

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK - KOMPOZİT KATMANLI ZİRH
MALZEMELERİNİN DİNAMİK MODELLENMESİ**

Makine Müh. Hilal Kemal ŞENYILMAZ

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Necati TAHRALI

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Değerlendirmesi	2
1.2 Patlamanın Mekanizması	4
2. NÜMERİK YÖNTEMLER	5
2.1 Yazılımın Genel Özellikleri	5
2.2 Çözücü Tipleri.....	6
2.2.1 Lagrange Çözücü.....	6
2.2.2 Euler Çözücü	7
2.2.3 Shell Çözücü	7
2.3 Malzeme Modelleri.....	8
2.3.1 Hal Denklemi (Equation of State)	8
2.3.1.1 İdeal Gaz Hal Denklemi.....	8
2.3.1.2 John - Wilkins - Lee Hal Denklemi.....	8
2.3.1.3 Lineer Hal Denklemi	8
2.3.1.4 Orthotropik Hal Denklemi	9
2.3.1.5 Şok Hal Denklemi	11
2.3.2 Mukavemet Modelleri.....	12
2.3.2.1 Johnson - Cook Modeli.....	12
2.3.2.2 Elastik Model	13
2.3.3 Kırılma Modelleri	13
2.3.3.1 Gerilme - Gerinim Kırılma Modeli	14
2.3.3.2 Johnson - Cook Kırılma Modeli	14
3. MODELLEME ve ANALİZLER.....	15
3.1 Modelin Hazırlanması.....	15
3.1.1 Zırh Çeliği Modeli	15
3.1.2 Kompozit Modeli.....	16
3.1.3 Hava ve Patlayıcı Modeli.....	16
3.1.4 Elastomer Modeli	18
3.2 Patlama Analizleri	18
3.2.1 Zırh Çeliği	19
3.2.2 Çelik - Kompozit Konfigürasyonu	23
3.2.3 Zırh Çeliği - Elastomer - Kompozit Konfigürasyonu.....	32
4. SONUÇLAR	39

KAYNAKLAR.....	40
Ek 1 AISI 4340 Çeliği Malzeme Özellikleri.....	43
Ek 2 Kevlar-Epoksi Malzeme Özellikleri.....	44
Ek 3 Hava Malzeme Özellikleri	46
Ek 4 TNT Malzeme Özellikleri	47
Ek 5 Polistiren Malzeme Özellikleri.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	49

SİMGE LİSTESİ

t	Zaman
v	Hız
x	Mesafe
p	Hidrostatik Basınç
s	Sapma Gerilmesi
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme
$\dot{\epsilon}$	Gerininin zamana bağlı türevi
x, y, z	Koordinat
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	Hız
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	İvme
m	Kütle
\mathcal{E}	Gerinim
e	İç enerji
T	Sıcaklık
γ	Adyabatik sabit
A, B, R_1	Patlayıcı türüne bağlı sabitler
R_2, w	Patlayıcı türüne bağlı sabitler
V	Hacim
K	Hacim modülü
μ	Basınç sabiti
C_{ij}	Katılık matrisi
\mathcal{E}_{ij}	Gerinim tensörü
Γ	Gruneisen sabiti
c_0	Hacim içerisindeki ses hızı
n	Deformasyon sertleşmesi üssü
k	Mukavemet katsayısı
T_m	Ergime sıcaklığı
T_r	Referans sıcaklık
σ_0	Akma gerilmesi
σ_r	Referans gerilme

D	Hasar parametresi
ϵ_f	Eşdeğer kırılma gerinimi
$d\epsilon_{eq}^p$	Eşdeğer plastik gerinim artışı
d_1-d_5	Malzeme sabitleri
σ_m	Ortalama gerilme
σ_{vM}	Eşdeğer von-Misses gerilmesi
$\dot{\epsilon}_{eq}^p$	Eşdeğer von-Misses gerinim oranı
$\dot{\epsilon}_o$	Referans gerilme oranı
a	Patlayıcı
P	Basınç dalgası
r	Tesir yarıçapı
E	Enerji
$\Delta\epsilon_{ave}$	Ortalama gerinim
$\Delta\epsilon_{ij}^d$	Sapma gerinimi
$\Delta\epsilon_{vol}$	Volümetrik gerinim artışı
$\Delta\sigma_{ij}$	Gerilme artışı
ΔP	Basınç artışı
G	Kayma modülü

