

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

ARKADAN DESTEKLİ Al_2O_3 SERAMİK
MALZEMELERİN BALİSTİK DARBE
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ
BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİMULASYONU

Bülent ESEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2004

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

ARKADAN DESTEKLİ Al_2O_3 SERAMİK
MALZEMELERİN BALİSTİK DARBE
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ
BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİMULASYONU

Bülent ESEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç. Dr. Hasan KURTARAN

GEBZE
2004

KABUL VE ONAY

Bu tez çalışması G.Y.T.E Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından TASARIM VE İMALAT Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye

(Tez Danışmanı) : Yard. Doç. Dr. Hasan Kurtaran

Üye

: Yard. Doç. Dr. Zafer Şenalp

Üye

: Yard. Doç. Dr. Mehmet Göktürk

ONAY

G.Y.T.E Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Bilgisayar ortamında Al_2O_3 seramik malzemede balistik darbe simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Seramik katmanı Alüminyum katman ile desteklenmiştir ve yarım küre şeklindeki bir delici tarafından balistik darbeye maruz bırakılmıştır. Simülasyonlarda lineer olmayan explicit dinamik analiz kodu (LS-DYNA) kullanılmıştır. Darbe analizlerinde sonlu elemanlar metodu ve sonlu elemanlar metoduyla hibrid olarak küçük parçacıklar hidrodinamiği (SPH) metodu kullanılmıştır. SPH metodu delicinin davranışını simüle etmek için kullanılırken seramik ve alüminyum destek için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

Gelişmiş malzeme modelleri (Johnson Cook ve Johnson Holmquist malzeme modelleri) yüksek hızlarda balistik darbe altındaki malzeme davranışlarını karakterize etmek için kullanılmıştır. Johnson Cook malzeme modeli delici ve alüminyum katman için kullanılırken, Johnson Holmquist malzeme modeli seramik katman için kullanılmıştır. Delicinin 300 m/sn, 595 m/sn ve 797 m/sn hızları için balistik simülasyonlar yapılmıştır.

SUMMARY

In this thesis, ballistic impact simulation of an Al_2O_3 ceramic layer is performed in computer environment. The ceramic layer is backed by an aluminium layer and impacted by a projectile of hemispherical nose shape. Non – linear explicit dynamic analysis code (LS-DYNA) is used for the simulation. In impact analysis of ceramic layer, finite element approach and hybrid approach integrating finite element and Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) methods are adopted. SPH method is used to simulate the projectile's behavior while finite element method is utilized to analyse the ceramic layer and the backing layer behavior.

Advanced material models (Johnson Cook and Johnson Holmquist material models) are employed to characterize the impact behavior of materials at high velocities. Johnson Cook material model is used for the projectile and the backing aluminium layer while Johnson Holmquist material model is utilized for the ceramic layer. Ballistic simulations are conducted for the projectile's impact velocities of 300 m/s, 595 m/s and 797 m/s.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında benden yardımlarını ve çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve becerilerini benden esirgemeyen danışmanım Yard. Doç. Dr. Hasan KURTARAN' a, maddi ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan değerli insan Berna YENİCE' ye, her koşulda ve durumda destekleri ve sevgileriyle benim adım adım ilerlememde büyük pay sahibi olan aileme, anne ve babama TEŞEKKÜR EDERİM.

İzmit, Haziran 2004

Bülent ESEN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	İV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLOLAR DİZİNİ	XIV
GİRİŞ	1
1.EXPLICIT DİNAMİK ANALİZ	3
1.1.Explicit Dinamik Teorisi	3
1.1.1. Virtüel İş Prensibi	4
1.1.2. Geometrinin Bölünmesi	6
1.1.3. Zaman Diskritizasyonu	9
1.1.4. Çözüm Adımları	10
1.1.5. Zaman Adımı Kriteri	11
1.2. Sph Metodu	12
1.2.1. SPH metodunun Temel Prensipleri	13
1.2.2. SPH metodunun Sonlu Elemanlar ile Hibrid Uygulaması	15
2. SONLU ELEMEN MODELİ	17
2.1. Sonlu Eleman Modeli Geometri	17
2.2. Eleman Seçimi	19
2.2.1. Katı (Solid) Elemanlar	19
2.2.2. Şekil Değişimi ve Gerilme Hesabı	20
2.2.3. İç Kuvvet Hesabı	22
2.3. Sonlu Eleman Mesh Oluşturulması	25
2.4. Malzeme Modeli	27
2.4.1. Johnson – Cook Malzeme Modeli	27
2.4.1.1. Johnson – Cook Kırılma Kopma Modeli	28
2.4.2. Seramik Malzemeler	29
2.4.3. Seramik Malzemelerin Darbe Altındaki Davranışı	30

2.4.4. Johnson – Holmquist Seramik Malzeme Modeli	31
2.4.4.1. JH-2 Malzeme Modeli Sabitleri	34
2.4.4.2. JH-2 Seramik Modelinin Geçerlilik Deneyleri	37
2.5. Kontakların Tanımlanması	40
2.6. Sınır Şartlarının Tanımlanması	41
2.7. Hız İfadesi	42
3. SONLU ELAMAN ANALİZİ	43
3.1. Senaryo 1	43
3.1.1. Senaryo 1a	43
3.1.2. Senaryo 1b	47
3.1.3. Senaryo 1c	52
3.2. Senaryo 2	56
3.2.1. Senaryo 2a	56
3.2.2. Senaryo 2b	60
3.2.3. Senaryo 2c	64
3.3. Senaryo 3	68
3.3.1. Senaryo 3a	68
3.3.2. Senaryo 3b	71
3.3.3. Senaryo 3c	73
3.4. Delici Deformasyon Şekilleri	76
4. SONUÇLAR VE YORUMLAR	82
4.1. Gerçekleştirilen Analizlerde Karşılaştığımız Sorunlar ve Çözüm Önerileri	84
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
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
v	hız
$\dot{\epsilon}_{ij}$	hız-gerinim
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

$\dot{\epsilon}_{ij}$	değişken gerinim hızları
G	malzemenin kayma modülü
K	malzemenin bulk modülü
σ_y	akma gerilmesi
JC	Johnson – Cook Malzeme modeli
JH-2	Johnson Holmquist Ceramics malzeme modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Langrange uzayında bulunan 3 boyutlu cisim.Cisim içindeki bir a, b noktada gerilme durumu.	3
1.2 Geometrik uzayın elemanlara bölünmesi	6
1.3 Parçacık dağılımı	14
1.4 Geometriden SPH modeline geçiş	16
2.1 Çarpışma analizinde kullanılan modelin ¼ kesit görünüşü	17
2.2 Delici geometrisinin önden ve yandan görünüşleri	17
2.3 Seramik geometrisinin önden ve yandan görünüşleri	18
2.4 Alüminyum destek geometrisinin önden ve yandan görünüşleri	18
2.5 Tetrahedron katı eleman ve doğal koordinatları	19
2.6 8-nodlu brick katı elaman ve doğal koordinatları	20
2.7 Düzlem bir elemanda 2x2 Gauss integrasyon noktaları	23
2.8 Katı elemanlarda kum saati modları	23
2.9 Kum saati modlarının (hourglassing) olduğu ve olmadığı analiz sonuçları	24
2.10 Geometrilerin Mesh edilmiş durumları	25
2.11a Delicinin free mesh oluşturulmuş geometrisi	26
2.11b Delicinin mapped mesh oluşturulmuş geometrisi	26
2.12 Seramik malzemede konik ve radyal kırıklar	31
2.13 Hasara uğramış ve hasarsız malzeme için zorlanmaya karşılık basınç değişimi	33
2.14 Test durumu sınır şartları	37
2.15 Efektif stres e karşı basınç değişimleri	39
2.16 ANSYS-LSDYNA kontak kontrol kartının gösterimi	41
2.17 Alüminyum destek için tanımlanan sınır şartı	42
3.1 Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için Explicit analiz sonuçları	44
3.2 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	45
3.3 Delicinin Hız-Zaman değişimi	45
3.4 Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	46

3.5	Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için SPH analiz sonuçları	47
3.6	Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	49
3.7	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	49
3.8	Delicinin Hız-Zaman değişimi	50
3.9	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	50
3.10	Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları	51
3.11	Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	53
3.12	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	53
3.13	Delicinin Hız-Zaman değişimi	54
3.14	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	54
3.15	Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları	56
3.16	Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	57
3.17	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	58
3.18	Delicinin Hız-Zaman değişimi	58
3.19	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	58
3.20	Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için SPH analiz sonuçları	60
3.21	Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	61
3.22	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	62
3.23	Delicinin Hız-Zaman değişimi	62
3.24	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	62
3.25	Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları	64
3.26	Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	65
3.27	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	66
3.28	Delicinin Hız-Zaman değişimi	66

3.29	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	66
3.30	Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları	68
3.31	Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için Explicit analiz sonuçları	69
3.32	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	70
3.33	Delicinin Hız-Zaman değişimi	70
3.34	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	70
3.35	Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	72
3.36	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	72
3.37	Delicinin Hız-Zaman değişimi	73
3.38	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	73
3.39	Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları	74
3.40	1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi	75
3.41	Delicinin Hız-Zaman değişimi	75
3.42	Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi	76

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Delici, Seramik ve Alüminyum destek geometrilerinin, eleman tipleri, malzeme modelleri ve eleman sayıları	27
2.2	Alüminyum (6061-T6) ve mermi için Johnson – Cook malzeme modeli, Mie-Gruneisen EOS Sabitleri	29
2.3	Seramik malzemeler için malzeme modeli değerleri	36
2.4	Test durumları için malzeme modeli değerleri	38

GİRİŞ

Uzun namlulu silahlardan atılan zırh delici mermilere karşı (zırh delici G3, Kalaşnikov veya M16 mermileri gibi) geliştirilen zırh sistemleri; genellikle bir seramik on plakadan ve arkasında da bir destek malzemesinden oluşmaktadır. [1] Seramik malzemeler son 30 yıldır zırh uygulamalarında kullanılmaya başlandı. Genel olarak seramik malzemeler basmada ve zayıf gerilmelerde oldukça dayanıklıdır. Seramik malzemeler çoğunlukla kırılındır fakat yük altında kırılmadan sonra dayanımları devam eder. Seramikler diğer malzemelerle örneğin metallere karşılaştırıldığında oldukça hafiftir. Bu karakteristik özellikleri nedeniyle zırh uygulamalarında tercih edilmişlerdir.[3] Destek malzemesinde ise; kullanım yerine göre, maliyet fiyatı ve ağırlık gibi faktörler önem kazanabilmekte ve buna göre de destek kademesi, Kevlar'dan alüminyuma kadar çeşitlilik gösteren malzemeler arasından seçilebilmektedir. İyi bir destek malzemesinden beklenen görev; seramiği geçen merminin artık kinetik enerjisini absorbe edecek nitelikte olmasıdır. Bir merminin destek malzemesi içinde gerçekleştireceği penetrasyon derinliği genellikle mermi ucu geometrisine çok hassastır. Deforme olmayan sivri uçlu mermiler, destek malzemeleri içerisinde oldukça büyük penetrasyon derinlikleri oluşturmaktadır. Seramik on plakanın en önemli görevlerinden birisi de zırh delici merminin ucunu köreltmek ve destek malzemesi için mermiyi verimsiz bir deliciye dönüştürmektir.

[1]. Bilimsel literatürde bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda bu hassasiyet tespit edilmesine karşın Numerik analizde bu konuda farklı analiz metotları aynı çalışma içerisinde kullanılarak bir karşılaştırma yoluna gidilmemiştir. Yapılan bu tez çalışmasında iki farklı analiz metodu kullanıldığı için bu yöndeki boşluğu giderici yönde katkıda bulunmuştur. Ayrıca bu çalışma genel olarak Explicit ve SPH metodunun bir anlatımını içermektedir ve Sonlu eleman analizi ile yapılan balistik çarpışma konusunda bilimsel literatüre bir başvuru kaynağı olma açısından önem taşımaktadır.

Seramiğin bir diğer görevi de; konoid seramik bölgesi üzerinden yükü yayarak destek malzemesine iletmektir. İşte bu iki önemli görevi en iyi şekilde yerine getirebilmesi için, seramik on plakanın destek malzemesi tarafından iyice

desteklenmesi ve deformasyonuna mümkün mertebe izin verilmemesi çok önemlidir. O halde destek malzemesinde aranması gereken özelliklerden birisi de yüksek rijidlik olmalıdır. Çünkü, ancak bu şekilde seramiğin balistik performansından azami şekilde istifade edilebilecektir.[1] Mevcut deneysel çalışmada "zayıf destek tekniği" ile yapılan balistik testler bunu işaret etmektedir.

Atılan merminin seramiğe temas etmesiyle başlayan balistik çarpışma sürecinin bir başka ilgi çekici yanı da fragmentasyondur. Çarpışma esnasında, merminin hedefle temas ettiği bölgenin etrafındaki belli bir seramik kütlesi küçük parçalara ayrılarak, mermiye ters yönde büyük bir hızla dışarı doğru atılır. Yani, merminin seramiği penetrasyonu sırasında gerçekleşen momentum transferi, mermi kinetik enerjisinin bir kısmının bu parçacıklar üzerinde yeniden dağıtılmasıyla sonuçlanır. Bu yolla absorbe edilen kinetik enerji için henüz matematiksel bir model ortaya konmamış olmasına rağmen, gerek mevcut çalışmada gerekse daha Önceki çalışmalarda yapılan deneysel gözlemler; fragmente olan seramik parçacıklarının kayda değer miktarda enerji absorbe ettiğini göstermektedir. Bu yüzden zırh seramiklerinin fragmentasyon davranışı, gelecekte ortaya konacak matematiksel modeller açısından önem taşımaktadır. [1]

Tez çalışmasını oluştururken belirli bir sıralama ile gidilerek her bölümde gerçekleştirilen analizler ince ayrıntısına kadar anlatılmıştır. Özellikle birçok çalışmada yer almayan ANSYS-LSDYNA programına ait komutlar ve özel seçenekler gösterilmiştir. İlk olarak Explicit dinamik analiz teorisine genel bir bakış yapılarak, teorik olarak metodun işleyişi anlatılmıştır. Sonuç itibarıyla bu tez çalışmasında teoriden pratiğe doğru bir yol izlenmiştir. Explicit metodun yanı sıra yeni bir metod olan SPH analiz metodu da kullanılarak ileride bu metod ile yapılacak çalışmalara fikir verilmeye çalışılmıştır.

1. EXPLICIT DİNAMİK VE SPH ANALİZ

1.1 Explicit Dinamik Teorisi

Şekil 1a da gösterilen esnek cisimlerin hareketi rijit cisimlerden farklı olarak cisim içinde noktadan noktaya değişebilmektedir. Bu tür cisimlerin her bir noktasındaki hareketi / davranışı diferansiyel denklemle tanımlanır. Cisim içindeki herhangi bir nokta, Şekil 1b deki gibi sonsuz küçüklükte bir küp olarak düşünülüp bu küpün yükleme altında dengesi kullanılarak noktanın diferansiyel hareket denklemi çıkarılabilir. Aşağıda elde edilen hareket denklemi ve sınır şartları tensörel notasyonda gösterilmektedir.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{\chi}_i = 0 \quad : \text{cismin } V \text{ hacmi üzerinde (1.1)}$$

$$\sigma_{ij} n_j = T_i \quad : \text{zorlama yüzeyi } S_T \text{ üzerinde (1.2)}$$

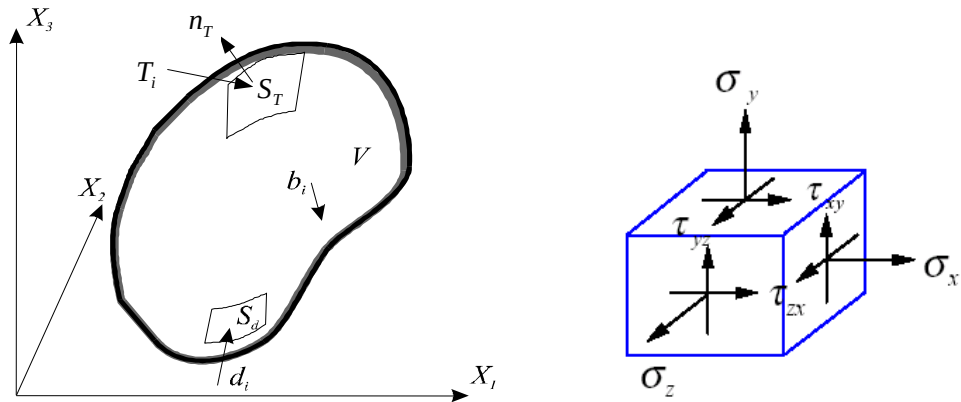
$$\chi_i = d_i \quad : \text{yer değiştirme yüzeyi } S_d \text{ üzerinde (1.3)}$$

σ_{ij} : Cauchy gerilme tensörünü,

ρ : malzemenin o anki yoğunluğunu

$n_j S_T$: zorlama yüzeyine normal doğrultuda olan birim dış vektörü ifade eder.

denklem 1.1' e güçlü (strong) formu da denir. Bu denklem sınır şartlarıyla birlikte cisim üzerindeki ve yüzeylerdeki her noktada sağlanmalıdır.



Şekil 1.1: a) Langrange uzayında bulunan 3 boyutlu cisim. b) Cisim içindeki bir noktada gerilme durumu.

1.1.1 Virtüel İş Prensibi

Diferansiyel hareket denklemi eğer çözülebilirse cisim içindeki her bir noktanın hareketini tüm zamanlar için verir. Yalnız karmaşık geometriye sahip ve/veya yüklemeye maruz cisimlerde bu denklemi çözmek çok zordur veya imkansızdır. Bu gibi durumlar mühendisleri diferansiyel denklemin çözümüne özdeş, yeni ve daha kolay çözümlere yöneltmiştir. Bunlardan biri de virtüel iş ilkesidir. Virtüel iş ilkesinde cismin davranışı diferansiyel hareket denklemi yerine, cismin üzerine etkiyen iç ve dış kuvvetlerin yaptığı işlerin dengesinden elde edilir. Bu tür çözüme hareketin zayıf (weak) formu da denir. Zayıf formda, şartlar cisim üzerindeki her noktada sağlanmak zorunda değildir, bunun yerine şartlar cismin toplamı üzerinde ve ortalama olarak sağlanır. Zayıf formun kullanımı sonuçların doğruluğunu etkilemez.

Hareket denkleminin zayıf formunu elde ederken, S_d bölgesi üzerinde yer değiştirme sınır şartını sağlayan herhangi bir virtüel (hayali) yer değiştirme δx_i düşünülür. Denklem (1.1)'i virtüel yer değiştirme ile ve cismin hacmi üzerinde integre edersek:

$$\int_V (\sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho \ddot{x}_i) \delta x_i dV = 0 \quad (1.4)$$

elde edilir.

Denklem (1.4)'ün sıfıra eşit olması için parantez içinde kalan ifadenin, geçerli herhangi bir virtüel yer değiştirme için, sıfıra eşit olması gerekir. Buradan da denklem (1.4)'ün Denklem (1.1)'e eşdeğer olduğu görülmüş olur. Kısmi türev kullanılarak

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_j = \sigma_{ij,j} \delta x_i + \sigma_{ij} \delta x_{ij} \quad (1.5)$$

elde edilir. Denklem (1.5) denklem (1.4) de ilk terimde yerine konarak:

$$\int_V \left((\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} - \sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \rho b_i \delta x_i - \rho \ddot{x}_i \delta x_i \right) dV = 0 \quad (1.6)$$

elde edilir. Gauss teoreminden denklem (1.6) deki ilk bileşen şöyle ifade edilebilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} (\sigma_{ij} \delta x_i) n_j dS \quad (1.7)$$

Yükleme yüzeyinin sınırları kullanılarak denklem (1.2) ve (1.7) şöyle yazılabilir:

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dV = \int_{S_T} T_i \delta x_i dS \quad (1.8)$$

Gerilme tensörü simetrik olduğundan, denklem (1.6)' deki ikinci terim şöyle yazılır:

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV &= \int_V \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \delta x_{i,j} + \sigma_{ji} \delta x_{j,i}) dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} \frac{1}{2} (\delta x_{i,j} + \delta x_{j,i}) dV \\ &= \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV \end{aligned} \quad (1.9)$$

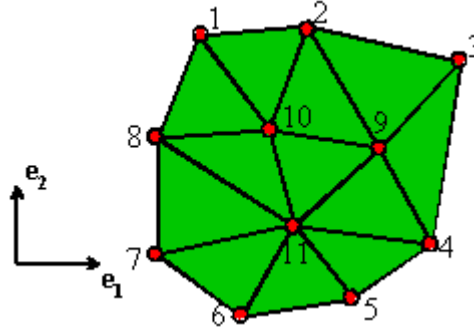
Burada $\delta \varepsilon_{ij}$, virtüel yer değişimi δx_i ' yi veren virtüel gerilme tensörüdür. Denklem (1.8) ve (1.9)'i denklem (1.6)'de yerine koyarak

$$-\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \rho b_i \delta x_i dV + \int_{S_T} T_i \delta x_i dS = 0 \quad (1.10)$$

elde edilir. Denklem (1.10), Şekil 5' de tanımlanan genel bir üç boyutlu problem için virtüel iş prensibi ifadesidir.

1.1.2 Geometrinin Bölünmesi (Diskritizasyonu)

Sonlu elemanlar denklemlerini çıkarmak için bir sonraki adım geometrik uzayın bölünmesidir. Cismin karmaşık şekli, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi eleman adı verilen daha basit şekillere bölünür. Elemanlar birbirine köşelerindeki düğüm noktalarından bağlıdır. Düğüm noktaları ve elemanlar sonlu eleman modelini (mesh) oluşturur.



Şekil 1.2: Geometrik uzayın elemanlara bölünmesi.

Yer değiştirme alanının sonlu eleman ağı boyunca sürekliliğini sağlamak amacıyla enterpolasyon fonksiyonları (şekil fonksiyonları olarak da bilinirler) kullanılır. Şekil fonksiyonları eleman içerisindeki noktaların yer değiştirmesi ile düğüm noktalarının yer değiştirmesi arasında ilişki kurarlar:

$$\delta x_i = \sum_{a=1}^n N_a \delta x_{ai} \quad (1.11)$$

Denklem (1.11)' de δx_i ' ler eleman içindeki bir noktanın yer değiştirmelerini, n elemanın düğüm noktası sayısını, N_a a düğüm noktasındaki şekil fonksiyonunu ve δx_{ai} a düğüm noktasındaki yer değiştirmeleri göstermektedir.

Benzer ifadeler aşağıdaki gibi eleman içindeki bir noktanın koordinatları, hızları ve ivmeleri içinde yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\chi_i &= \sum_{a=1}^n N_a \chi_{ai} \\
\dot{\chi}_i &= \sum_{a=1}^n N_a \dot{\chi}_{ai} \\
\ddot{\chi}_i &= \sum_{a=1}^n N_a \ddot{\chi}_{ai}
\end{aligned} \tag{1.12}$$

Denklem (1.12)'de χ_{ai} , $\dot{\chi}_{ai}$, $\ddot{\chi}_{ai}$, a düğüm noktasının sırasıyla yer değiştirmelerini, hızlarını ve ivmelerini göstermektedir. Şekil fonksiyonları ile bir fonksiyonun herhangi bir noktasındaki değeri, o fonksiyonun düğüm noktasındaki değerleri kullanılarak tahmin edilir. Tahminin doğruluğu şekil fonksiyonuna ve fonksiyonun derecesine bağlıdır.

Sonlu eleman bağıntıları denklem (1.10)'de verilen virtüel iş denklemini uzayda bölerek (diskritize ederek) bulunur. Cismin virtüel iş denklemi, sistemdeki her elemanın potansiyel enerjilerinin toplanmasıyla elde edilir. Denklem (1.9) dikkate alınarak denklem (1.10) şöyle yazılabilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho \ddot{\chi}_i \delta \chi_i dV_m + \int_{V_m} \sigma_{ij} \delta \chi_{i,j} dV_m - \int_{V_m} \rho b_i \delta \chi_i dV_m - \int_{S_T} T_i \delta \chi_i dS_m \right\} = 0 \tag{1.13}$$

burada, M sistemdeki toplam eleman sayısıdır, V_m elemanın hacmidir. Daha sonra, virtüel yer değiştirmeler, $\delta \chi_i$ ve ivmeler $\ddot{\chi}_i$, denklem (1.11) ve (1.12)'deki şekil fonksiyonu enterpolasyonlarıyla değiştirilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho (N_{\beta} \ddot{\chi}_{\beta}) (N_a \delta \chi_{ai}) dV_m + \int_{V_m} \sigma_{ij} (N_{a,j} \delta \chi_{ai}) dV_m \right.$$

$$\left. - \int_{V_m} \rho b_i (N_a \delta x_{ai}) dV_m - \int_{S_T} T_i (N_a \delta x_{ai}) dS_m \right\} = 0 \quad (1.14)$$

burada δx_{ai} ve $\ddot{x}_{ia}$ sırasıyla yer deşiştirmeler ve düğüm noktalarındaki ivmeleri göstermektedir. Düğüm noktalarındaki virtüel yer değiştirmeler (δx_{ai}) sabit değerlerdir ve integral dışına alınabilirler. Ayrıca denklem (1.13) sadece küçük virtüel yer değiştirmeleri için geçerli olduğundan, δx_{ai} denklem dışına alınabilir:

$$\sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho N_a N_\beta \ddot{x}_{\beta i} dV_m + \int_{V_m} N_{aj} \sigma_{ij} dV_m - \int_{V_m} N_a \rho b_i dV_m - \int_{S_T} N_a T_i dS_m \right\} = 0 \quad (1.15)$$

Denklem (1.15) şöyle de yazılabilir:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \left\{ \int_{V_m} \rho N_a N_\beta dV_m \right\} \ddot{x}_{\beta i} &= \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_a \rho b_i dV_m \\ &+ \sum_{m=1}^M \int_{S_T} N_a T_i dS_m - \sum_{m=1}^M \int_{V_m} N_{a,j} \sigma_{ij} dV_m \end{aligned} \quad (1.16)$$

Denklem (1.16) matris formunda sadeleřtirilirse:

$$[M]\{\ddot{x}\} = \{F\} \quad (1.17)$$

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

$$[M] = \sum_{m=1}^M \int_{V_m} \rho N^t N dV_m \quad (1.18)$$

1.1.3 Zaman Diskritizasyonu

Denklem (1.17) hareketin sonlu eleman denklemidir ve zamana göre çözülmesi gerekmektedir. Dinamik doğrusal olmayan sonlu eleman problemlerinin çözümünde direk integrasyon metodları kullanılabilir. Direk integrasyon metodlarında sonlu eleman denklemlerinin tüm zaman aralığı için çözümü yerine, bu aralık içinde bazı zaman noktaları için çözümleri aranır. Bu zaman noktaları için Denklem (1.17)'deki sonlu eleman denklemi şöyle yazılabilir:

$$[M]\{\ddot{x}\}_n = \{F\}_n \quad (1.19)$$

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

Sonlu eleman denkleminin zaman içindeki diskritizasyonu için merkezi farklar açık (explicit) metodu kullanılır. 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 $t_{1/2}, \dots, t_{n-1/2}, \dots, t_{f-1/2}$ zamanlarında hesaplanır. Metod t_0 zamanındaki yer değiştirmelerin, t_0 ve $t_{-1/2}$ anındaki (t_0 anından yarım zaman adımı önceki) hızların başlangıç değerlerinin tahmin edilmesi ile başlar. Çözüm aşağıdaki merkezi farklar bağıntıları kullanılarak adım adım elde edilir.

$$\dot{x}_{n+1/2} = \dot{x}_{n-1/2} + \ddot{x}_n \Delta t_n \quad (1.20)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2} \quad (1.21)$$

$$\dot{x}_{n+1} = M^{-1} F_{n+1} \quad (1.22)$$

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \quad (1.23)$$

1.1.4 Çözüm adımları

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 (1.20)'den $t_{n+1/2}$ anındaki hız vektörü hesaplanır.

Bu vektör daha sonra denklem (1.20)'de t_{n+1} anındaki yer değiştirme vektörünü hesaplamak için kullanılır.

Daha sonra model içerisindeki her bir elemanın gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanıp, gerilmelerden türetilen iç kuvvetler bulunur. Bundan sonra, düğüm noktalarının serbestlik derecelerindeki iç ve dış kuvvetler kuvvet vektörünü elde edebilmek için toplanır.

t_{n+1} anındaki ivme vektörü denklem (1.22)'deki kuvvet vektörü kullanılarak bulunur.

Son adım $\Delta t_{n+1/2}$ zaman adımının denklem (1.23)'ü ve zaman adımını kullanarak hesaplanmasıdır. Merkezi farklar metodunun doğruluğu Δt^2 'inci derecedendir. Explicit metotta 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.

1.1.5 Zaman Adımı Kriteri

Açık (explicit) dinamik sonlu eleman analizlerinde zaman adımlarının seçimi kritik öneme sahiptir. Büyük zaman adımı çözümü kararsızlığa sürüklerken, küçük zaman adımı hesap maliyetlerini oldukça artırır. 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 içinden geçmesini önleyecek kadar küçük seçilmelidir. Bu Courant kriteri kullanılarak yapılabilir:

$$\Delta t_e = \frac{1}{c} \quad (1.24)$$

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:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.25)$$

burada E ve ρ sırasıyla malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğudur. Denklem (1.24) ve (1.25) birleştirilerek çubuk eleman için zaman adımı şöyle bulunur:

$$\Delta t_e = l \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (1.26)$$

Dalga hızının benzer ifadeleri, iki ve üç boyutlu elemanlar için de yazılabilir:

Katı (Solid) elemanlar için:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad L_e = \frac{V_e}{A_{e\max}} \quad (1.27)$$

Modeldeki tüm elemanlar için hesaplanan zaman adımlarından en küçüğü, çözüm döngüsünün kritik zaman adımı olarak kabul edilir. Explicit dinamik çözümün kararlılığından emin olmak için, hesaplanan kritik zaman adımından daha küçük bir değer kullanılır. Kararlılık için kullanılan zaman adımı denklem (1.28)' de gösterilmektedir:

$$\Delta t^{n-1} = a \cdot \min\{\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, ..., \Delta t_N\} \quad (1.28)$$

a ile temsil edilen küçültme katsayısı ise genellikle $a=0.9$ dur.

