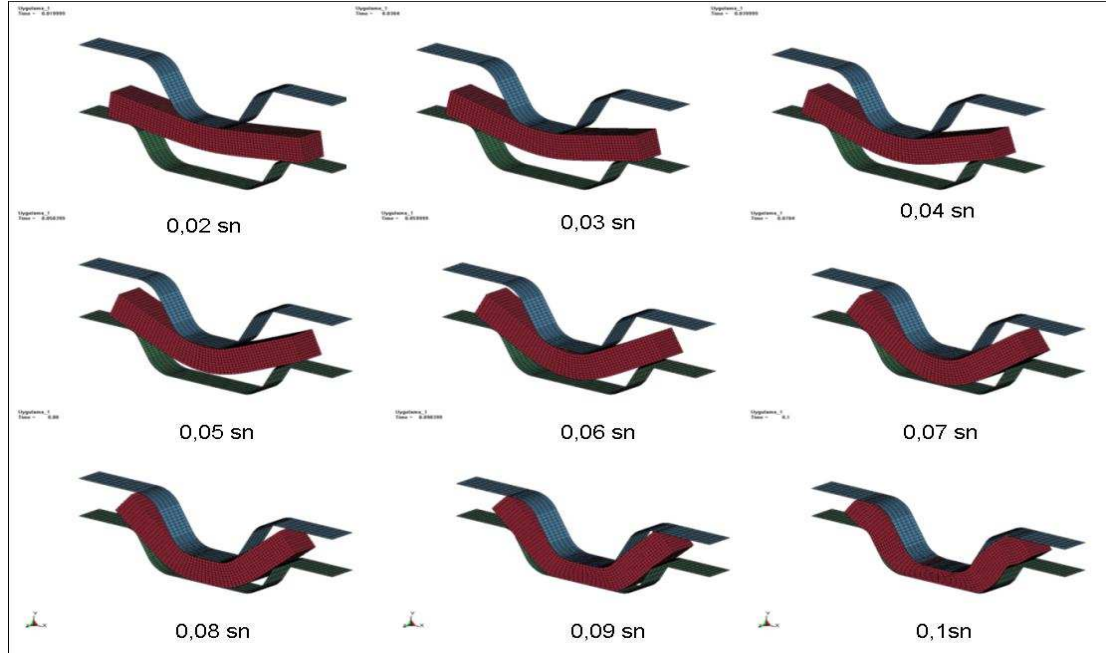
Uygulama_1
Time = 0



Şekil 5.4: Parçaların LSP-REPOST™ önışlemcisindeki genel görünüşü

5.1.2.2 Sonuçlar

Hazırlanan sonlu elemanlar modeli ANSYS/LS-DYNA v970 çözücüsü kullanılarak çözümlenmiştir. Açık (Explicit) çözümlemede büyük önem taşıyan zaman adımı başlangıçta $1.44E-06$ saniye olarak hesaplanmıştır. Hesaplama bitiminde zaman adımı $2.63E-07$ saniyeye kadar düşmüştür. Hesaplama toplam 112495 döngüde (cycle) tamamlanmıştır. Döngü hesaplama süresi (cycle time) 4323 nanosaniye'dir Toplam hesaplama süresi 59 dakika 57 saniye (3597 saniye)'dir. Çözümleme sonrasında elde edilen sonuçlar; zamana göre kalıp yükü, anlık eşdeğer gerinim (plastic strain or effective strain) ve eşdeğer gerilme (von misses stress) değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

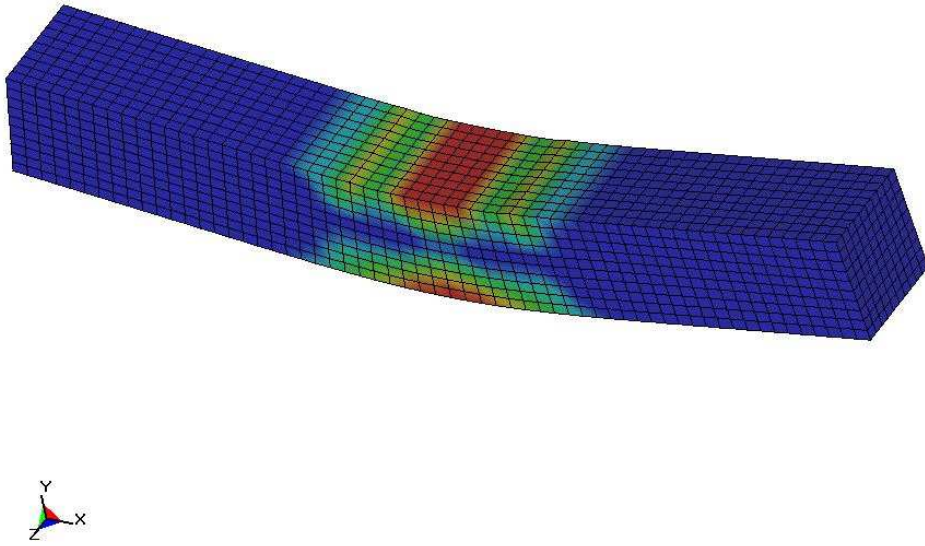


Şekil 5.5: Şekillendirme işleminin gelişimi

Uygulama_1
Time = 0.019999
Contours of Effective Plastic Strain
max ipt. value
min=0, at elem# 1
max=0.0467032, at elem# 2720

Fringe Levels

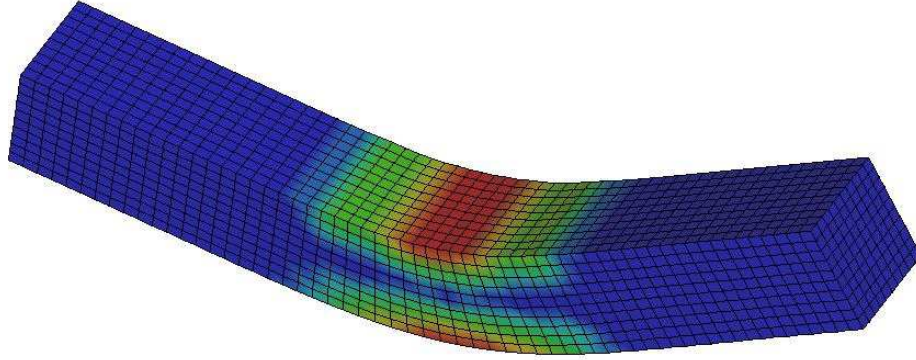
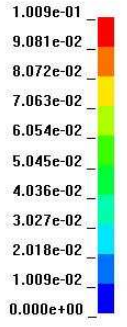
4.670e-02
4.203e-02
3.736e-02
3.269e-02
2.802e-02
2.335e-02
1.868e-02
1.401e-02
9.341e-03
4.670e-03
0.000e+00



Şekil 5.6: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

Uygulama_1
Time = 0.039999
Contours of Effective Plastic Strain
max ipt. value
min=0, at elem# 1
max=0.100904, at elem# 3301

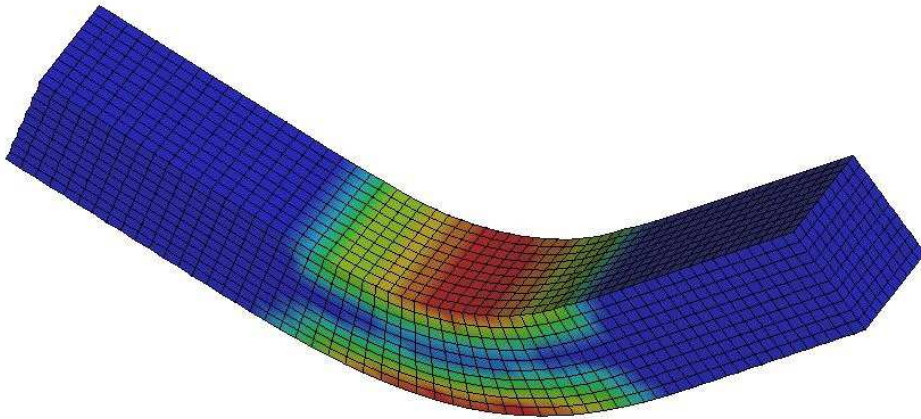
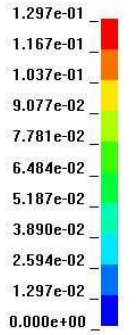
Fringe Levels



Şekil 5.7: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

Uygulama_1
Time = 0.059999
Contours of Effective Plastic Strain
max ipt. value
min=0, at elem# 1
max=0.129678, at elem# 5730

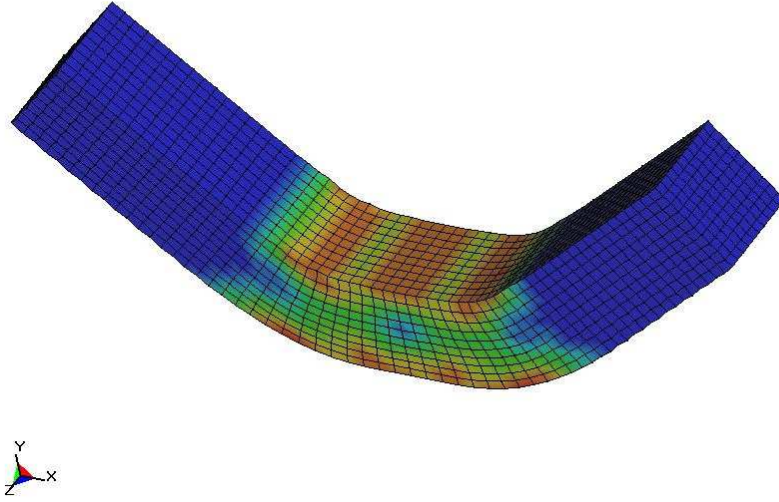
Fringe Levels



Şekil 5.8: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

Uygulama_1
Time = 0.08
Contours of Effective Plastic Strain
max ipt. value
min=0, at elem# 1
max=0.173058, at elem# 3830

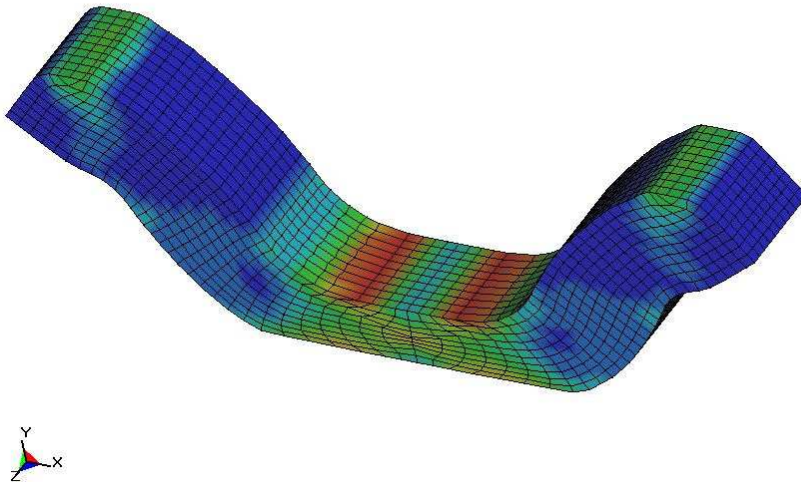
Fringe Levels
1.731e-01
1.558e-01
1.384e-01
1.211e-01
1.038e-01
8.653e-02
6.922e-02
5.192e-02
3.461e-02
1.731e-02
0.000e+00



Şekil 5.9: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

Uygulama_1
Time = 0.1
Contours of Effective Plastic Strain
max ipt. value
min=0, at elem# 9
max=0.767443, at elem# 3261

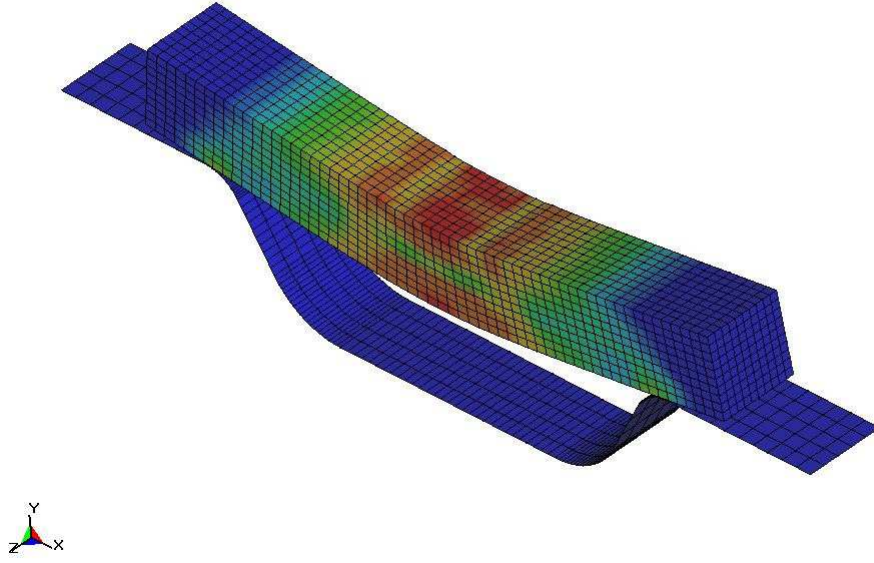
Fringe Levels
7.674e-01
6.907e-01
6.140e-01
5.372e-01
4.605e-01
3.837e-01
3.070e-01
2.302e-01
1.535e-01
7.674e-02
0.000e+00



Şekil 5.10: 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

MODEL PART1
Time = 0.019999
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 6676
max=3.20043e+08, at elem# 3900

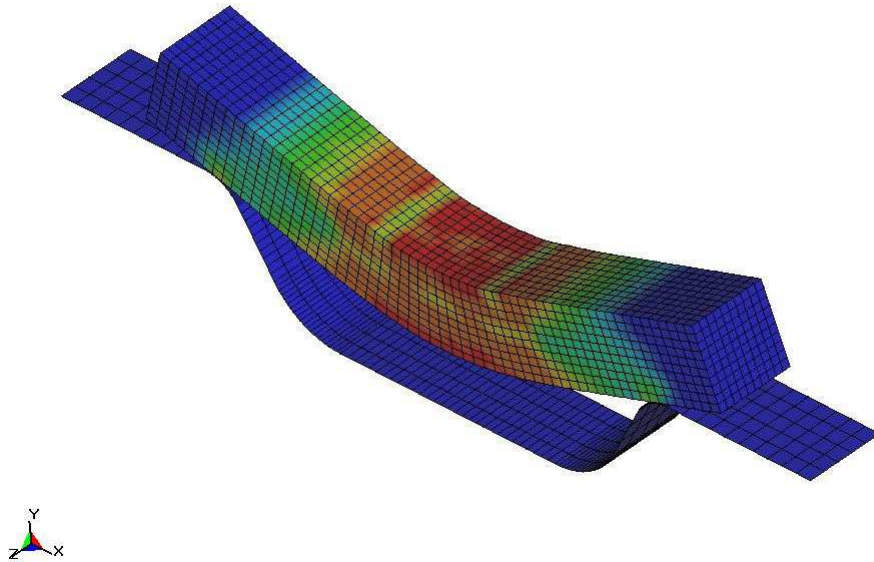
Fringe Levels
3.200e+08
2.800e+08
2.560e+08
2.240e+08
1.920e+08
1.600e+08
1.280e+08
9.601e+07
6.401e+07
3.200e+07
0.000e+00



Şekil 5.11: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

MODEL PART1
Time = 0.039999
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 6676
max=3.00355e+08, at elem# 4520

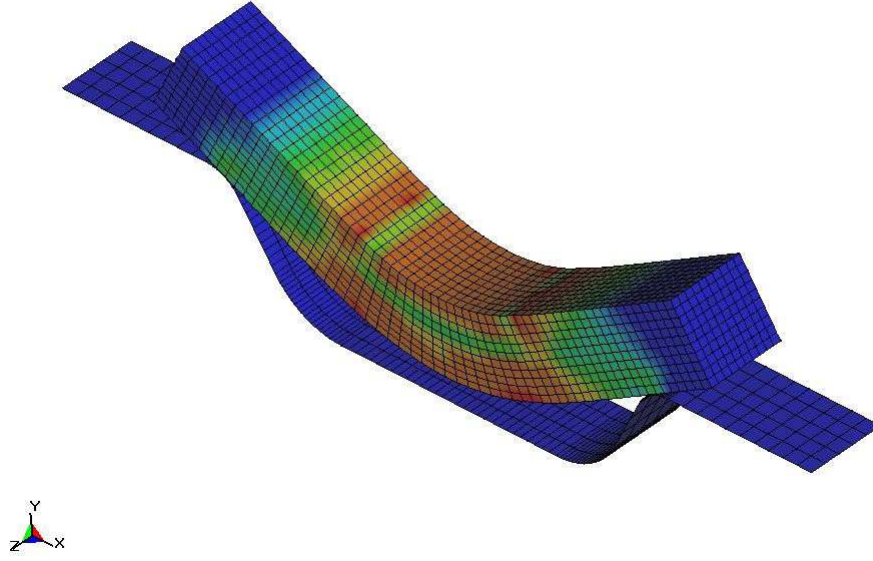
Fringe Levels
3.004e+08
2.703e+08
2.403e+08
2.102e+08
1.802e+08
1.502e+08
1.201e+08
9.011e+07
6.007e+07
3.004e+07
0.000e+00