KISALTIMA LİSTESİ

TNT	Trinitrotoluen (patlayıcı)
JWL	John – Wilkins – Lee
C-4	Yüksek patlama hızına sahip askeri bir plastik patlayıcı
GEBOD	Generator of body data

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 MRAP aracının mayın testi	1
Şekil 1.2 Patlama ve basınç dalgası	4
Şekil 1.3 Patlama basıncı-zaman eğrisi.....	4
Şekil 2.1 Eleman IJK koordinat sistemi.....	6
Şekil 2.2 Eleman özellikleri ve ağ deformasyonu	7
Şekil 2.3 Euler çözücüsünde malzeme özelliklerinin ağ içerisinde iletimi.....	7
Şekil 2.4 Elastik Model.....	13
Şekil 3.1 Zırh çeliği modeli.....	15
Şekil 3.2 Kompozit modeli.....	16
Şekil 3.3 Euler elemanlarla modellenmiş hava	17
Şekil 3.4 Patlayıcı modeli.....	17
Şekil 3.5 Polistiren köpük modeli.....	18
Şekil 3.6 Savaşların model üzerindeki yerleşimi	19
Şekil 3.7 Zırh çeliği patlama simülasyonu	19
Şekil 3.8 Patlama basıncı – zaman eğrisi	21
Şekil 3.9 Zırh çeliği deplasman – zaman eğrisi.....	22
Şekil 3.10 Zırh çeliği hız – zaman eğrisi.....	22
Şekil 3.11 Zırh çeliği – kompozit patlama simülasyonu.....	23
Şekil 3.12 Zırh çeliği – kompozit (0° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	25
Şekil 3.13 Zırh çeliği – kompozit (0° / 90° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri.....	26
Şekil 3.14 Zırh çeliği – kompozit (45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	27
Şekil 3.15 Zırh çeliği – kompozit (0° / 45° / -45° / 90° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	28
Şekil 3.16 Zırh çeliği – kompozit (90° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	29
Şekil 3.17 Zırh çeliği – kompozit (30° / -30° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	30
Şekil 3.18 Zırh çeliği – kompozit (60° / -60° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri	31
Şekil 3.19 Zırh çeliği - elastomer - kompozit (+45° / -45° Yönü) patlama simülasyonu	33
Şekil 3.20 Zırh çeliği - elastomer (kalınlık 20 mm.) – kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri.....	35
Şekil 3.21 Zırh çeliği – elastomer (kalınlık 15 mm.) - kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri.....	36
Şekil 3.22 Zırh çeliği - elastomer (kalınlık 10 mm.) – kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri.....	37

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Korunum kanunları.....	5
Çizelge 2.2 Çizelge 2.1' de kullanılan eşitliklere ait semboller.....	5
Çizelge 3.3 Zırh çeliği-kompozit konfigürasyonu deplasman ve deformasyon hızları.....	32
Çizelge 3.4 Zırh çeliği - elastomer - kompozit konfigürasyonu deplasman ve deformasyon hızları.....	38

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, araçları mayın patlamasına maruz kalan personelin, patlama etkisinden en az zararla kurtulabilmesi için kullanılacak zırh konfigürasyonlarına ışık tutması için hazırlanmıştır. Çalışma, 27-06-01-04 proje numarasıyla bilimsel araştırma projeleri kapsamında BAPK tarafından desteklenmiş ancak hiçbir maddi katkı alınmadığı için mayın patlatma ve dinamik ölçme deneyleri yapılamamıştır. Tez çalışmam süresince, bilgi, tecrübe ve destekleriyle yol gösteren danışmanlarım Prof. Necati Tahralı' ya, Yrd. Doç. Dr. Cihan Demir'e, yazılım konusunda desteklerini esirgemeyen Temsa Ar-Ge A.Ş.' ne ve bana yardımcı geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı; beni her zaman destekleyen ve teşvik eden aileme, sevgili eşim Didem'e, biricik kızlarım İlkim Naz ve İdil Derin' e ithaf ediyorum.