1.2 Sph Metodu

Sonlu elemanlar Explicit metodu ile gerçekleştirilen analizlerde cisimler mesh (ağ) yapısı ile temsil edilmektedir. Mesh ile tanımlanan cisimlerde yüksek hızlı çarpma / darbe analizleri gerçekleştirildiğinde, ortaya çıkan eleman şekil değişimleri yüksek seviyelere ulaştığı için geometri de hacmi hesaplanamayacak eleman deformeleri meydana gelmektedir. Klasik sonlu elemanlar Explicit metodunda eleman hacim ve kütle hesaplanarak adım adım çözüm gerçekleştirildiği için günümüz analiz programları yetersiz kalmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için son birkaç yılda geliştirilen yeni bir çözüm metodu uygulanmaktadır.

Bu metod SPH (smoothed particles hydrodynamics) metodudur. SPH metodu mesh' siz (ağırsız) bir metoddur ve yapının serbest hareket edebilen parçacıklar ile temsiline dayanır. Bu parçacıklar belirli kriterler ile birbiriyle etkileşim halindedir. Kullanıma sunduğu bazı özellikleri ile SPH metodu, Klasik sonlu elemanlar metodlarla modellenmesi ve uygulanması zor problemlerin çözümüne bir alternatif oluşturmuştur. Özellikle yapısında mesh (ağ)

bulundurmadığından dolayı düzensiz geometrilerin ortaya çıktığı problemlerin hesaplanmasına olanak sağlar.

1.2.1 SPH metodunun Temel Prensipleri

Parçacık metodu hareket eden parçacığı ifade eden; $(x_i(t), w_i(t))_{i \in P}$ kuadratik formülüne dayanmaktadır. 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 korunumunu sağlamak için düzeltilmektedir:

$$(i) \frac{d}{dt} x_i = v(x_i, t) \quad (ii) \frac{d}{dt} w_i = \text{div}(v(x_i, t)) w_i \quad (1.29)$$

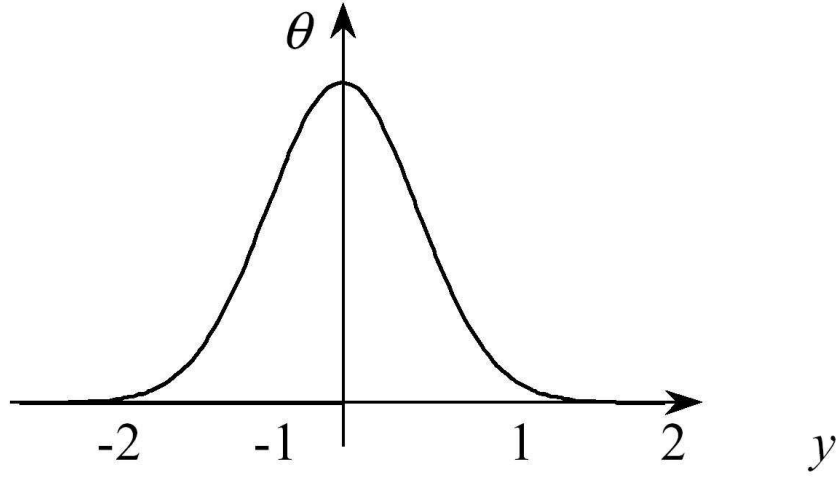
Buna göre aşağıdaki formül yazılabilir:

$$\int_{\Omega} f(x) d_x = \sum_{j \in P} w_j(t) f(x_j(t)) \quad (1.30)$$

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:

$$\theta(y) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}y^2 + \frac{3}{4}y^3; y \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-y)^3; 1 < y \leq 2 \\ 0; y > 2 \end{cases} \quad (1.31)$$

C: Boyuta bağlı olarak belirlenen bir katsayıdır.



Şekil 1.3. Parçacık dağılımı

Yeterli elemana sahip olunduğunda, düzgünleştirilmiş parçacık çekirdeği W :

$$W(x_i - x_j, \bar{h}) = \frac{1}{\bar{h}} \theta \left(\frac{x_i - x_j}{\bar{h}} \right) \quad (1.32)$$

$\bar{h} \longrightarrow 0$ 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 (1.32) kullanılarak u nun fonksiyonu olan aşağıdaki $\prod^h u$ yaklaşım ifadesi yazılabilir:

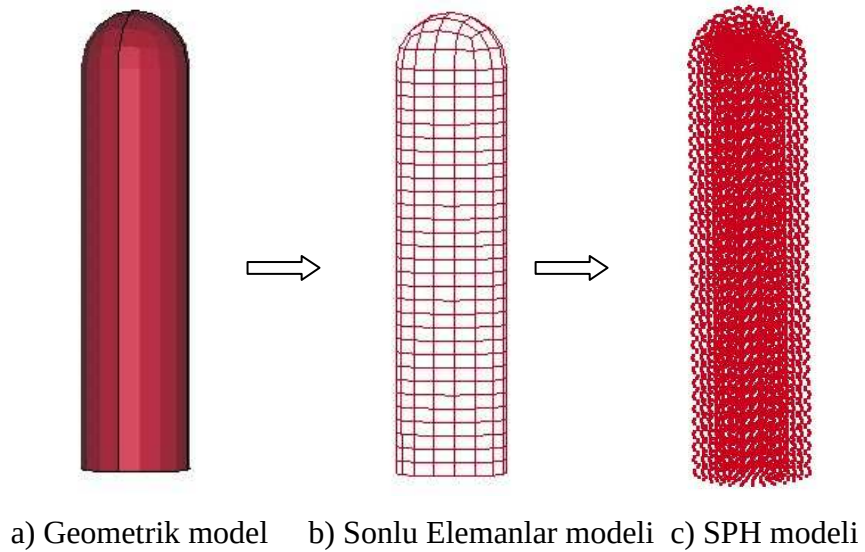
$$\prod^h u(x_i) = \sum_{j \in \Omega} w_j(t) u(x_j) W(x_i - x_j, \bar{h}) \quad (1.33)$$

Düzgünleştirilmiş uzunluğa türev ifadesi eklendiğinde ise aşağıdaki ifade elde edilir :

$$\nabla \prod^h u(x_i) = \sum_{j \in \Omega} w_j(t) u(x_j) \nabla W(x_i - x_j, \bar{h}) \quad (1.34)$$

1.2.2. SPH Metodunun Sonlu Elemanlar Metodu ile Hibrid Uygulaması

Analizleri gerçekleştiren kullanmış olduğumuz ANSYS – LSDYNA v970 programında SPH metodun uygulanması için öncelikle klasik sonlu elemanlar yöntemi ile geometrileri oluşturduk. Daha sonra oluşturduğumuz her bir geometrinin mesh (ağ)' ini oluştururken ANSYS v8.0' da bulunan *Numbering Controls* komutu ile her bir geometri için nod ve eleman başlangıç numarası atadık. Bu işlemi gerçekleştirmemizin nedeni ise kullanılan programın geometrileri meshlerken mesh ile geometride oluşturulan her bir elemana ve noda bir numara atamasından kaynaklanmaktadır. SPH metodu ile analiz gerçekleştiren kullandığımız delici geometrisini SPH eleman olarak tanımlamak için MATLAB programı ile oluşturduğumuz programcık ile delicinin her bir elemanını (başlangıç elemanından bitiş elemanına kadar) eşit kütleyle sahip nodlara dönüştürdük. Aşağıdaki şekilde gerçekleştirilen uygulamanın gösterimi yer almaktadır.



Şekil 1.4 : Geometriden SPH modeline geçiş

ANSYS – LSDYNA v970 programında SPH metodu için bazı tanımlama kartları yer almaktadır. Bu kartlar SPH metodunun bazı başlangıç değerlerine ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda gerçekleştirdiğimiz SPH analizlerde Sonlu elemanlar metodu ile hibrid (birlikte) kullanım gerçekleştirdiğimiz için, **LSDYNA** giriş dosyasını (k file) metin düzenleme programları ve **LSPOST v1.2**

programı ile düzenledik. **LSDYNA v970** programında SPH analiz için yer alan kartlar ise şunlardır:

***ELEMENT_SPH:** Her bir parçacığın (nodun) parça (nod) numarasını ve kütle bilgisini içerir.

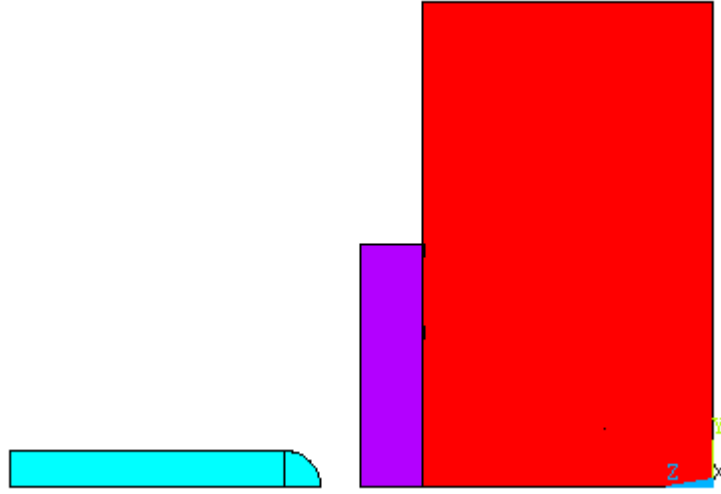
***SECTION_SPH:** Bütün SPH elemanlarına ait değişkenleri içerir.

***CONTROL_SPH:** Hesaplama için gerekli genel kontrol değişkenlerini içerir.

|

2. SONLU ELEMEN MODELİ

2.1 Sonlu Eleman Modeli Geometri



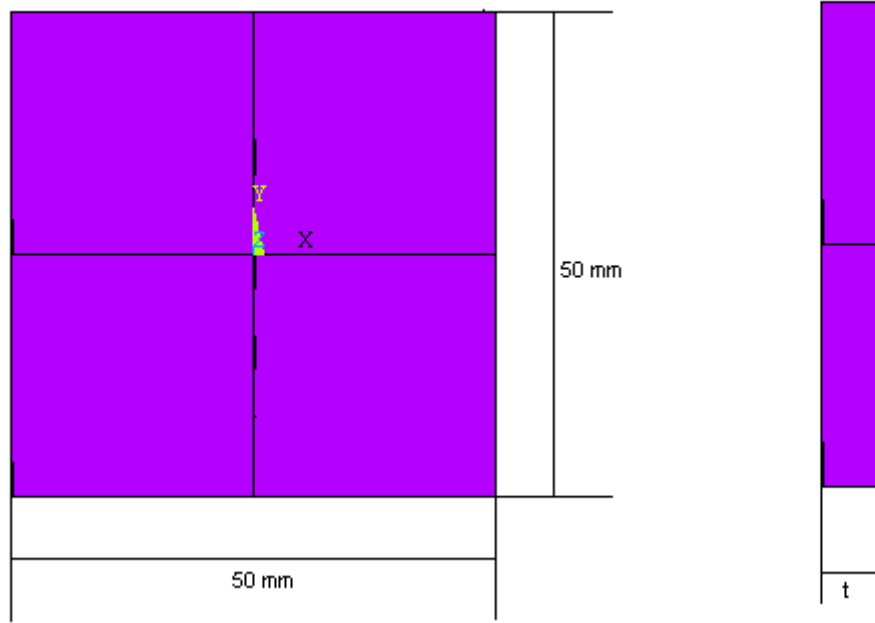
Şekil 2.1. Çarpışma analizinde kullanılan modelin 1/4 kesit görünüşü

Balistik darbe analizini gerçekleştirirken kullandığımız model şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bu geometride delici geometrisi ve alüminyum destek kalınlığı sabit tutularak farklı kalınlıklardaki seramik üzerinde çarpışma testleri uygulanmıştır. Explicit dinamik analizde hesaplama maliyetini minimuma indirmek için her bir parçanın kesit düzlemlerini oluşturduk. Bu kesit düzlemleri Z ve Y düzlemlerinde ve her birinin normal vektörü doğrultusunda simetri sınırları oluşturulmuştur.

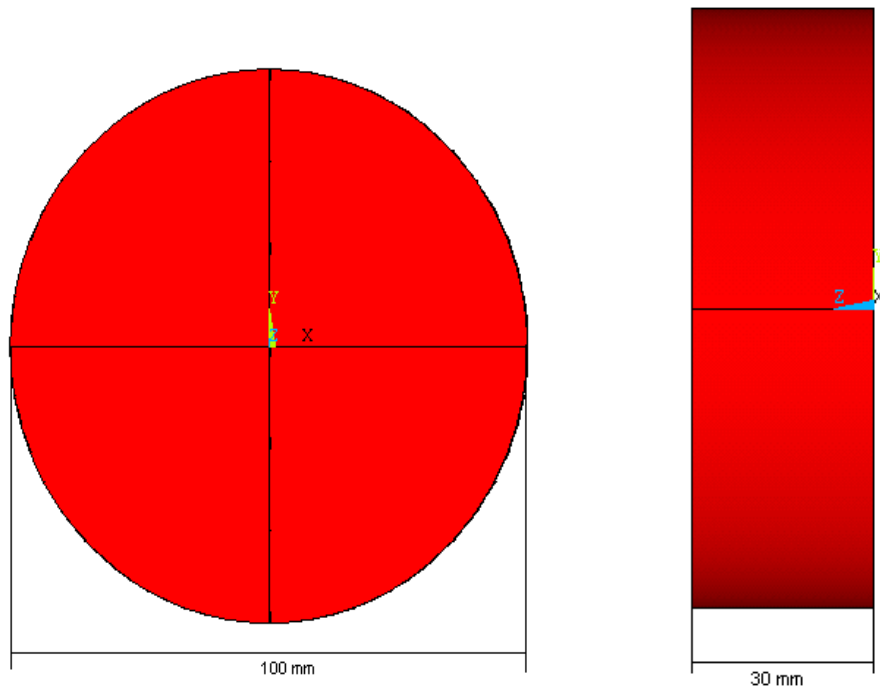


Şekil 2.2. Delici geometrisinin önden ve yandan görünüşleri

Şekil 2.2’ de analizde kullanılan delici geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Seramik geometrisinin önden ve yandan görünüşleri



Şekil 2.4. Alüminyum destek geometrisinin önden ve yandan görünüşleri

Yine Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 de seramik ve alüminyum desteğin geometrisi gösterilmiştir.

2.2 Eleman Seçimi

Explicit dinamik analizlerde çok küçük zaman adımları kullanıldığından, analizin hesap maliyeti üzerinde seçilecek eleman tipleri ne bunların kullanacağı şekil fonksiyonlarının etkisi çok büyüktür. Bu yüzden explicit dinamik analizlerde, statik (implicit) analizlerde olduğu gibi quadratik şekil fonksiyonlu elemanlar kullanılamaz. Explicit dinamik analizlerde kullanılan bütün elemanlar lineer şekil fonksiyonlarına sahiptir ve bu elemanların kenar ortalarında düğüm noktaları yoktur.[2] Bu bağlamda yapmış olduğum sonlu eleman analizinde katı (Solid) elemanlar kullanılmıştır. Katı (Solid) elemanların özellikleri ise aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.2.1 Katı (Solid) Elemanlar

Katı elemanlar 4-nod tetrahedral veya 8-nod brick içerirler.

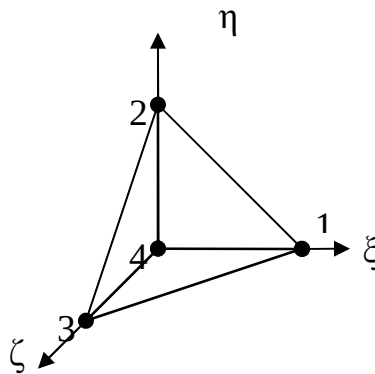
Tetrahedral (dörtgen) katıda yer değiştirme fonksiyonu:

$$U(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (2.1)$$

veya şekil fonksiyonları cinsinden:

$$U(x, y, z) = \sum_{a=1}^4 N_a x_a,$$

$$N_1 = \xi, \quad N_2 = \eta, \quad N_3 = \zeta, \quad N_4 = 1 - \xi - \eta - \zeta \quad (2.2)$$



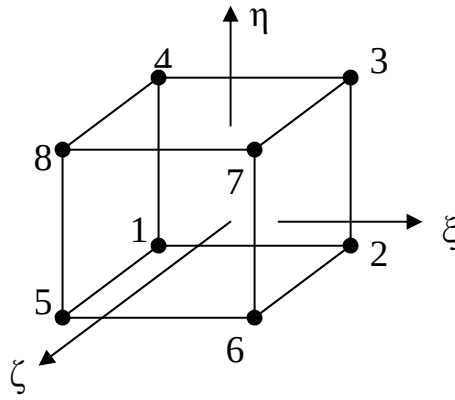
Şekil 2.5. Tetrahedron katı eleman ve doğal koordinatları

8-nodlu katıda yer değıştirme fonksiyonu :

$$U(x, y, z) = a + bx + cy + dz + exy + fxz + gyz + hxyz$$

veya izoparemetrik Şekil fonksiyonları cinsinden Şöyle ifade edilebilir:

$$U(x, y, z) = \sum_{a=1}^8 \frac{1}{8} (1 - \xi \xi_a) (1 - \eta \eta_a) (1 - \zeta \zeta_a) \quad (2.3)$$



Şekil 2.6. 8-nodlu brick katı elaman ve doğal koordinatları

Elemanın merkezinde lokal bir koordinat merkezi (ξ, η, ζ) yaratılır. Kúpün koordinatları (ξ_a, η_a, ζ_a) her üç doğrultuda da -1 ila +1 arasında değışmektedir.

2.2.2 Şekil Değişimi ve Gerilme Hesabı

Şekil değışimi ve gerilme için önce yer değıştirme artımı gradyenti hesaplanır:

$$\Delta \epsilon_{xx} = \frac{\partial(\Delta u)}{\partial x^{n+1/2}} + \Phi, \quad \Delta \epsilon_{yy} = \frac{\partial(\Delta v)}{\partial y^{n+1/2}} + \Phi, \quad \Delta \epsilon_{zz} = \frac{\partial(\Delta w)}{\partial z^{n+1/2}} + \Phi \quad (2.4)$$

$$\Delta \varepsilon_{xy} = \frac{\frac{\partial(\Delta v)}{\partial x^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta u)}{\partial y^{n+1/2}}}{2}, \quad \Delta \varepsilon_{yz} = \frac{\frac{\partial(\Delta w)}{\partial y^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta v)}{\partial z^{n+1/2}}}{2},$$

$$\Delta \varepsilon_{zx} = \frac{\frac{\partial(\Delta u)}{\partial z^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta w)}{\partial x^{n+1/2}}}{2} \quad (2.5)$$

Φ normal şekil değişimlerini toplam hacimsel şekil değişimi tüm integrasyon noktalarında aynı olacak şekilde ayarlar

$$\Phi = \Delta \varepsilon_v^{n+1/2} - \frac{\frac{\partial(\Delta u)}{\partial x^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta v)}{\partial y^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta w)}{\partial z^{n+1/2}}}{3} \quad (2.6)$$

$\Delta \varepsilon_v$ ortalama hacimsel şekil değişimi artımı:

$$\Delta \varepsilon_v^{n+1/2} = \frac{\frac{1}{3} \int_{V^{n+1/2}} \frac{\partial(\Delta u)}{\partial x^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta v)}{\partial y^{n+1/2}} + \frac{\partial(\Delta w)}{\partial z^{n+1/2}} dV^{n+1/2}}{\int_{V^{n+1/2}} dV^{n+1/2}} \quad (2.7)$$

$\Delta u, \Delta v, \Delta w$: x, y ve z yönündeki yer değiştirme artımlarını göstermektedir ve

$$x^{n+1/2} = \frac{(x^n + x^{n+1})}{2}, \quad y^{n+1/2} = \frac{(y^n + y^{n+1})}{2}, \quad z^{n+1/2} = \frac{(z^n + z^{n+1})}{2} \quad (2.8)$$

Δu_i : yer değiştirme artımı, y_j : deformasyonu takip eden koordinatlar.

Şekil değişimi artımı ($\Delta \varepsilon_{ij}$) ve dönme ($\Delta \omega_{ij}$) hesabı:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(G_{ij} + G_{ji}) \quad (2.9)$$

$$\Delta \omega_{ij} = \frac{1}{2}(G_{ij} - G_{ji}) \quad (2.10)$$

Dönme artımı $\Delta \omega$, Jauman gerilme hesabında rijit cisim dönme katkısını hesaplamada kullanılır.

Jauman gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + \sigma_{ip}^n \Delta \omega_{pj} + \sigma_{jp}^n \Delta \omega_{pi} \quad (2.11)$$

n+1: yenilenmiş eksen takımını, n: referans eksen takımını göstermektedir.

2.2.3 İç kuvvet hesabı

Elemandaki nodlara etkiyen iç kuvvetler, gerilme değerleri eleman alanı üzerinde integre edilerek bulunur

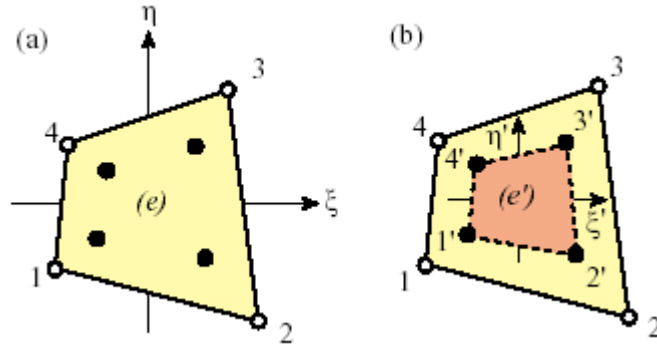
$$f_{\alpha}^{\text{int}} = \int_A B_{\alpha}^T \sigma dA$$

f_{α}^{int} : α noduna etkiyen iç kuvvet, B_{α}^T : şekil değişimi – yer değiştirme matrisi

İç kuvvetlerin hesabında nümerik integrasyon kullanılır. İntegral işareti içindeki fonksiyonun, eleman içinde belli noktalardaki değeri hesaplanır. Sonra belli katsayılarla çarpılan bu değerler toplanarak nodlara etkiyen iç kuvvetler bulunur.

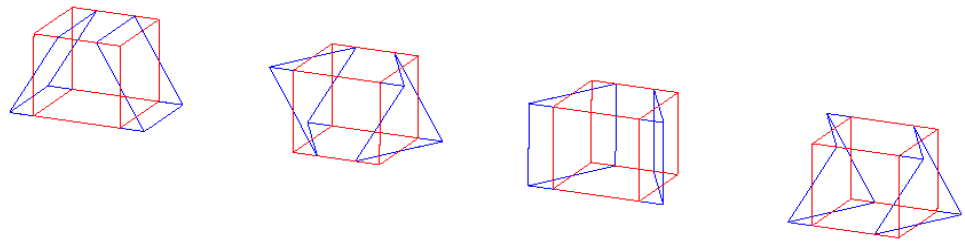
Explicit dinamik analizde kullanılan elemanlar Nümerik integrasyon için kullanılan Gauss noktalarının sayısına bağlı olarak tam integrasyonlu (full

integrated), indirgenmiş integrasyonlu (selectively reduced) ve az integrasyonlu (reduced integrated) elemanlar olarak adlandırılır. Aşağıda tam integrasyonlu (2x2 Gauss) bir düzlem eleman görülmektedir. Tam integrasyonlu elemanlar her bir lokal eksen takımı boyunca 2 Gauss noktası, az integrasyonlu elemanlar ise eleman merkezinde tek bir Gauss noktası kullanırlar. Tam integrasyonlu elemanlar yapıyı daha sert, az integrasyonlu elemanlar ise daha esnek gösterirler.[2]

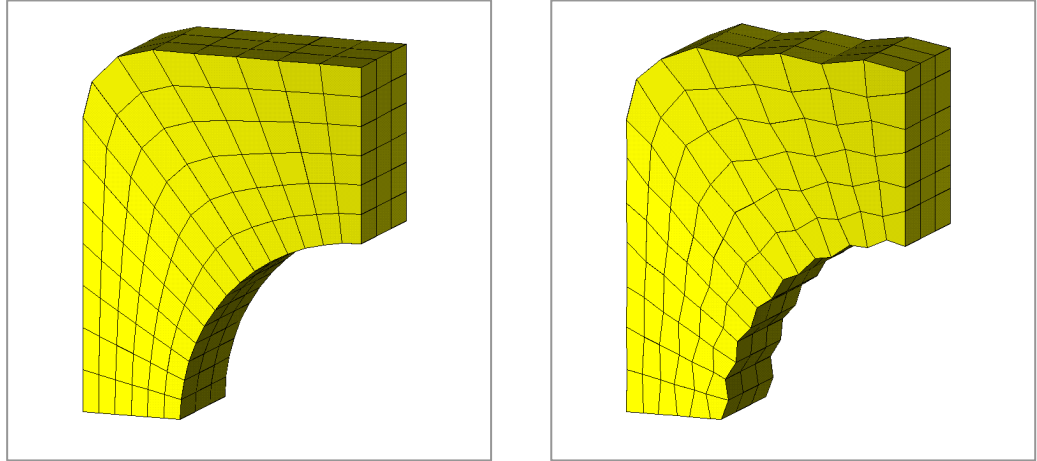


Şekil 2.7: Düzlem bir elemanda 2x2 Gauss integrasyon noktaları.

İç kuvvetlerin hesabında geçen zaman (hesap maliyeti) kullanılan integrasyon noktalarının sayısı ile orantılıdır. Bu yüzden explicit dinamik analizlerde az integrasyonlu (1 Gauss noktalı) elemanlar kullanılır. 1 Gauss noktalı elemanlar hesap maliyetini önemli ölçüde azaltırken bir takım sorunların çıkmasına neden olurlar. Şekil 2.8' de katı (Solid) elemanlarda tek bir integrasyon noktası kullanılması nedeniyle ortaya çıkan kum saati (hourglassing) deformasyon modları gösterilmektedir.[2]



Şekil 2.8: Katı elemanlarda kum saati modları



Şekil 2.9: Kum saati modlarının (hourglassing) olduğu ve olmadığı analiz sonuçları.

Kum saati modları şekil değişim enerjisi üretmediklerinden bu olaya “sıfır enerji” modu da denir. Sistemde bu deformasyonları önleyecek hiçbir kuvvet yoktur. Kum saati etkisi kontrolü olmasa, yanlış sonuçlara neden olacak gerçek deformasyon değerlerinden daha büyük deformasyonlarla karşılaşılabilir.[2]

Kum saati etkisi deformasyonlarını önlemek amacıyla bir çok Metod geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılan ikisi; viskoz kum saati kontrolü (viscous hourglass control) ve direngenlik kum saati kontrolü (stiffness hourglass control) metotlarıdır. İki metod da kum saati etkisini deformasyon yönünün tersi yönünde, düğüm noktalarına kuvvet uygulayarak engellemeye çalışır.[2]

Viskoz kontrolde kuvvetler kum saati modu hızlarına bağlı iken, direngenlik kontrolünde kuvvetler kum saati deformasyonlarına bağlıdır. Viskoz kontrol kum saati etkilerini tümüyle yok edemezken sadece bunların büyümesini engeller.[2]

Direngenlik kontrolü ise etki bitene kadar kuvvet uygulanacağından kum saati etkilerini tamamen yok eder. Bunun yanında direngenlik kontrolü bazı durumlarda elemanı olduğundan daha direngen (stiff) yapar.[2]

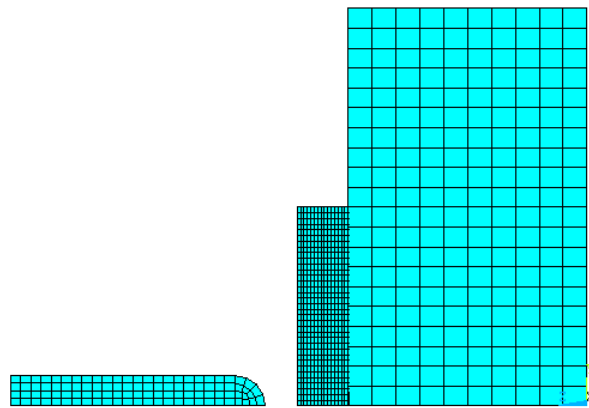
Hourglassing’i azaltmanın diğer yolları:

- 1- Tekil yüklerden kaçınmak: Tekil yükler hourglass modlarını tahrik ederler. Hourglassing’e uğrayan bir eleman yanındaki diğer elemanı da bu modda davranmaya zorlar.

- 2- Tam integrasyonlu elemanlar kullanmak: Tam integrasyonlu elemanlar hourglassing modları göstermezler. Yapının tümünde veya bir kısmında tam integrasyonlu elemanlar kullanılarak hourglassing yok edilebilir.[2]

2.3 Sonlu Eleman Mesh Oluşturulması

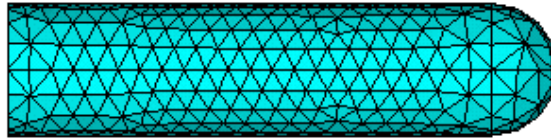
Sonlu eleman analizi gerçekleştirirken, kullanılan nümerik program kullanılan parçaları en küçük elemanlara ayırarak ve bu elemanlara genel yapının malzeme modeli özellikleri yüklenerek, elemanlar arasındaki etkileşimlerle adım adım çözümü elde etmektedir. Bu nedenle yapılan analizin doğru ve geçerli olabilmesi için kullanılan eleman tipi ve (mesh yoğunluğu) bölünen eleman sayısı büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte yoğun bir mesh oluşturulduğunda (yani fazla sayıda elemanlara bölünme yapıldığında) ise hesaplama süresi ve hesaplama maliyeti yeterli bir PC' nin sınırlarını oldukça zorlamaktadır. Bu handikabı olabildiğince ortadan kaldırmak için analizde etkileşime girecek bölgeler daha yoğun mesh diğer bölgeler ise daha seyrek mesh' lenerek, hem çözümün geçerli sınırlar içerisinde kalması hem de çözüm maliyetlerinin kabul edilebilir seviyelerde olması sağlanabilir.