Şekil 5.12: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

MODEL PART1
Time = 0.059999
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 6676
max=3.08303e+08, at elem# 991

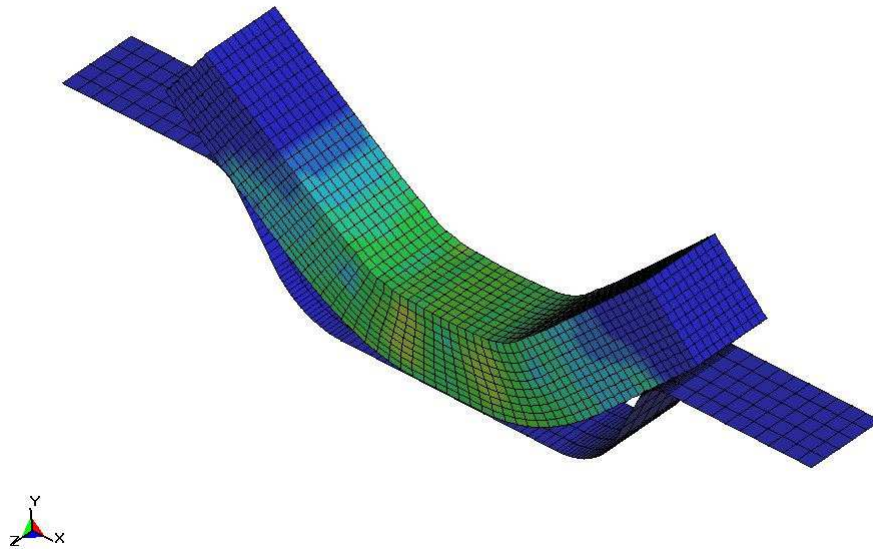
Fringe Levels
3.083e+08
2.775e+08
2.466e+08
2.158e+08
1.850e+08
1.542e+08
1.233e+08
9.249e+07
6.166e+07
3.083e+07
0.000e+00



Şekil 5.13: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

MODEL PART1
Time = 0.08
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 6676
max=3.58234e+08, at elem# 4452

Fringe Levels
3.582e+08
3.224e+08
2.866e+08
2.508e+08
2.149e+08
1.791e+08
1.433e+08
1.075e+08
7.165e+07
3.582e+07
0.000e+00

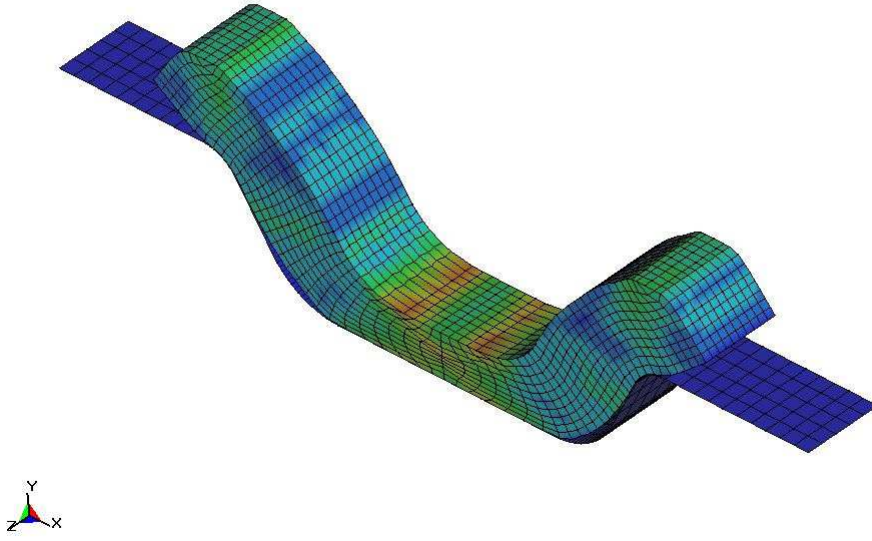


Şekil 5.14: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

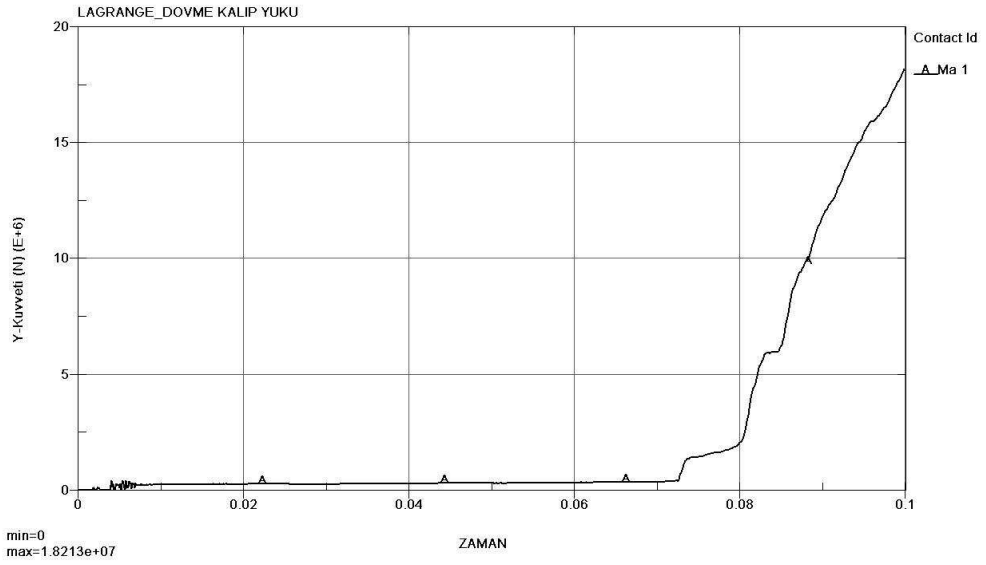
MODEL PART1
Time = 0.1
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 6676
max=3.82086e+08, at elem# 3251

Fringe Levels

3.821e+08
3.439e+08
3.057e+08
2.675e+08
2.293e+08
1.910e+08
1.528e+08
1.146e+08
7.642e+07
3.821e+07
0.000e+00



Şekil 5.15: 0,1 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

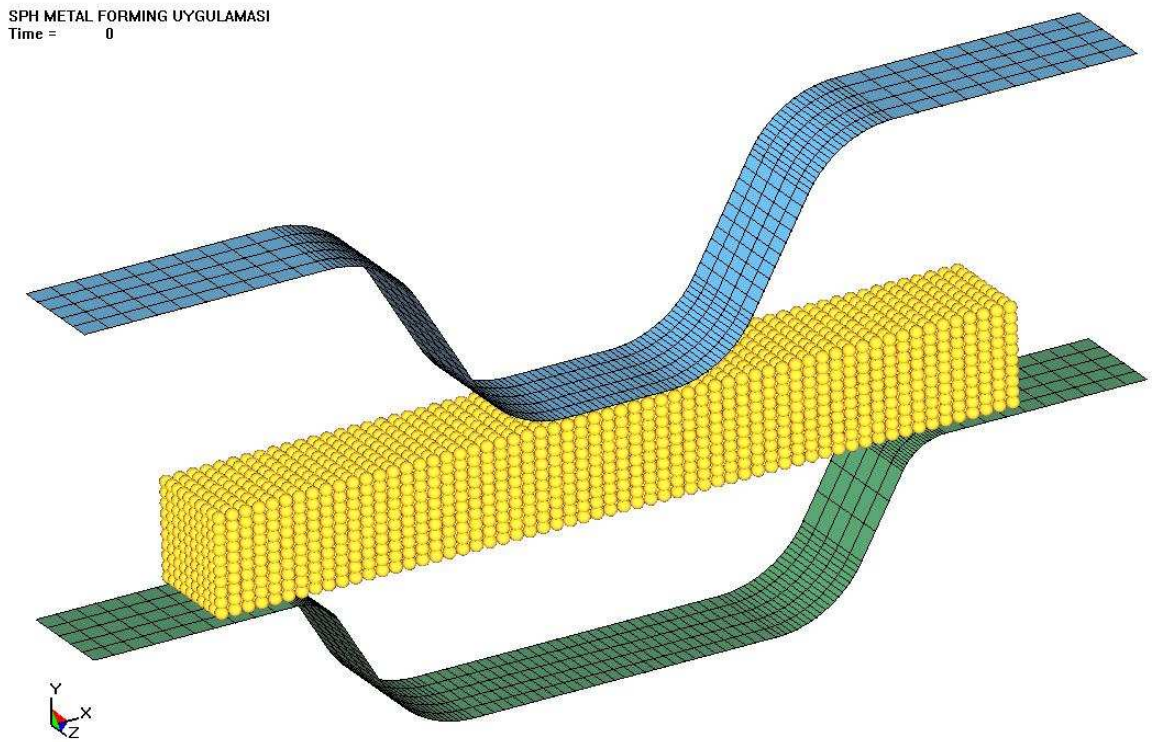


Şekil 5.16: Kalıp yükünün zamana göre değişimi

5.1.3. SPH Metodu İle Simülasyon

5.1.3.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Klasik sonlu elemanlar yönteminde olduğu gibi hazırlanan geometrik modelden ANSYS önışlemcisi kullanılarak sonlu elemanlar ağı katı elemanlar ile oluşturulmuştur. Klasik yöntemden farklı olarak bu çıktı dosyasının içerisindeki katı elemanlar SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) elemanlara dönüştürülmüştür. Kullanılan eleman sayısı ve tipi aşağıdaki tabloda (Tablo 5.3) gösterilmiştir.



Şekil 5.17: SPH modelinin genel görünümü

İşparçası için kullanılan SPH eleman sayısının bir önceki modeldeki katı eleman sayısı ile eşit olduğu görülmektedir. Her katı eleman için, elemanın merkezine konumlanmış bir SPH eleman kullanılmıştır. Kullanılan malzeme modelleri ve sınır şartları bir önceki örnekle aynıdır.

Tablo 5.3: Parçaların sahip olduğu eleman sayısı

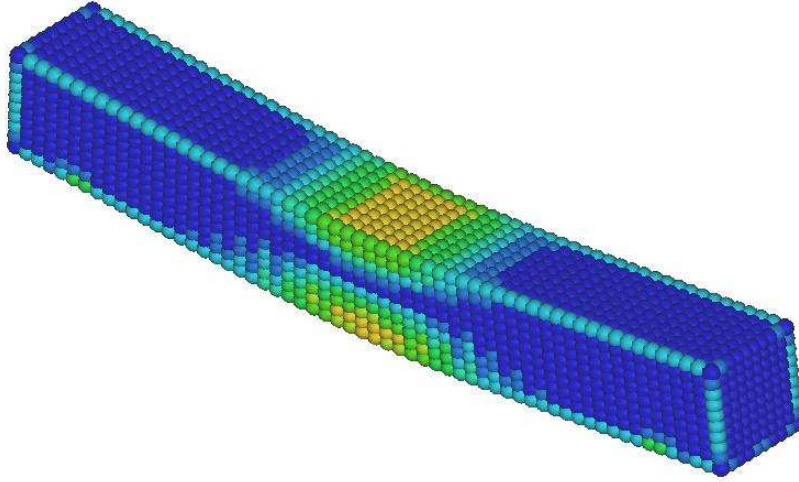
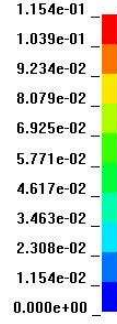
Parça Adı	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Malzeme Modeli
1-İşparçası	SPH	6000	*MAT_19
2-Üst Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
3-Alt Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
	TOPLAM	7350	

5.1.3.2 Sonuçlar

Hazırlanan sonlu elemanlar modeli ANSYS/LS-DYNA v970 çözücüsü kullanılarak çözümlenmiştir. Açık (Explicit) çözümlemede büyük önem taşıyan zaman adımı başlangıçta $3.45E-06$ saniye olarak hesaplanmıştır. Hesaplama bitiminde zaman adımı $3.43E-06$ saniyeye düşmüştür. Zaman adımı değişimin çok küçük olduğu görülmektedir. Hesaplama toplam 31953 döngüde (cycle) tamamlanmıştır. Döngü hesaplama süresi (cycle time) 34260 nanosaniye'dir Toplam hesaplama süresi 2 saat 14 dakika 58 saniye (8099 saniye)'dir. Çözümleme sonrasında elde edilen sonuçlar; zamana göre kalıp yükü, anlık eşdeğer gerinim (plastic strain or effective strain) ve eşdeğer gerilme (von misses stress) değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.02
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0, at elem# 1000013
 max=0.11542, at elem# 1003910

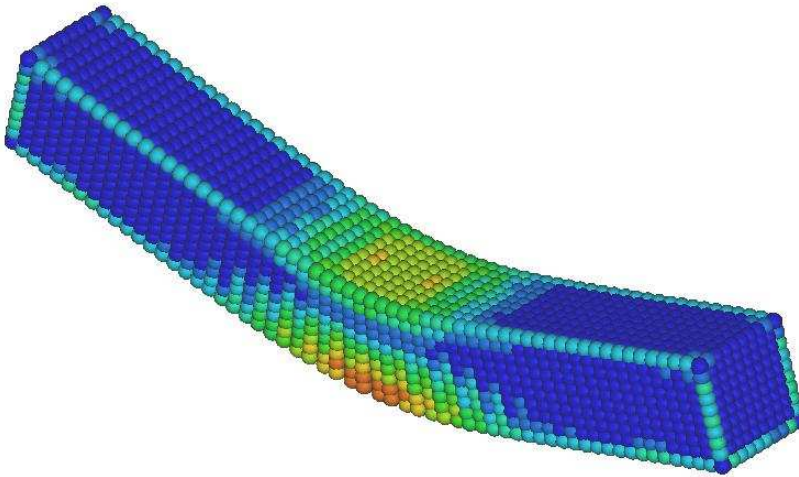
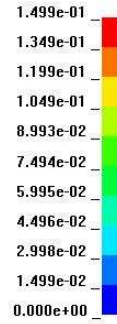
Fringe Levels



Şekil 5.18 : 0,02 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.039999
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0, at elem# 1000015
 max=0.149879, at elem# 1002140

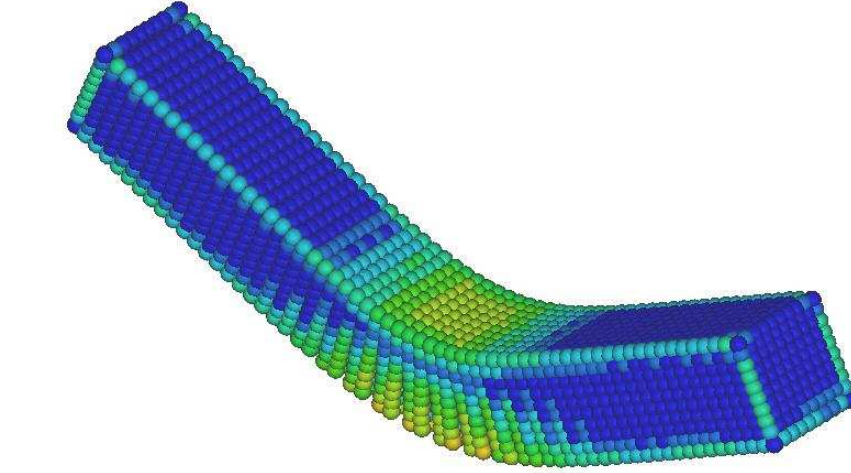
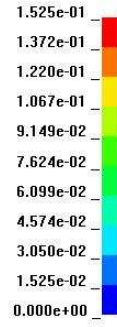
Fringe Levels