Hilal Kemal ŞENYILMAZ
Makine Mühendisi

ÖZET

Bu çalışmada, 5 kilogramlık TNT patlaması karşısında çelik – kompozit katmanlı zırh malzemelerinin davranışı incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde zırh çeliği tek başına modellenmiş, patlama karşısında meydana gelen deplasman ve deformasyon hızı bulunmuştur. Daha sonra aynı kalınlıktaki çelik üzerine rijit olarak bağlanmış kompozit malzemenin deplasmanı ve deformasyon hızı lif yönüne bağlı olarak incelenmiştir. Son bölümde çelik ve en uygun lif yapısına sahip kompozit plakalar arasına polistiren köpük yerleştirilerek testler tekrar edilmiş, polistiren köpüğün farklı kalınlıkları için kompozit katmanda oluşan deplasman ve deformasyon hızları bulunmuştur.

Elde edilen veriler ışığında mayın patlamasına karşı yalnız çelik malzemeler yerine istenen değerlere bağlı olarak çelik – kompozit veya çelik – elastomer köpük – kompozit katmanlı malzemelerin kullanılmasının oluşan deplasman ve deformasyon hızı bakımından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mayın patlaması, çelik – kompozit katmanlı zırh malzemeleri, dinamik analiz

ABSTRACT

In this study, the behaviour of the steel-composite layered armour plate materials against 5 kilogram TNT explosion is examined. In the first part of the study, armoured steel plate is modelled alone then displacement and the velocity of deformation is obtained. Afterwards displacement and deformation velocity of composite material fastened as rigid to the steel in the same thickness depending on fibrous direction is investigated. In the last part the tests are repeated by embedding the polystyrene foam between steel and composite plates which have the most conformable fibrous structure and displacement and deformation velocity which come into existence in the composite layer for different polystyrene thickness is obtained.

According to the obtained data it has been concluded that the usage of steel-composite or steel - elastomer foam - composite layered materials against mine explosion in terms of originated displacement and deformation velocity is more suitable than usage of steel materials.

Keywords: Mine explosion, steel-composite layered armour plate materials, dynamic analysis

1.GİRİŞ

Kara mayınları, insanlar ve araçlar için çok ciddi tehdit olmaya devam etmektedirler. Son yıllarda araçlarının mayına basması sonucu birçok kişi hayatını kaybetmiş, bir kısmı da önemli derecede yaralanmalarla kurtulabilmişlerdir (Şekil 1.1). Gelişen teknoloji nedeniyle üretim maliyetlerinin düşmesinden dolayı, yasal olmayan örgütlerin mayın elde ederek, terörist etkinliklerde kullanması kolaylaşmış ve silahlı çatışmaya girmek yerine mayınlı tuzaklar kurmak daha çok tercih ettikleri bir yöntem haline gelmiştir. Bu nedenle araçların zırhlandırılarak personelin mayın etkilerinden korunması eskiye oranla daha büyük önem arz etmektedir. Mayından korunmak için geliştirilen zırhlar çelik, alüminyum gibi tek katmanlı olabileceği gibi, uygun seçilmiş kompozit malzemelerle birleştirilerek çok katmanlı yapılar şeklinde de kullanılabilirler. Böylece aynı tehdit seviyesi için daha ince metal kalınlığı ve daha düşük ağırlıkta zırh elde edilebilmektedir. Bu çalışmada mayın patlaması karşısında çelik-kompozit katmanlı zırh malzemelerinin davranışı incelenmiştir.