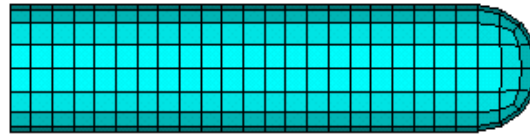
Şekil 2.10 : Geometrilerin Mesh edilmiş durumları

Şekil 2.10 'da geometrilerin mesh edilmiş halleri gösterilmektedir. Şekilde de görülebileceği gibi analizde asıl üzerinde odaklandığımız seramik parça mermi ve

alüminyum desteğe oranla daha yoğun olarak meshlenmiştir. Mesh yoğunluğunun önemi konusuna değindik, mesh oluşturulurken dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise mesh elemanlarının düzgün geometride olmasıdır. Özellikle Explicit dinamik analiz gerçekleştirirken mesh 4 köşeli dikdörtgen yada kare prizma elemanlardan oluşmalıdır. Bunu sağlayabilmek içinde parça geometrileri oluşturulduktan sonra, özellikle silindirik ye küresel geometriler 4 eşit parçaya bölünerek köşeler elde edilmelidir. Eğer silindirik yada küresel bir geometriyi (mapped) yani düzgün yapıda meshlemek istediğimizde, geometriyi olduğu gibi programa gösterdiğimizde, program mapped mesh oluşturmak için birden fazla kenar ve köşe arayacak ve bulamadığı için mesh eylemi başarısız olacaktır. Köşeli olmayan silindirik ve küresel geometrileri meshlemenin bir diğer yolu ise free (serbest) mesh oluşturmaktır. Bu seçenek kullanıldığında kullanılan program geometriyi meshlemek için üçgenler ve üçgen prizmalar kullanmaktadır, bu ise yine özellikle Explicit dinamik analizde sonuçların istendiği kadar doğru olmasını engelleyecektir. Örnek olarak Şekil 2.11’de delici geometrisinin mapped mesh ve free mesh kullanılarak oluşturulduğu durumlar gösterilmiştir.



Şekil 2.11 a: Delicinin free mesh oluşturulmuş geometrisi



Şekil 2.11 b: Delicinin mapped mesh oluşturulmuş geometrisi

Şekil 2.11a’ da gösterilen mesh modelinde mesh oluşturulurken katı eleman tipi olan Tetrahedron kullanılmıştır. Şekil 2.11 b’ de ise nodlu brick katı eleman tipi kullanılarak mapped mesh oluşturulmuştur.

Tablo 2.1’de gerçekleştirmiş olduğumuz sonlu eleman analizinde kullanılan delici, seramik ve alüminyum destek geometrilerinin eleman tipi, malzeme modeli ve eleman sayıları gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Delici, Seramik ve Alüminyum destek geometrilerinin, eleman tipleri, malzeme modelleri ve eleman sayıları

Geometri	Eleman Tipi	Malzeme Modeli	Eleman Sayısı	
			S E	SPH
Delici	Solid164	Johnson-Cook EOS Gruneisem	392	1792
Seramik	Solid164	Johnson – Holmquist Ceramics	18375	-
Alüminyum	Solid164	Johnson-Cook EOS Gruneisem	3000	-

Yukarıdaki tabloda yer alan SE sonlu elemanları, SPH ise Smoothed Particule Hydrodynamics' i ifade etmektedir.

2.4 Malzeme Modeli

Johnson – Cook (JC) ve Johnson – Holmquist Ceramics (JH-2) malzeme modelleri sonlu eleman simülasyonunda delici ve çelik yelek katmanlarında kullanıldı. Aşağıda JC ve JH-2 malzeme modelleri detaylı olarak tanıtılmaktadır.

2.4.1 Johnson – Cook Malzeme Modeli

Johnson – cook modeli sertleşme ile ilgili en gelişmiş modellerden biridir. Sertleşme üzerinde şekil değişim hızı ile birlikte sıcaklık değişiminin de etkisini dikkate alır.

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \quad (2.12)$$

ε : Efektif plastik şekil değişimi

ε^* : Normalize edilmiş efektif plastik şekil değişim hızı (normalizyon hesaplanan şekil değişim hızı $1.0s^{-1}$, a bölünerek yapılır),

n : Üstel sertleşme katsayısı,

A, B, C ve m : sabitler

T^* : Sıcaklık oranı ise şu şekilde tanımlanır:

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2.13)$$

T_{room} : Oda sıcaklığı,

T_{melt} : Erime sıcaklığı

2.4.1.1 JC kırılma kopma modeli

Malzemedeki kırılma/kopmayı şekil değişimi, şekil değişimi hızı ve sıcaklık değişimine bağlı olarak hesaplar. Malzemede kırılma/kopma, şekil değişimi kırılma kopma şekil değişimine eşit olunca ($D=1$) gerçekleşir.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \quad (2.14)$$

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] [1 + D_4 \ln \epsilon^*] [1 + D_5 T^*] \quad (2.15)$$

$\Delta \epsilon$: Δt zaman adımı boyunca efektif plastik şekil değişimi artımı,

σ^* : Efektif gerilmeye bölünerek elde edilmiş ortalama gerilme

D_1, D_2, D_3, D_4 ve D_5 : Kırılma sabitleri

ϵ_f : Kırılma / kopma şekil değişimi

Tablo 2.2. Alüminyum (6061-T6) ve mermi için Johnson – Cook malzeme modeli Mie – Gruneisem EOS sabitleri [3]

<i>Malzeme</i>	<i>Yoğunluk ρ (Kg/m³)</i>	<i>G(Gpa)</i>	<i>Zorlanma Sabitleri</i>				
			<i>A</i> (Mpa)	<i>B</i> (Mpa)	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>M</i>
6061-T6 Alüminyum	2704	28	324	114	0.42	0.002	1.34
Tungsten Delici	17670*	124	1200*	141*	0.12	0.016	1.00

<i>Malzeme</i>	<i>Kırılma Sabitleri</i>					<i>Mie – Gruneisem EOS Sabitleri</i>			
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	<i>D5</i>	<i>K1</i> (Gpa)	<i>K2</i> (Gpa)	<i>K3</i> (Gpa)	<i>Γ</i>
6061-T6 Alüminyum	-0.77	1.45	-0.47	0.000	1.60	77	128	125	2.0
Tungsten Delici	0.00	0.33	-1.50	0.000	0.00	302	470	335	1.43

[*: Weber tarafından kullanılan değerleri ifade etmektedir.] [3]

Johnson – Cook malzeme modeli Mie – Gruneisem EOS sabitleri ile birlikte kullanılmıştır. Alüminyum (6061-T6) ve delici için kullanılan JC ve Mie – Gruneisem sabitleri tablo 2.2’ de gösterilmiştir.

2.4.2 Seramik Malzemeler

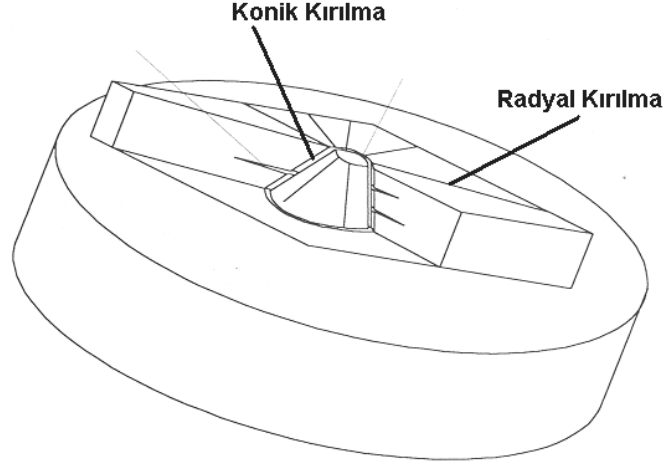
Seramik ve diğer kırılğan malzemelerin analizleri çelik yelek, hafif zırhlı araçlar ve ağır zırhlı araçlar (tanklar)’ da kullanılmalarının ardından önem kazanmıştır. Seramikler düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleri ile koruyucu zırh sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Sayısal analiz gerçekleştirirken malzemenin tam olarak modellenebilmesi için deneysel çalışmalara her zaman ihtiyaç duyulur. Seramiklerin balistik darbeye karşı davranışları, delicinin büyüklüğüne, delicinin hızına, delicinin malzemesine ve yapısına, seramiğe destek olarak kullanılan malzemeye ve tabi ki seramiğin mekanik özelliklerine bağlıdır. Bu

değişkenlerin iyi anlaşılabilmesi ve tespit edilmesi ise deneysel çalışmalara bağlıdır.[4]

Seramiğin davranışını tanımlayabilmek için birçok model geliştirilmiş, Johnson-Holmquist (JH-2) modeli ise balistik darbe altında seramiklerin davranışını en iyi şekilde tanımlayan modeldir.[5] Bununla birlikte geliştirilen model bir dereceye kadar yeterli olabilmektedir. Örneğin seramik darbe altında mikro yapısal parçacıklara kadar parçalanır, bununla birlikte analizde kullanılan JH-2 modeli bir noktaya kadar bunu elde etmemizi sağlar.[6] Tez çalışmamın bu bölümünde **ANYSLSDYNA** (versiyon 9.70) de 110 numaralı malzeme modeli olarak yerleştirilmiş 110 (***MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS**)[16] modelinin kullanımı ve geçerliliğinin ispatı gerçekleştirilmiştir. Ama öncelikle seramik malzemelerin balistik darbe altındaki davranışının anlaşılması gerekmektedir.

2.4.3 Seramik Malzemelerin Balistik Darbe Altında Davranışı

Seramiklerin balistik darbe altındaki davranışları onların kırılgan doğalarından dolayı benzersizdir. Seramiklerin bir önemli özelliği yarı statik ve dinamik yük altında az yada yok sayılabilir derecedeki yumuşaklıkları, diğeri ise hidrostatik basınca karşı malzeme dayanımlarıdır[7]. Seramik malzemeler dinamik darbeye maruz bırakıldıklarında iki farklı davranış gösterirler. İlki, darbenin başlangıcında mikro saniye mertebesinde gerçekleşir[8,9]. Sıkıştırıcı Stres dalgaları darbe bölgesinden başlar ve dairesel olarak bu bölgenin dışına doğru yayılır. Sıkıştırıcı stres dalgalarının hızı verilen bir darbe için elastik dalga hızının oldukça üstündedir. Eğer sıkıştırıcı streslerin büyüklüğü malzemenin lokal dinamik dayanımının üzerine çıkarsa hasar başlar ve kırıklar formunda birikir. Bu kırık malzemenin önünden içine doğru elastik dalga hızıyla yayılır ve darbe altındaki malzemede konik formda bir hasara yol açar. Bu kırılmalar şekil 2.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Seramik malzemede konik ve radyal kırıklar

Sıkıştırıcı stres dalgaları seramiğin serbest yüzeyine ulaştığında bu kesme dalgalarını yansıtır ve eğer seramik malzemenin dinamik kesme dayanımının üzerine çıkarsa radyal formda bir hasara neden olur. İkinci evrede ise büyük ölçekli deformasyon ve seramiğin ve/veya delicinin erozyonu gerçekleşir[9]. Bu evre çok yüksek zaman adımlarına izin verir (genellikle mili saniye) ve delici seramiğe nüfuz ettiğinde yada seramik deliciyi durduğunda sona erer.[4]

Düşük hızlı darbelerde delici deformasyona girer ve seramik tarafından orta dereceli hasarla durdurulabilir. Orta ve yüksek darbe hızlarında ve daha sert delicilerle seramikte erozyona neden olur ve delici seramik malzemenin içine doğru nüfuz eder. Ve bu da malzeme tanımının dinamik açısal olmayan *Yield* dayanımı yada *Hugoniot Elastik Limit* (HEL) dayanımları gibi birçok malzeme özelliklerini içermesini gerektirir. Uygulamada malzeme için bir hasar (kopma/kırılma) tanımlaması da mutlaka eklenmelidir.[4]

2.4.4 Johnson Holmquist Seramik Malzeme modeli

Johnson Holmquist seramik modeli kırılğan malzemelerin büyük deformasyonlarda davranışlarını tanımlayan ilk modeldir. Modelin ilk versiyonu (JH-1) malzemede progresif hasarı tanımlayamıyordu. JH-2 olarak bilinen bu modelin ikinci versiyonu malzemede dayanım ve hasarı temsil edilen değişkenlerin birer fonksiyonu olarak sunar. JH-2 modeli ayrıca çeşitli malzemelerin direk

karşılaştırılmalarına olanak sağlayan HEL' deki dayanım parametrelerinin normalizasyonunu içerir. ANSYS-LSDYNA Hydrocode malzemenin davranışını eleman deformasyonun artmasıyla (*strain*), malzeme denklemini kullanarak stres deki değişimi adım adım iterasyon gerçekleştirerek hesaplar.[4]

JH-2 modeli bölgesel malzemenin davranışını tanımlayabilmek için çeşitli malzeme sabitlerine ihtiyaç duyar[7]. Başlangıçta malzeme davranışı elastik malzeme özellikleri

(kesme modülü) ve EOS (Faz denklemleri –Equation Of State) aracılığı ile stres durumunun tamamen tanımlanmasıyla elastik olarak kabul edilmiştir. JH-2 modelinde normalize edilmiş zorlanmaya karşılık gelen stres:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2.16)$$

σ_i^* : normalize edilmiş ilk stres

σ_f^* : normalize edilmiş kırılma stresi

D : Kopma oranı ($0 \leq D \leq 1$)

Normal yöndeki stresler ($\sigma^*, \sigma_i^*, \sigma_f^*$) genel formu içermektedir

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (2.17)$$

σ : Gerçek stres

σ_{HEL} : Hugoniot elastik limitindeki stres

Stres'in gerçek formu ise şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma = \sqrt{1/2[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]}$$

(2.18)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 3 normalize edilmiş stres

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: Shear (kesme) stresleridir.

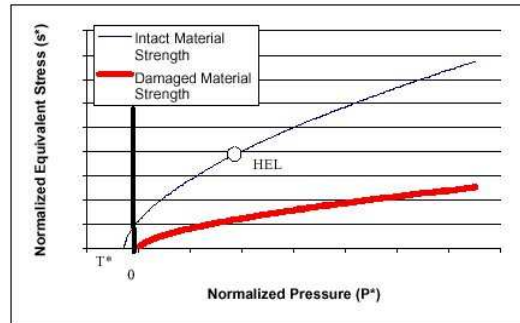
Hasara uğramamış (*Intact*) malzemenin dayanımı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.19)$$

ve hasara uğramış (*damaged*) malzemenin dayanımı:

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.20)$$

Şekil 2.13' de hasara uğramamış (*Intact*) ve hasara uğramış (*Damaged*) malzemede strese karşılık basınç değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Hasara uğramış ve hasarsız malzeme için zorlanmaya karşılık basınç değişimi

Önemli bir nokta normalize kırılma zorlanması sınırlandırılabilir $\sigma_f^* \leq \sigma_{f \max}^*$.

Bu opsiyonel kırılma zorlanması parametresi önemli kırılma zorlanmasını tanımlarken esneklik sağlar.[3]

A, B, C, M, N, T ve $\sigma_{f \max}^*$ malzemenin sabitleridir. Basınç ise;

$$P^* = P / P_{HEL}$$

P: Gerçek basınç,

P_{HEL} : HEL' deki basınçtır.

Normalize uzama(tensile) hidrostatik basıncı ise:

$T^* = T / P_{HEL}$, T malzemenin dayanabildiği maksimum uzama (tensile) hidrostatik basıncı ifade eder.

JH-2 modeli için operasyon denklemlerini bu şekilde özetleyebiliriz. Sonuçların izlenmesi için LS-POST kullanıldığında; toplam stres, strain, basınç ve plastik strain kullanışlı bölgelerde bulunabilir. Bir eleman için geçerli toplam basınç HISTORY değişkeni1 ve malzemedeki hasar HISTORY değişkeni2 olarak kaydedilir. Çıkış dosyasında history değişkenlerinin tutulması (kaydedilmesi) için *DATABASE_EXTENT_BINARY komutu gereklidir.[4]

2.4.4.1 JH-2 Malzeme Modeli Sabitleri

Günümüzde, mevcut literatür incelendiğinde birçok balistik seramik için JH-2 malzeme karakterize edilmiş ve tanımlanmıştır. Bu özellikler tablo 3' de gösterilmiştir. Bu malzemeler %99.5 Seramik (Al_2O_3) [10], Boron Carbide (B_4C) [11], Silicon Carbide (SiC) [12] ve Alüminyum Nitrat (AlN) [3] dır. Diğer bir seramik malzeme olan Silika Bazlı Cam karakterize edilmiştir [13]. Al_2O_3 ' ün dışındaki diğer malzemeler ileride yapılacak olan çalışmalara yön göstermek amacıyla gösterilmiştir. Tablo içindeki terimler orijinal şekilde yer almıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılan ANYS-LSDYNA (versiyon 9.70) programındaki kontrol kartları ve diğer komutlarda anlatılırken okuyucuya ileride yapılacak çalışmalarında kolaylık sağlaması ve terimlerin farklı anlamlara neden olabileceği düşünülerek orijinal şekilde gösterilmiştir. Tablo 2.3' de gösterilen bu sabitler direk olarak hesaplanmayıp mevcut bilgilerin yorumlanmasıyla elde edilmiştir.

Elastik değişkenler üreticilerden yada yayınlanmış eserlerden genellikle elde edilebilir. Basınç-Hacim ilişkileri deneysel balistik darbe testlerinden veya diomand-anvil tekniği gibi (Sertlik deneyleri) yarı-statik yaklaşımlarla hesaplanabilir[3]. LS-DYNA' da JH-2 modeline tamamlayıcı olarak malzeme erozyonu kriteri (FS)

eklenmiştir. İlk opsiyon efektif plastik strain' in kritik bir değerinde temellendirilmiştir ve ikinci opsiyonda uzama (tensile) kopmalarıdır. Geçerli formulasyonda bu kriterler özeldir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise erozyon kriterinin (FS) yanlış bir değerde kullanılması elemanların zamanından önce erozyona uğramasına (yok olmasına) sebebiyet verir ve bu durum da hatalı model sonuçlarına neden olur. Gerçek formda ise malzemenin erozyonu delicinin nüfuz etmesiyle veya kesme basıncıyla gerçekleşmektedir[14]. Geçerli basınç altında malzemenin zarar görmemiş stres değeri malzemenin dayanımını aşarsa hasar gerçekleşir. Bu plastik strain' in artışı aynı şekilde hasarı da artırır. Erozyon kriteri toplam plastik strain' e bağlıdır, hesaplanan plastik strain belirlenen plastik strain (FS – Failure Strain)' i aştığı zaman eleman erozyona uğrar.[4]

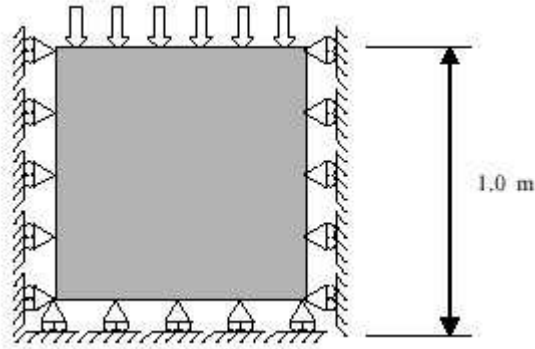
Kırılma strain (FS)' i olarak negatif bir değer belirlenirse bu kez uzama (Tensile) basıncı belirlenen maksimum uzama basıncını aştığında eleman erozyona uğrar (yok olur). Unutulmamalıdır ki kopma strain (FS)' i sadece bir erozyon kriteridir ve malzeme/hasar hesaplamasında yer almaz. Kopma/kırılma strain (FS)' nin analiz sonuçları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde tanımladık. Bu tez çalışmasında da seramik malzemeler için iki farklı kırılma/kopma strain (FS)' leri ile değişik durumlar (CASE' ler) oluşturarak balistik darbe analizleri gerçekleştirdik. Böylelikle seramik malzemelerde (FS)' nin bir bakıma tespiti için farklı analiz sonuçları elde edilmiştir.[4]

Tablo 2 3. Seramik malzemeler için malzeme modeli değerleri[4]

	Silika				
	B₄C	SiC	AlN	Al₂O₃	Bazlı Cam
Yoğunluk (kg/m ³)	2510	3163	3226	3700	2530
Shear Modulus (Gpa)	197	183	127	90.16	30.4
Strength Constants					
A	0.927	0.96	0.85	0.93	0.93
B	0.7	0.35	0.31	0.31	0.088
C	0.005	0.0	0.013	0.0	0.003
M	0.85	1.0	0.21	0.6	0.35
N	0.67	0.37	0.29	0.6	0.77
Ref Strain Rate (EPSI)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tensile Strength (Gpa)	0.26	0.37	0.32	0.2	0.15
Normalized Fracture Strength	0.2	0.8	NA	NA	0.5
HEL (Gpa)	19	14.567	9	2.79	5.95
HEL Pressure (Gpa)	8.71	5.9	5	1.46	2.92
HEL Vol. Strain	0.0408		0.0242	0.1117	
HEL Strength (Gpa)	15.4	13.0	6.0	2.0	4.5
Damage Constants					
D1	0.001	0.48	0.02	0.005	0.053
D2	0.5	0.48	1.85	1.0	0.85
Equation Of State					
K1 (Gpa) (Bulk Modulus)	233	204.785	201	130.95	45.4
K2 (Gpa)	-593	0	260	0	-138
K3 (Gpa)	2800	0	0	0	290
Beta	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

2.4.4.2 JH-2 Seramik Modelinin Geçerlilik Deneyleri (Durumları)

Johnson ve Holmquist malzeme modelinin geçerliliğini ispat etmek amacıyla 3 farklı durum tanımlanmıştır[4]. Durumların hepsinde modelin davranışını tespit etmek için çeşitli hasar değerlerinde sınırlandırılmış ve serbest bırakılmış seramik malzemede basma deneyi gerçekleştirilmiştir. Test durumlarının şematik gösterimi ve sınır şartları şekil.2.14.' de gösterilmiştir.

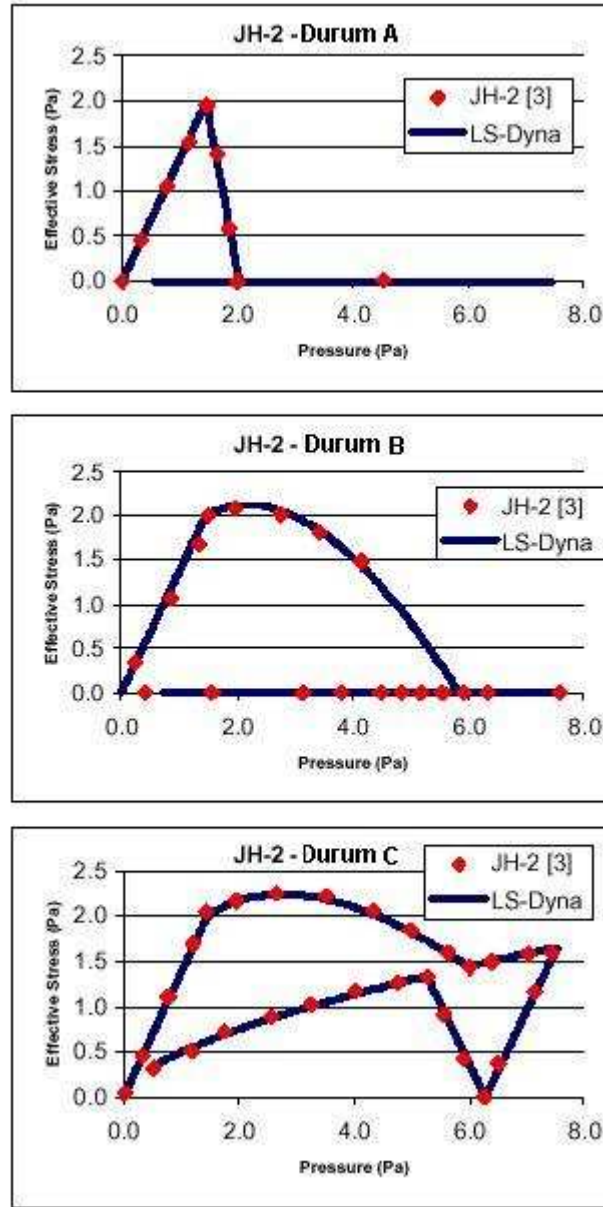


Şekil 2.14. Test durumu sınır şartları

Test elemanı olarak üç boyutlu ve kenar uzunlukları 1m olan bir küp kullanılmıştır. Küp beş yüzeyinden sınır şartları uygulanarak sınırlandırılmış ve altıncı serbest yüzey (üst) üzerinden de yük uygulanmıştır. Her bir test malzeme dikey olarak aşağı doğru 0.05m yer değiştirdiğinde ve stres-adımının sıfır noktasına ulaşıldığında sonlandırılmıştır.[4] Tablo 2.4' de üç durum için malzeme özellikleri gösterilmiştir. Durum A için, malzeme kırılma dayanımı olmadan tanımlanmıştır ($S_f=0$) plastik strain' in oluşmasına izin verilmemiştir ($\epsilon_f=0$). Test sonucunda malzeme dayanımı aşıldığında malzeme tamamen bir kez hasara uğramıştır. (Şekil X, Durum A). Bu hacimsel basıncın 0.56 Gpa' a yükselmesini sağlamıştır.[4] Önemli bir nokta finaldeki hacimsel basınç şekil 19' da yer almamaktadır ancak referans "Johnson and Holmquist" [3]' de bulunabilir. Durum B' de; malzeme kırılma/kopma strain' i olmadan tanımlanmıştır ($S_f=0$), fakat plastik strain' in oluşmasına (hesaplanmasına) izin verilmiştir. Bu durumda malzeme tamamen hasara uğradığında hacimsel basınç hasarla birlikte maksimum değer 0.72 Gpa' a kadar yükselmiştir. Durum C' de ise kırılma/kopma strain' i ve plastik strain' in her ikisi de tanımlanmıştır.[4]

Tablo 2.4. Test durumları için malzeme modeli değerleri [4]

	Durum A	Durum B	Durum C
Yoğunluk (kg/m ³)	3700	3700	3700
Shear Modulus (Gpa)	90.16	90.16	90.16
Strength Constants			
A	0.93	0.93	0.93
B	0	0	0.31
C	0	0.0	0.0
M	0	0	0.6
N	0.6	0.6	0.6
Ref Strain Rate (EPSI)	1.0	1.0	1.0
Tensile Strength (Gpa)	0.2	0.2	0.2
Normalized Fracture Strength	NA	NA	NA
HEL (Gpa)	2.79	2.79	2.79
HEL Pressure (Gpa)	1.46	1.46	1.46
HEL Vol. Strain	0.1117	0.1117	0.1117
HEL Strength (Gpa)	2.0	2.0	2.0
Damage Constants			
D1	0	0.005	0.005
D2	0	1.0	1.0
Equation Of State			
K1 (Gpa) (Bulk Modulus)	130.95	130.95	130.95
K2 (Gpa)	0	0	0
K3 (Gpa)	0	0	0
Beta	1.0	1.0	1.0



Şekil 2.15. Efektif stres e karşı basınç değişimleri

Geçerlilik durumlarının sonuçları efektif stres e karşı basınç değişimlerinin grafikleri şekil 2.15' de gösterildiği gibi Johnson ve Holmquist tarafından sunulan verilerle karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, doğru final basınçları ve stres-basınç değerleri tamamen uyushmaktadır[4].

2.5 Kontakların Tanımlanması

Büyük deformasyonların olduğu çarpma / darbe analizlerinde etkileşime girecek olan modeller arasında sürtünmeler ve temaslar olur. Birbiri ile etkileşime giren modeller arasında ortaya çıkan kuvvet ve momentum transferleri kontak – impact algoritmaları ile sağlanır. Birbiri içerisine geçen yüzeyler arasında hayali yaylar yerleştirilerek oluşacak olan yay kuvvetleri sayesinde yüzeyleri dışarı çıkartmaya çalışır. Dinamik analizlerde kontak – impact algoritmaları:

- a) Birbirine temas edecek nod ve elemanlarla birlikte iç içe geçme miktarını (penetrasyon derinliğini) tespit ederler.
- b) İç içe geçen kontak yüzeylerini – elemanlarını dışarı çıkarak gerekli kontak kuvvetlerini hesaplar.

Penetrasyon derinliği;

$$\text{Penetrasyon derinliği} = \min \left[\frac{Hacim}{Alan}, 0.5 \times \sqrt{Alan} \right]$$

Formülü ile hesaplanır.

Kontak kuvvetlerinin hesabı ise;

$$k = \frac{f_s \times Alan^2 \times K}{Hacim}$$

f_s : Arayüz stiffness' i için katsayı (sabit)

Formülasyonu ile hesaplanmaktadır.