Şekil 5.19: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.059999
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0, at elem# 1000015
 max=0.152482, at elem# 1002160

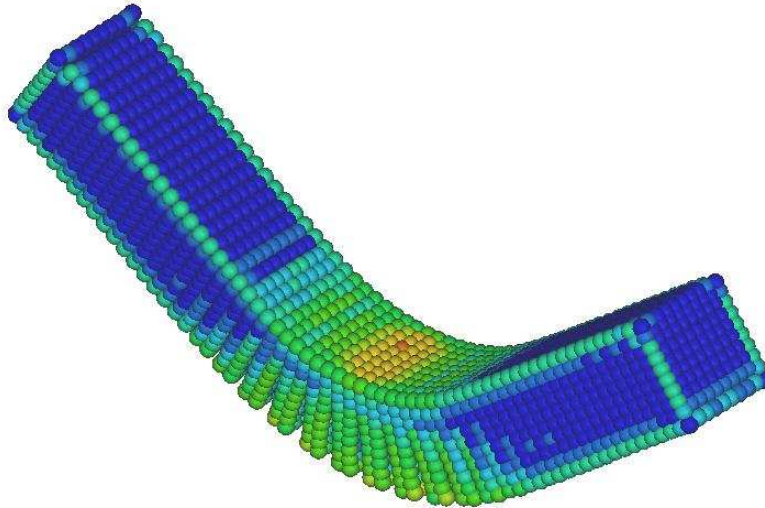
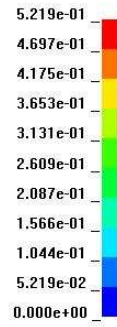
Fringe Levels



Şekil 5.20: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.08
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0, at elem# 1000015
 max=0.521871, at elem# 1003830

Fringe Levels

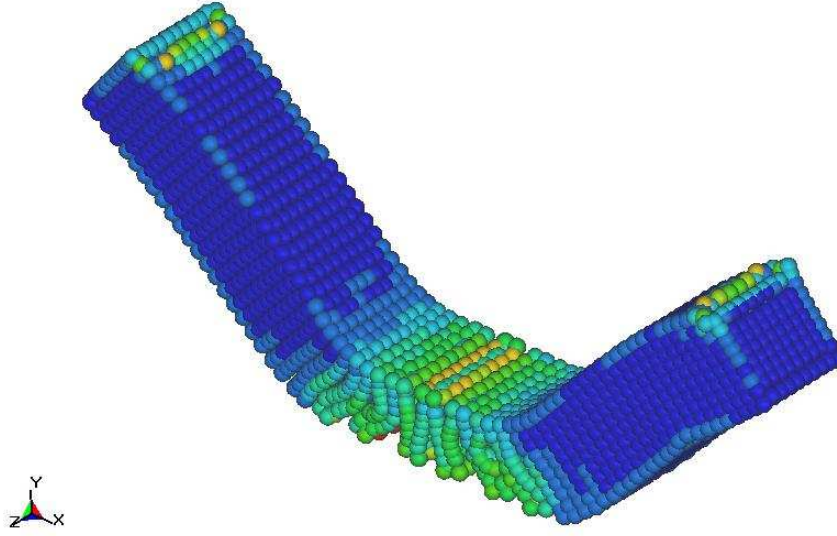


Şekil 5.21: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.099998
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=0.00125503, at elem# 1002451
 max=0.818216, at elem# 1001480

Fringe Levels

8.182e-01
 7.365e-01
 6.548e-01
 5.731e-01
 4.914e-01
 4.097e-01
 3.280e-01
 2.463e-01
 1.646e-01
 8.295e-02
 1.255e-03

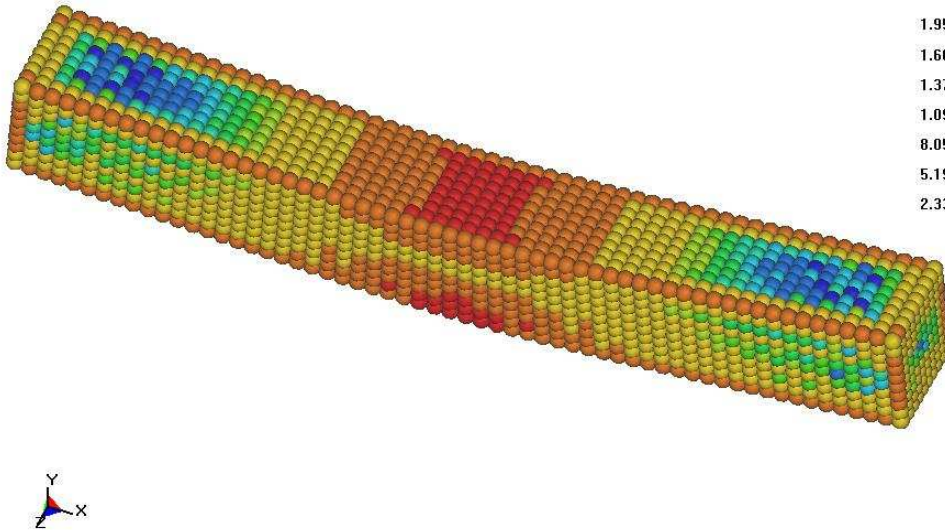


Şekil 5.22: 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

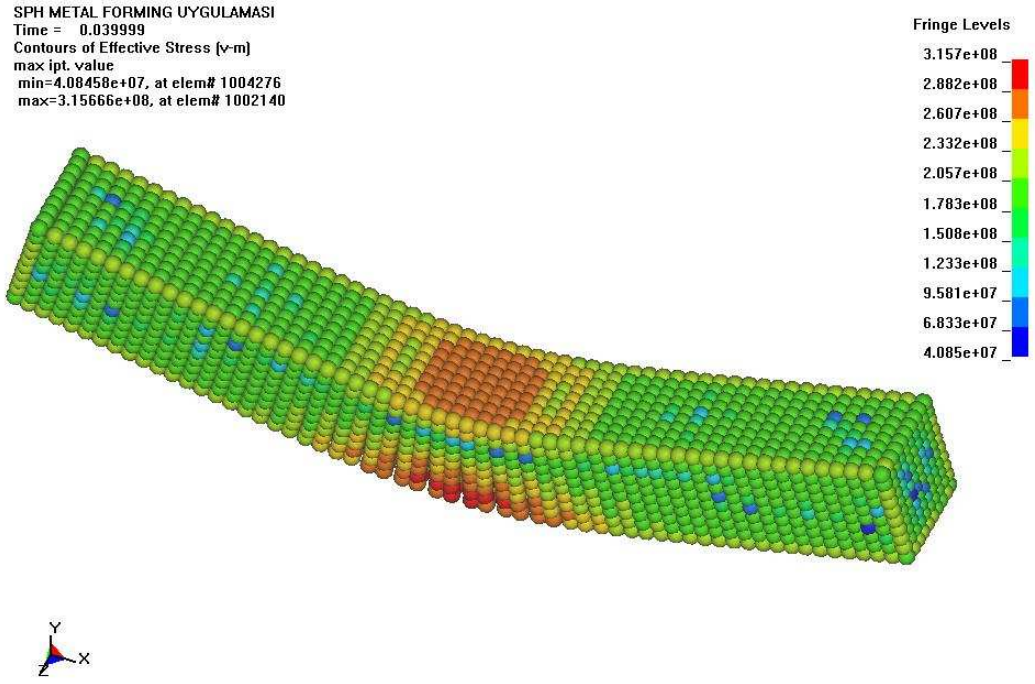
SPH METAL FORMING UYGULAMASI
 Time = 0.02
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max ipt. value
 min=2.32952e+07, at elem# 1002902
 max=3.0965e+08, at elem# 1003910

Fringe Levels

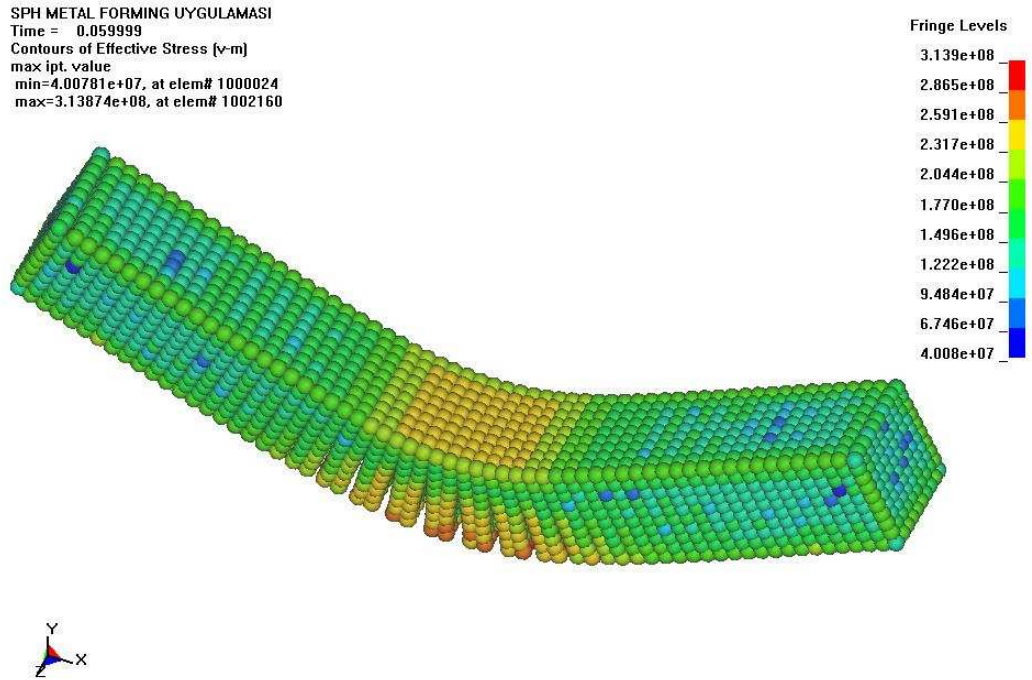
3.097e+08
 2.810e+08
 2.524e+08
 2.237e+08
 1.951e+08
 1.665e+08
 1.378e+08
 1.092e+08
 8.057e+07
 5.193e+07
 2.330e+07



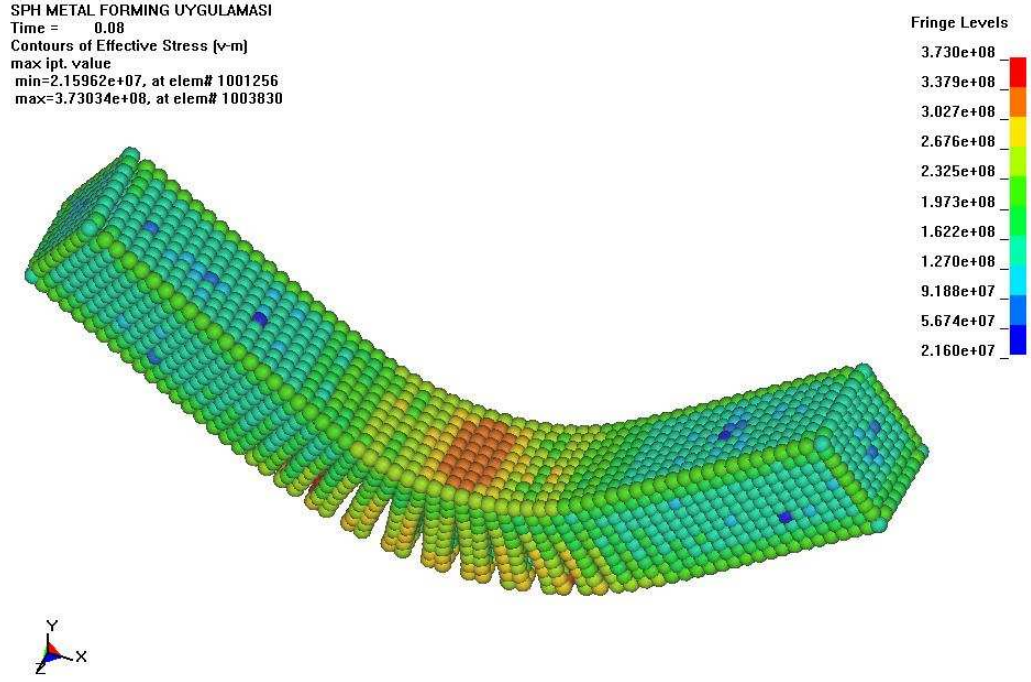
Şekil 5.23: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



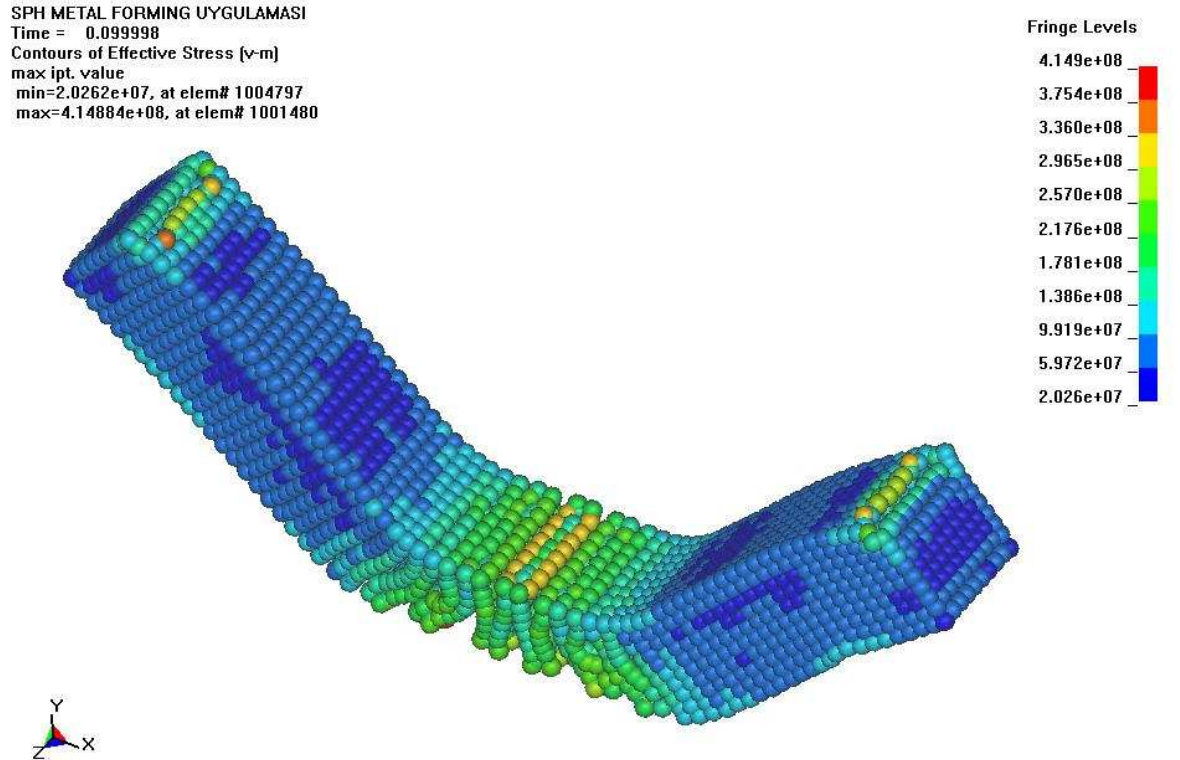
Şekil 5.24 : 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



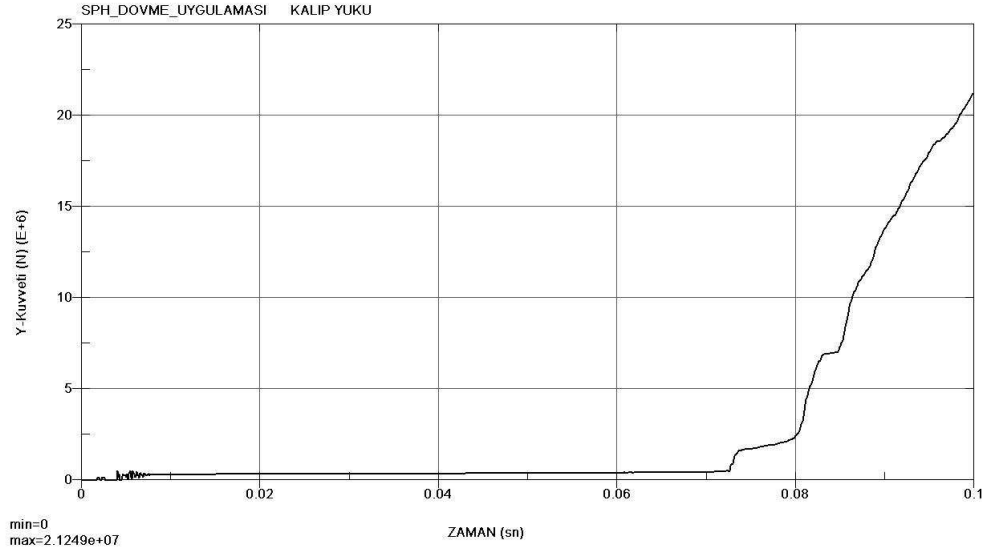
Şekil 5.25: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.26: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.27: 0,1 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