Şekil 1.1 MRAP aracının mayın testi

Son yıllarda kompozit malzemeler, balistik performansları ve hafiflikleri nedeniyle ya tek başlarına ya da farklı malzemelerle çeşitli yöntemlerle birleştirilerek zırh malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Askeri taşıtlarda kullanılan kompozitlerde mermi veya parça tesirlerine karşı dayanıklılık istendiğinde kompozit plakaların delme anında ne kadar rijit oldukları önemlidir. Kompozit arka destek katmanının matris malzemesi, fiberlerin şekli, boyutları, dökme yönleri, hacim oranları ve dağılımları zırhın performansı yönünden önem arz etmektedir. Matris malzemesi ile fiberler arasında iyi bir bağ olması, tabakalarda ayrılma ve delaminasyon olmaması önemlidir. Matris malzemesinin türü, kompozit malzemenin balistik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir (Wong vd.,2001).

1.1 Literatür Değerlendirmesi

Konu dinamik olarak ele alındığında, zırhın oluştuğu malzemelerin cinsini belirleyen tehdidin türüdür. Literatür incelendiğinde bu tehdidin balistik darbe ve mayın patlama etkisi olarak iki ana başlıkta toplandığı görülmüştür. Mermi etkisine karşı direnç gösterecek zırh malzemeleri için sayısal çözümler ve gerçek deneyler oldukça çoktur. Ancak mayın patlaması ile ilgili sayısal ve deneysel çalışmaların fazla olmadığı görülmüştür. Mayın saldırılarının büyük çoğunluğunun araçları hedeflediği düşünüldüğünde, araçların zayıf yanlarının giderilmesi ve daha önemlisi personelin hayatta kalmasının sağlanması için patlamanın araç gövdesi ve kullanılan zırha etkilerinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Tuncer vd., 2002). Bundan dolayı patlama ile ilgili teorik çalışmalarda çoğunlukla çeşitli şekillerdeki ve malzemelerdeki levha ve panel tipi yapıların patlama anındaki davranışları incelenmiştir (Gupta, 1999; Rosa, 2003). Bunun nedeni araçların imalatında bu tip yapıların kullanılması ve patlamaya maruz kalan ilk bölgeleri temsil etmeleridir (Kurtaran vd., 2004). Levha tipi yapılarla mayının patlama şiddeti üzerinde, mayının gömülü olduğu toprak özelliklerinin etkisi, mayının gömülme derinliği etkisi gibi birçok faktör de araştırılmıştır.

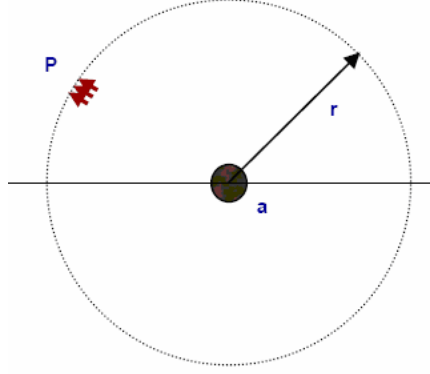
Kara mayınlarının yarattığı patlama etkisinin incelendiği nümerik model iki bölümde ele alınabilir. Birincisi, araç gövdesinin yapısal tepkisini, ikincisi ise basınç dalgaları ve parçacıkların (toprak, patlama ürünleri, vs) momentumundan dolayı oluşan enerjinin hava ve yer üzerinden araca iletilmesini kapsamaktadır (Tuncer vd., 2002). Literatürde bu iki durumun beraber incelenebilmesi için Lagrangian ve Eulerian metodlarının beraber kullanıldığı görülmektedir. Bu metodu kullanan programlar incelendiğinde LS-DYNA ve ANSYS AUTODYN programlarının öne çıktığı görülmektedir. Tabiei ve Nilakantan (2006) LS-DYNA kullanarak yaptıkları çalışmada mayın patlaması esnasında araçtaki zırhın ve koltuk dizaynının personele etkilerini incelemişlerdir. Koltuğun enerji emici alüminyum tüplerle donatılmasının dikey düşüş ve mayın patlaması esnasında personelin hayatta kalma olasılığını arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmalar sayısal ve deneysel olarak iki yönlü yürütülmüştür. Yapay personel ile yapılan dikey düşüş ve mayın patlama testlerine konu olan enerji emici özellikteki koltuk dizaynının sayısal Ls-Dyna kullanılarak yapılan simülasyonları gerçek zamanlı deneylere göre güvenilir ve daha az pahalı bir alternatif olmayı kanıtlamıştır. Adamik vd. (2004) 25 ve 50 gramlık kütlelerde silindirik TNT tipi patlayıcının infilakı ile oluşan hava basınç dalgalarının patlayıcıya yakın olarak (tahminen 800mm ve 840mm) yerleştirilen basınçölçerlere etkilerini, LS-DYNA kodu kullanılarak üç boyutlu olarak incelenmişlerdir. Sayısal çalışmalar, hava ve TNT için denklemlerin doğruluğu üzerine yoğunlaştırılmıştır. Çalışmada ideal gaz denklemi ve JWL denkleminin sırasıyla TNT