ANSYS-LSDYNA' da her durum için ayrı tanımlanabilen kontak ifadeleri mevcuttur. Balistik darbe analizi gerçekleştirirken biliyoruz ki etkileşime girecek olan modellerde hasar ve eleman çıkarılması (erozyon) gerçekleşecek. Bu nedenle delici, seramik ve alüminyum modellerinin her biri arasında Explicit dinamik analizde ***CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE** tipi kontak tanımlaması gerçekleştirdik. **SURFACE_TO_SURFACE** ifadesi ilişkilendirilen iki modelin yüzeylerinin birbiri ile tanıştırıldığı anlamına gelmektedir. **ERODING** ifadesi ise ilişkilendirilen iki yüzeyde belirlenen elemanlar için strain, stres yada basınç değerleri aşıldığında o elemanların erozyona uğrayacağı (yok edileceği) ve yok olan elemanların arkasındaki diğer elemanlar arasında ise kontak tanımlamasının

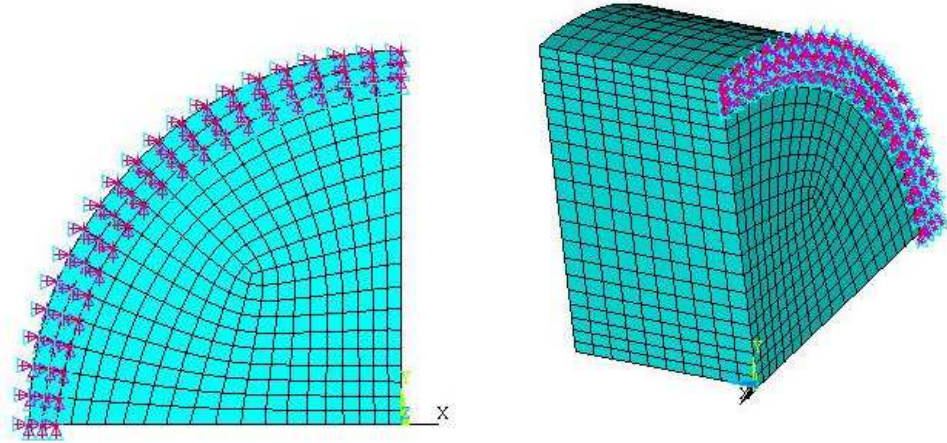
devam ettiği anlamına gelmektedir. SPH metod ile gerçekleştirilen analizlerde ise ***CONTACT_ERODING_NODE_TO_SURFACE** tipi kontak tanımlaması kullandık. Bunun nedeni ise SPH analizde mermi elemanları sadece nodlardan meydana geldiği içindir. **NODE_TO_SURFACE** kontak, iki cisimden birinin yüzey nodları diğer cismin yüzeyine temas etmesi durumunda kullanılmaktadır. Tek yönlü kontak kontrolü yaptığından en hızlı kontak algoritmasıdır. Algoritma sadece kontak nodlarının hedef yüzeye temas etmesi durumunu dikkate alır.[2] **ANSYS-LSDYNA**'da özellikle yüksek hız ve yoğun ağ (mesh) durumlarında penetrasyonu (iç içe geçme) önlemek ve analizin doğru çalışmasını sağlamak amacıyla ***CONTROL_CONTACT** kartı ile bazı özel değişkenler tanımlanmalıdır.[17] Şekil 19' da balistik darbe analizleri gerçekleştirirken kullandığım bir kontrol kartı okuyucuya kontrol kartları hakkında fikir vermesi amacıyla örnek olarak gösterilmiştir.

```
*CONTROL_CONTACT
## slsfac rwpnal islchk shlthk penopt thkchg orien enmass
0.100000 0.0 1 0 0 0 1
## usrstr usrfrc nsbcs interm xpene ssthk ecdt tiedprj
0 0 0 0 1.0000E+5
## sfric dfric edc vfc th th_sf pen_sf
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
## ignore frceng skiprwg outseg spotstp spotdel
0 0 0 0 0 0
```

Şekil 2.16: ANSYS-LSDYNA kontak kontrol kartının gösterimi

2.6 Sınır Şartlarının Tanımlanması

Gerçekleştirmiş olduğumuz balistik darbe analizinde delici, seramik ve alüminyum destek modelleri için $\frac{1}{4}$ simetrik geometri kullandığımızdan. Bu üç model için simetri düzlemi tanımlayarak, kesit düzlem yüzeyleri üzerindeki nodların (düğüm noktaları) belirli iki yöndeki hareketlerini sınırlandırmış olduk. Simetri düzlemi tanımlama **ANSYS-LSDYNA** içerisinde ***BOUNDARY_SLIDING_PLANE** kartı ile ifade edilmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen darbe analizinde kullandığımız alüminyum destek modelini de yine arka yüzeyinde alüminyum modelin merkezine doğru belirli bir derinlikteki düğüm noktalarının tüm doğrultulardaki hareketini sınırlandırarak sabitledik. Alüminyum destek için tanımlanan sınır şartı şekil 2.17' de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Alüminyum destek için tanımlanan sınır şartı

2.7 Hız İfadesi

ANSYS-LSDYNA ile hız ataması iki şekilde gerçekleştirilebilir, ilki her bir geometriyi oluşturan elemanlar kendi aralarında ***CREATE_PART** komutuyla PART olarak gruplandırılır. Örneğin PART1, PART2, PART3 gibi daha sonra hangi PART' a hız tanımlanacaksa **Initial Velocity > Apply > On Parts** adımlarıyla PART seçilir ve hız tanımlanır. İkinci yol ise hız tanımlayacağımız modelin tüm nodlarını (düğüm noktaları) bir arada toplayarak bir grupta (companent) tanımlamak. Ve bu tanımladığımız komponent' e **Initial Velocity > Apply > On Nodes** adımlarıyla ilerleyerek ve komponent seçilerek hız ataması yapılabilir. Örneğin bizim gerçekleştirdiğimiz darbe analizinde hız tanımlayacağımız geometri delici olduğundan, deliciyi ifade eden düğüm noktalarının hepsini bir isim altında topladık. Ve analiz için bu tanımladığımız gruba (companent) belirli bir değer ve belirli bir doğrultuda hız ataması gerçekleştirdik. **ANSYS-LSDYNA** Komut dosyasında hız ifadesi ***INITIAL_VELOCITY** ile belirtilir. Komut dosyası bir metin işleme programı ile açılarak sadece ***INITIAL_VELOCITY** tanımı altındaki değer değiştirilerek farklı hızlar için aynı analiz çalıştırılabilir.

3. SONLU ELEMEN ANALİZİ

Birden fazla farklı senaryo için balistik darbe analizi gerçekleştirdik. Gerçekleştirilen tüm analizlerde seramik malzeme (Al_2O_3) için Tablo 2.3’ de verilen JH-2 malzeme modeli kullanılmıştır. Alüminyum ve delici içinse Tablo 2.2’ de verilen Johnson – Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Ayrıca farklı seramik kalınlıkları için hem Explicit hem de SPH metodu kullanılarak analizler gerçekleştirdim. Aşağıda farklı seramik kalınlıkları için analiz sonuçları yer almaktadır.

3.1 Senaryo 1

Bu analizde delici ve alüminyum destek için Tablo2.2’ de verilen Johnson Cook - Mie Gruneisem malzeme modeli kullanılmıştır. Seramik (Al_2O_3) kalınlığı 4 mm olarak kullanılmıştır.

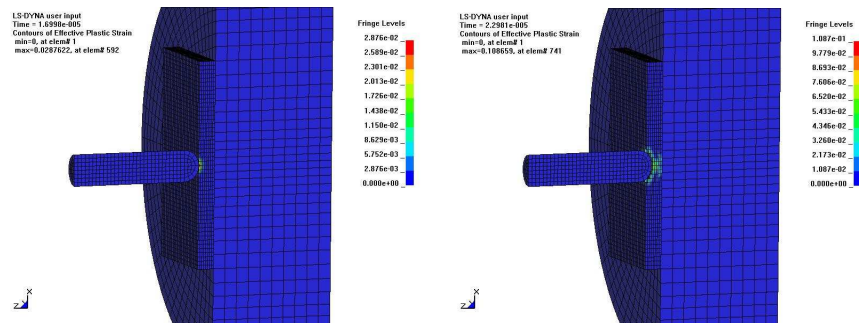
3.1.1 Senaryo 1a

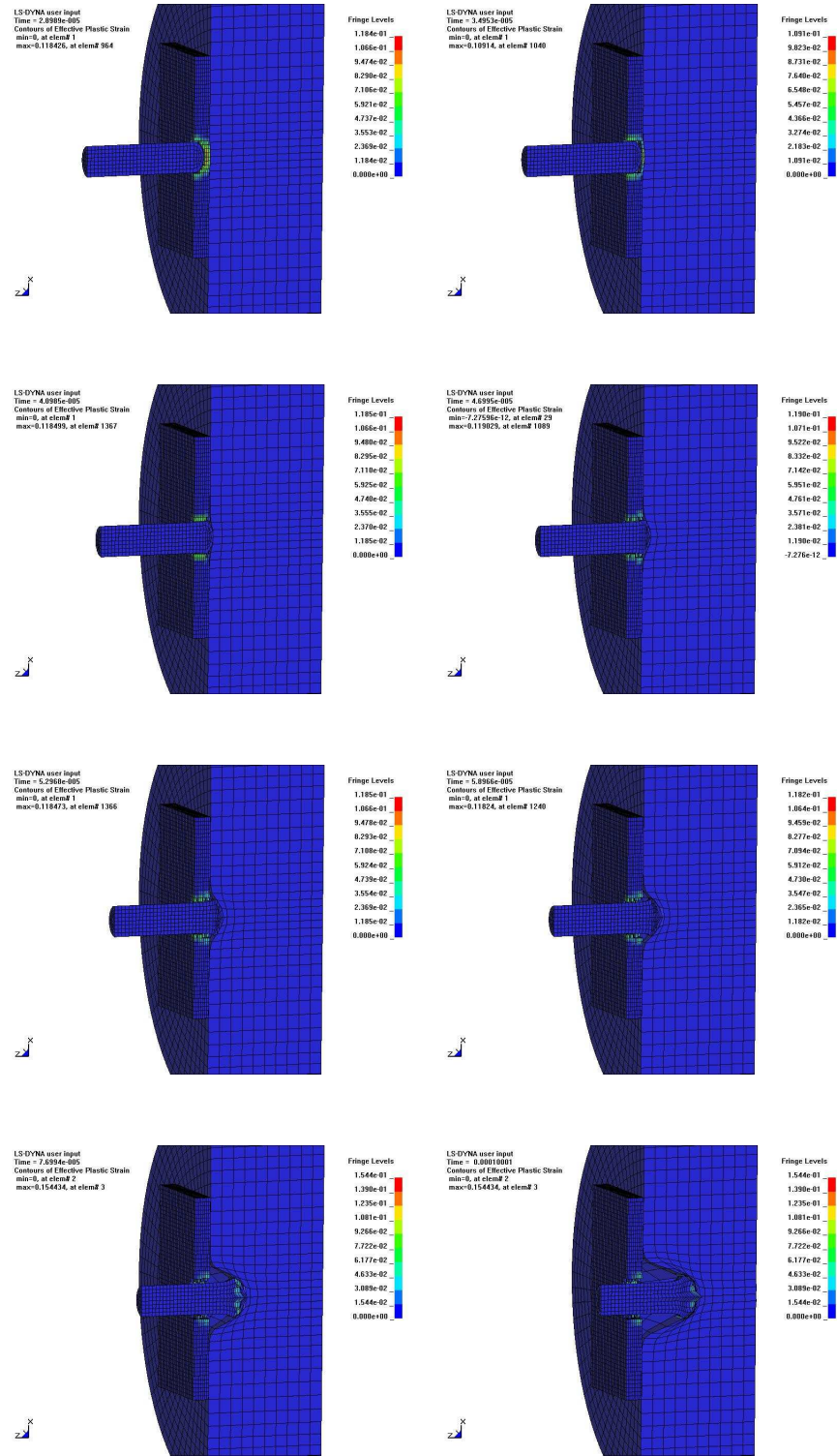
Delici Hızı: 300 m/sn

(Al_2O_3)Seramik için Failure Strain (FS): 0.12

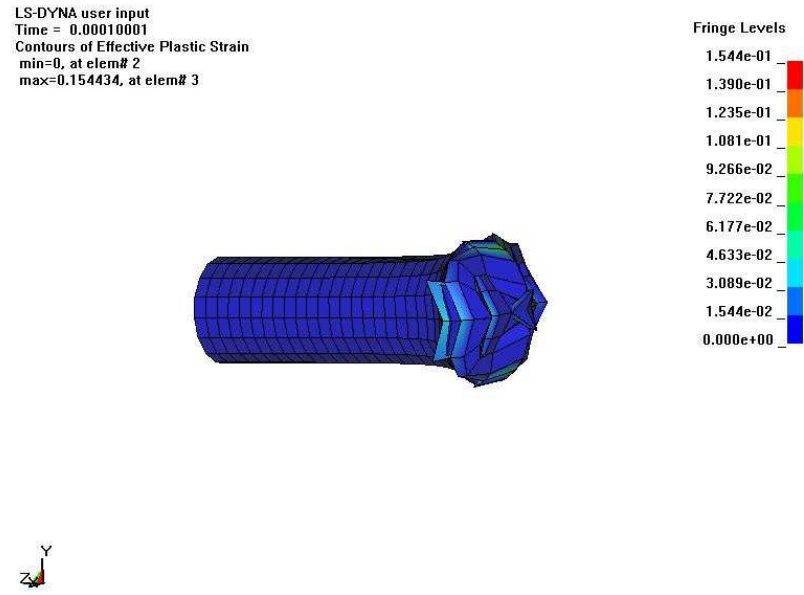
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

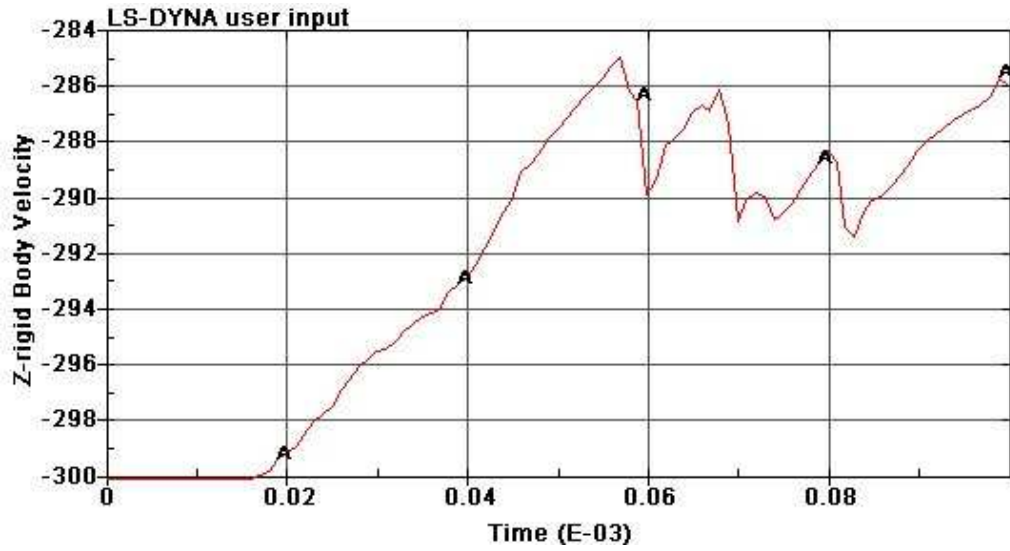




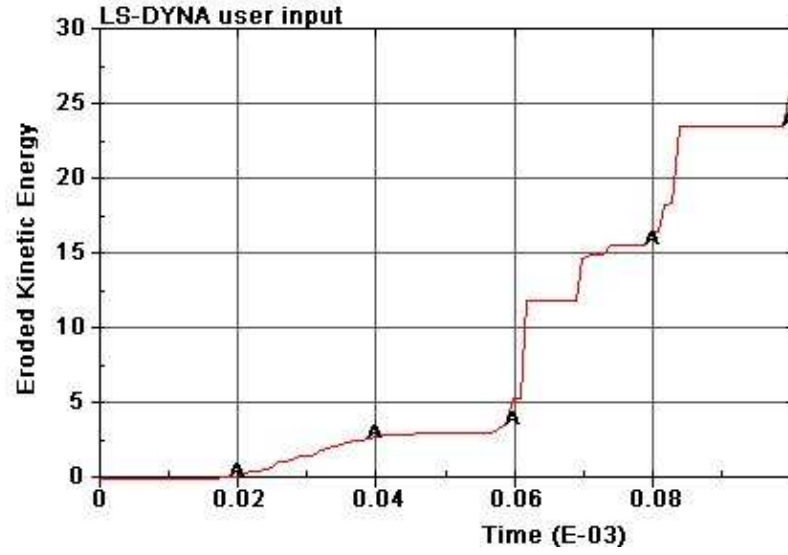
Şekil 3.1: Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.2: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

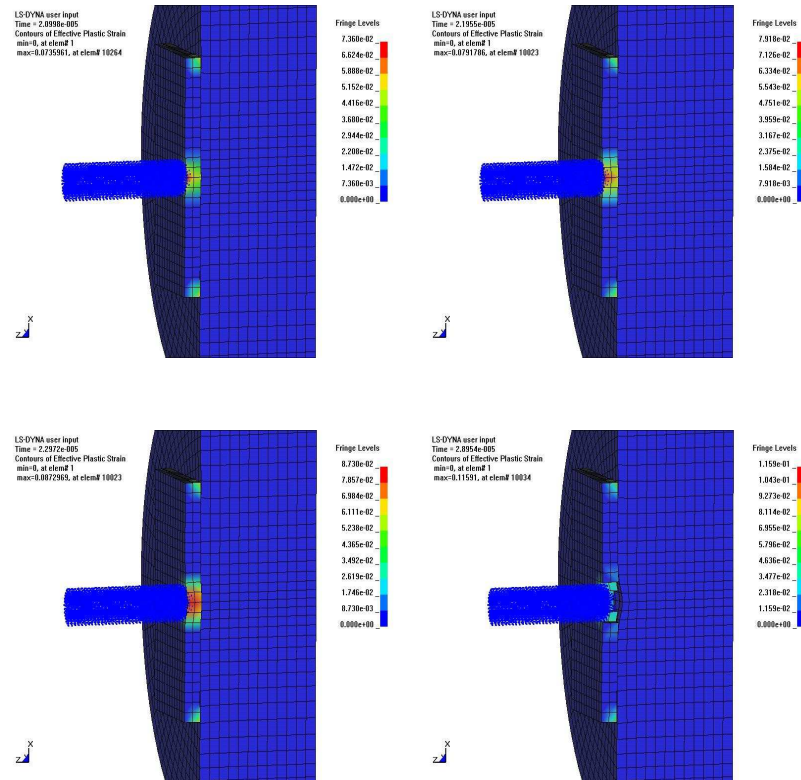


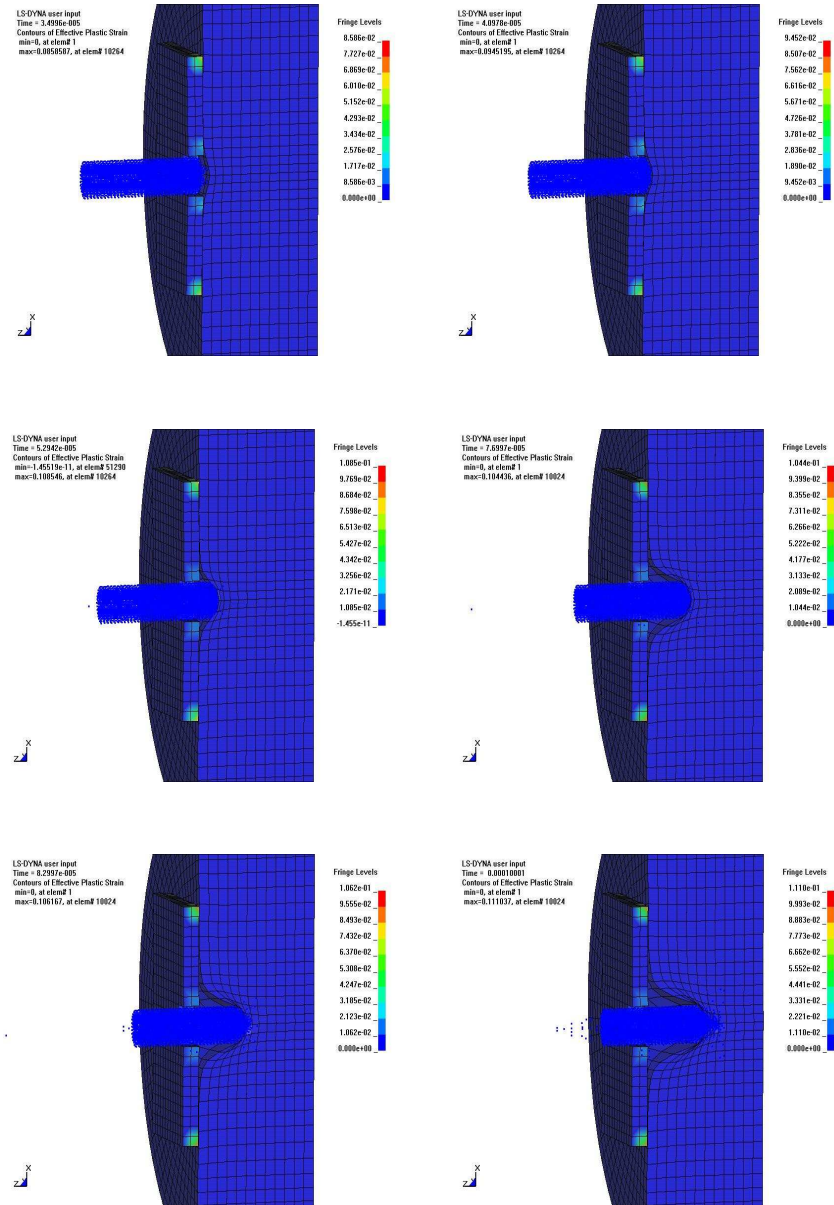
Şekil 3.3. Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.4. Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.5. Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için SPH analiz sonuçları

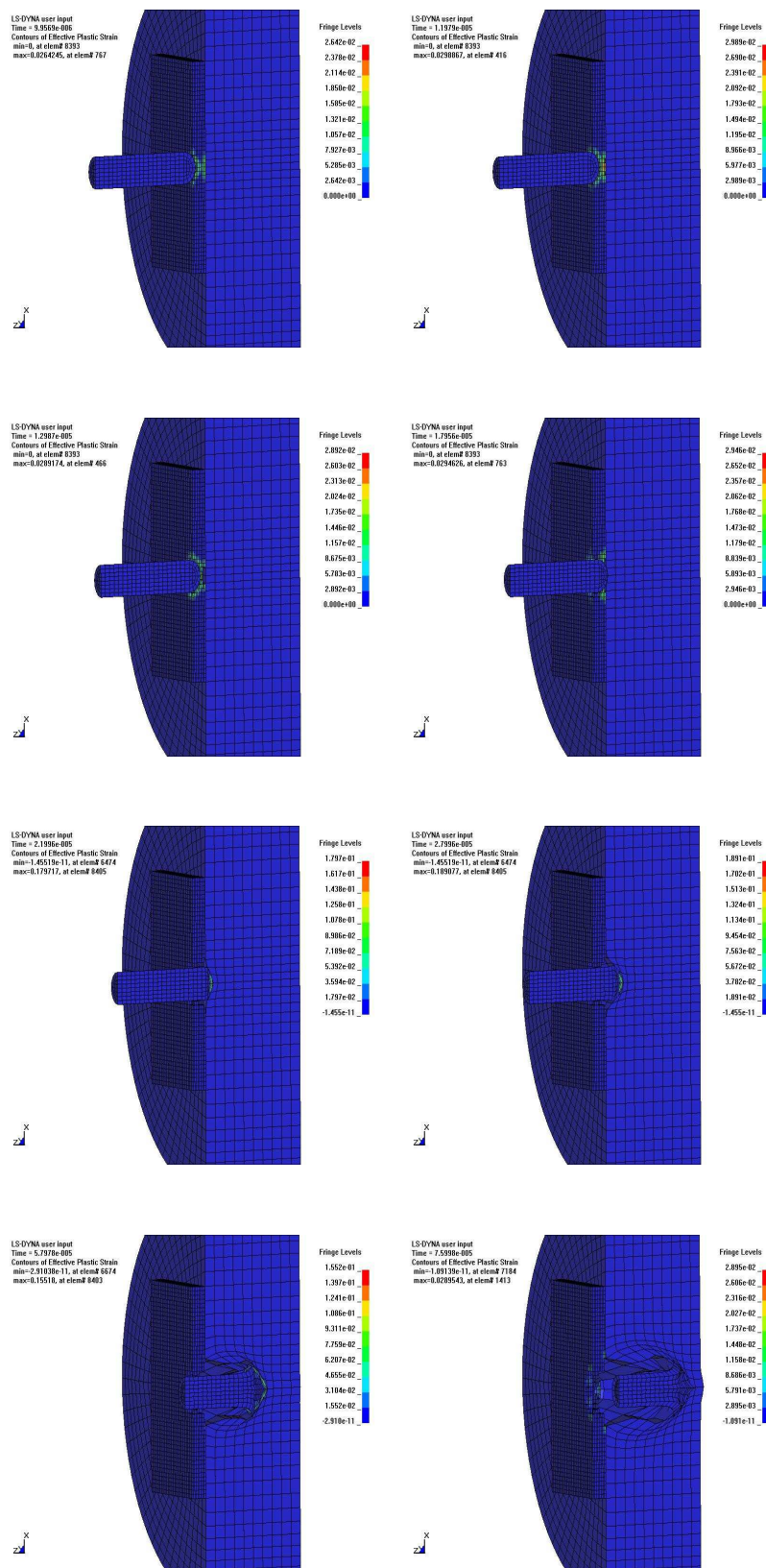
3.1.2 Senaryo 1b

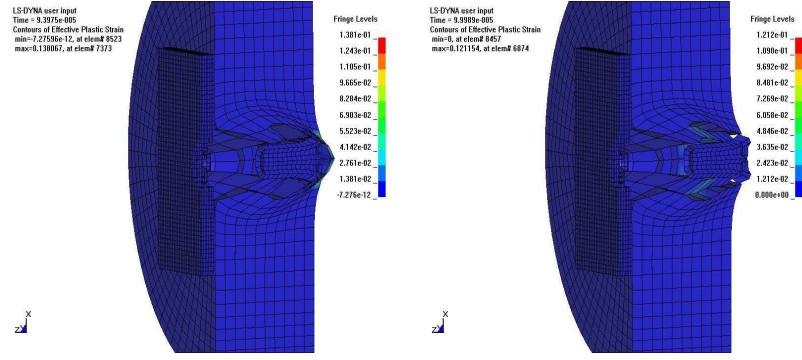
Delici Hızı: 595 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

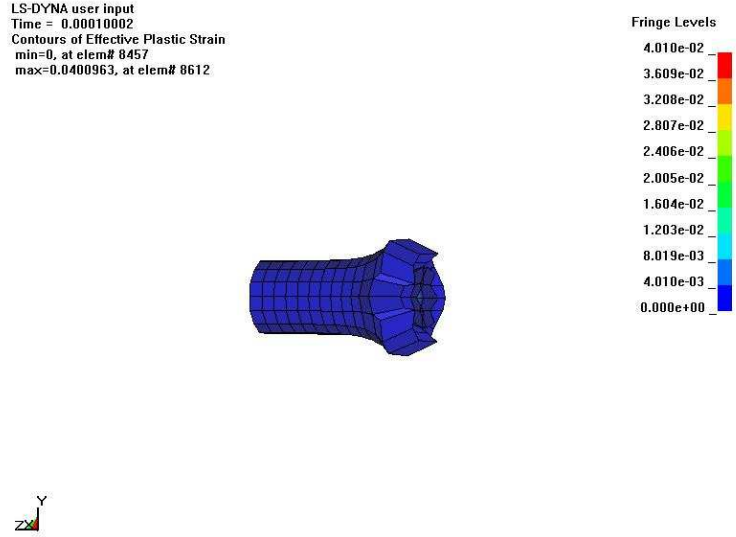
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

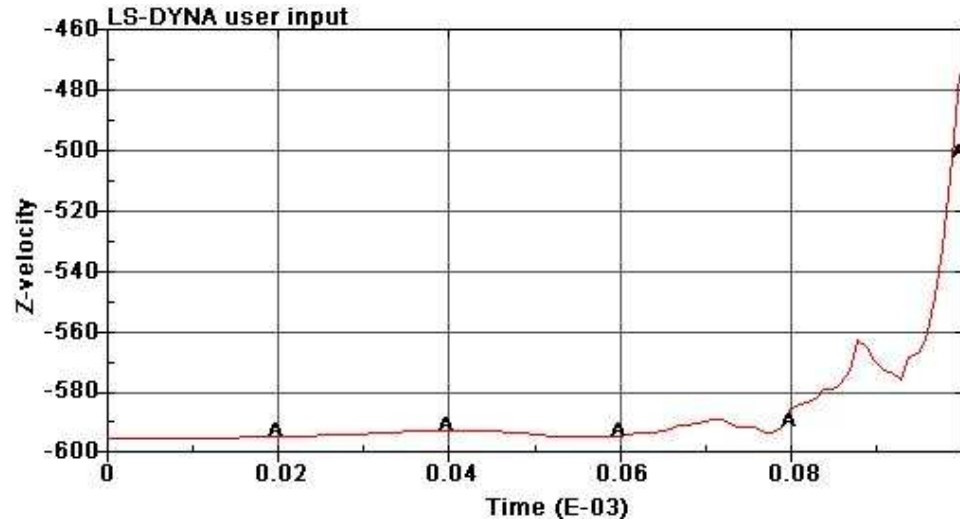




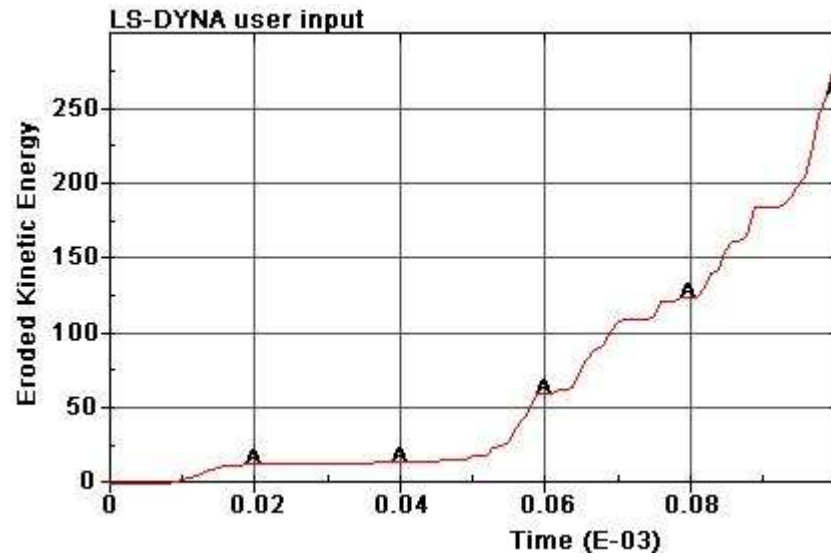
Şekil 3.6: Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.7: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