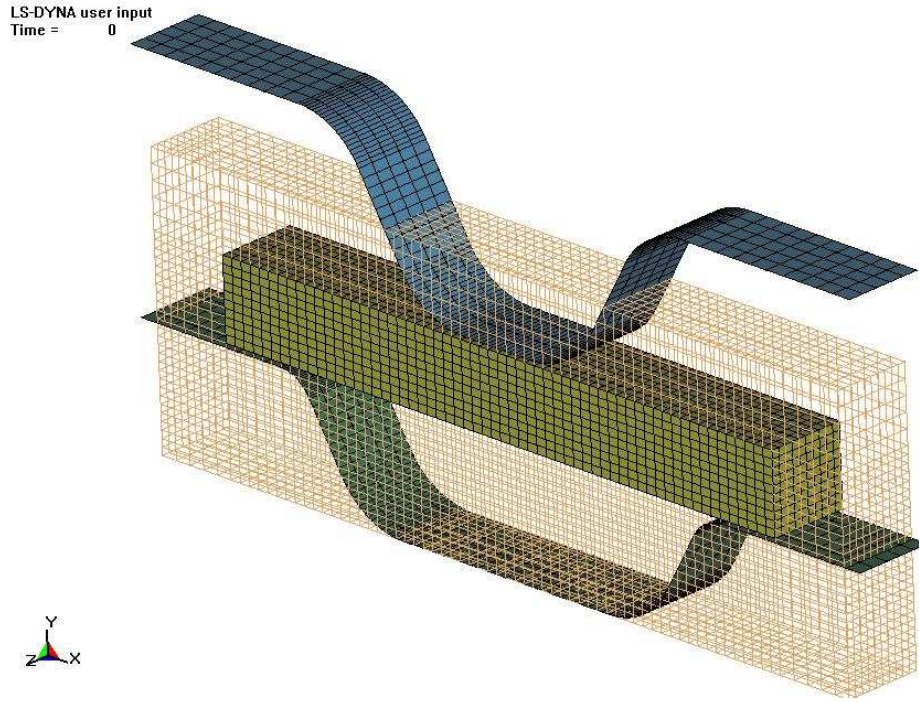


Şekil 5.28: Kalıp yükünün zamana göre değişimi

5.1.4. ALE Metodu ile Simülasyon

5.1.4.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Bu teknik ile çözüm yapmak için kullanılan sonlu elemanlar modeli daha önceki uygulamalarda kullanılan model esas alınarak hazırlanmıştır. İşparçası Euler tipi elemanlar kullanılarak temsil edilmiştir. Euler elemanlarda şekil değişimi elemanın çarpılması ile değil içerisindeki malzemenin yer değiştirmesiyle temsil edilmektedir. Başlangıçta işparçasının içerisinde bulunan malzeme kalıbın hareketiyle şekil değiştirmeye zorlamaktadır. Bu sebeble sonlu elemanlar modeline, şekil değiştiren elemanların içerisinde bulunan malzemenin hareketine olanak sağlamak hareket edebileceği ortamı temsil eden bir yapı daha eklenmiştir. Bu ilave yapı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.29: ALE sonlu elemanlar modeli

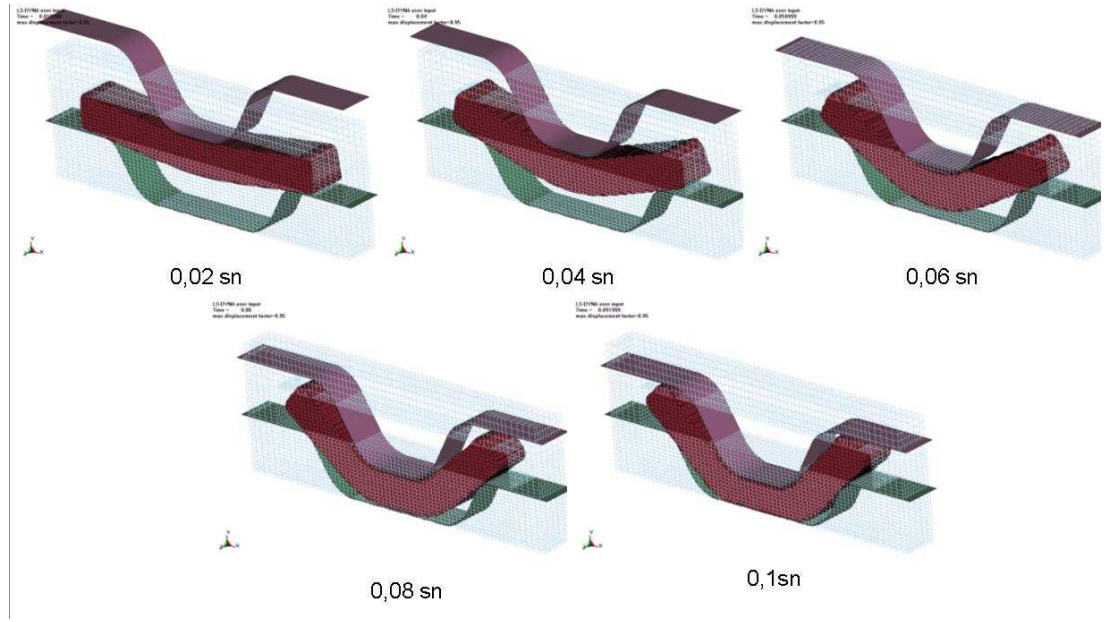
Kalıplar için yine kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kalıplarda rijit malzeme modeli kullanılmıştır. Ortamı ve işparçasını temsil eden yapı için gerinim hızına bağımlı malzeme modeli kullanılmıştır. İşparçasının elemanlarının içi dolu kabul edildiği halde ortamı temsil eden elemanların başlangıçta boş oldukları kabul edilmiştir. Yapı şekil değiştirdikçe işparçasındaki elemanların bir kısmının içindeki malzeme etraflarındaki ortam elemanlarına doğru hareket etmektedir. Parçaların herbirine ait eleman sayıları aşağıdaki tabloda (Tablo 5.4) gösterilmiştir.

Tablo 5.4: ALE sonlu elemanlar modeline ait eleman sayıları

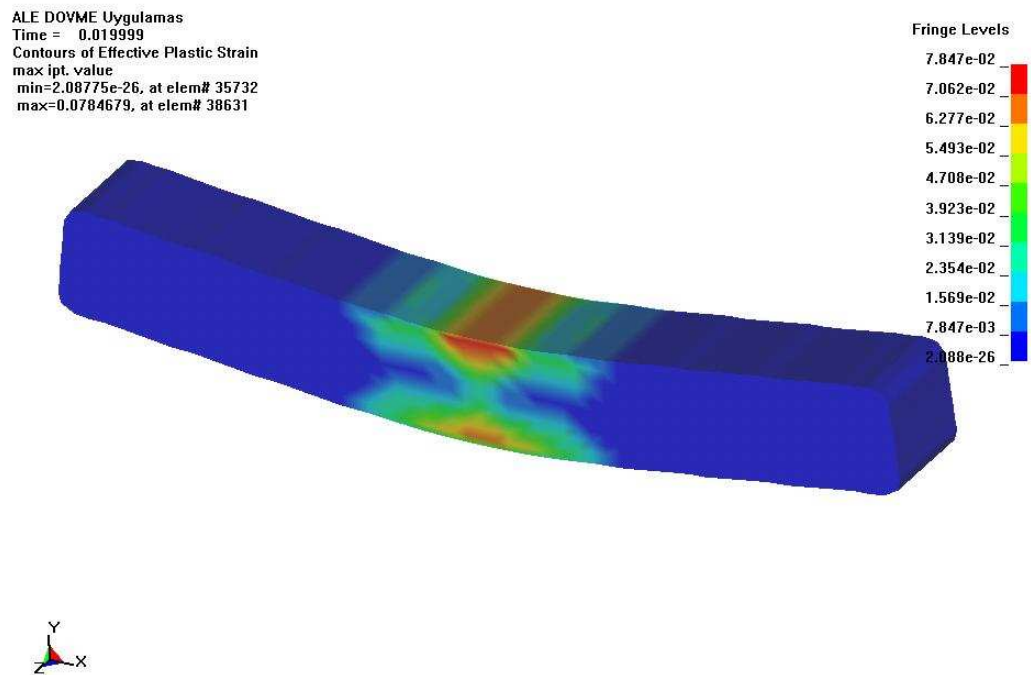
Parça Adı	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Malzeme Modeli
1-İşparçası	KATI (Euler)	6000	*MAT_19
2-Ortam	KATI (Euler)	15700	*MAT_19(Başlangıçta boş)
3-Üst Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
4-Alt Kalıp	KABUK	675	*MAT_20
	TOPLAM	23050	

5.1.4.2 Sonuçlar

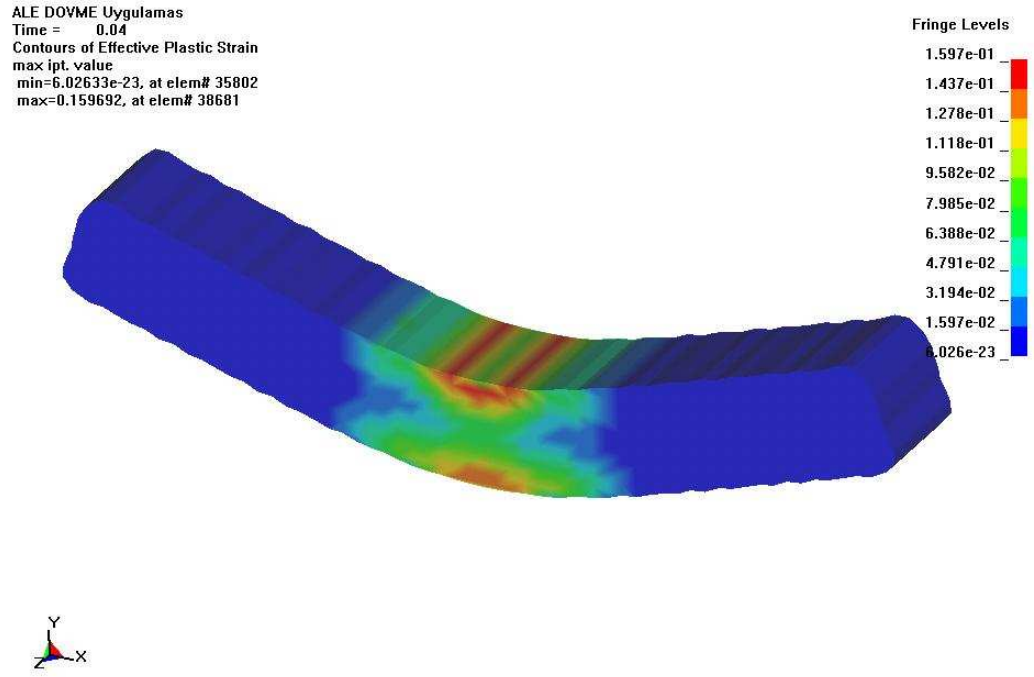
Hazırlanan ALE sonlu elemanlar modeli ANSYS/LS-DYNA v970 çözücüsü kullanılarak çözümlenmiştir. Açık (Explicit) çözümlemede büyük önem taşıyan zaman adımı başlangıçta $1.44E-06$ saniye olarak hesaplanmıştır. Hesaplama bitiminde zaman adımı $1.39E-06$ saniyeye düşmüştür. Zaman adımı değişimin çok küçük olduğu görülmektedir. Hesaplama toplam 71960 döngüde (cycle) tamamlanmıştır. Döngü hesaplama süresi (cycle time) 43308 nanosaniye'dir. Toplam hesaplama süresi 4 saat 38 dakika 36 saniye (16716 saniye)'dir. Çözümleme sonrasında elde edilen sonuçlar; zamana göre kalıp yükü, anlık eşdeğer gerinim (plastic strain or effective strain) ve eşdeğer gerilme (von misses stress) değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



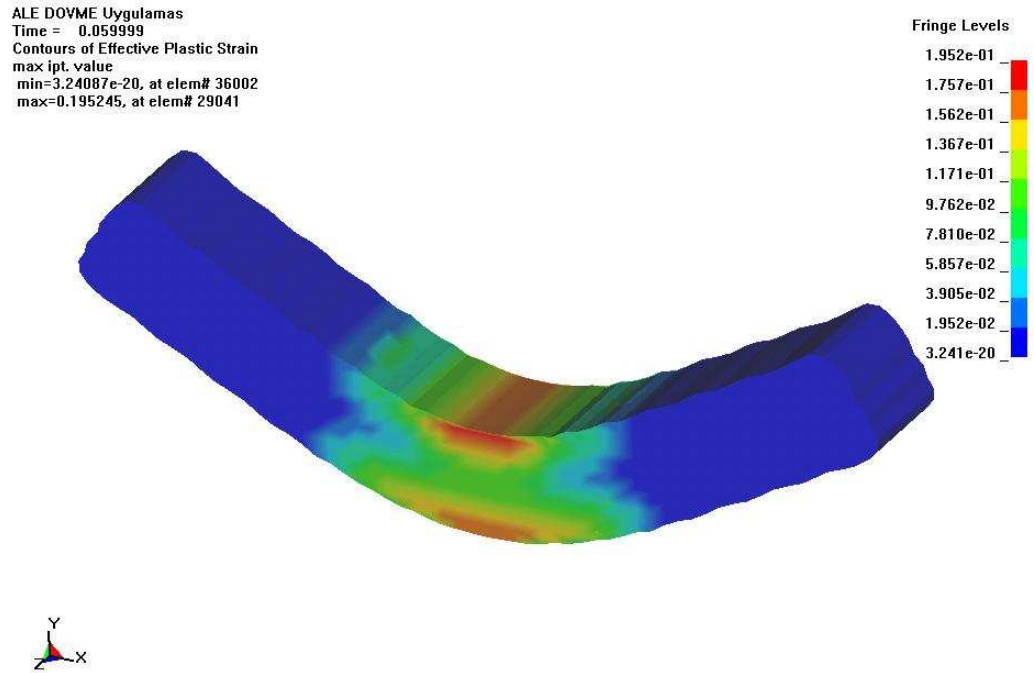
Şekil 5.30: ALE modelinde şekillendirme işleminin gelişimi



Şekil 5.31: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



Şekil 5.32: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

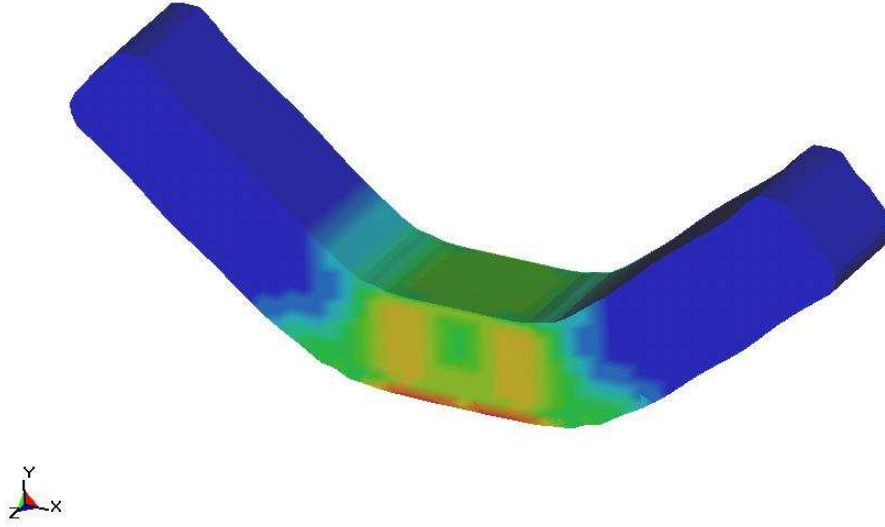


Şekil 5.33 : 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.08
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=5.77134e-16, at elem# 36021
 max=0.396966, at elem# 21865