ve hava için en uygun denklemler olduğu tespit edilmiştir. Değişik miktardaki barut hakkı için basit formüller geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Sayısal simülasyonlar Varşova Askeri Teknik Üniversitesinde icra edilen orijinal deneyler ile mukayese edilmiş, bu mukayesenin temeli olarak, LS-DYNA kullanılarak yapılan üç boyutlu sayısal simülasyonların çok güçlü ve kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır. Williams (2002) yaptığı çalışmada askeri maksatla kullanılan personel taşıyıcı aracın LS-DYNA kodu kullanılarak yapılan patlama simülasyonlarının sonucunu sunmaktadır. Araç modeli simülasyona uygun olarak modifiye edilmiştir. 6 kg.lık C-4 modellenerek araç modeli üzerinde kullanılmıştır. Personeli simüle etmek için Ls-Dyna kodu içerisinde bulunan GEBOD modeli kullanılmıştır. Böylece patlamanın personel üzerindeki etkileri incelenmiş; ivme ve hız, hasar eşik kriterleri ile mukayese edilmiştir. Brill vd. (2006) askeri maksatla kullanılan zırhlı personel taşıyıcı aracın 6 kg.lık mayın infilak yükünün simülasyonu için LS-DYNA kullanımının komple bir test ile mukayeselerini sunmuşlardır. Çalışmalarında, yapılan gerçek deneyler sonucunda klasik mühendislik modelinin zırhlı araç üzerindeki yükü tahmin edilenin ciddi bir şekilde altında gösterdiği belirlenmiştir. Personeli simüle etmek için LS-DYNA içerisinde bulunan yapay insan modelleri kullanılmıştır. LS-DYNA kodu kullanılarak yapılan sayısal simülasyonların deneysel sonuçlarla benzerliği teyit edilmiştir. Hafif kaportaya sahip ticari bir aracın ön sağ tekerleğinin altında kuru veya neme doymuş kuma gömülü kara mayınının infilakına karşı plastik deformasyon, kırılma gibi kinematik tepkileri ANSYS AUTODYN kodu kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analizler, aracın non-linear dinamik davranışlarını, araçla birlikte püsküren kumun ve gazlı infilak ürünlerinin etkileşimini içermiştir. Basıncın frekans analizleri, zaman adımlarının incelenmesi ve görsel referanslar, infilak sonrası oluşan patlama yükünün zemin yapısına bağlı olarak değiştiği, bunun sonucunda araç üzerindeki etkinin de değiştiği belirlenmiştir (Grujicic vd., 2007). Bir köprünün bölümleri üzerindeki patlama yükleri Black (2006) tarafından ANSYS AUTODYN kodu kullanılarak incelenmiştir. Başta Euler ve Lagrange olmak üzere ANSYS AUTODYN kodunun kullandığı çözücüler, simülasyonda kullanılabilirliği açısından karşılaştırılmıştır. İki boyutlu olarak hazırlanan modelde köprü bölümünü simüle eden plaka ve havada oluşan basınç, plakada oluşan gerinim ve sehim incelenmiştir.

Bu çalışmada ANSYS AUTODYN programından yararlanılarak, çelik-kompozit katmanlı bir zırh modellenmiş ve bu zırh sisteminin mayın patlaması karşısındaki davranışı incelenmiştir.