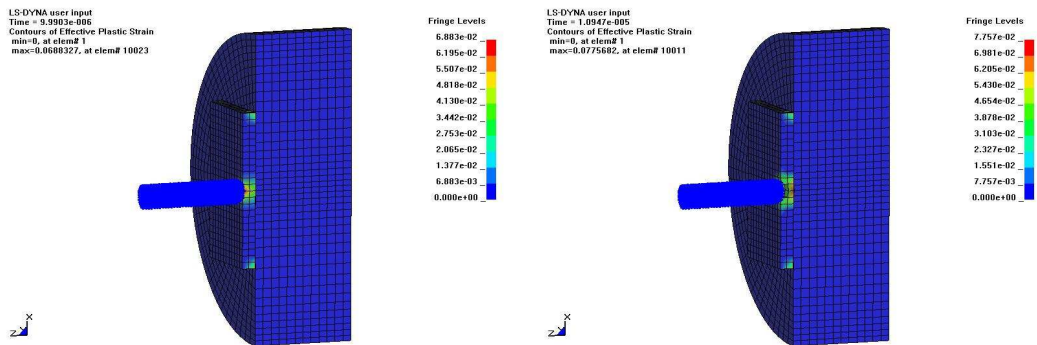


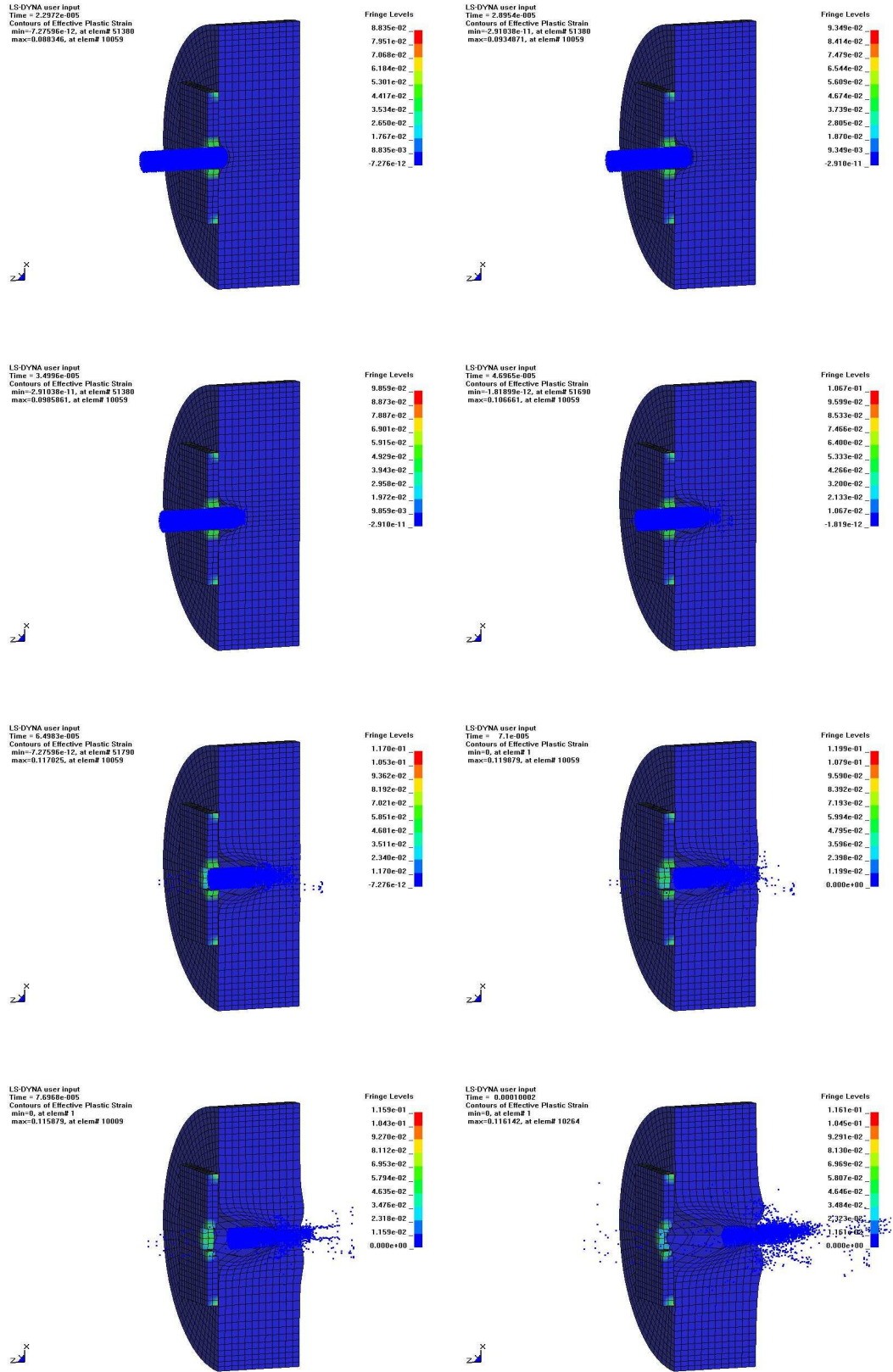
Şekil 3.8: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.9: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.10: Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları

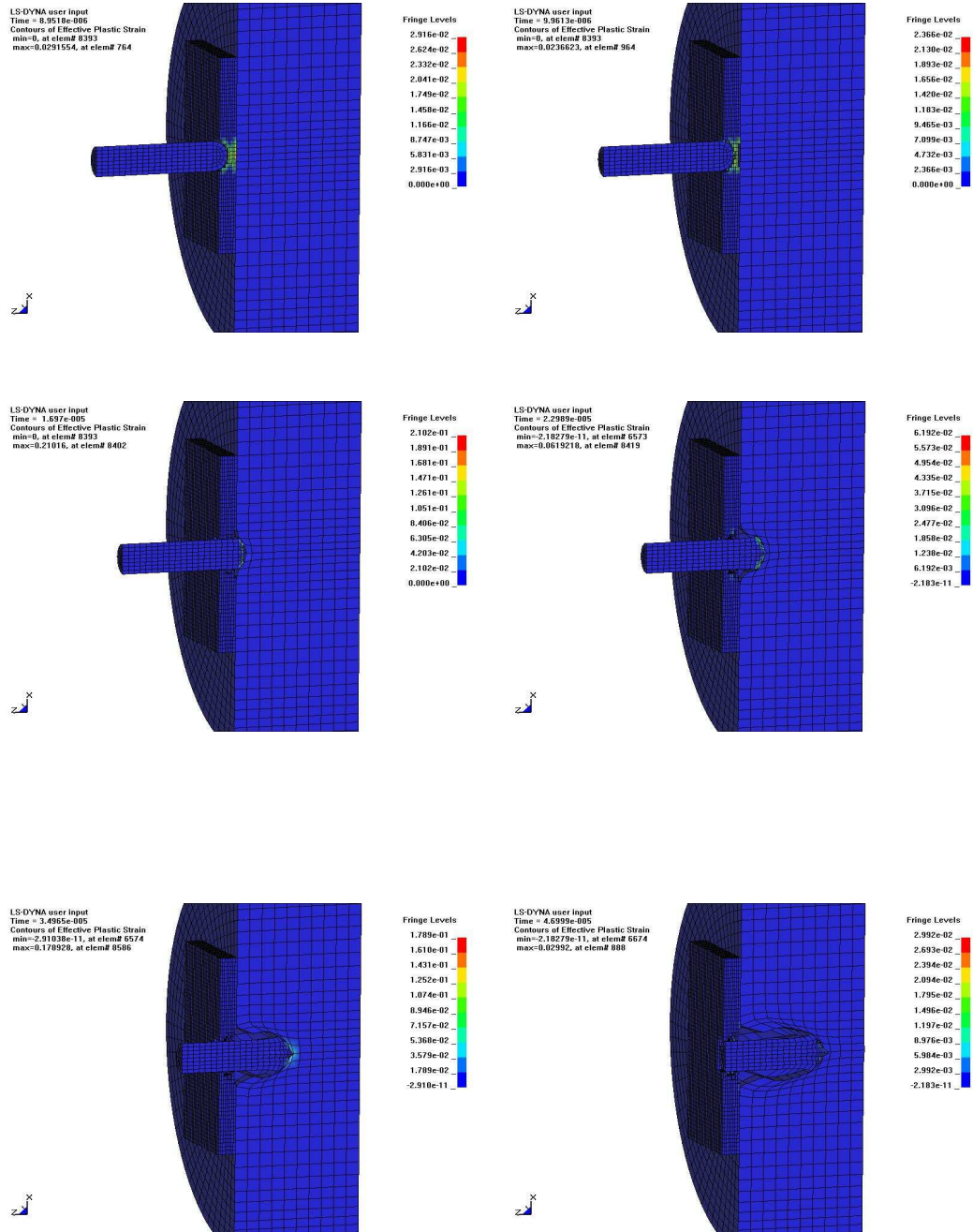
3.1.3 Senaryo 1c:

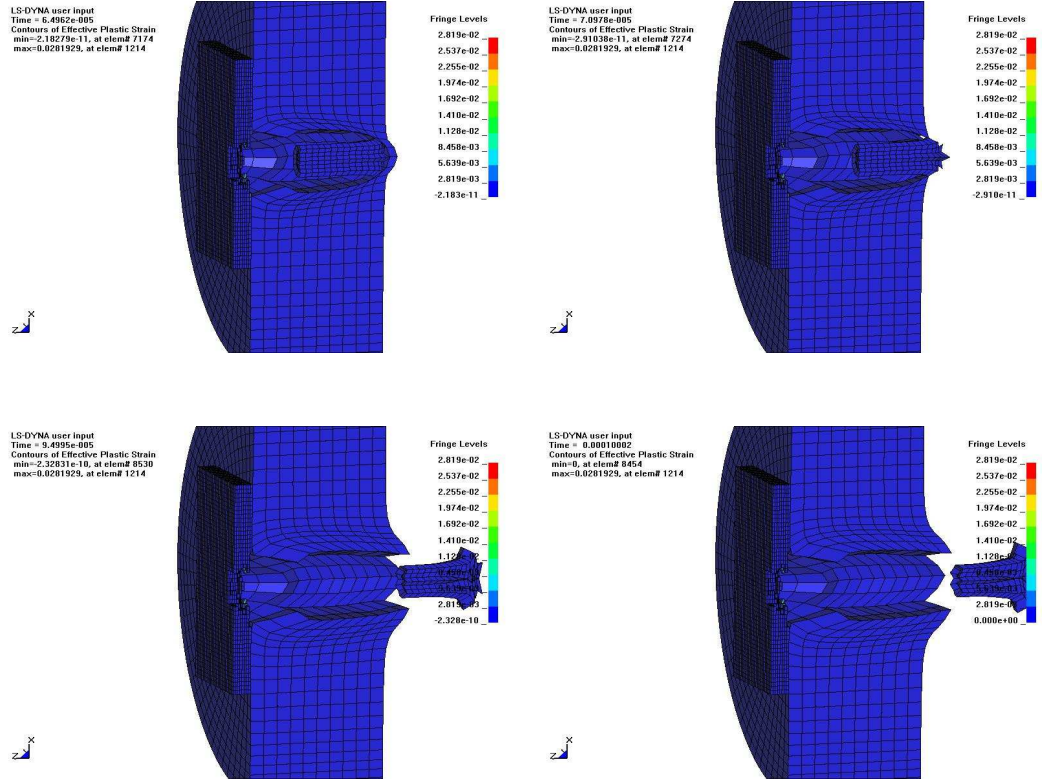
Delici Hızı: 797 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

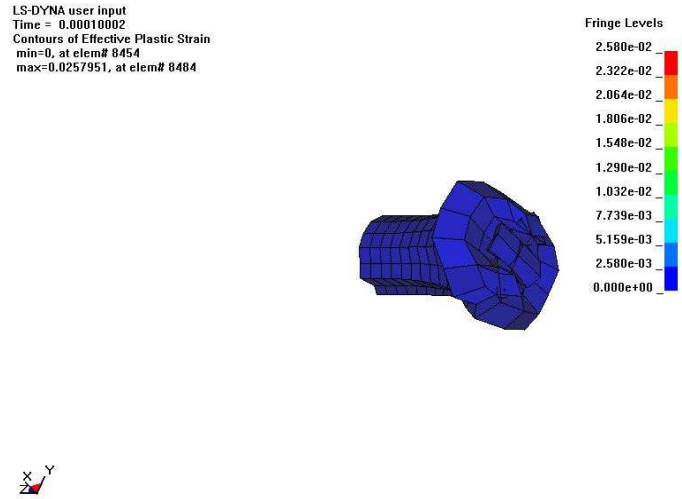
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

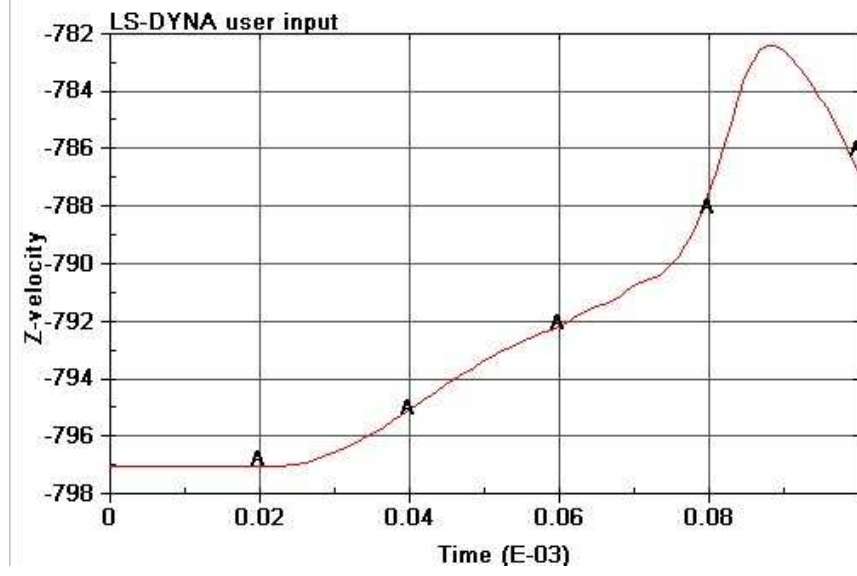




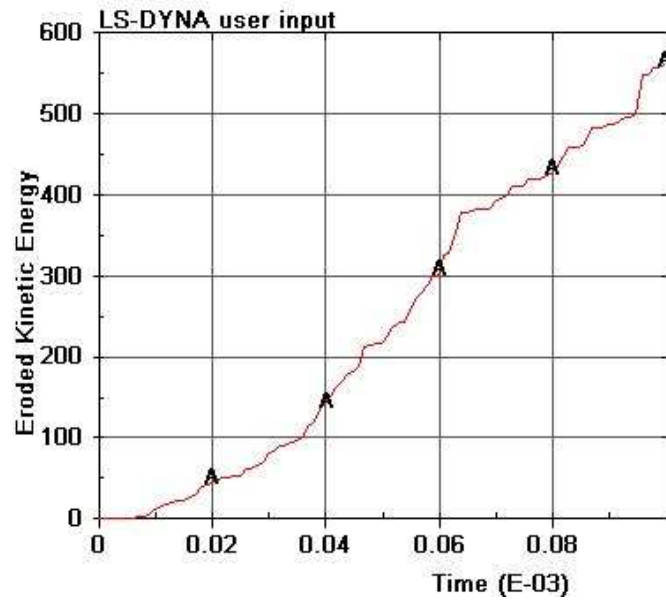
Şekil 3.11: Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.12: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

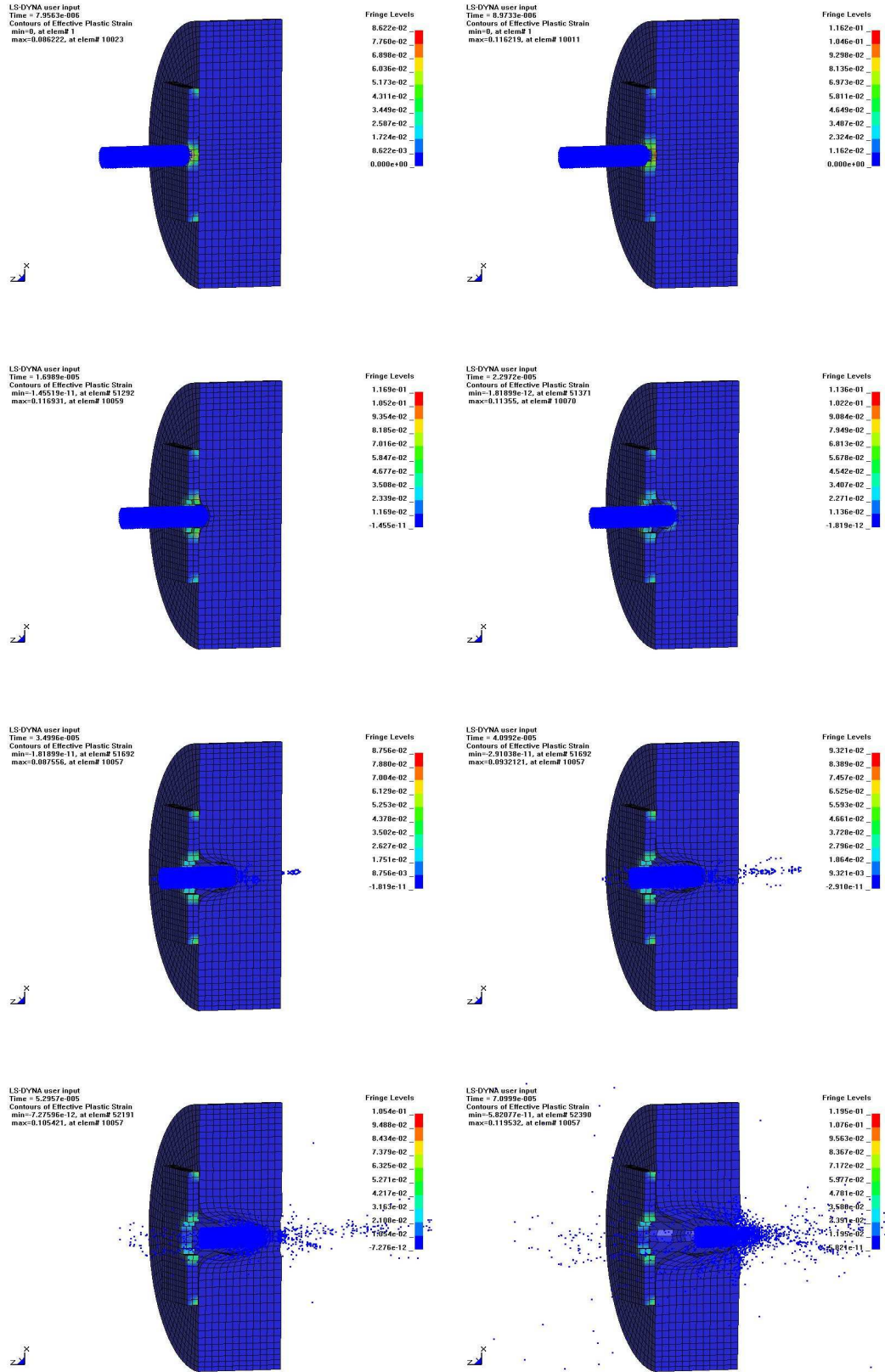


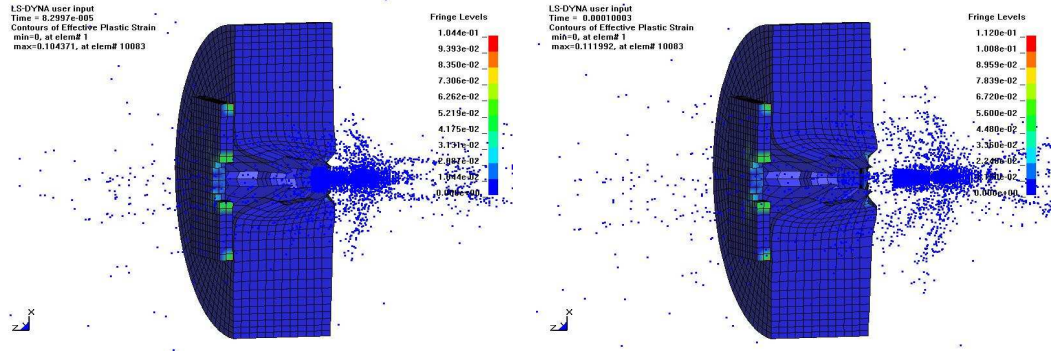
Şekil 3.13: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.14: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.15: Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları

3.2 Senaryo 2

Bu analizde delici ve alüminyum destek için Tablo 2.2’ de verilen Johnson Cook - Mie Gruneisem malzeme modeli kullanılmıştır. Seramik (Al_2O_3) kalınlığı 6 mm olarak kullanılmıştır.

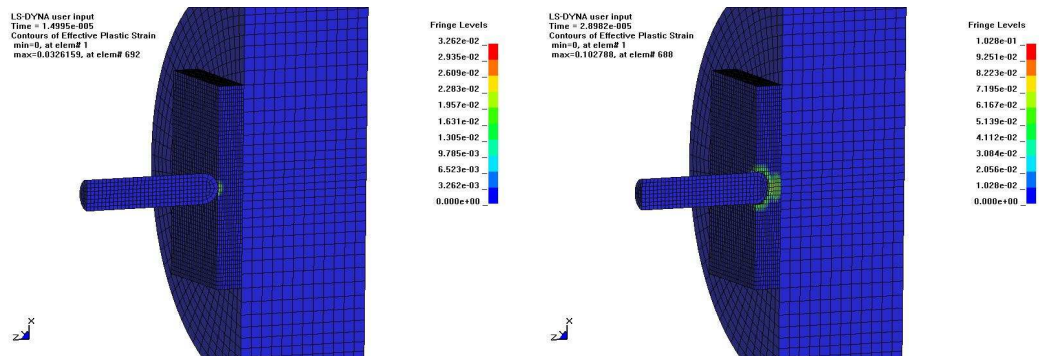
3.2.1 Senaryo 2a

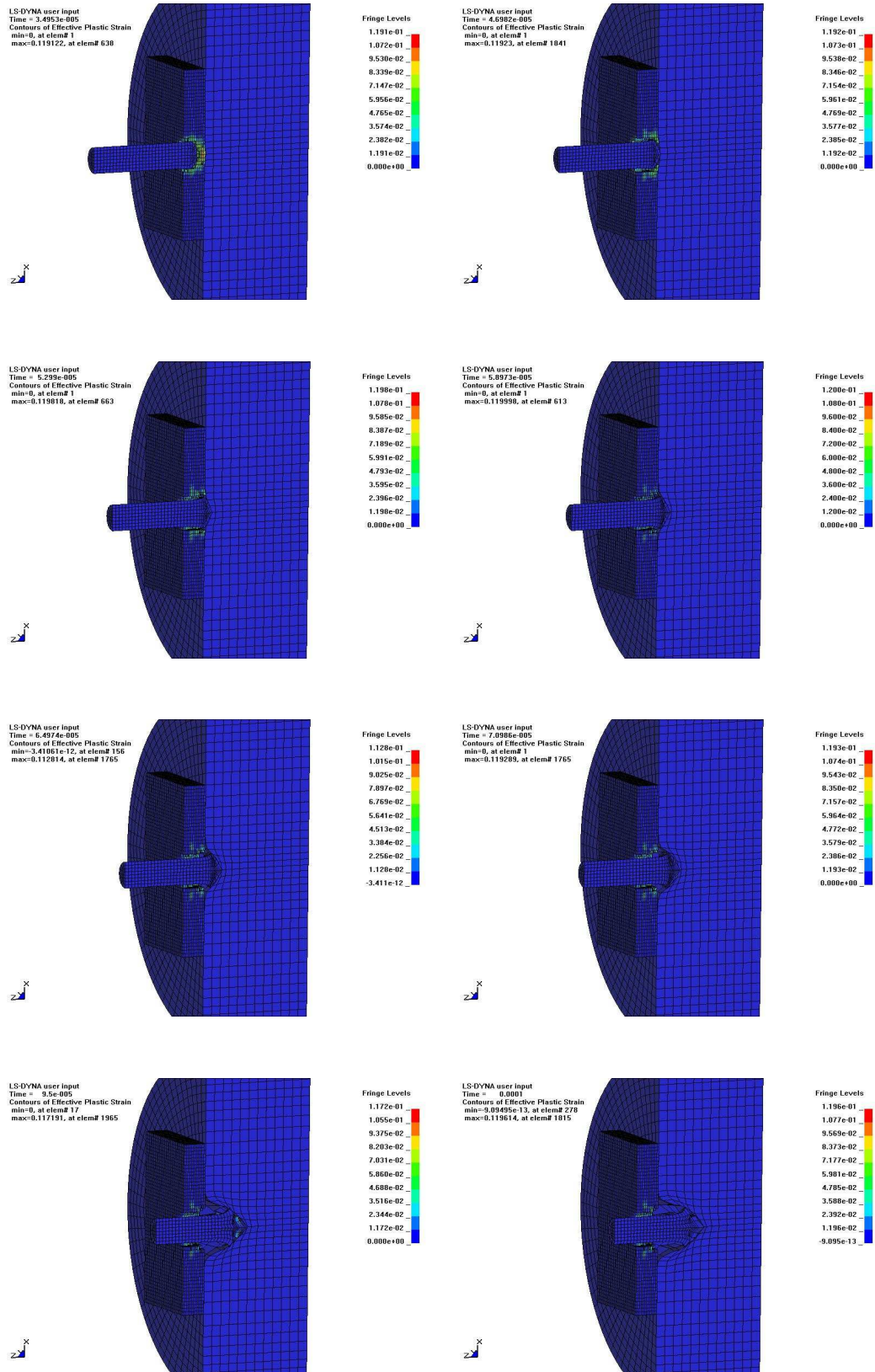
Delici Hızı: 300 m/sn

(Al_2O_3)Seramik için Failure Strain (FS): 0.12

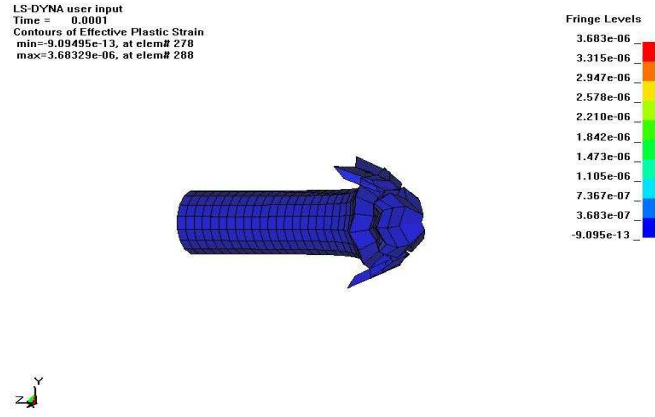
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

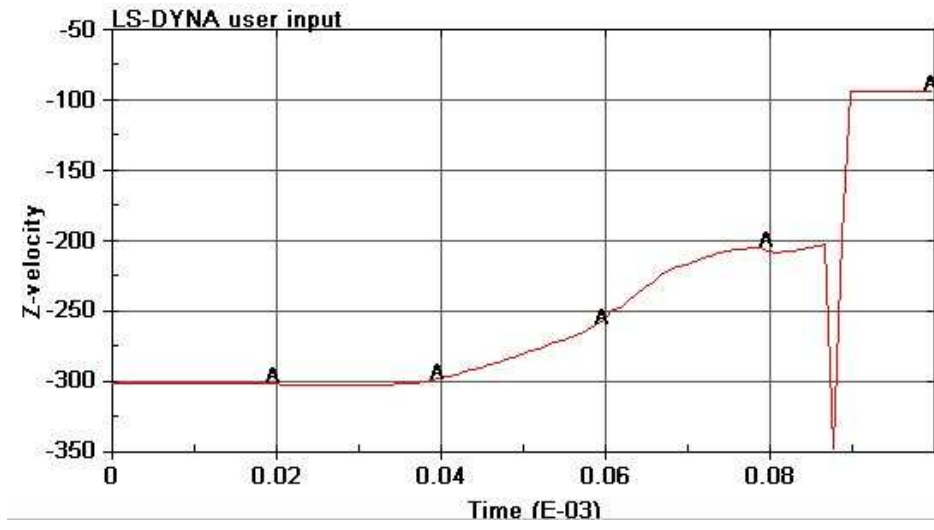




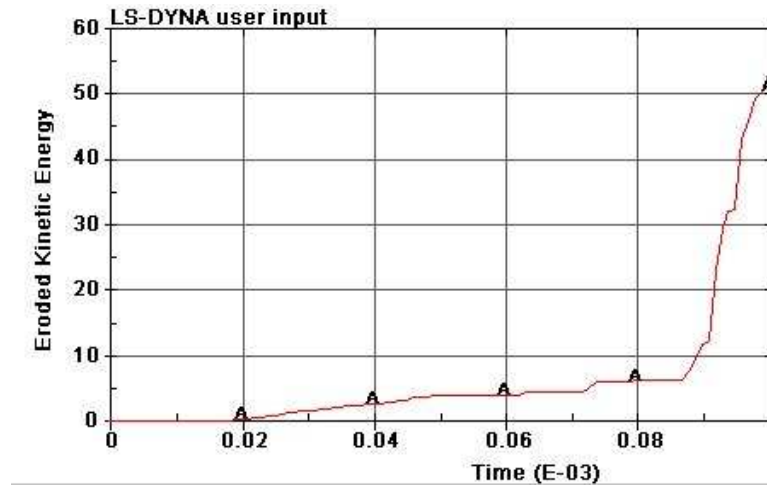
Şekil 3.16: Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.17: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