Fringe Levels

3.970e-01
3.573e-01
3.176e-01
2.779e-01
2.382e-01
1.985e-01
1.588e-01
1.191e-01
7.939e-02
3.970e-02
5.771e-16

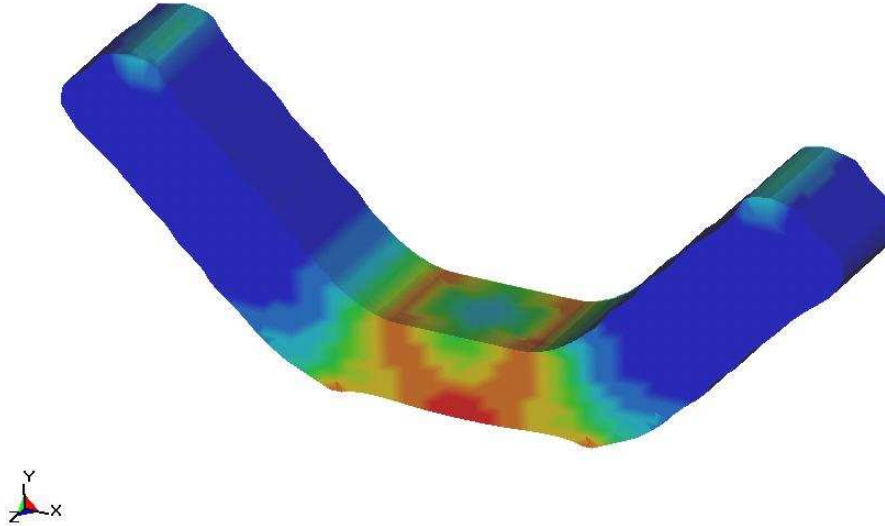


Şekil 5.34: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.091999
 Contours of Effective Plastic Strain
 max ipt. value
 min=2.78221e-06, at elem# 41541
 max=0.73091, at elem# 21844

Fringe Levels

7.309e-01
6.578e-01
5.847e-01
5.116e-01
4.385e-01
3.655e-01
2.924e-01
2.193e-01
1.462e-01
7.309e-02
2.782e-06

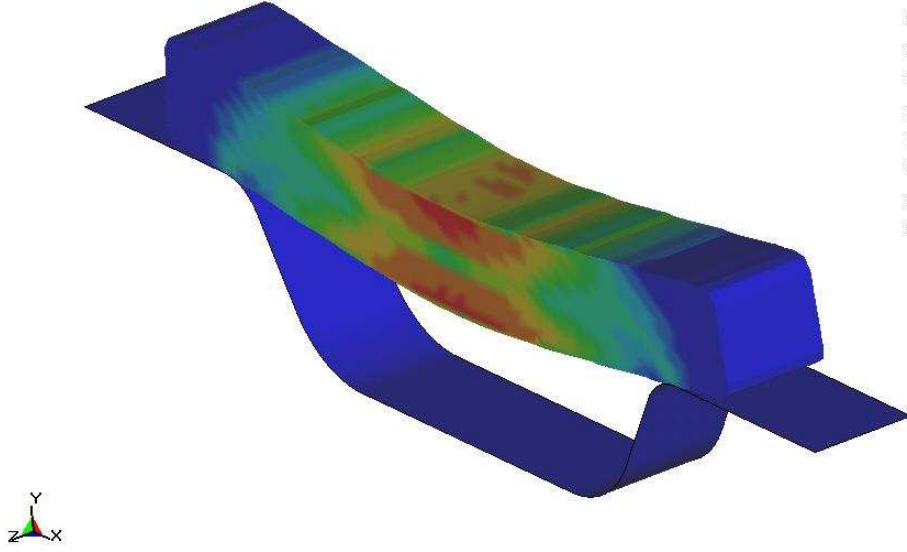


Şekil 5.35 : 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı

ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.019999
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max ipt. value
 min=0, at elem# 6676
 max=3.93504e+08, at elem# 38540

Fringe Levels

3.935e+08
3.542e+08
3.148e+08
2.755e+08
2.361e+08
1.968e+08
1.574e+08
1.181e+08
7.870e+07
3.935e+07
0.000e+00

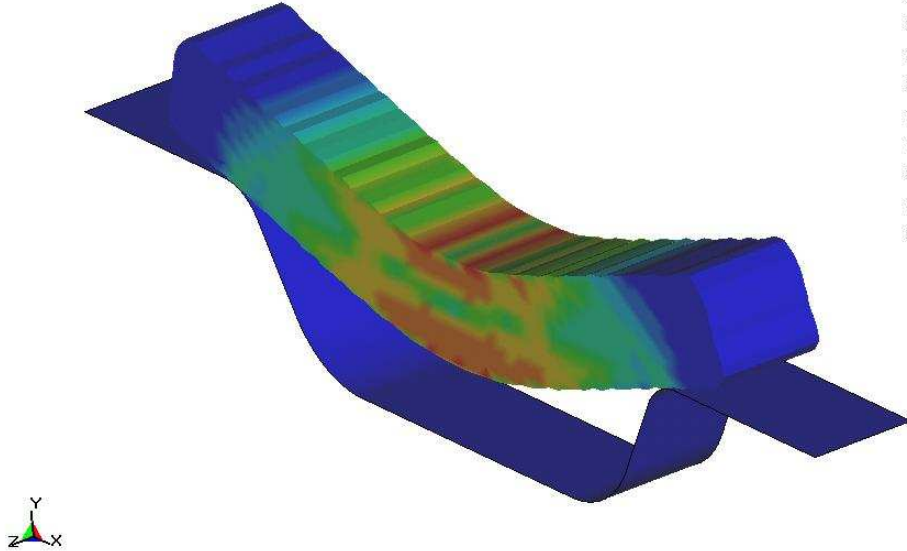


Şekil 5.36: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.04
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max ipt. value
 min=0, at elem# 6676
 max=4.07982e+08, at elem# 38573

Fringe Levels

4.080e+08
3.672e+08
3.264e+08
2.856e+08
2.448e+08
2.040e+08
1.632e+08
1.224e+08
8.160e+07
4.080e+07
0.000e+00

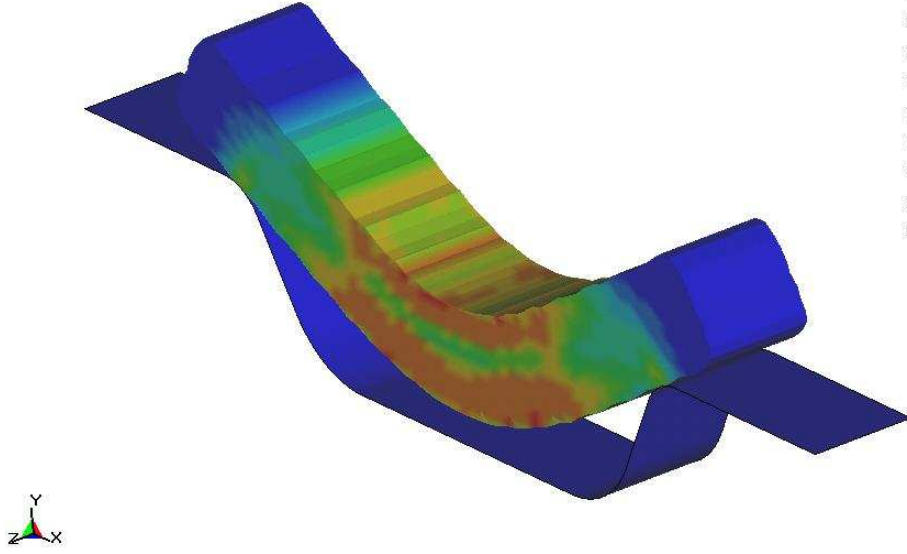


Şekil 5.37: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.059999
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max ipt. value
 min=0, at elem# 6676
 max=3.881e+08, at elem# 24321

Fringe Levels

3.881e+08
3.493e+08
3.105e+08
2.717e+08
2.329e+08
1.940e+08
1.552e+08
1.164e+08
7.762e+07
3.881e+07
0.000e+00

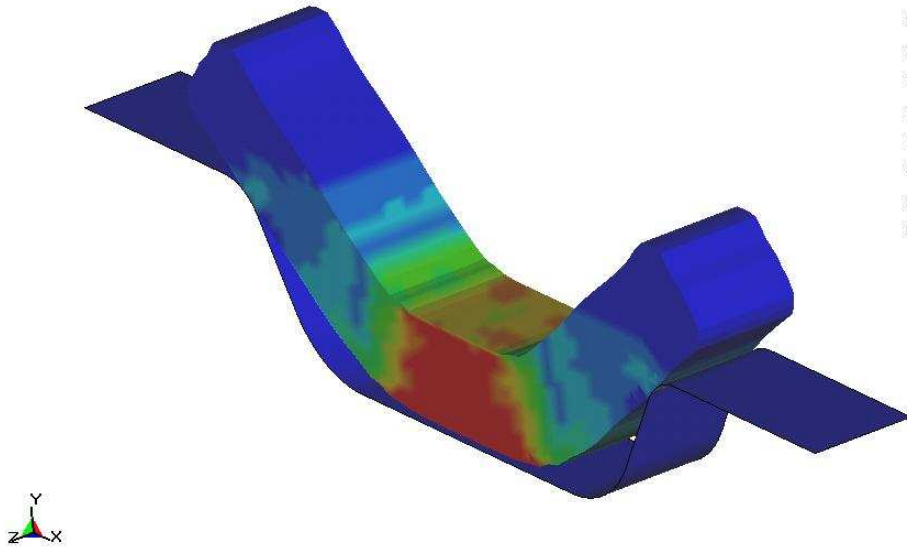


Şekil 5.38: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı

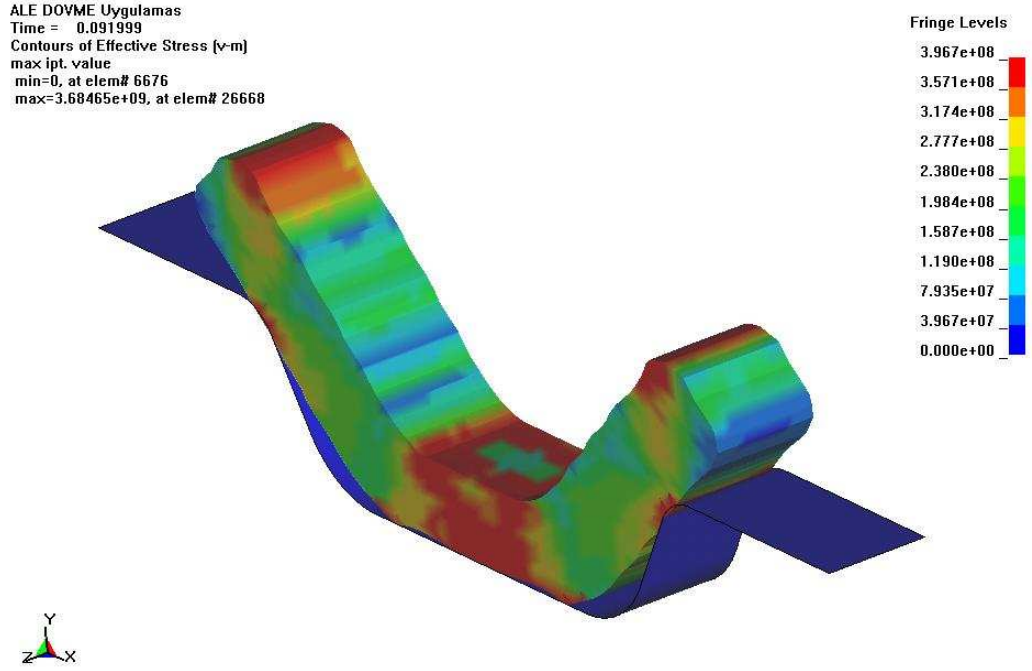
ALE DOYME Uygulamas
 Time = 0.08
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max ipt. value
 min=0, at elem# 6676
 max=8.38159e+08, at elem# 21930

Fringe Levels

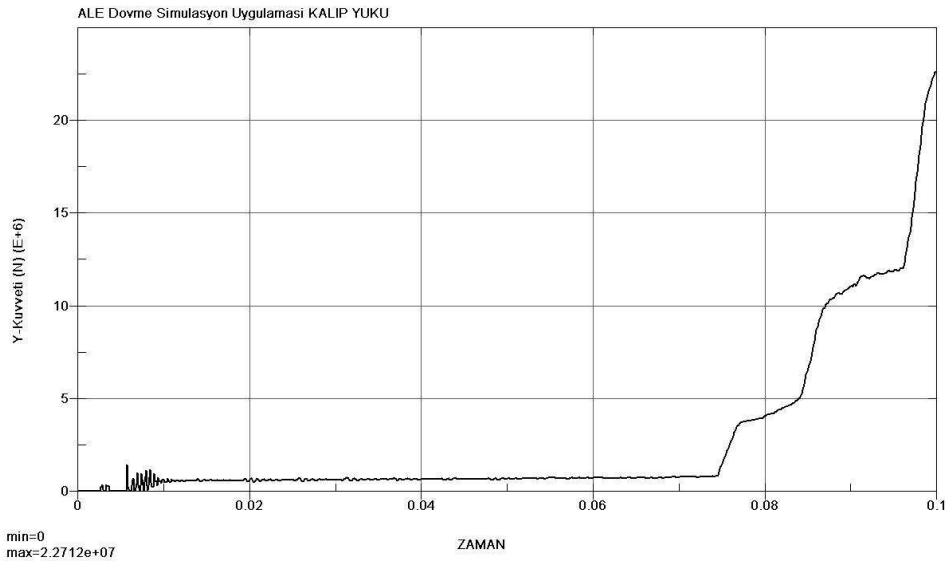
3.676e+08
3.309e+08
2.941e+08
2.573e+08
2.206e+08
1.838e+08
1.471e+08
1.103e+08
7.353e+07
3.676e+07
0.000e+00



Şekil 5.39: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.40: 0,1sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.41: Kalıp yükünün zamana göre değişimi

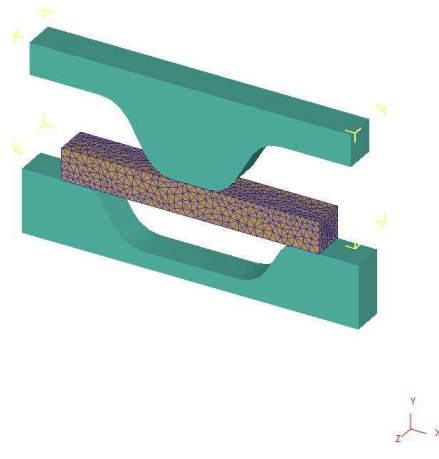
5.1.5. DEFORM ile Simülasyon

5.1.5.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Hazırlanan geometrik model *.stl formatında alınarak sonlu elemanlar modeli DEFORM önışlemcisi kullanılarak hazırlanmıştır. İşparçası otomatik ağ oluşturma

özelliği kullanılarak, yazılımın sahip olduğu tek eleman tipi olan 4 düğüm noktalı dört yüzlü (tetrahedral) katı elemanlara bölünmüştür. Toplam eleman sayısı 6551'dir. İşparçasının temsili malzeme modeli için önceki uygulamalarda kullanılan gerinim hızına bağlı malzeme modelinden elde edilen akma gerilme değerleri (flow stress) hesaplanarak tablo halinde girilmiştir (Tablo 5.5). Kalıplar için rijit malzeme modeli seçilmiştir.