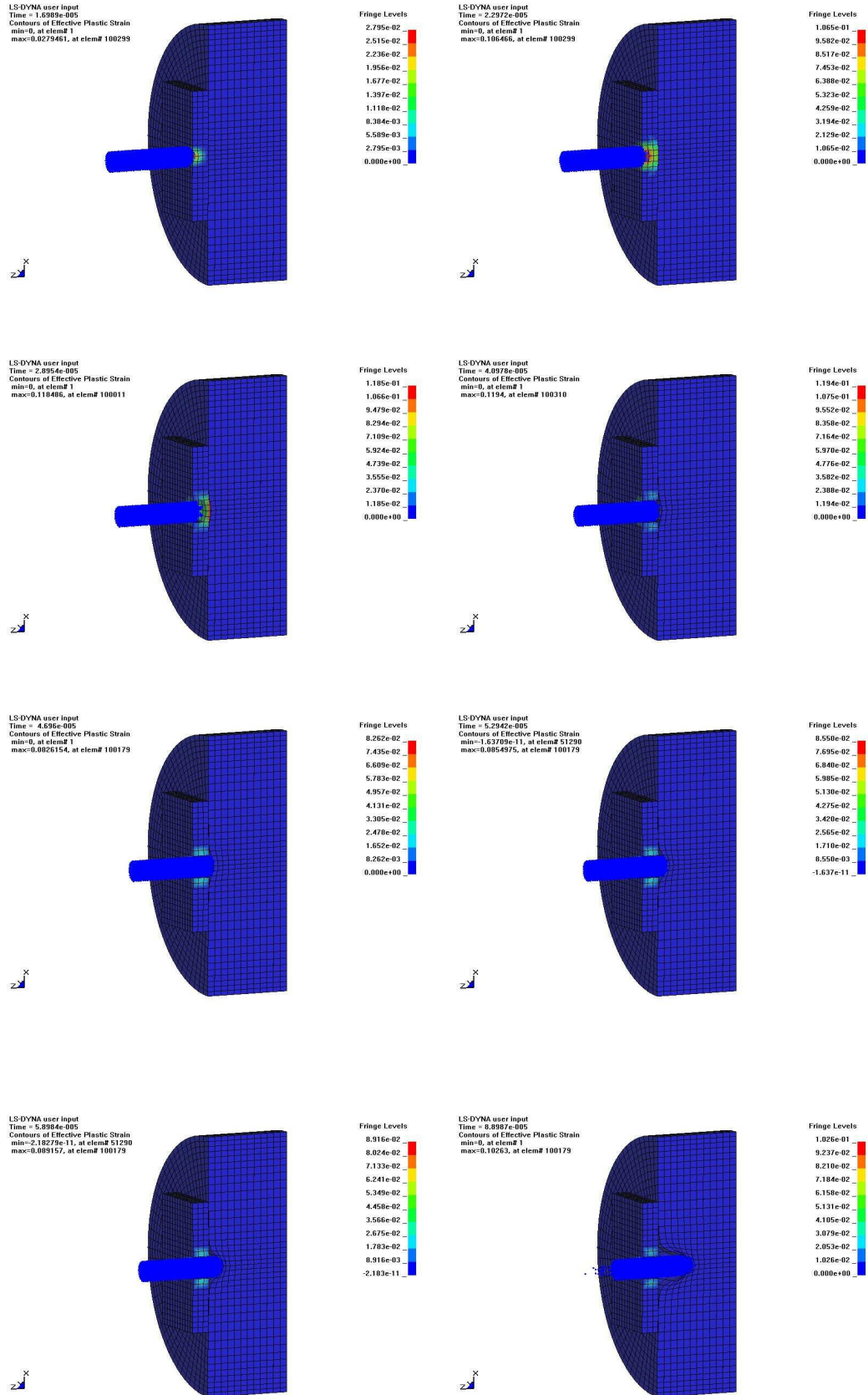


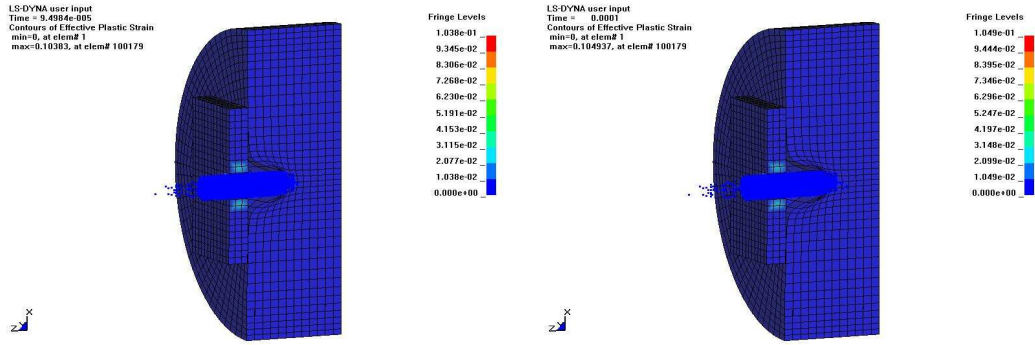
Şekil 3.18: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.19: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.20: Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için SPH analiz sonuçları

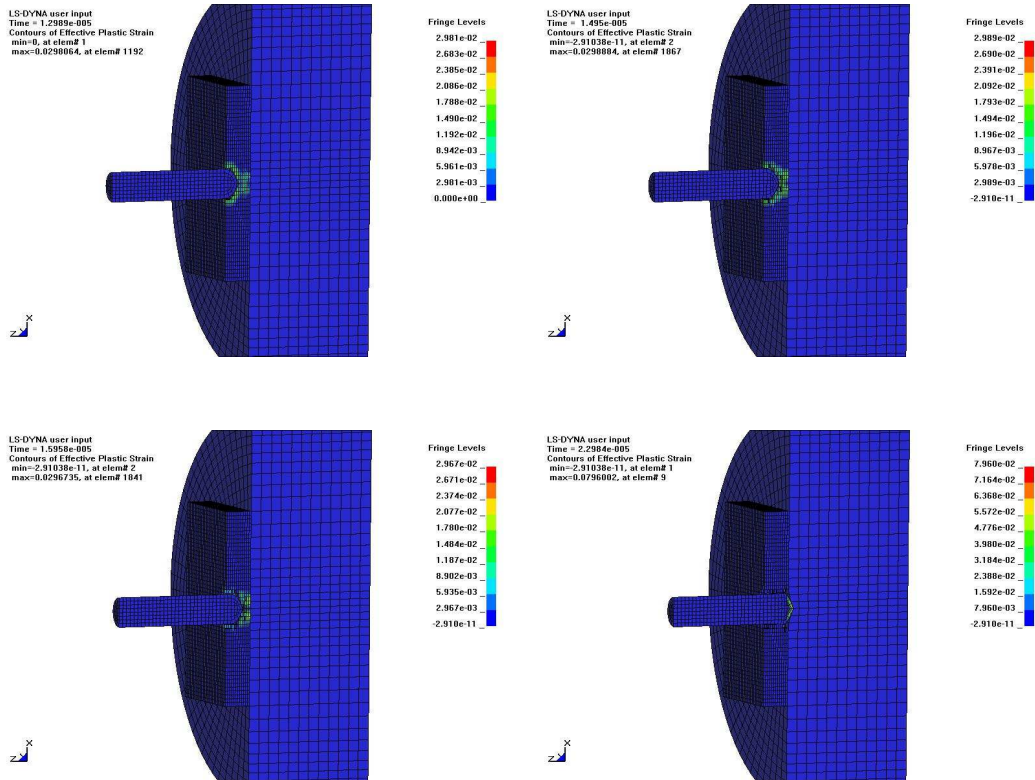
3.2.2 Senaryo 2b

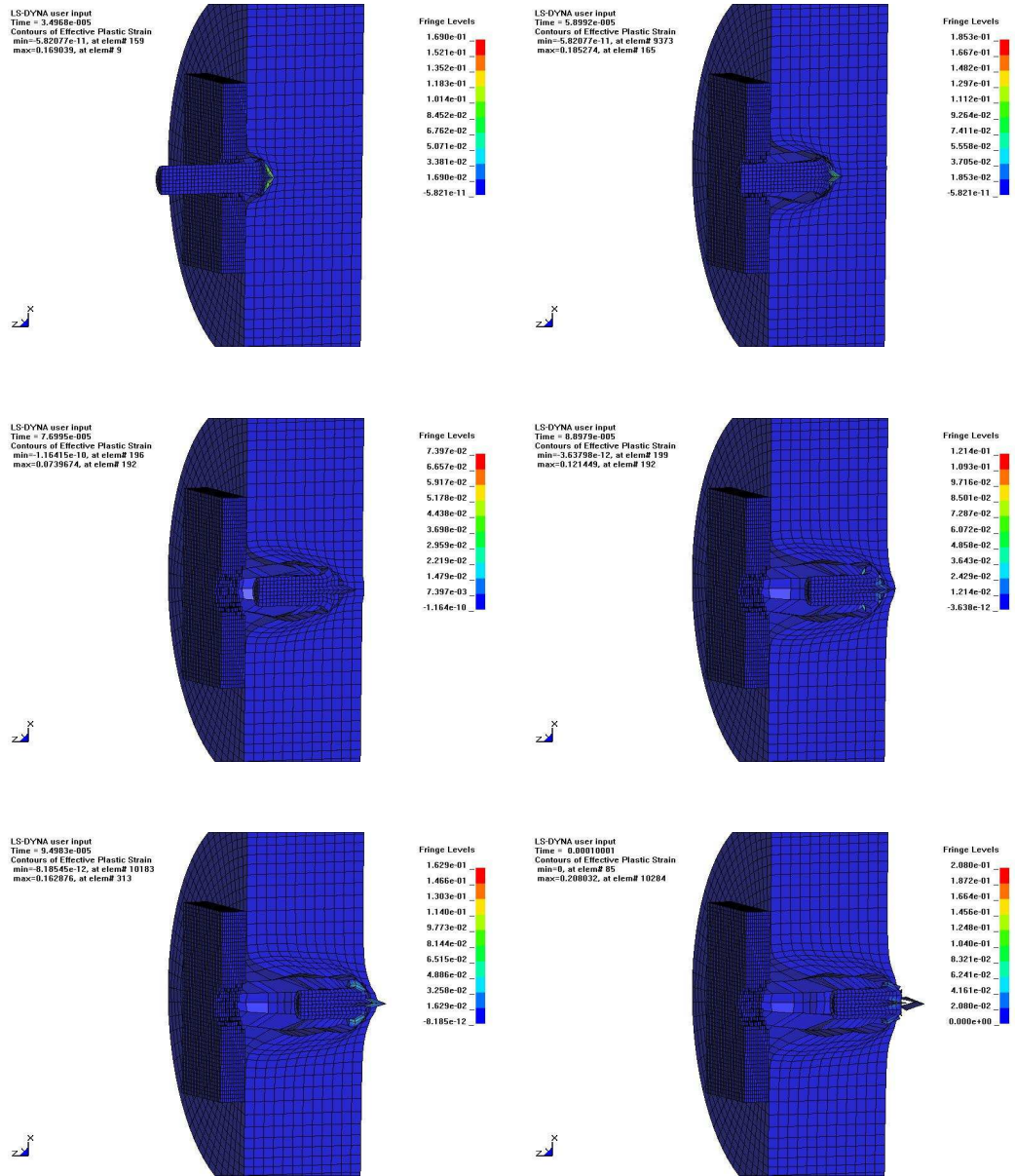
Delici Hızı: 595 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

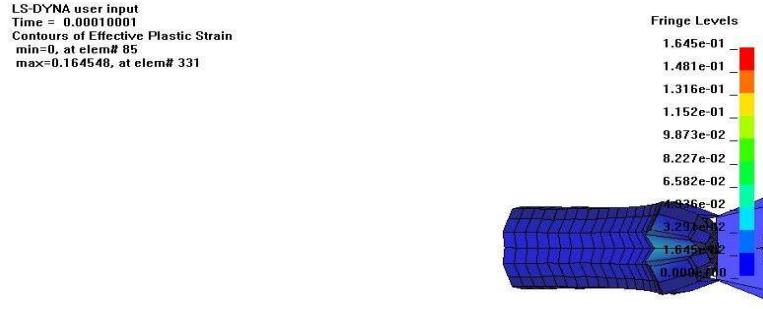
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

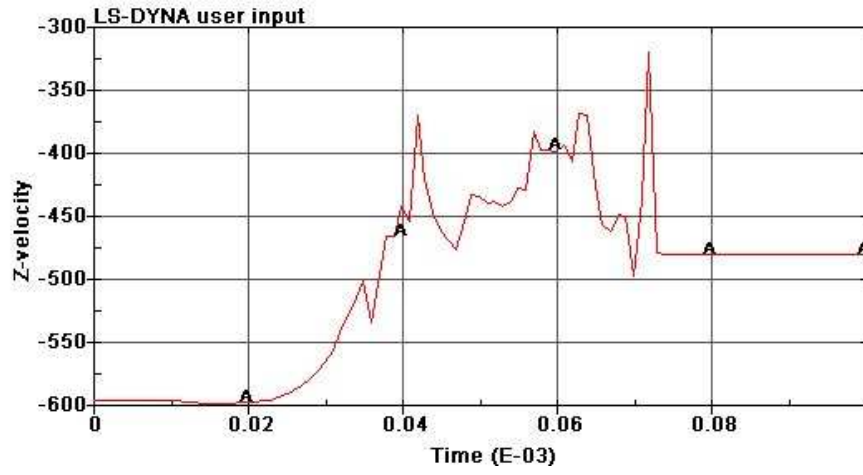




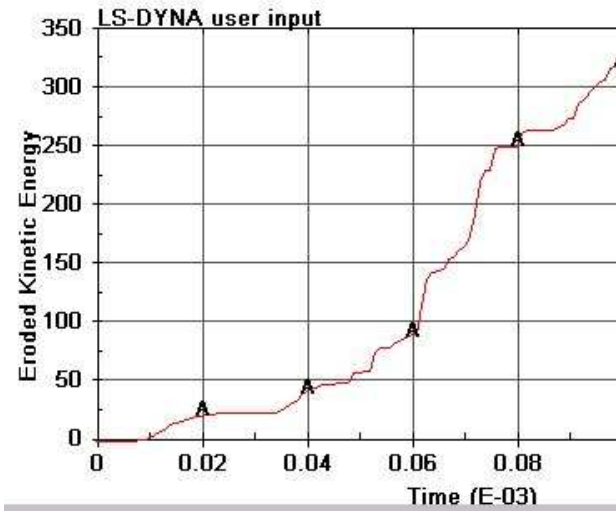
Şekil 3.21: Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.22: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

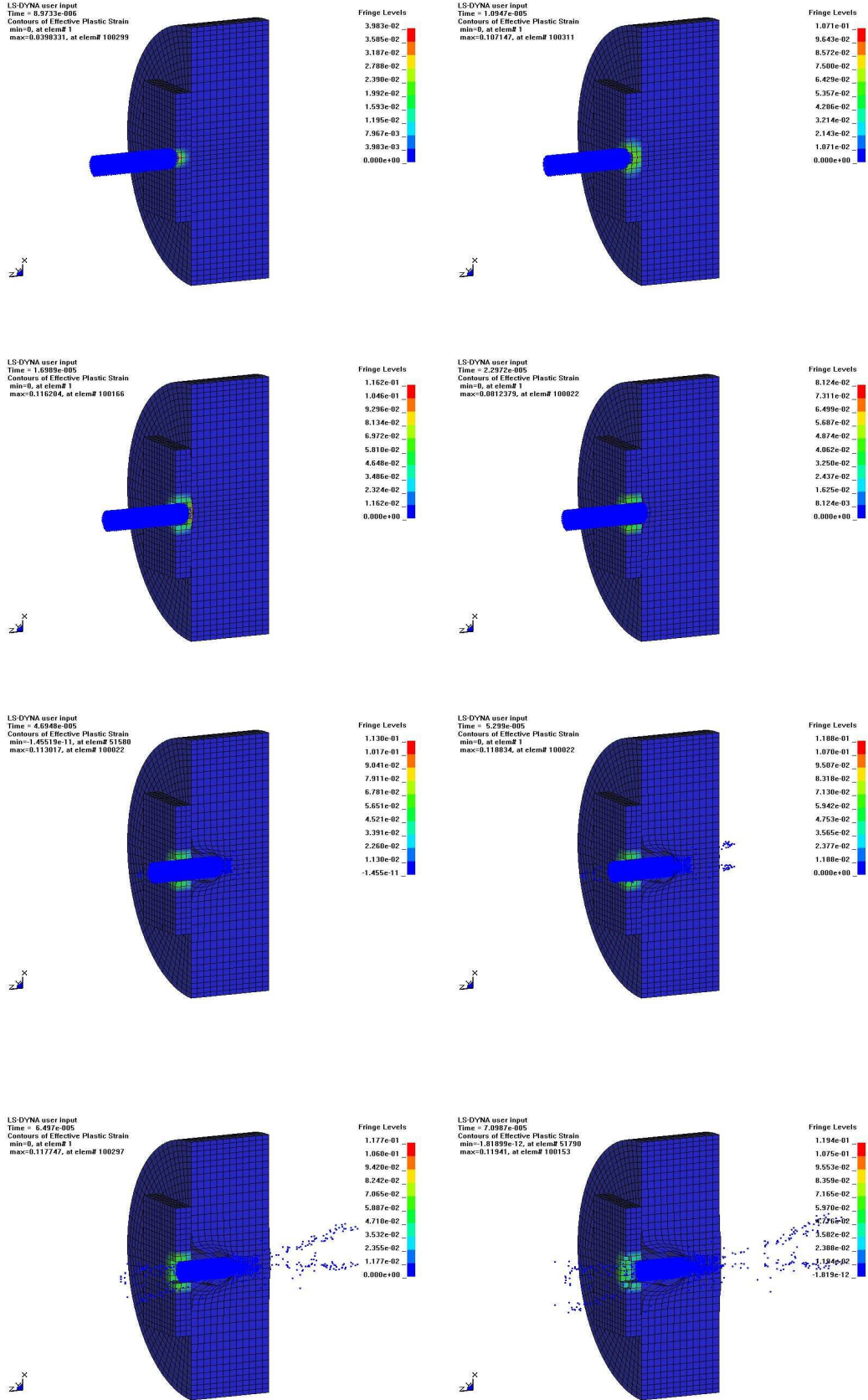


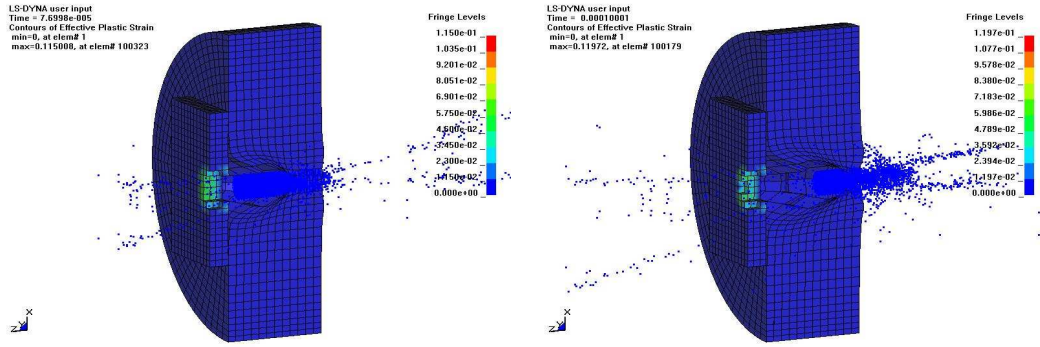
Şekil 3.23: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.24: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.25: Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları

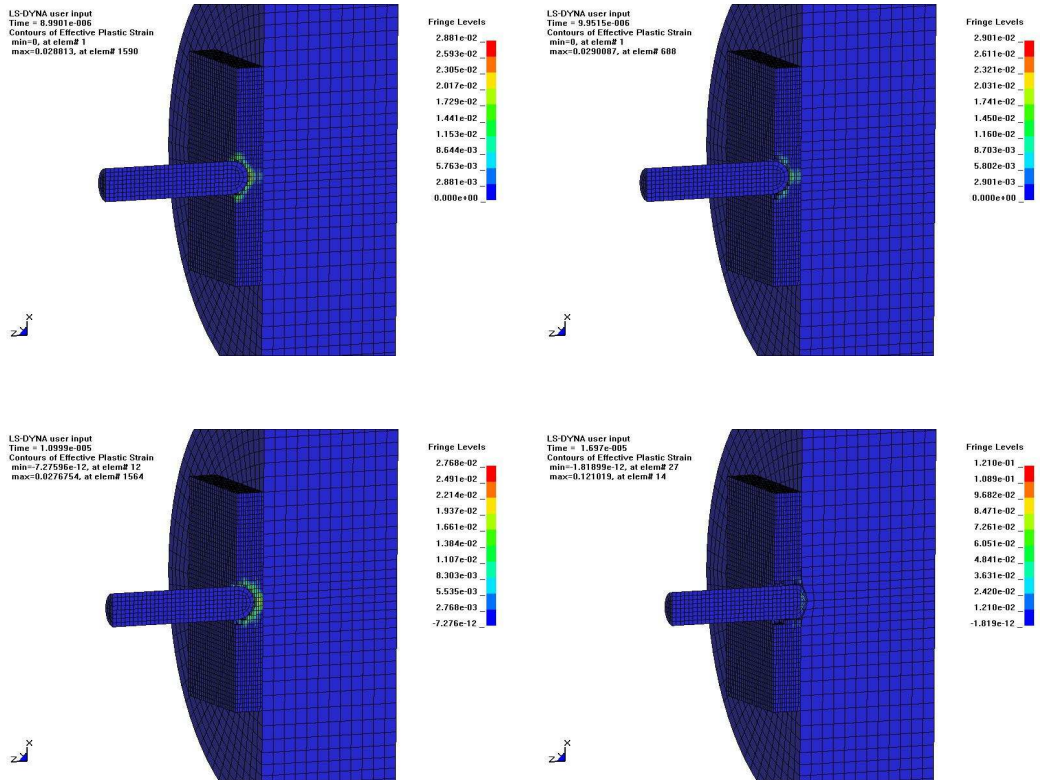
3.2.3 Senaryo 2c

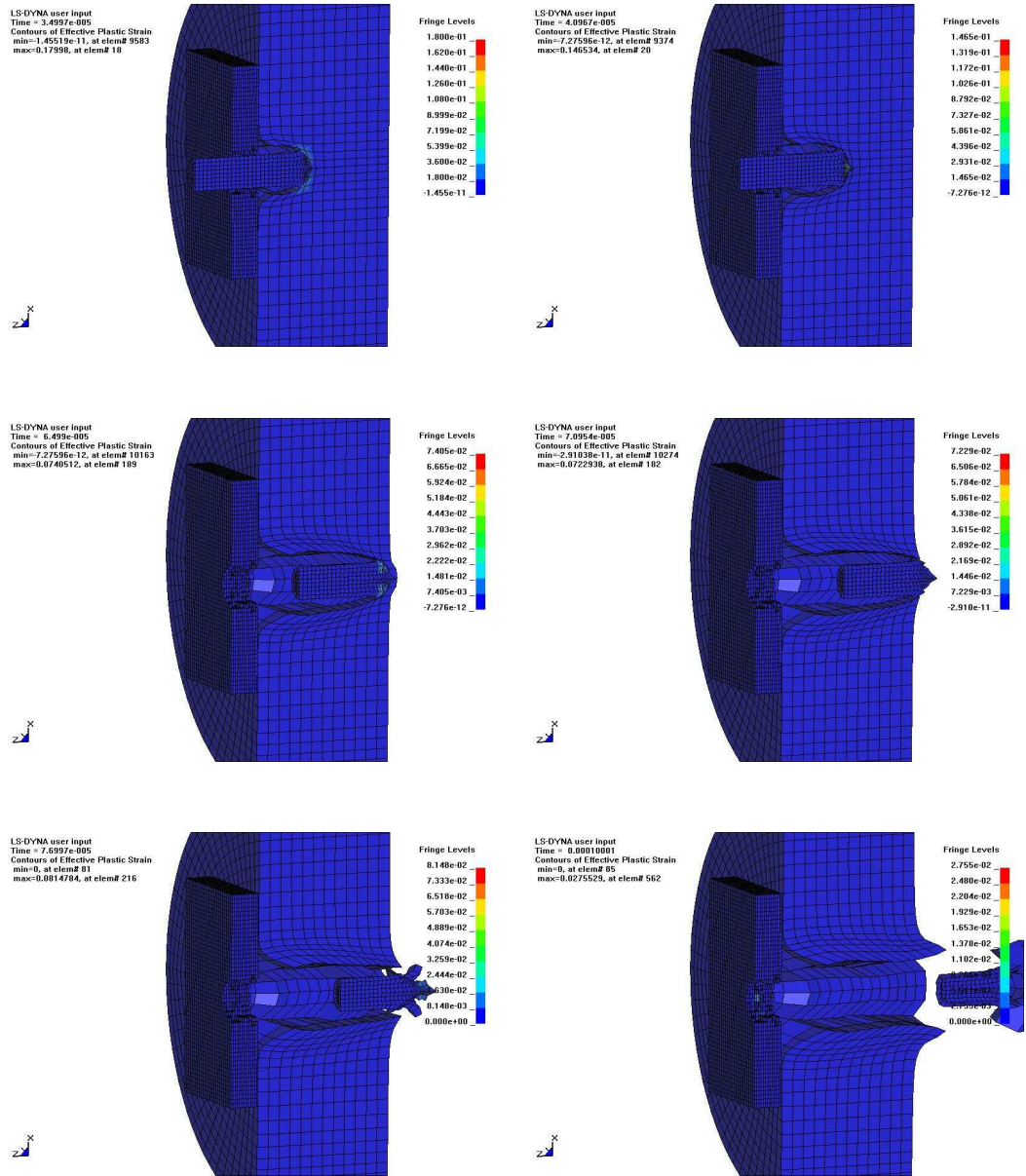
Delici Hızı: 797 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

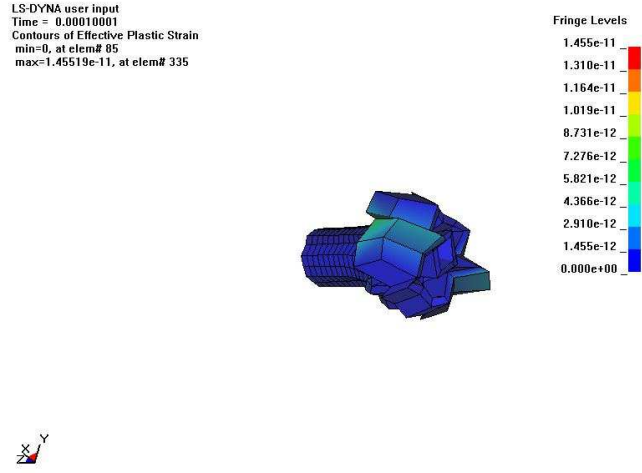
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

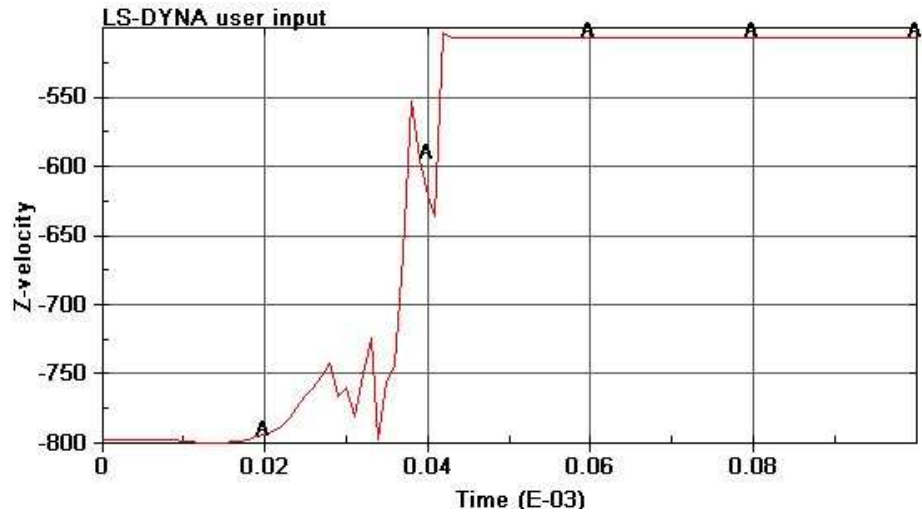




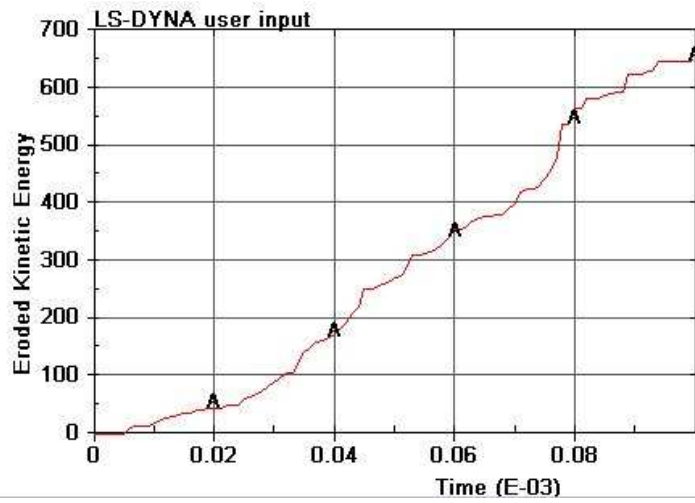
Şekil 3.26: Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.27: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi

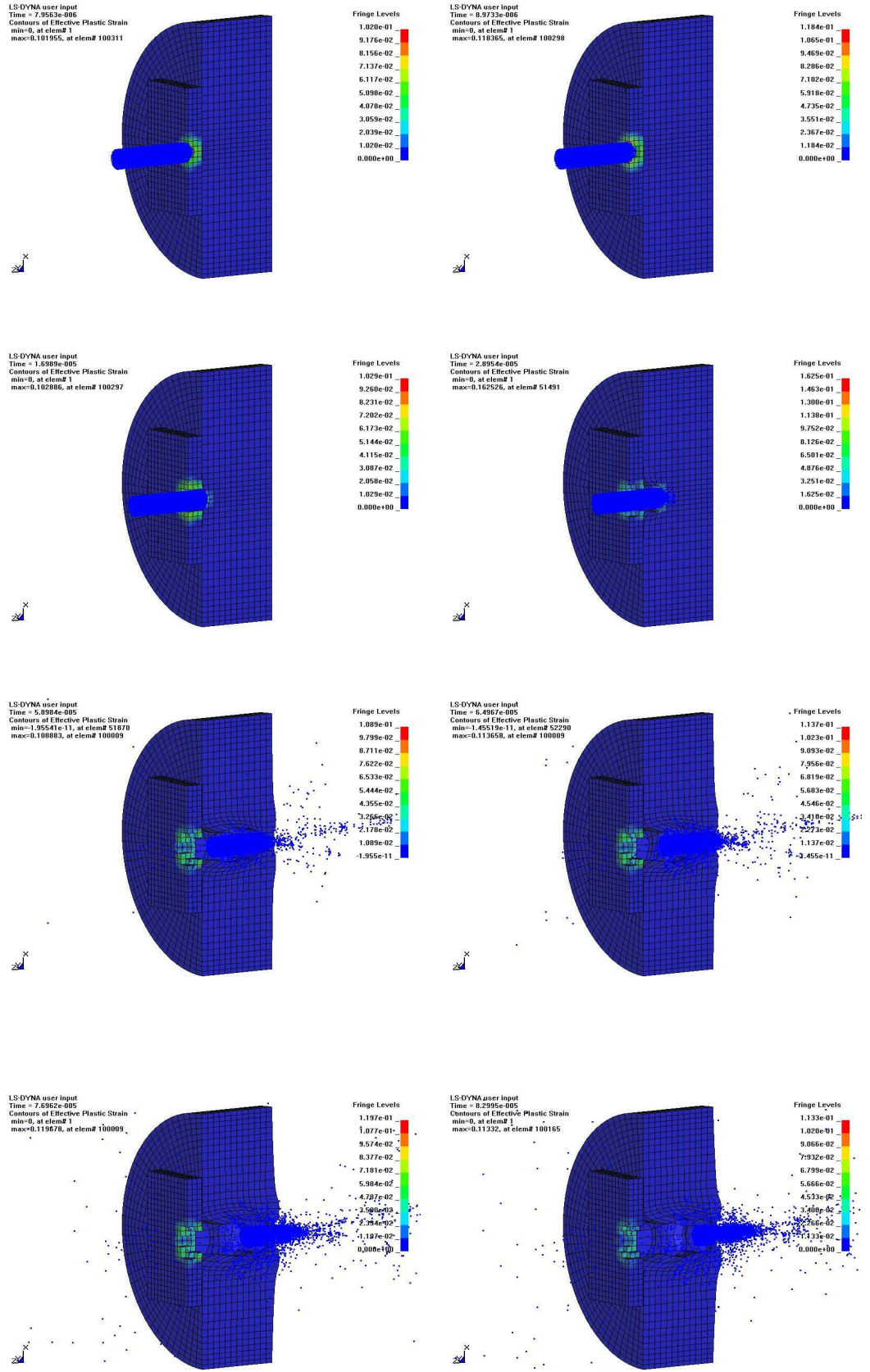


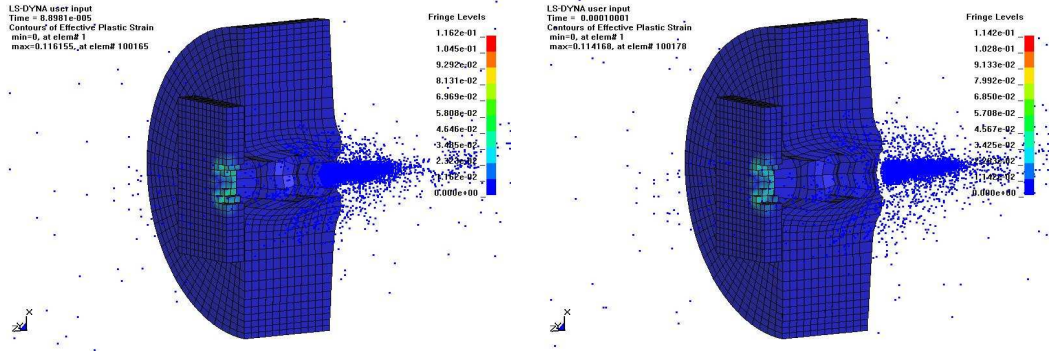
Şekil 3.28: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.29: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

SPH metodu ile gerçekleştirilen analizin sonuçları;





Şekil 3.30: Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için SPH analiz sonuçları

3.3 Senaryo 3

Bu analizde delici ve alüminyum destek için Tablo 2.2’ de verilen Johnson Cook - Mie Gruneisem malzeme modeli kullanılmıştır. Seramik (Al_2O_3) kalınlığı 8 mm olarak kullanılmıştır. Bu analizde sadece Explicit metod ile sonuçlar elde edilmiştir.

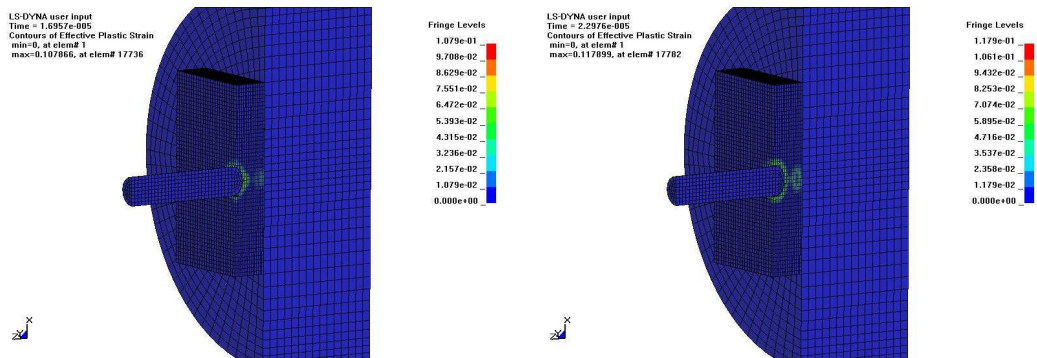
3.3.1 Senaryo 3a:

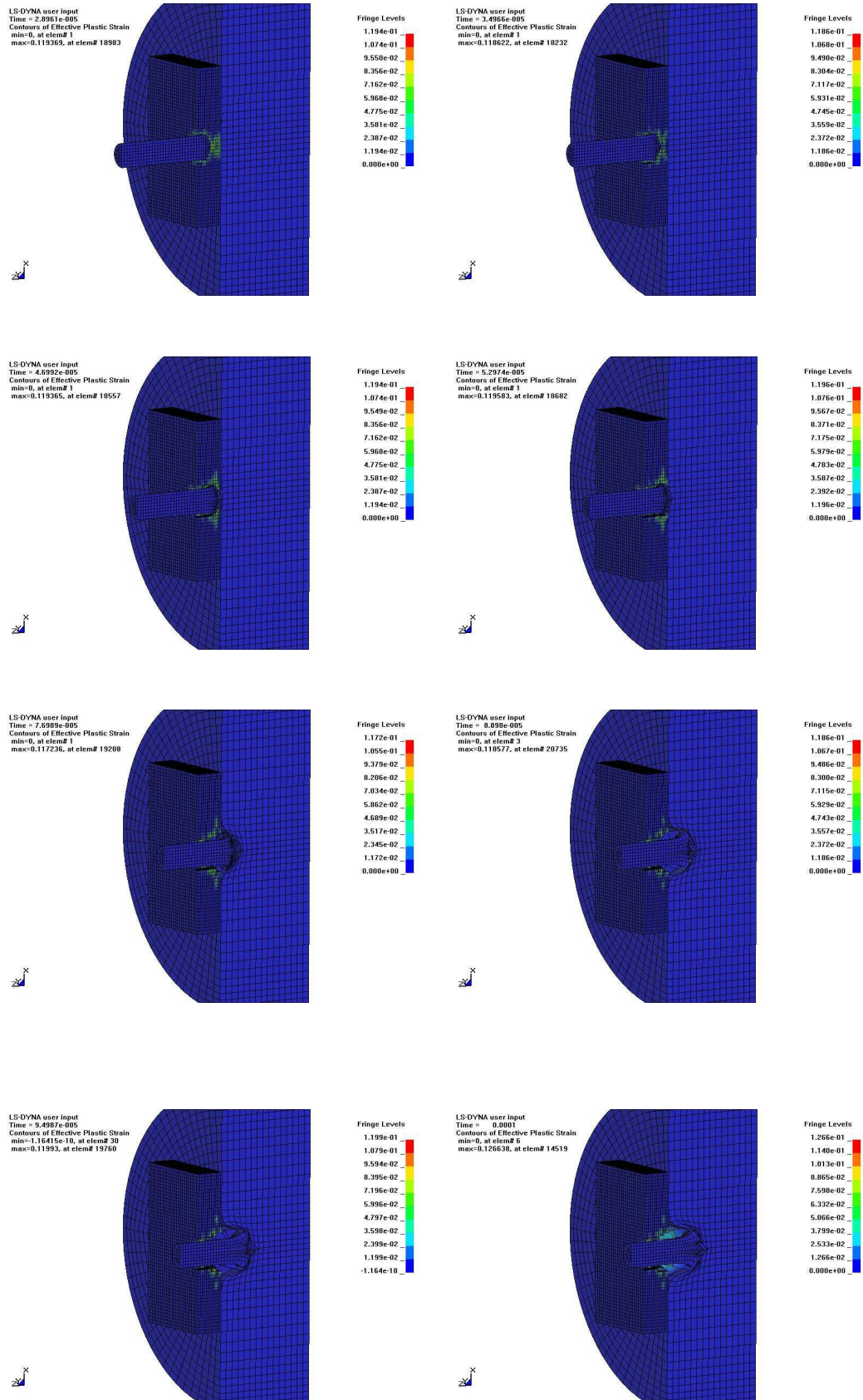
Delici Hızı: 300 m/sn

(Al_2O_3)Seramik için Failure Strain (FS): 0.12

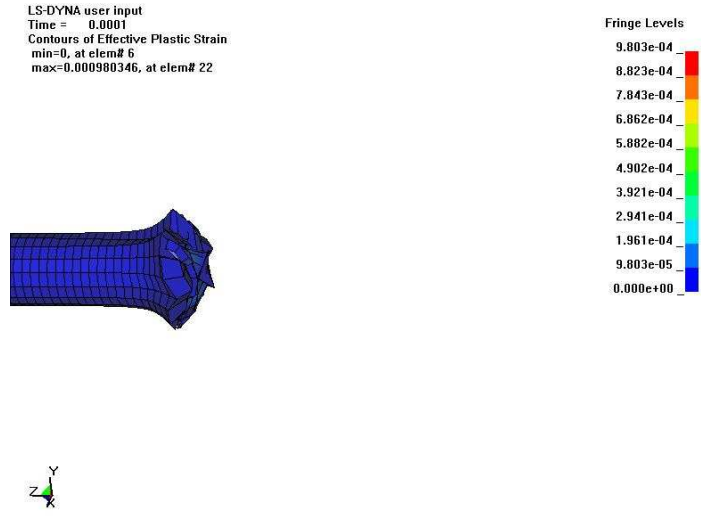
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

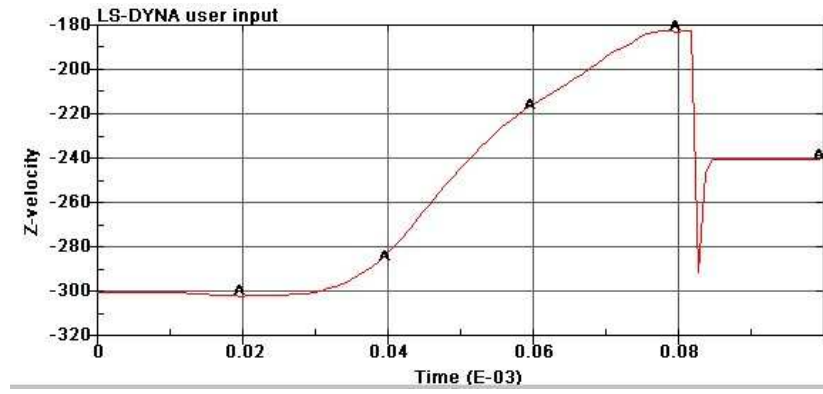




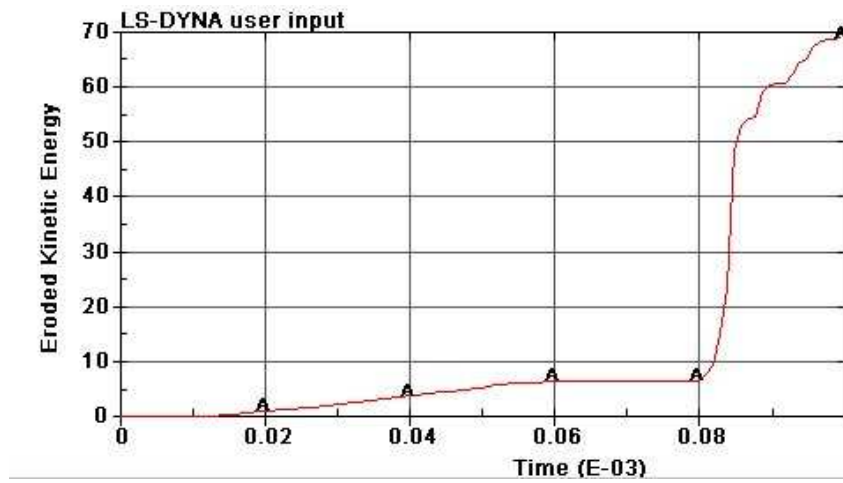
Şekil 3.31: Delici Hızı 300 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.12 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.32: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi



Şekil 3.33: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.34: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

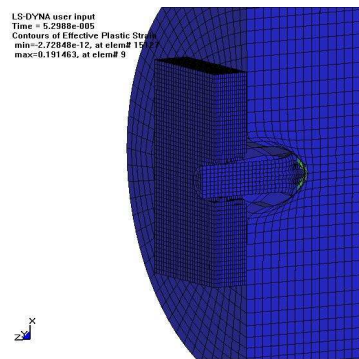
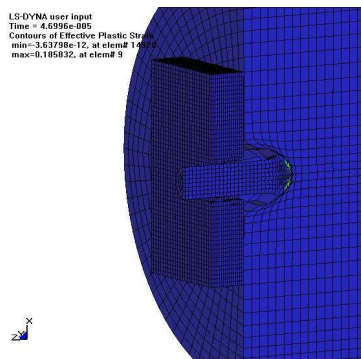
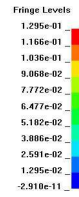
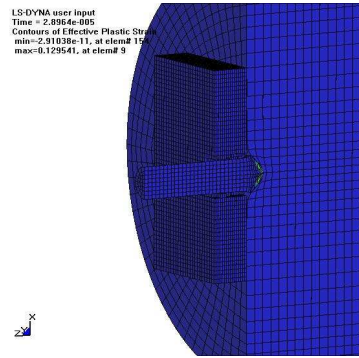
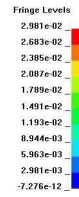
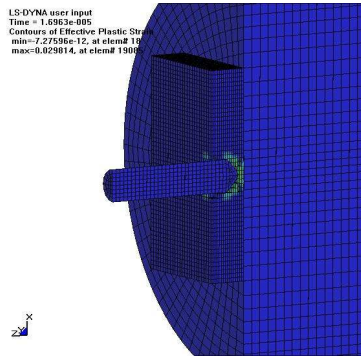
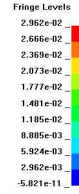
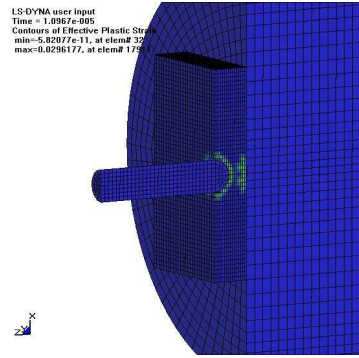
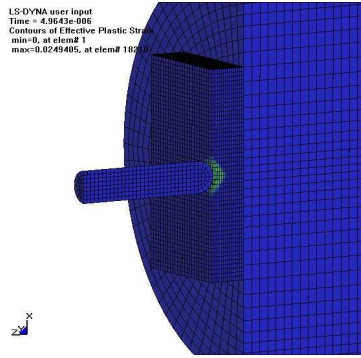
3.3.2 Senaryo 3b

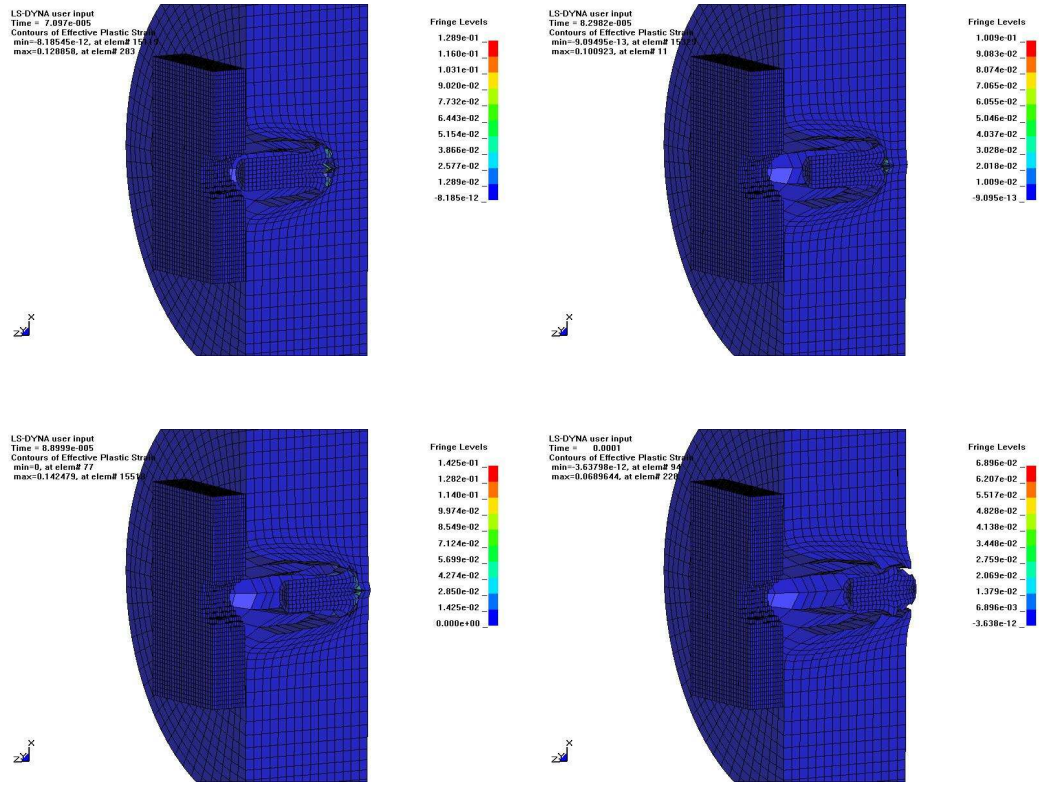
Delici Hızı: 595 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

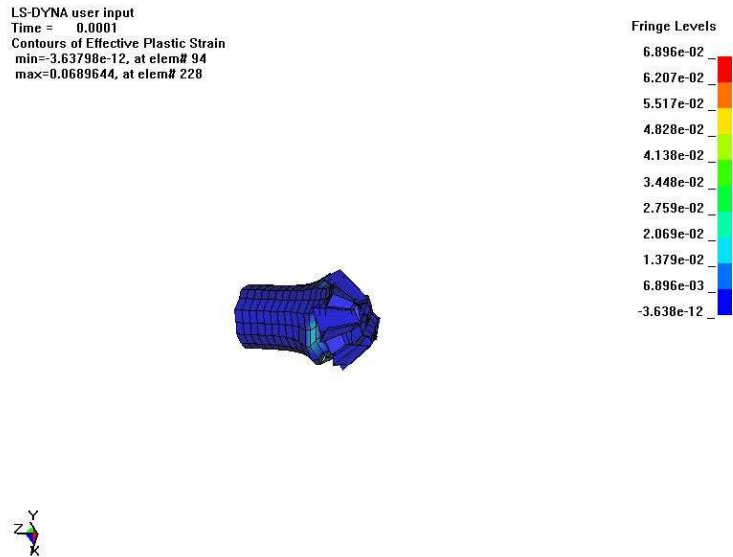
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

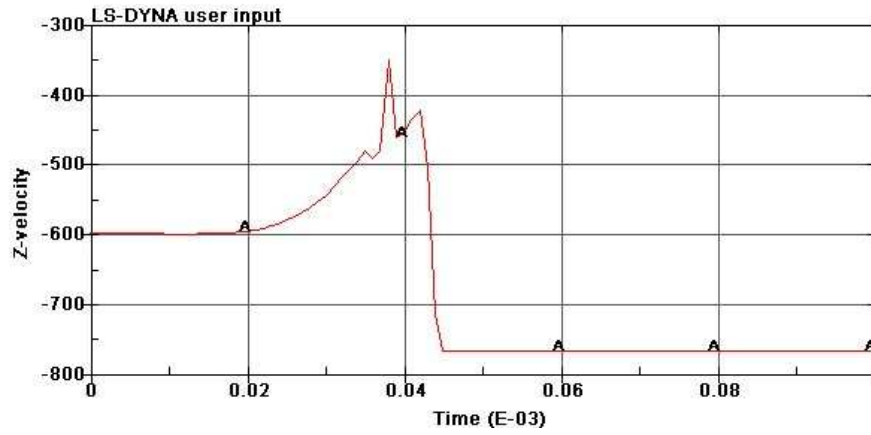




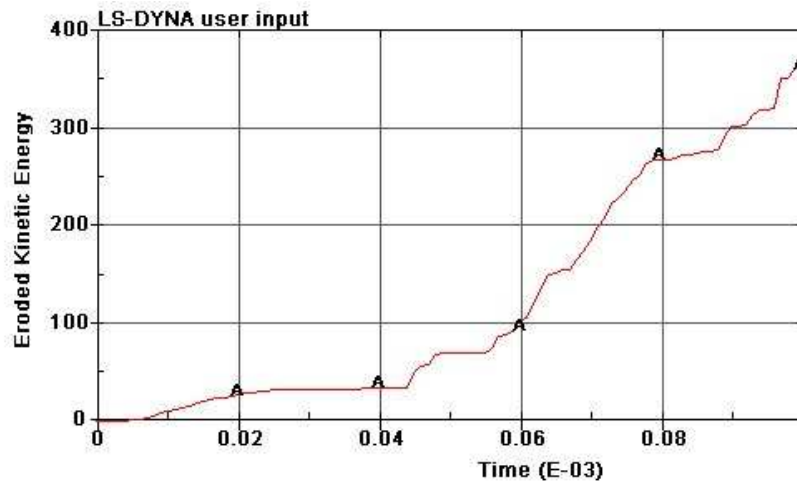
Şekil 3.35: Delici Hızı 595 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.36: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi



Şekil 3.37: Delicinin Hız-Zaman değişimi



Şekil 3.38: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

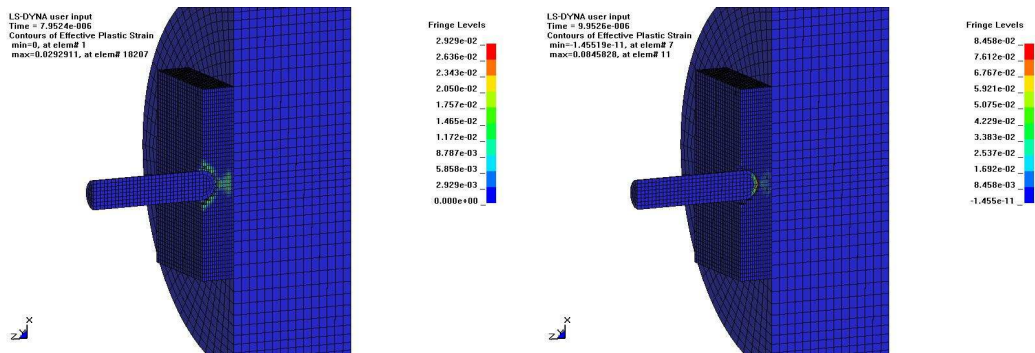
3.3.3 Senaryo 3c

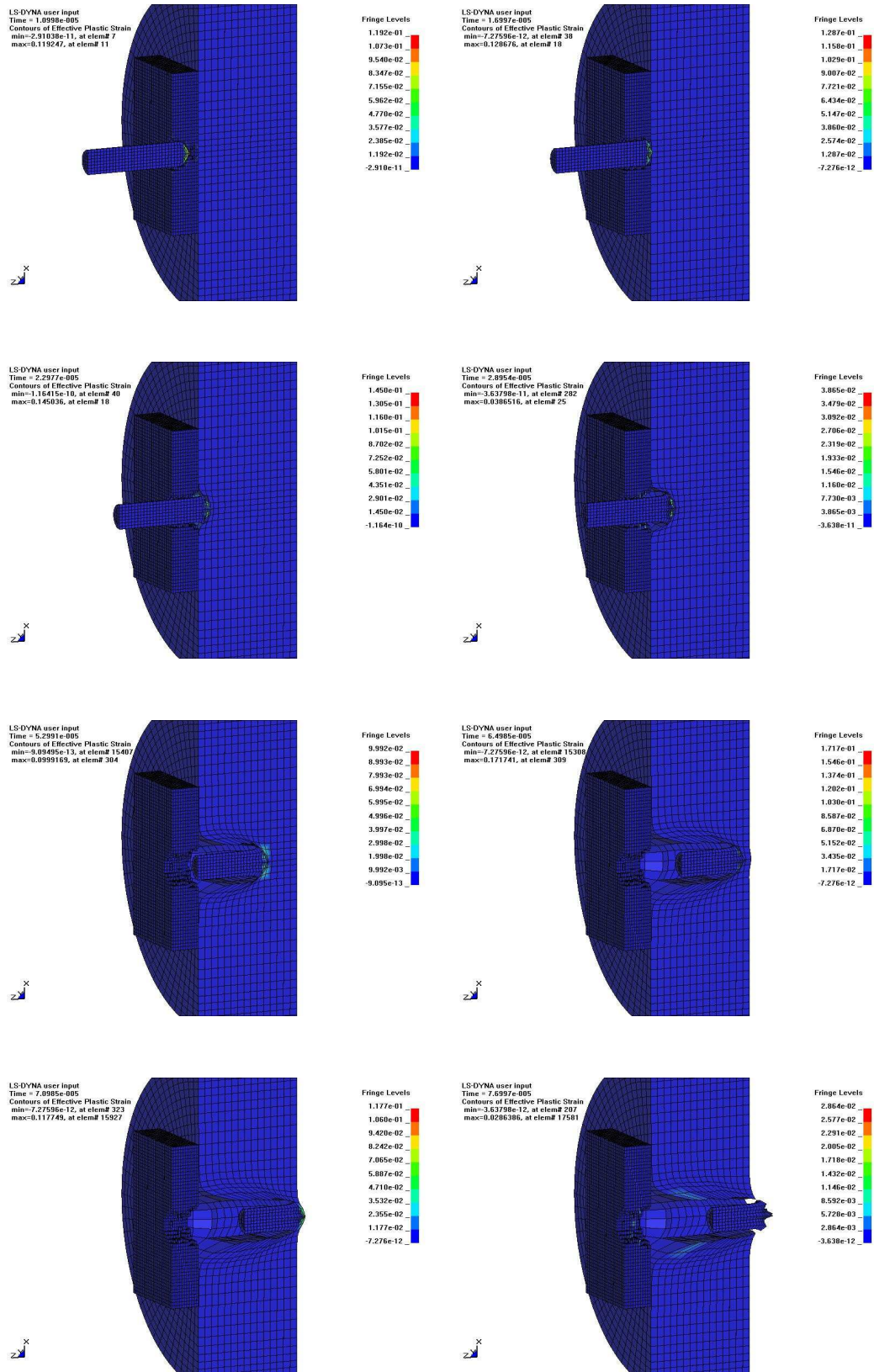
Delici Hızı: 797 m/sn

(Al₂O₃)Seramik için Failure Strain (FS): 0.030

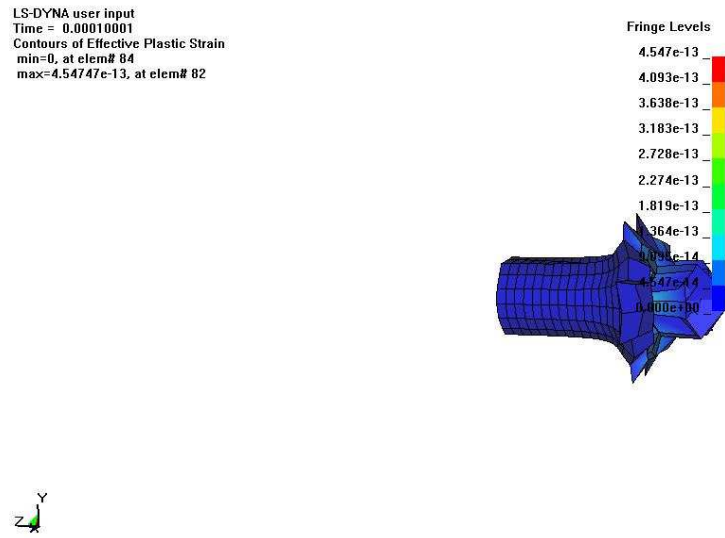
Analizi Sonlandırma Zamanı : 1e-04

Explicit metod ile gerçekleştirilen analiz;

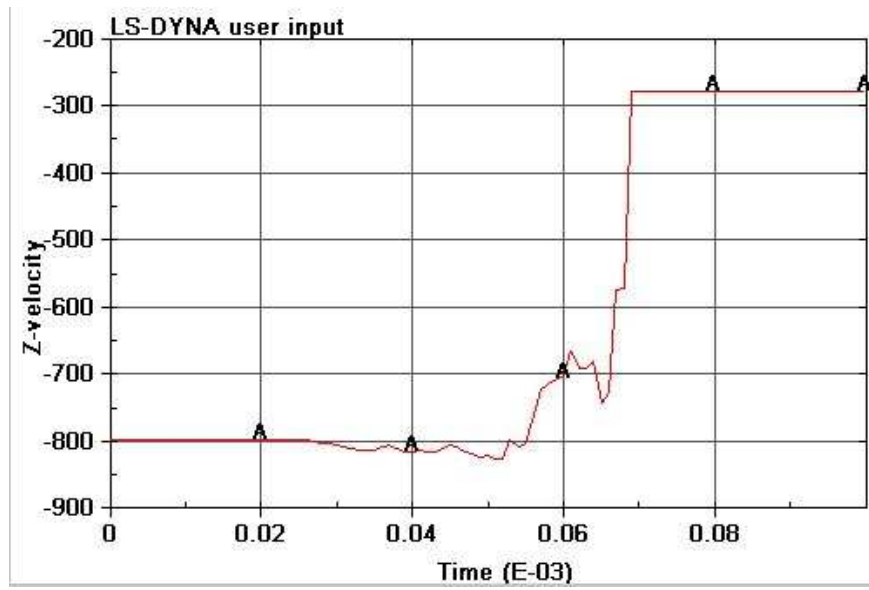




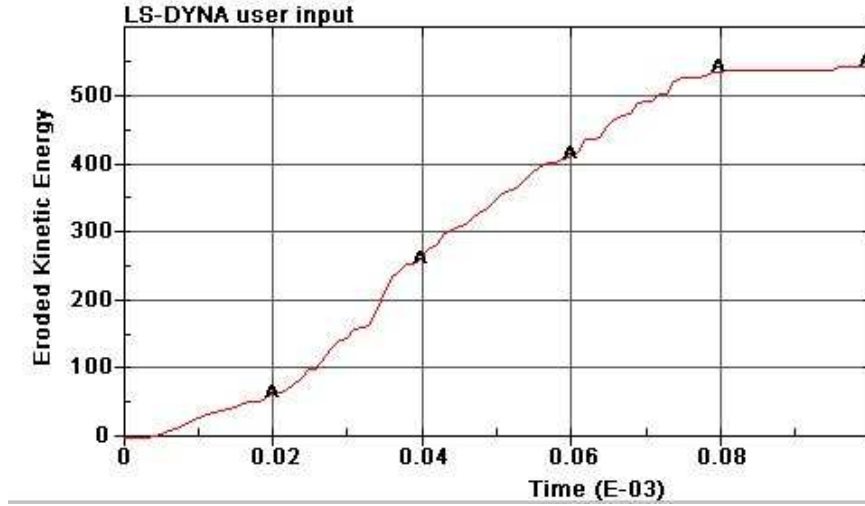
Şekil 3.39: Delici Hızı 797 m/sn ve (JH-2) modeli FS: 0.030 için Explicit analiz sonuçları



Şekil 3.40: 1E-04 Zamanında Delicideki şekil değişimi



Şekil 3.41: Delicinin Hız-Zaman değişimi

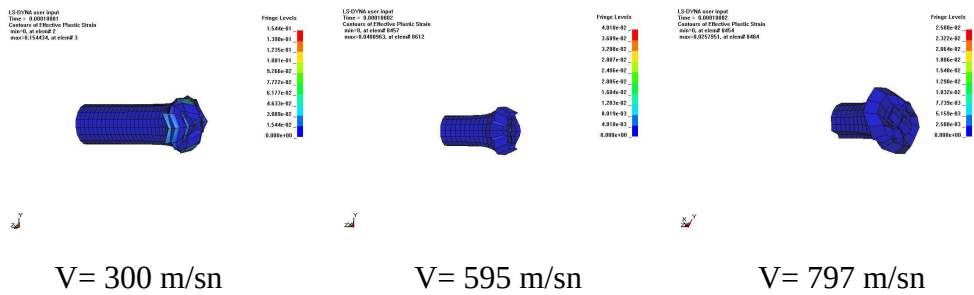


Şekil 3.42: Sistemde Erozyona uğrayan Kinetik Enerji Değişimi

3.4 Mermi Deformasyon Şekilleri

Gerçekleştirilen farklı kalınlıklardaki ve farklı hızlardaki analizlerin sonuçlarında gerçekleşen delici deformasyonlarını bu başlık altında göstereceğiz.