Uygulama_1

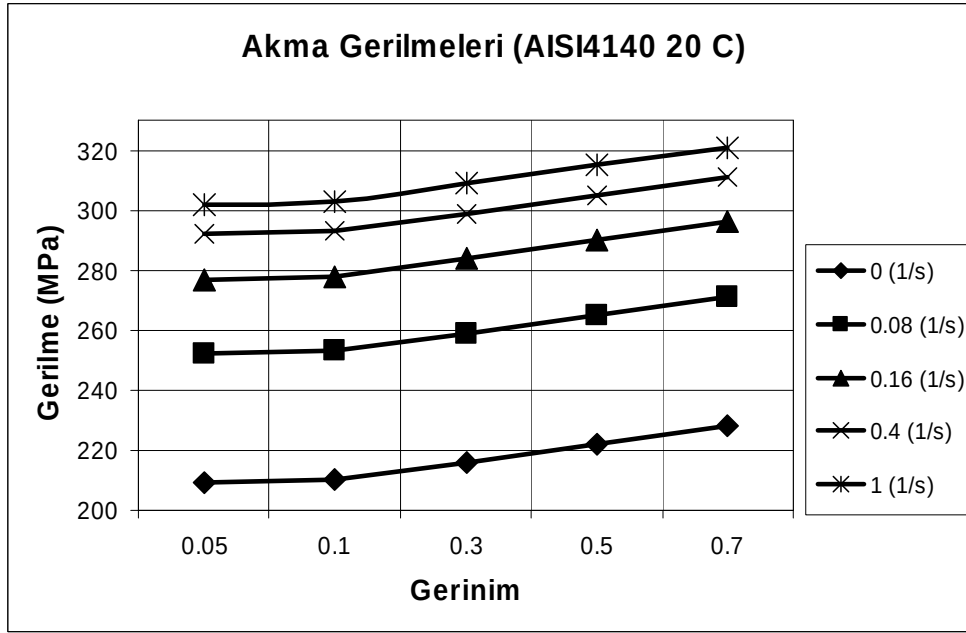


Şekil 5.42: Sonlu elemanlar modelinin görünüşü

Tablo 5.5: AISI4140 çeliği için kullanılan akma gerilmeleri

	Gerinim				
Gerinim Hızı (1/s)	0.05	0.1	0.3	0.5	0.7
0	209 MPa	210 MPa	216 MPa	222 MPa	228 MPa
0.08	252 MPa	253 MPa	259 MPa	265 MPa	271 MPa
0.16	277 MPa	278 MPa	284 MPa	290 MPa	296 MPa
0.4	292 MPa	293 MPa	299 MPa	305 MPa	311 MPa
1	302 MPa	303 MPa	309 MPa	315 MPa	321 MPa

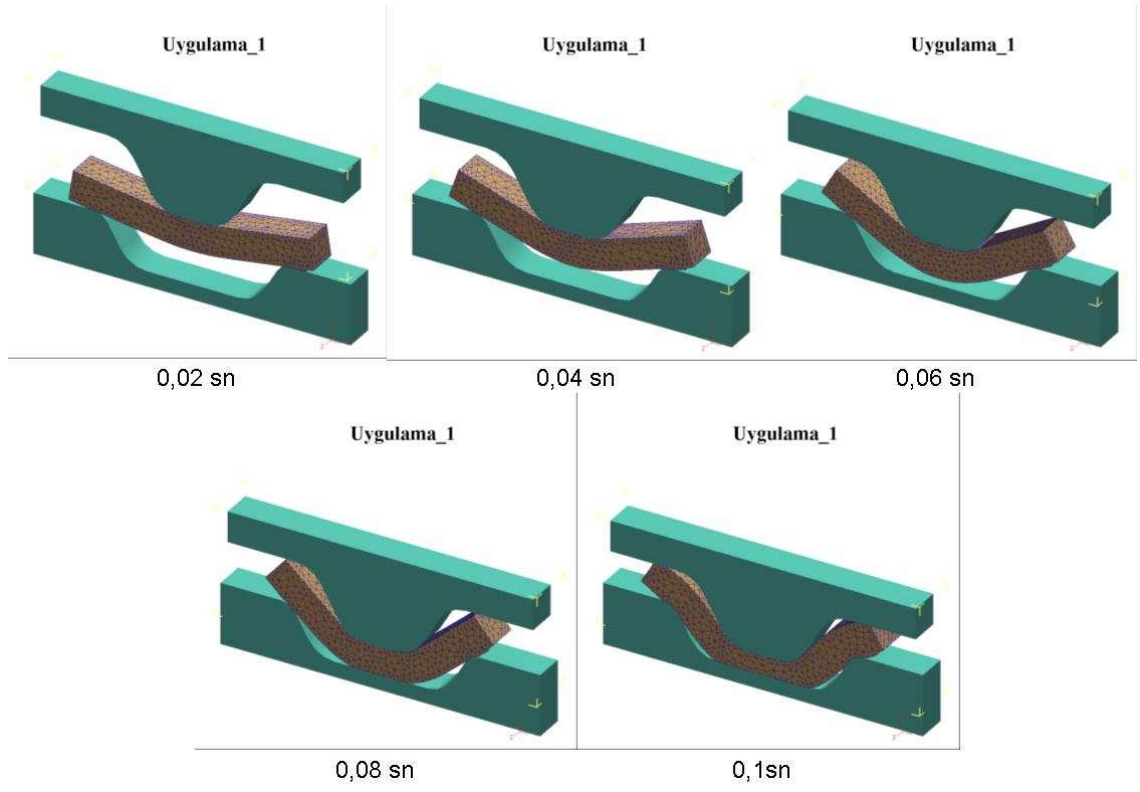
Tablo 5.6: AISI4140 malzemesinin gerinme hızı ile akma gerilmesinin değişimi



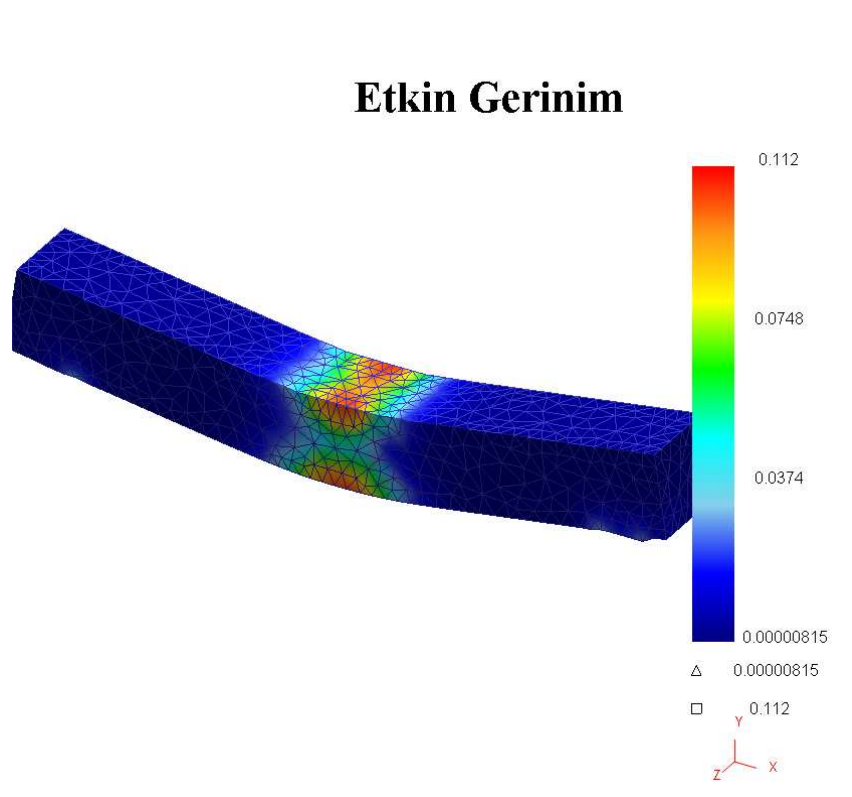
Hesaplama sabit adımlarla yapılmıştır. Toplam adım sayısı 200'dür. Zaman adımı kriteri olarak $5E-04$ saniye verilmiştir. Hesaplama sırasında hacim korunumunu sağlamak için hacim sabitliği kriteri aktif duruma getirilmiştir. Çözüm sırasında her 5 adımda bir tekrar ağ oluşturma (remeshing) kriteri verilmiştir.

5.1.5.2 Sonuçlar

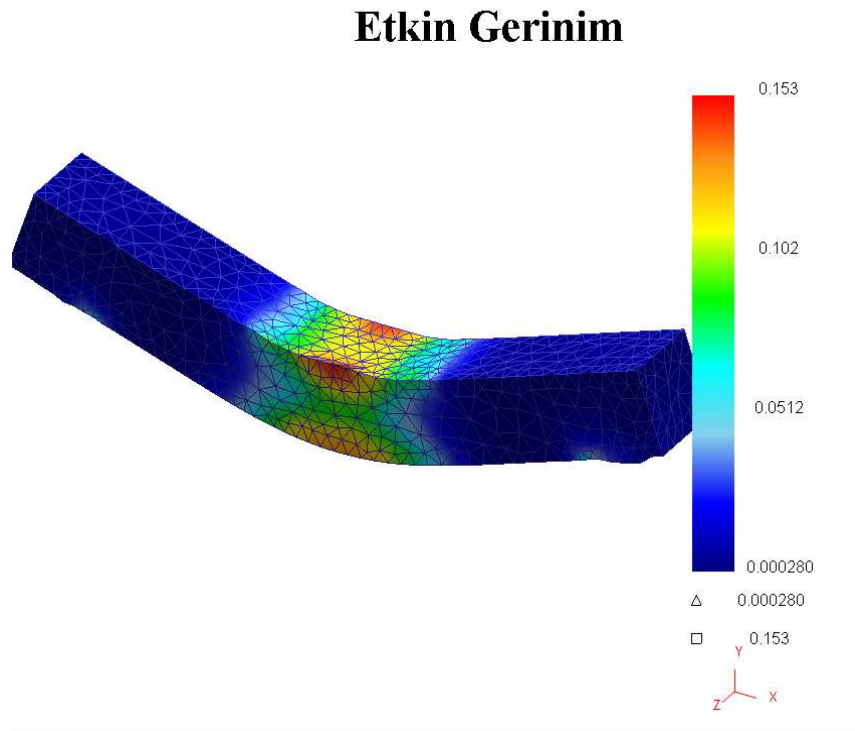
Hazırlanan sonlu elemanlar modeli DEFORM-3D™ çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Toplam hesaplama zamanı 36 dakika 18 saniyedir. Çözümleme sonrasında elde edilen sonuçlar; zamana göre kalıp yükü, anlık eşdeğer gerinim (plastic strain or effective strain) ve eşdeğer gerilme (von misses stress) değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



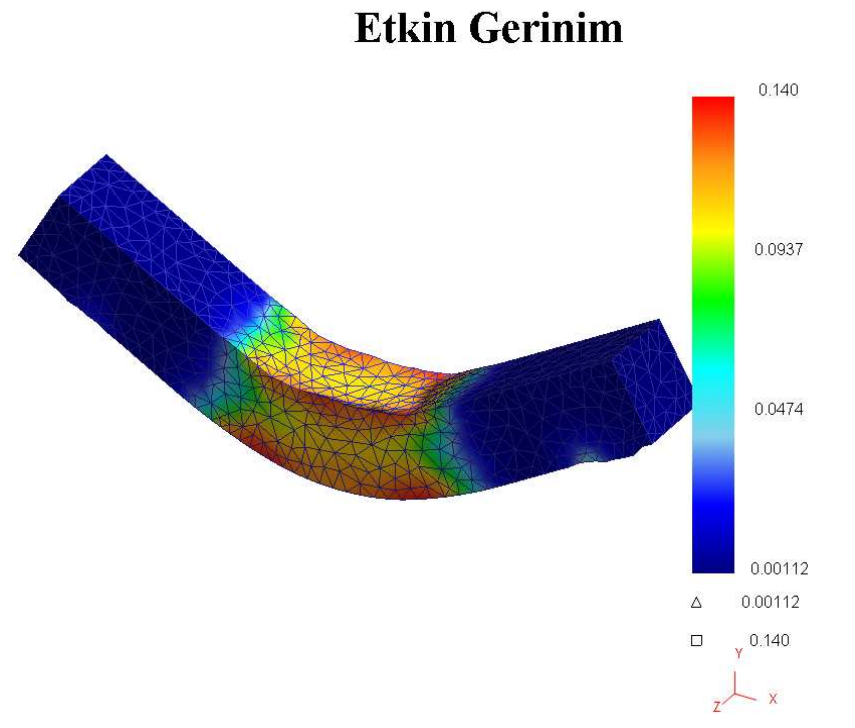
Şekil 5.43 : İşparçasının şekillendirilmesi



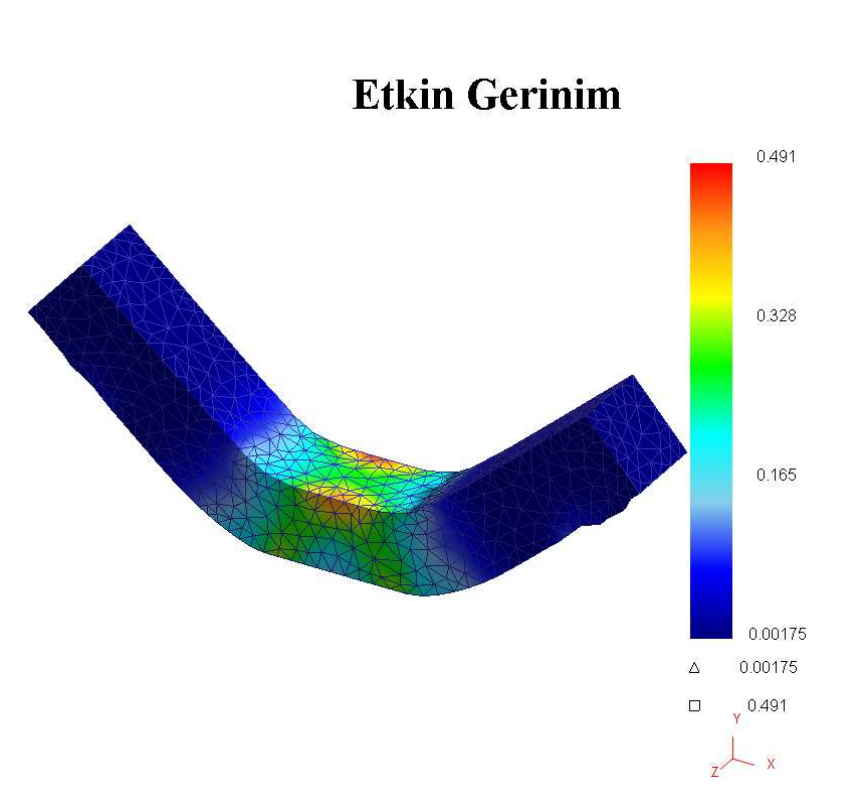
Şekil 5.44 : 0,04 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



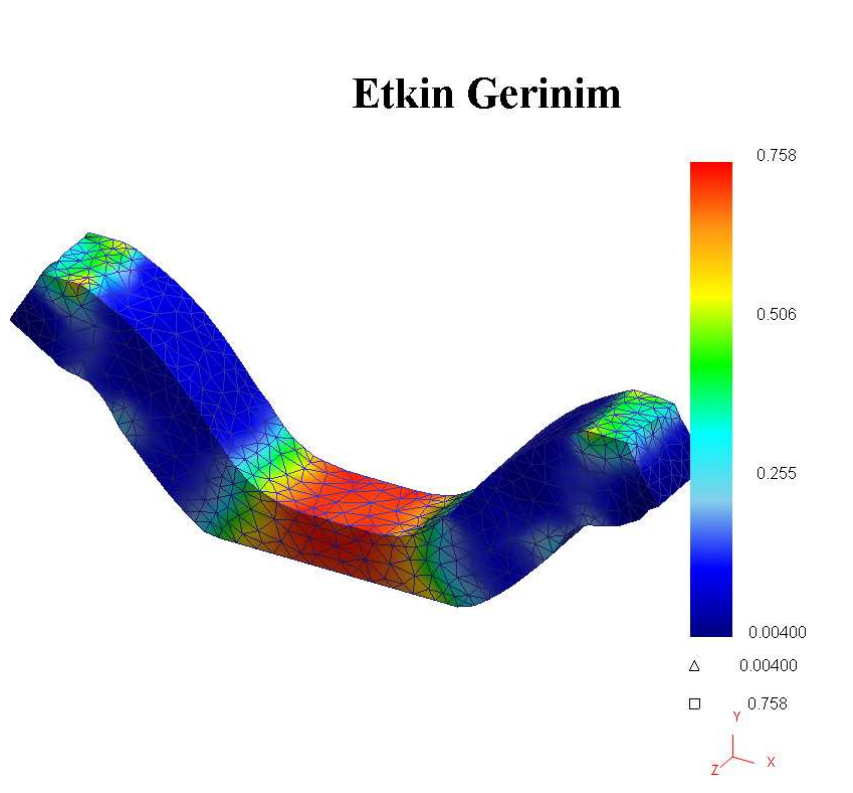
Şekil 5.45: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