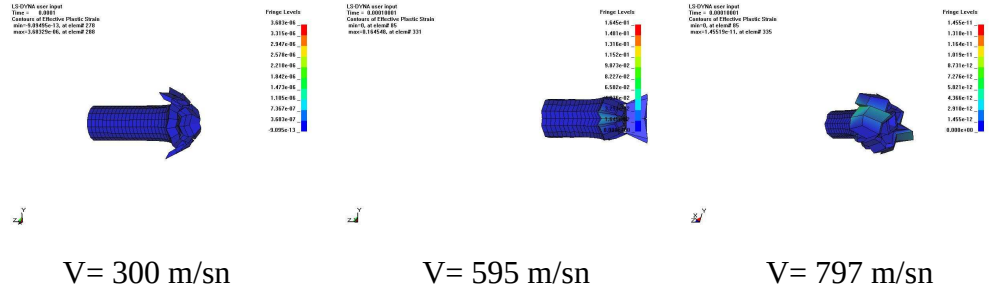
4 mm kalınlığındaki seramik için Explicit sonlu eleman metodu ile 300, 595, ve 797 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analiz sonucunda ($t = 0.001$ sn) delicide meydana gelen deformasyonlar:



Bu şekillerde görülmektedir ki, delici hızı ile delici üzerinde meydana gelen şekil değişimleri ve deformasyonlar artmaktadır. Delici hızı 300 m/sn de ve seramik katman kalınlığı 4 mm olduğu takdirde delicinin uç kısmında meydana gelen mantarlaşma belirli bir seviyeye kadar olmaktadır. Delici hızı 595 m/sn ve 797 m/sn'ye yükseltildiği durumda ise delicide meydana gelen akma şekil değişimleri

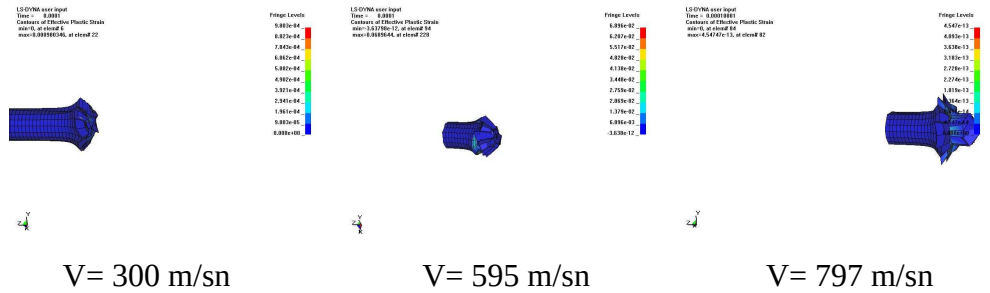
artmaktadır. Delicinin uç kısmı delicinin arka bölümüne doğru akarak plastik (kalıcı) şekil değişimi meydana gelmektedir. Analiz başlangıcında 32 mm olan delici uzunluğu 0.0001 sn sonunda yaklaşık %60 oranında azalmıştır.

6 mm kalınlığındaki seramik için Explicit sonlu eleman metodu ile 300, 595, ve 797 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analiz sonucunda ($t = 0.001$ sn) delicide meydana gelen deformasyonlar aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir:



Delici deformasyonları, seramik katman kalınlığı 6mm olduğunda 300 m/sn hızda delicide meydana gelen şekil değişimi daha fazla olmaktadır. Aynı zamanda delicinin ucunda meydana gelen mantarlaşma daha fazla olmuştur. 595 m/sn ve 797 m/sn hızlarda ise bu bağlamda delicideki kütleşme ve kısalma yüksek oranda gerçekleşmiştir.

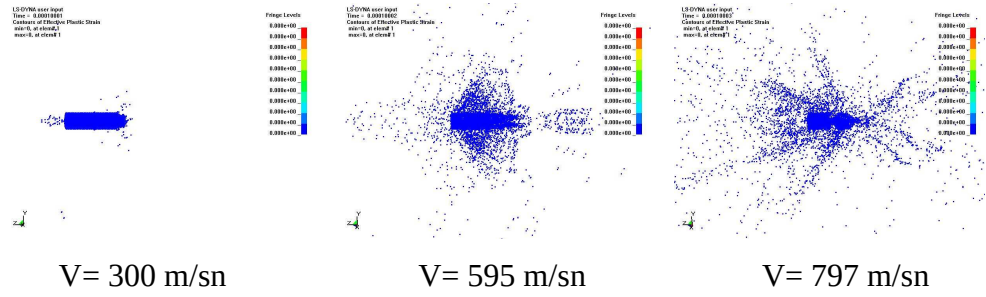
8 mm kalınlığındaki seramik için Explicit sonlu eleman metodu ile 300, 595, ve 797 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analiz sonucunda ($t = 0.001$ sn) delicide meydana gelen deformasyonlar:



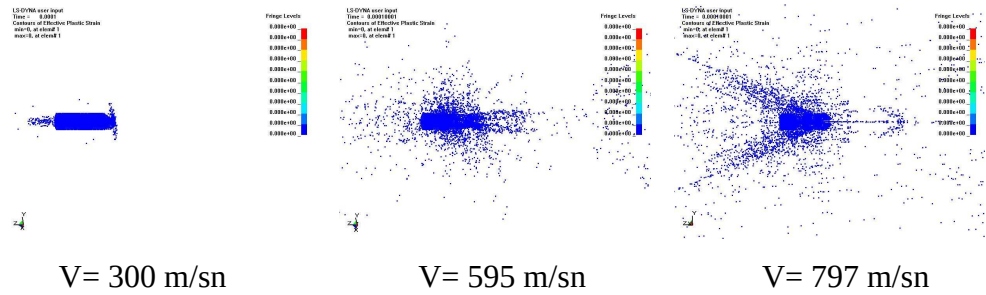
Seramik katman kalınlığı 8 mm olduğunda, analiz sonucu delici şekil değişimleri seramik katman kalınlığı 6 mm olduğundaki sonuçlara yakın sonuçlar

elde edilmiştir. Bununla birlikte delici uzunluğundaki kısalma miktarı daha fazla olmuştur.

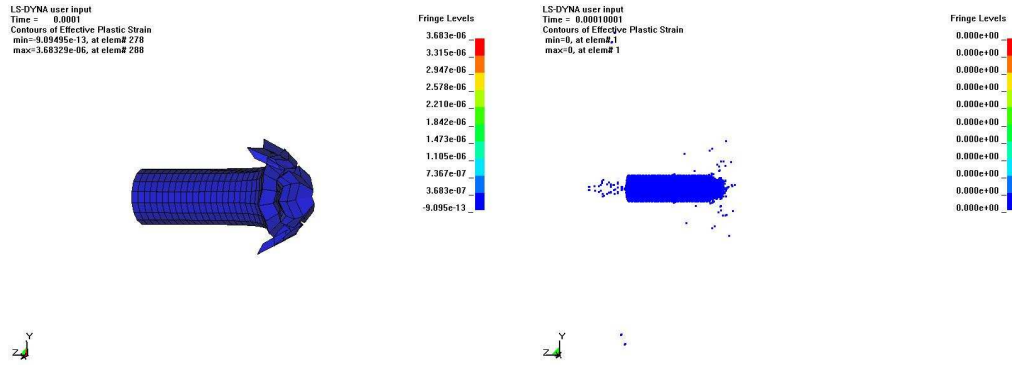
4 mm kalınlığındaki seramik için SPH metodu ile 300, 595, ve 797 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analiz sonucunda ($t = 0.001$ sn) delicide meydana gelen deformasyonlar:



6 mm kalınlığındaki seramik için SPH metodu ile 300, 595, ve 797 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analiz sonucunda ($t = 0.001$ sn) delicide meydana gelen deformasyonlar:

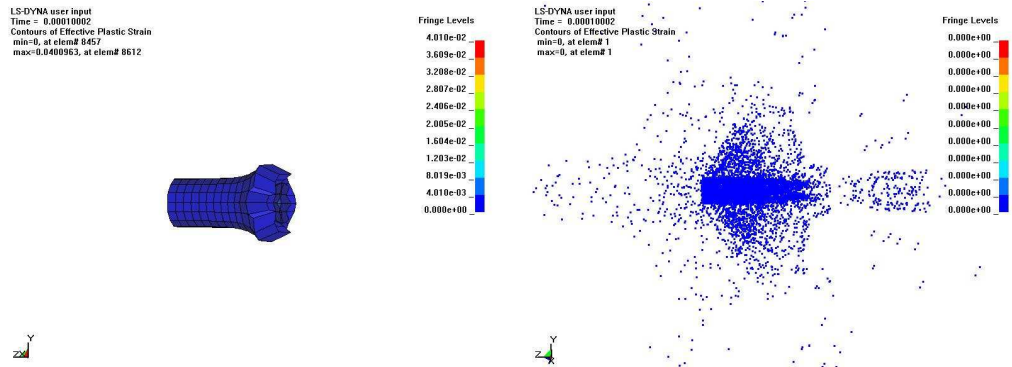


4 ve 6 mm kalınlığındaki seramikler için 300 m/sn 595 m/sn ve 797 m/sn hızlar için Explicit sonlu eleman ve SPH analiz sonuçlarında delicide meydana gelen deformasyonların bir arada gösterimini gerçekleştirerek karşılaştırma yapabiliriz.



$V = 300 \text{ m/sn}$ seramik kalınlığı 4 mm

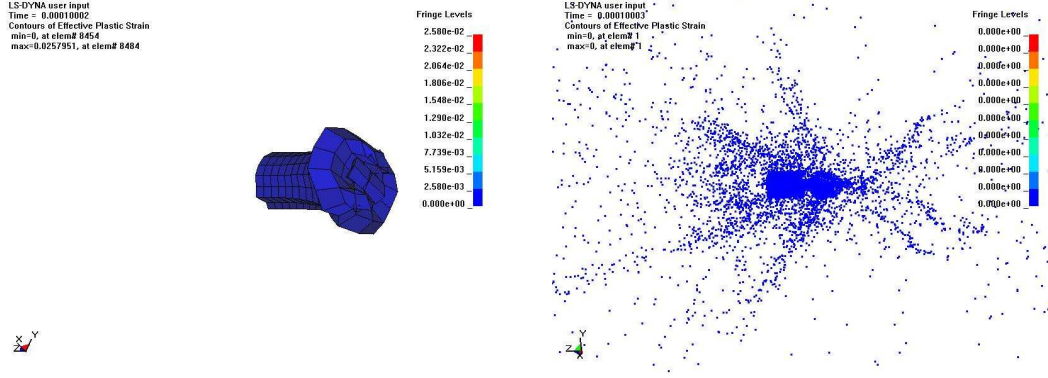
Delici hızı 300 m/sn olduğunda delicideki uç deformasyonu klasik sonlu eleman metoduyla gerçekleştirilen analiz ile SPH analiz sonucu karşılaştırıldığında, SPH metodu ile gerçekleştirilen analiz sonucundaki delicinin uç deformasyonu küçük bir oranla yakalanabilmiştir. SPH metodu ile oluşturulan delici SPH elemanı olduğundan sadece nodlardan meydana gelmektedir, bu nedenle delicideki akma belirli bir seviyede yakalanabilmiştir.



$V = 595 \text{ m/sn}$ seramik kalınlığı 4 mm

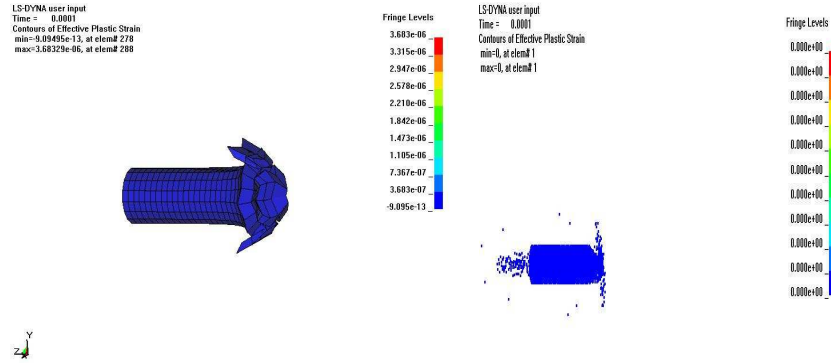
Delici hızı 595 m/sn olduğu takdirde ise Klasik Sonlu Elemanlar sonucu delicideki meydana gelen deformasyon ve plastik şekil değişimi, SPH metodu ile yakın bir şekilde yakalanabilmiştir. Klasik sonlu elemanlar metoduyla yapılan analizde delicide meydana gelen gerinim ve gerilmeler elemanların dayanımı üzerinde bir değere ulaştığında elemanlar koparak yapıdan atılır. SPH metodunda ise kopan elemanlar, uzaklaşan nodlar ile ifade edildiğinden dolayı analiz sonucu delicinin parçalanmış gibi görünmesine neden olur. Bununla birlikte 595 m/sn hızda gerçekleştirilen SPH analiz, delicideki deformasyon ve kısalma 300 m/sn de

gerçekleştirilen SPH analiz sonuçlarına göre klasik sonlu elemanlar ile elde edilen analiz sonuçlarına daha yakın gerçekleşmiştir.

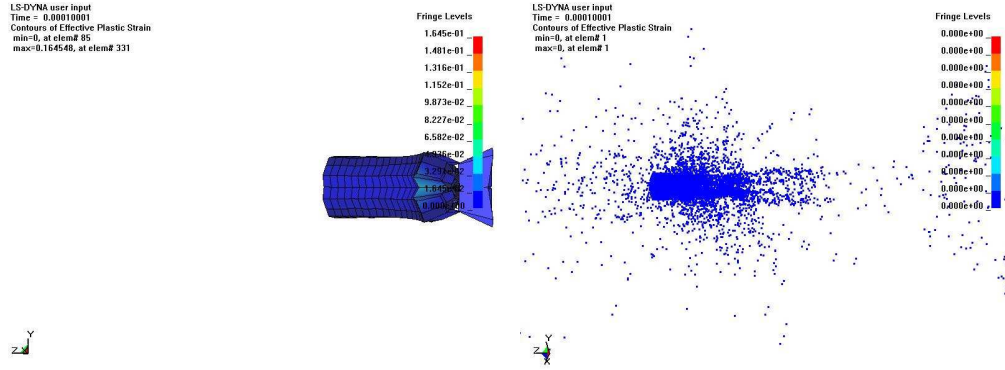


V= 797 m/sn seramik kalınlığı 4 mm

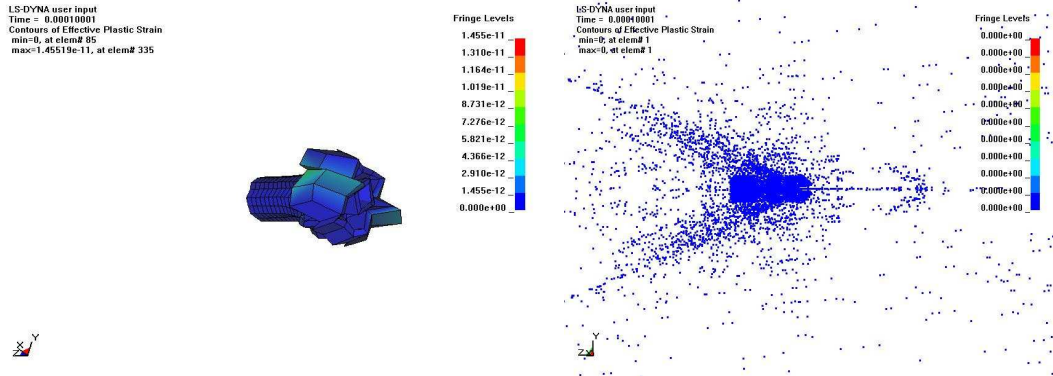
Delici hızı 797 m/sn olduğunda ise delicinin kısılma şekil değişimi yakın olarak elde edilebilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere delicinin uç kısmındaki deformasyon tıpkı 595 m/sn hızda elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi az miktarda yakalanabilmiştir. Bunun nedeni ise SPH elemandaki meydana gelen saçılmalardan kaynaklıdır.



V= 300 m/sn seramik kalınlığı 6 mm



$V = 595 \text{ m/sn}$ seramik kalınlığı 6 mm



$V = 797 \text{ m/sn}$ seramik kalınlığı 6 mm

Seramik kalınlığı 6 mm olarak modelleğinde 300 m/sn, 595 m/sn hızlarda gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar Sonlu Elemanlar Metodu ve SPH metodu ile yakınlık göstermiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi delici uç deformasyonları 300 m/sn ve 595 m/sn de çok yakın olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte 797 m/sn de yine SPH eleman olan delicide ki saçılmalara hızla orantılı bir şekilde arttığı için delici ucundaki akımlar ve mantarlaşmadan ziyade delicinin analiz sonucu uzunluğu yakın olarak elde edilebilmiştir.

4. SONUÇLAR VE YORUMLAR

1. Gerçekleştirilen Explicit sonlu eleman ve SPH analizlerinde gelişmiş malzeme modelleri Johnson –Cook ve Johnson Holmquist Ceramics başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Özellikle hız ve sıcaklık değişkenlerini dikkate alan ve malzemenin gerçek davranışına yakın bir sonuç elde etmemize olanak tanıyan Johnson – Cook malzeme modeli ile modellenen delicideki akma ve uzama sonuçları başarılı bir şekilde simule edilmiştir. Yine son yıllarda geliştirilmiş olan Johnson Holmquist Ceramics malzeme modeli seramik malzemedeki davranışlar büyük oranda simule edilmiştir.
2. Sonlu elemanlar Explicit metod ve SPH analizlerde 300 ile 797 m/sn hızlar için penetrasyon tahmini de başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
3. SPH metodu sonlu elemanlarla birlikte hibrid bir şekilde başarılı olarak kullanılmıştır. SPH metodunun uygulamasında seramik katmanının meshi oluştururken klasik sonlu elemanlar metoduna oranla daha seyrek yapıda mesh oluşturuldu. Penetrasyonu önlemek için bu bir çözüm olarak uygulandı.
4. Sonlu elemanlar Explicit ile SPH metodu delici deforme şekilleri açısından karşılaştırılmıştır.
5. Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizleri SPH metodla yapılan analizlerle çözüm zamanı (hesap maliyeti) karşılaştırıldığında. Klasik sonlu elemanlar analizleri SPH metoda oranla daha kısa zaman almıştır. Özellikle sayısal değerler ifade etmek gerekirse klasik sonlu elemanlar analizleri 4 mm seramik katman kalınlığı için 6 ila 8 dak arasında tamamlanmıştır. SPH metod ile yapılan analizler ise 8 ila 12 dak arasında bir zamanda sonlanmıştır. Aynı şekilde 6 mm seramik katman kalınlığı ile

gerçekleştirilen analizlerde klasik sonlu eleman metodu ile yapılan analizler 7 ila 11 dak arasında tamamlanmıştır. Bununla birlikte SPH metod ile gerçekleştirilen analizler 13 ila 19 dak arasında bir sürede tamamlanmıştır. Ancak dikkat edilmesi gereken bir nokta çözüm süresini etkileyen birçok faktör söz konusudur. Başlıcaları; zaman adımı kriteri ve geometrilerin mesh yoğunluğudur.

6. Gelecekte yapılacak çalışmalar için (diğer kişilere) sunabileceğimiz öneriler:
Optimizasyon yöntemi analizle birleştirilerek;
 - a) Penetrasyonu önleyecek en uygun seramik kalınlığı tahmin edilebilir.
 - b) Sabit kalınlıktaki bir seramik malzeme için seramiğin balistik limiti tespit edilebilir.
7. Bu tez çalışmasından elde edilen simülasyon bilgi birikimi; çelik yelek, koruyucu zırh vb gibi diğer yüksek hızlı çarpma / darbe analizlerinde ve tasarımlarında kullanılabilir. Yine Al_2O_3 seramik malzemelerin dışındaki diğer seramik malzemeler için verilen Johnson Holmquist Ceramics malzeme modeli sabitleri kullanılarak farklı tasarımlarda çarpma / darbe analizleri gerçekleştirilebilir.
8. Kevlar gibi (metal yada seramik olmayan) kumaş (fabric) özellikli malzemelerin balistik davranışları incelenebilir ve seramik/metal koruyucu zırhlar ile seramik/Kevlar koruyucu zırhlar karşılaştırılabilir.

4.1 Gerçekleştirilen Analizlerde Karşılaştığımız Sorunlar Ve Çözüm Önerileri

1. Genel bir kabul olarak mesh (ağ) yoğunluğunun fazla olmasının gerçekleştirilen analizin sonuçlarının doğruluğu için olumlu etki yapacağı ön görülür. Bununla birlikte özellikle yüksek hızlı çarpma / darbe analizleri gerçekleştirilirken ve gelişmiş malzeme modelleri kullanıldığında (örn; Johnson Cook) yoğun mesh (ağ) elemanların negatif hacme uğramasını hızlandırmaktadır. Ve bunun sonucunda da analiz sonuçlanamadan yarıda kesilerek sonlanmaktadır.
2. SPH metod ile gerçekleştirilen analizlerde kullanılan modelde hedef yoğun olarak mesh'lendiği takdirde penetrasyon (iç içe geçme) problemleri ortaya çıkmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için ANSYS – LSDYNA v970' de *CONTROL_CONTACT kartında yer alan bazı parametreler aktif olarak tanımlandığı halde penetrasyon önlenememiştir. Penetrasyonu ortadan kaldırmak için hedef malzemenin daha az yoğun olarak mesh'lenmesi ile bu problem aşılmış ve analizler gerçekleştirilebilmiştir.
3. Johnson Holmquist Ceramics malzeme modelinde malzemenin uzama / kopma sınırı (Failure Strain – FS) kullanıcı tarafından belirlenen bir değerdir ve modelin kendi içinde deformasyon hesabında dikkate alınmadan sadece elemanın ne zaman kopacağı (yok olacağı) ile ilgili bir sınır şartıdır. Al₂O₃ seramik malzemeler oldukça kırılgan oldukları için FS değerleri 0,12 dolaylarındadır. Bununla birlikte çarpma / darbe analizlerinde delici Johnson Cook malzeme modeli ile modellendiği takdirde ve hedef olarak da FS ' si 0,12 nin üzerinde bir malzeme Johnson Holmquist Ceramics malzeme modeli ile modellendiyse ve 300 m/sn' nin üzerindeki hızlarda delici elemanlarında negatif hacimler oluşmakta ve analiz sonlanmaktadır. Örneğin; Silika

Bazlı Cam için $FS = 3.0$ [4] dolaylarındadır. Bu handikabı ortadan kaldırmanın bir yolu delici için daha basit özellikli olan *MAT_PLASTIC_KINEMATIC malzeme modeli kullanılmasıdır. Bu malzeme modeli sıcaklık değişimi ve yüksek hız değişkenlerini tam olarak kullanmadığı için negatif hacim problemleriyle karşılaşmadan analiz sonuçlandırılabilir. Bu ise delicide meydana gelmesi öngörülen deformasyonları çok basit olarak simule edilmesi sonucunu doğurabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Murat Vural. Ballistic performance and impact behavior of alumina Ceramics. İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Phd. Thesis, November 1997
- [2] Yard. Doç. Dr. Hasan Kurtaran. Explicit dinamik analize giriş, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği, Gebze 2003
- [3] Timothy J. Holmquist, Douglas W. Templeton, Krishan D. Bishnoi. Constitutive modeling of aluminium nitride for large strain, high – strain rate, and high – pressure applications. International Journal of Impact Engineering, May 2000, Vol. 25 (2001) page 211 – 231
- [4] Duane S. Cronin, Khahn Bul, Christian Kaufmann, Grant McIntosh, Todd Berstad. Implementation and Validation of the Johnson – Holmquist Ceramic Material Model in LS – Dyna. 4th European LS – DYNA Users Conferences N2L 3G1 Canada
- [5] Kaufmann C., Cronin D.S, Worswick M.J., Bourget D. Numerical modeling of the ballistic response of ceramic tiles supported by semi – infinite metallic backings. Personal Armour Systems Symposium – Pass, The Hague, The Netherlands, November 2002
- [6] Meyers, M.A., Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons Inc. 1994
- [7] Johnson G.R, T.J. Holmquist, An improved computational constitutive model for brittle materials. High – Pressure Science and Technology, American Institute of Physics, 1994
- [8] Den Reijer P.C. Impact on Ceramic Faced Armor, Technische Univ. Phd Thesis.

- [9] Kaufmann C., Cronin D.S, Worswick M.J, Pageau G., Beth A. Influence of material properties on the ballistic performance of Ceramics for personal body armour. Shock and vibration journal, SAV 10(1), February 2003, page 51 – 59
- [10] Anderson C.E, Johnson G.R., Holmquist T.J., ballistic experiments and computations of confined %99.5 Al₂O₃ ceramics tiles, 15th International Symposium on Ballistics. Israel, May 1995
- [11] Johnson G.R., Holmquist T.J, response of boron Carbide subjected to large strains, high strain rates and high pressures. Journal Of Applied Physics, Vol 85, 1999
- [12] Legallic C., Cauret M., Milton, A.L and Carson W.A. A consideration of Damage in the intecration between tungsten rod penetrators and ceramic materials. Int. Symposium on Ballistic, San Francisco, USA, September 1996
- [13] Johnson G.R., Holmquist T.J, Grady D.E, Lopatin C.M and Hertel E.S. High strain rate properties and constituve modelling of glass. 15th International Symposium on Ballistics. Israel, May 1995
- [14] LS-DYNA Keyword User's Manuel (Version 960), Livermore Software Technology Corp.
- [15] H. Kurtaran, M. Buyuk, A. Eskandarian. Ballistic impact simulation of GT model vechile door using finite element method. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Vol 40 page 113 – 121, 2003
- [16]] LS-DYNA Keyword User's Manuel (Version 970), Livermore Software Technology Corp.

ÖZGEÇMİŞ

Bülent Esen, 1977 yılında KOCAELİ’ de doğmuştur. Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü’ nü 2001 yılında bitirmiştir. 2001 yılında itibaren Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümün’ de yüksek lisans eğitimine başlamıştır. İngilizce bilmektedir. Halen özel bir bankada müşteri ilişkileri danışmanı olarak görev almaktadır.