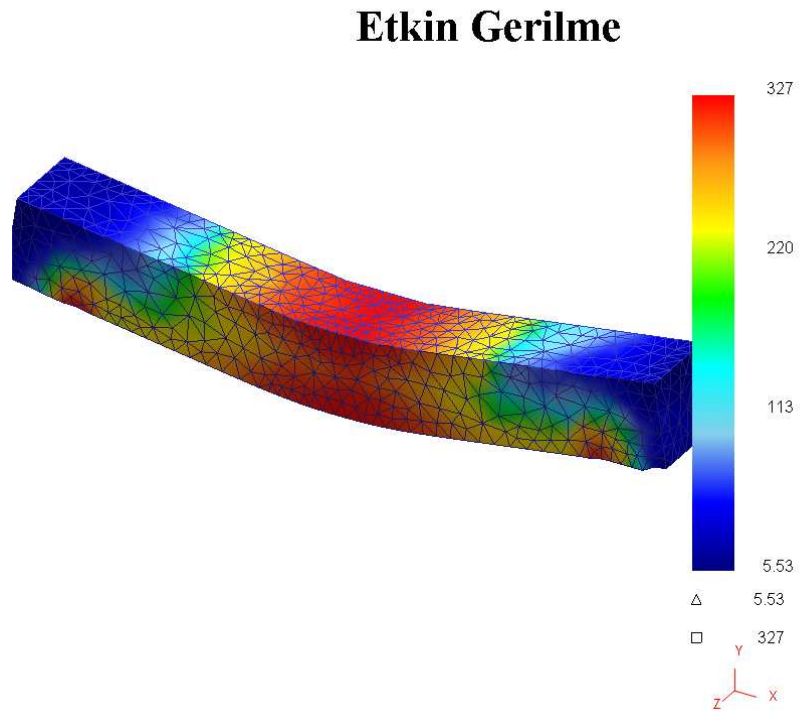
Şekil 5.46: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



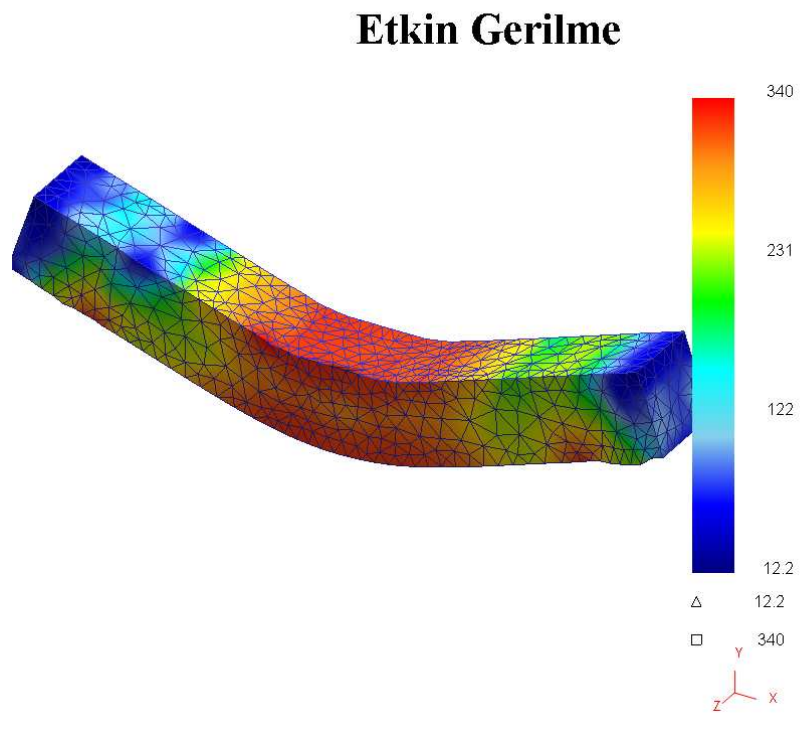
Şekil 5.47: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



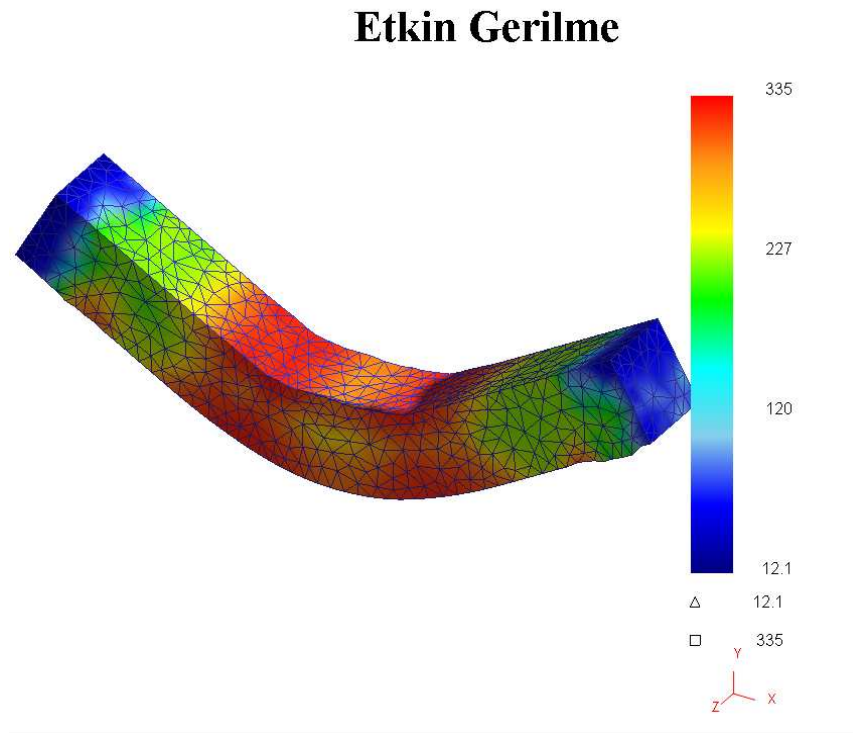
Şekil 5.48: 0,1 sn'de parça üzerindeki gerinim dağılımı



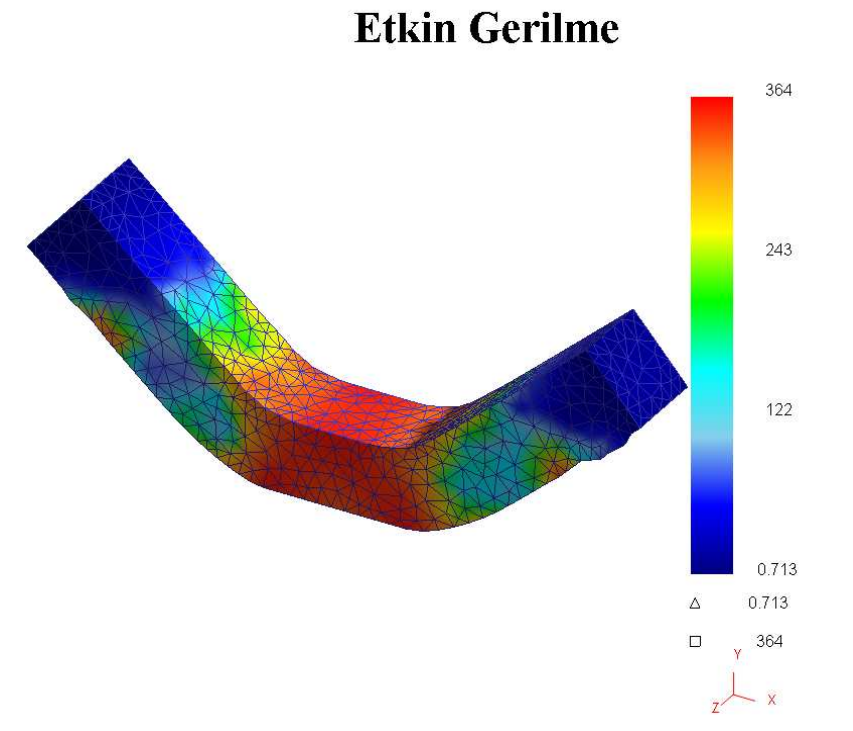
Şekil 5.49: 0,02 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



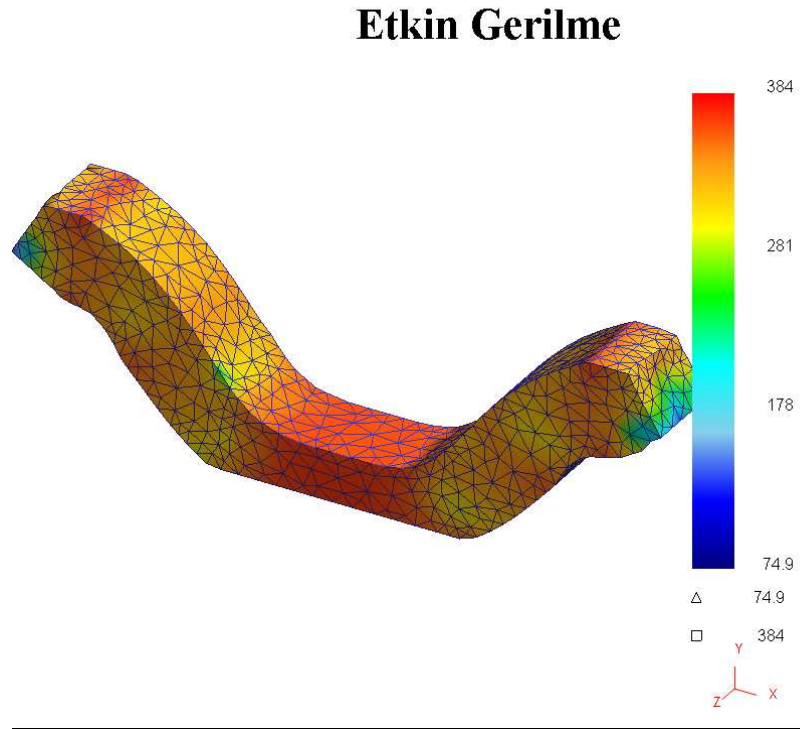
Şekil 5.50: 0,04 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



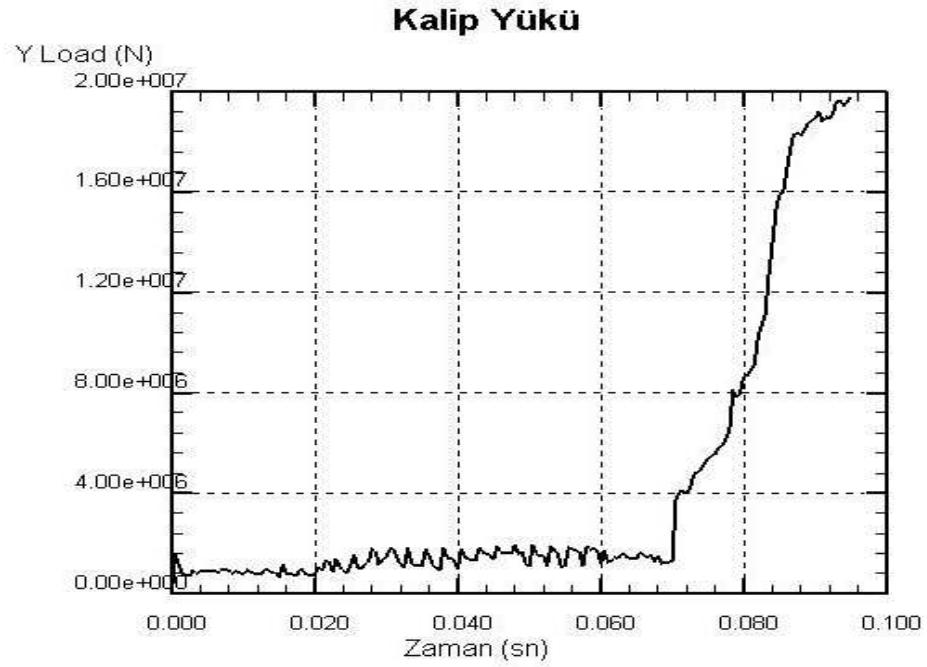
Şekil 5.51: 0,06 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.52: 0,08 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.53 : 0,1 sn'de parça üzerindeki gerilme dağılımı



Şekil 5.54: Kalıp yükünün zamana göre değişimi

5.1.6. Sonuçların Değerlendirilmesi

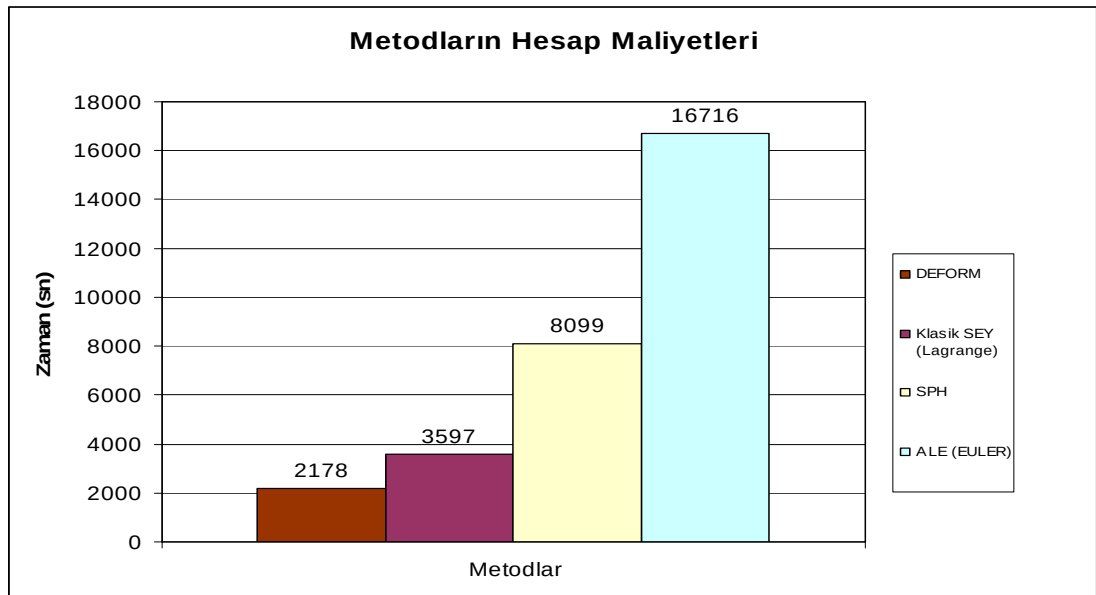
Ele alınan uygulama probleminin eşdeğer modellenmesi ve farklı metodlarla çözümlenmesi sonucu ortaya çıkan hesaplama maliyeti aşağıdaki tabloda (Tablo 5.7) gösterilmektedir.

Tablo 5.7 Metodların hesaplama maliyetleri

Metod	Toplam Eleman Sayısı	Modelleme Süresi (dak)	Zaman Adımı (sn)	Hesaplama Süresi (sn)
Klasik SEY (Lagrange)	6000	120	1.44E-06 - 2.63E-07	59dak.57sn
SPH	6000	135	3.45E-06	2saat14dak.59sn
ALE (Euler)	21700	165	1.44E-06	4saat38dak.36sn
Implicit (DEFORM)	6551	45	5.00E-04	36dak 18sn

Dikkat edilecek olursa modelleme sürelerinde Deform ile hazırlanan model diğerlerinden 2 kat daha kısa sürede tamamlanmıştır. Yazılımın dövme işlerinin simülasyonu için özelleştirilmiş olmasının önemi büyüktür. Yine hesaplama zamanlarına bakıldığında en kısa sürede sonuç veren kapalı çözüm yapan DEFORM programıdır. Klasik SEY yöntemi yaklaşık 1.65 kat, SPH metodu 3.71 kat, 7.67 kat daha uzun sürede çözümleme yapmıştır.(Tablo 5.8)

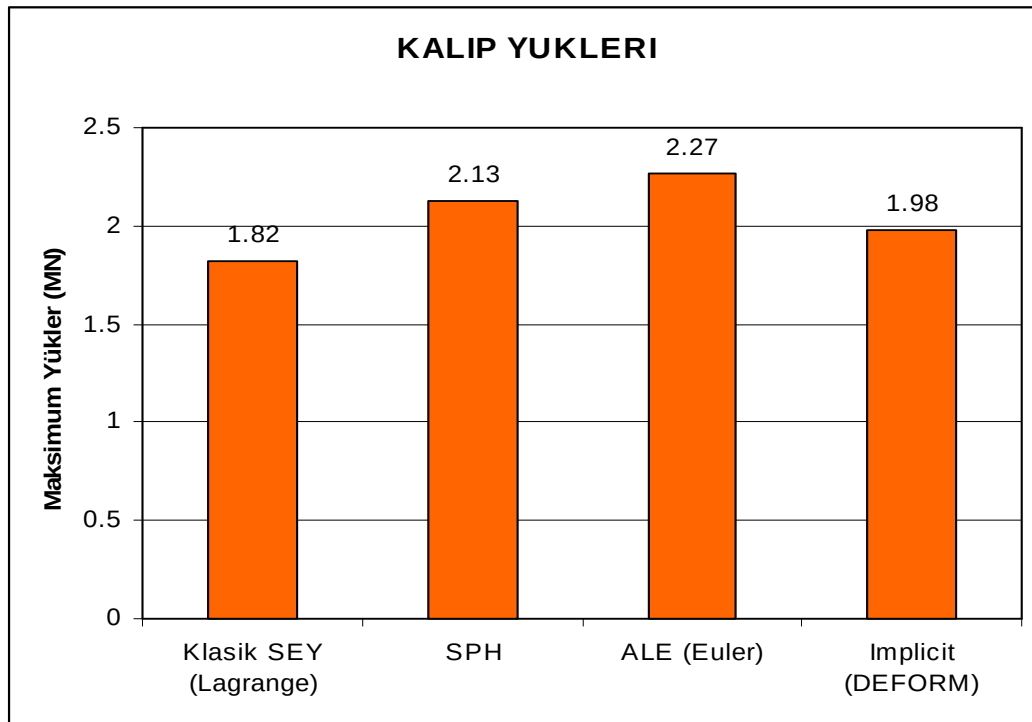
Tablo 5.8 Metodlara göre hesap maliyeti



Hesap maliyeti özellikle ALE metodu için oldukça büyük bir artış göstermektedir. Açık (explicit) metodlar kendi içinde değerlendirildiğinde ALE yöntemi, klasik yöntemden 4.6 kat daha pahalıya malolmaktadır. İlk bakışta hesaplama süresinde en büyük etken olan zaman adımının iki metod için aynı olduğu görülmekle birlikte döngü zamanları (cycle time) karşılaştırıldığında ALE metodunun her döngü hesabı, klasik yöntemden 10 kat uzun sürmektedir. Maliyet farkını yaratan bu döngü zamanı farkıdır. SPH metodu içinde durum benzerdir.

Nümerik çözümlerde, karşılanabilir bir maliyet ile yeterli derecede doğru sonuçlar almak esası gözetilmektedir. Uygulamada ele alınan problemin deneysel sonuçları bulunmamaktadır. Bu sebeble sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmışlardır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 5.9) çözüm metoduna göre maksimum kalıp yükleri verilmiştir.

Tablo 5.9: Simülasyonlardan elde edilen maksimum kalıp yükleri



Zaman-yükleme grafikleri incelendiğinde bütün metodlar için yükleme karakteristiğinin benzer olduğu görülmektedir. Fakat yukarıdaki tablodaki görüldüğü gibi tahmin edilen kalıp yükleri arasında ihmal edilemeyecek farklar ortaya çıkmıştır. Bu farklar büyük ölçüde, kullanılan temas algoritmalarındaki farklılıklardan

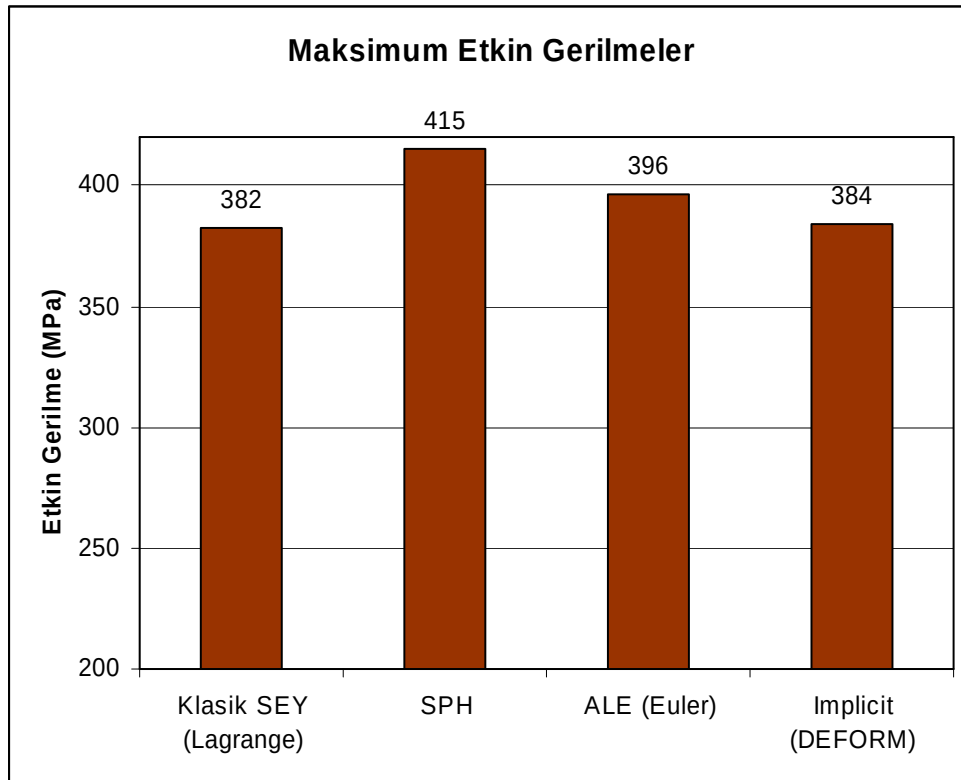
kaynaklanmaktadır. Deform çözümü kriter olarak alındığında, metodlar arasındaki maksimum kalıp yükü farkları aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 5.10: Kalıp yükü % fark miktarı (Deform çözümüne kıyasla)

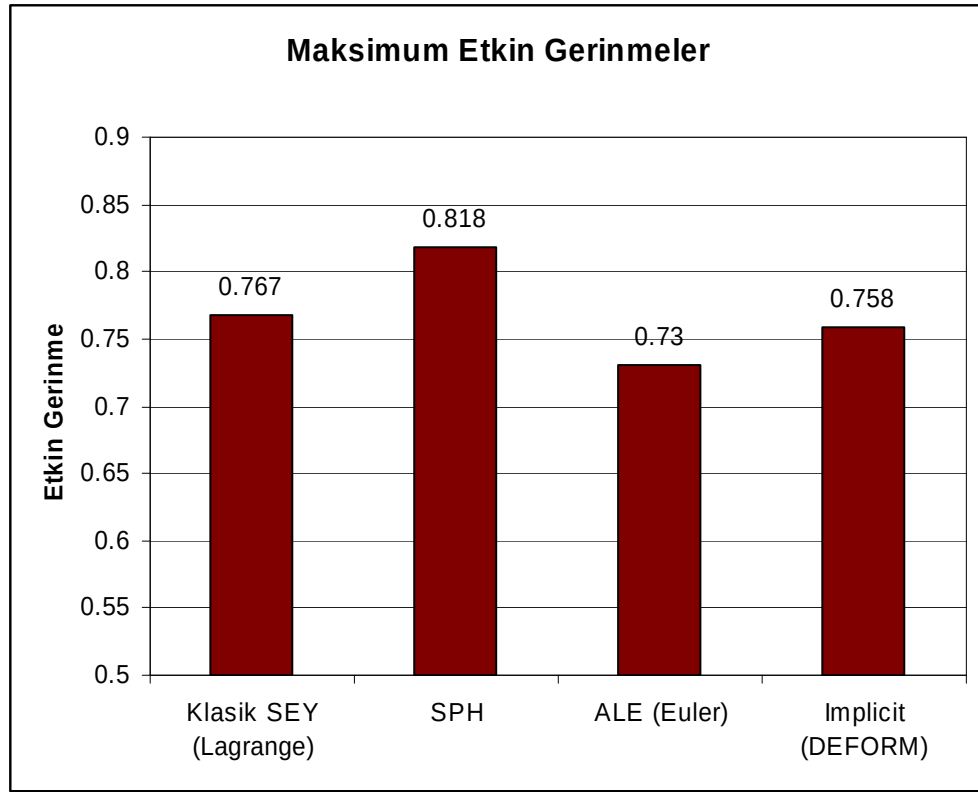
	max. Kalıp Yüğü (MN)	% Fark
Klasik SEY (Lagrange)	1.82 E+06	-8.08
SPH	2.13 E+06	7.57
ALE (Euler)	2.27 E+06	14.64

Kullanılan metodlara göre maksimum eşdeğer gerilmeler ve eşdeğer gerinme değerleri Tablo 5.11’de gösterilmektedir.

Tablo 5.11: Maksimum eşdeğer gerilmeler



Tablo 5.12: Maksimum eşdeğer gerinmeler



Yukarıdaki tablolardanda açıkça anlaşılacağı gibi kalıp yüklerinde ALE çözümü daha yüksek bir sonuç versede, maksimum eşdeğer gerilme ve gerinme değerlerinde SPH metodu daha yüksek tahminler yapmaktadır. Tüm veriler gözönüne alındığında açık (explicit) tip klasik SEY yöntemi ile kapalı (implicit) yöntem birbiri ile en yakın tahminleri yapmaktadır.

6. SONUÇLAR/ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ortaya çıkan tablo özetlenecek olursa;

Büyük plastik deformasyon meydana gelen metal şekillendirme problemlerinde remeshing özelliği vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Bu çalışmada kullanılan ANSYS/LS-DYNA ticari yazılımının sahip olmadığı bu özelliğin bu yazılıma kazandırılması gerekmektedir.

Remeshing uygulamasına alternatif olarak öne sürülen metodların çözüm zamanlarının fazla olması, çözümlerin pratik olmasını engellemektedir. Bu sebeple çözüm sürelerinin kısaltılması üzerinde çalışılmalıdır.

Bu çalışma çerçevesinde dünyada henüz yeni kullanılmaya başlayan iki sonlu elemanlar metodunun tanıtımı yapılmakla beraber, bu metodlar basit bir dövme işlemini modellemek için kullanılmıştır. Bir diğer önemli husus ise ilave yazılımlar kullanarak ANSYS/LS-DYNA™ ticari kodunun modelleme ve hesaplama kabiliyetlerinin geliştirilmesidir.

İmalat işleminde simülasyonun önemi büyüktür. Ürün kalitesini artırılmasına yardımcı olduğu gibi doğru uygulandığı takdirde maliyetleri düşürdüğü ispatlanmıştır. Bununla birlikte işletmelerin genelinde iki tip simülasyon yazılımı kullanılmaktadır. Bunlardan ilki kullanımı kolay fazla parametresi olmayan ve kullanıcı uzmanlığına ihtiyaç duymayan, uygulamaya göre özelleştirilmiş yazılımlardır. Diğer taraftan ikinci tür yazılımlar hemen her fiziki hadisenin modellenebileceği fakat uzmanlık (akademik düzeyde) isteyen yazılımlardır. Genel tip ticari kodların hem öğrenilmesi, hemde kullanımı zordur. Ayrıca girilmesi gereken parametrelerin çok fazla olması sebebiyle kullanıcı hatalarına açıktır.

Bu tez çalışması çerçevesinde bu iki tür yazılımda kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar gözönünde bulundurularak kar amaçlı işletmelerin bu iki tip yazılımdan uzmanlaşmış olanları tercih etmeleri gerekir. Dünyadaki eğilimde bu yöndedir. Fakat özelleşmiş kodlar genel kodlara nazaran hem daha pahalı hemde kullanım alanları çok daha kısıtlıdır. Bu sebeble gelecekte, genel kodların özel problemlerde (dövme,saç metal şekillendirme) daha etkin kullanımı için özelleştirilmiş kullanıcı arayüzü yazılması düşünülmektedir.

Kullanılan sonlu elemanlar modellerine dikkat edildiği takdirde özellikle metal şekillendirme işlerinin simulasyonunda etkin rol oynayan sıcaklık değişim ve ısı geçişi etkilerinin ihmal edildiği görülmektedir. Bu kabul sonuçların doğruluğunu oldukça etkilemektedir. Gelecekte yapılacak daha karmaşık simülasyon uygulamalarında bu etkilerde gözönünde tutularak hesaplamalara katılması öngörülmektedir.

Elde edilen sonuçlar nümerik hesaplamalara dayanmaktadır ve fiziksel hadiselerle belirli bir hata payı ile yaklaşım getirmektedir. Sonuçların daha objektif ve doğru değerlendirilebilmesi için ele alınan problemin deyinin yapılması ve bu deney sonuçları doğrultusunda nümerik çözümlerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- 1) HALLQUIST, J.O., LS-DYNA Theoretical Manual, LSTC, Livermore 1997
- 2) HALLQUIST, J.O., LS-DYNA Keyword User's Manual Version 970, LSTC, 2003
- 3) ALTAN T., S. OH and H. GEGEL, Metal Forming: Fundamentals and Applications, ASM 1983
- 4) BATHE, K. J. Finite Element Procedures, John-Wiley and Sons, NY, 1996.
- 5) BENSON D.J., Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes, J. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 99 (1992) p235±294.
- 6) M. SOULI, A. OUAHSINE, L. LEWIN, Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation for Fluid-Structure Interaction Problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 190 (2000) p 659-675
- 7) L. OLOVSSON and M. SOULI, ALE and Fluid-Structure Interaction Capability in LS-DYNA, 6th International LS/DYNA Users Conference, 2000
- 8) BENJAMIN A. TUTT, ANTHONY P. TAYLOR, The Use of LS-DYNA to Simulate the Water Landing Characteristics of Space Vehicles, 8th International LS-DYNA Users Conference 2004
- 9) DEFORM, Deform-3D User's Manual, SFTC, Columbus, OH, 2003.
- 10) ANSYS Inc., ANSYS User Guide Version 8.0, 2003
- 11) DPT, Dövme Ürünleri Çalışma Grubu Raporu, DPT, 1995, Ankara
- 12) LACOME, J.L., Smoothed Particle Hydrodynamics Part:I, FEA Newsletters, October, 2001 p.3-8
- 13) T. BELYTSCHKO, Y. KRONGAUZ, D. ORGAN, M. FLEMİNG, and P. KRYSL. Meshless methods: An overview and recent developments. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139:3--47, 1996.
- 14) KRIEG, R.D. and KEY, S.W., Implementation of a Time Dependent Plasticity Theory into Structural Computer Programs, Vol. 20 of Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects (American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., 1976), pp. 125-137.
- 15) BÜYÜK, M., Çarpışma Yüğü Altındaki Yapıların Sonlu Elemanlar Metodu İle Analizi ve Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, MSc Thesis, 2002, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmit, Turkey.

- 16) KOBAYASHI S., OH, S.I. and ALTAN T. Metalforming and the Finite-Element Method. Oxford University Press. 1989.
- 17) PRZEMIENIECKI J.S. Theory of Matrix Structural Analysis. Dover Publications. 1968.
- 18) ZIENKIEWICZ O.C. and TAYLOR, R.L. The Finite Element Method. McGraw-Hill. 1989.
- 19) ADAMS V., ESKENAZI A., Building Better Products with Finite Element Analysis , OnWord Press, 1998
- 20) ÇAPAN L., Metaller Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, 1989
- 21) ROWE G.W., et al. , Finite Element Plasticity and Metalforming Analysis , Cambridge University Press, 1991
- 22) LACOME J.,L., Smoothed particle hydrodynamics (SPH): A New Feature In LS-DYNA. 7th International LS-DYNAUsers Conference, Dearborn, Michigan, May 19–21, 2002. p. 7.29–34.
- 23) Souli M, Olovsson L, Do I. ALE and Fluid/Structure Interaction Capabilities In LS-DYNA. 7th International LSDYNAUsers Conference, Dearborn, Michigan, May 19–21, 2002. p. 10.27–36.
- 24) E. Kuhl, H. Askes, P. Steinmann, An ALE formulation based on spatial and material settings of continuum mechanics. Part 1:Generic hyperelastic formulation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.,in press , corrected proof

ÖZGEÇMİŞ

İsmail BİCAN, 1979 yılında Bilecik'in şirin ilçesi Pazaryeri'nde dünyaya gelmiştir. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun olmuştur. Çeşitli sanayi kuruluşlarında şantiye şefi ve imalat mühendisi olarak görev yapmış olan İsmail BİCAN, 2001 yılından beri Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.