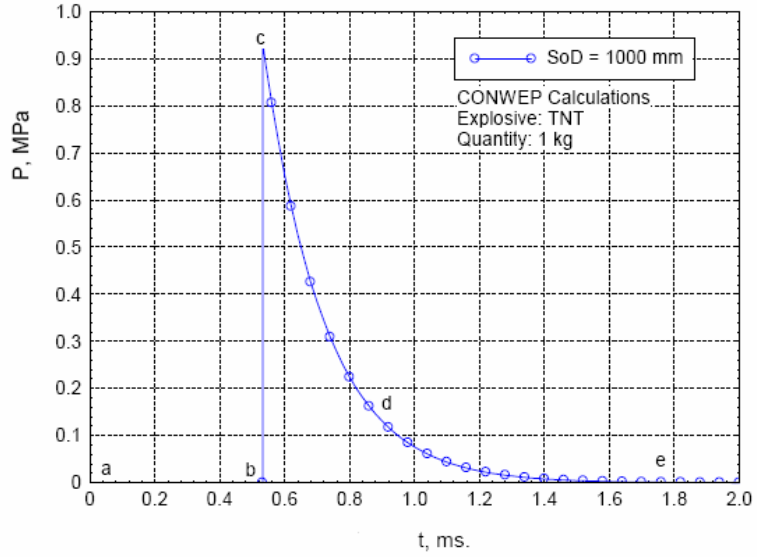
1.2 Patlamanın Mekanizması

Şekil 1.2' de patlamanın birkaç temel karakteristiği görülmektedir. Burada a patlayıcıyı, P basınç dalgasını, r tesir yarıçapını göstermektedir.



Şekil 1.2 Patlama ve basınç dalgası (Black vd., 2006)

Patlama anında ortaya çıkan enerji; ısı, ses ve basınç dalgasına dönüşür (Black vd., 2006). Basınç bir anda çok yüksek değerlere ulaşır ve yavaş yavaş düşer. 1kg.lık TNT nin patlaması ile ortaya çıkan basınç için basınç-zaman eğrisi Şekil 1.3' de görülmektedir (Black vd., 2006). Burada a fünyenin ateşlenmesi anı, b infilak anı, c en yüksek patlama basıncı, c-e basıncın zamanla düşüşünü göstermektedir.



Şekil 1.3 Patlama basıncı-zaman eğrisi (Black vd., 2006)

2. NÜMERİK YÖNTEMLER

2.1 Yazılımın Genel Özellikleri

ANSYS AUTODYN, askeri amaçlı bir explicit sonlu elemanlar yazılımıdır. Program non-lineer problemlerin (patlama, penetrasyon, parçacık tesiri, şok vb.) çözümünde başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. Program dinamik problemi sonlu elemanlara ayırır ve zaman adımlarına bölerek çözer. Kütle, momentum ve enerjinin korunumu kanunları (Çizelge 2.1) her zaman adımında uygulanır (Fiserova, 2006). Korunum kanunları aynı zamanda malzeme modellerinde de gereklidir. Gerilme ile deformasyon ve iç enerji arasındaki bağlantıların kurulmasını sağlarlar.

Çizelge 2.1 Korunum kanunları (Fiserova, 2006)

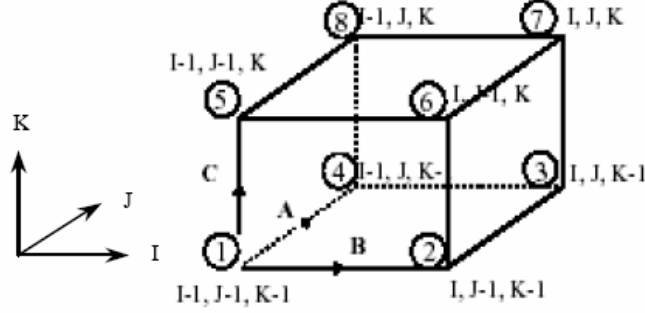
Korunum Kanunları	Lagrange Yaklaşımı	Euler Yaklaşımı
Kütle	$\frac{dp}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$ (2.1)	$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0$ (2.2)
Momentum	$\frac{dv_i}{dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$ (2.3)	$\frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$ (2.4)
Enerji	$\frac{dE}{dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ (2.5)	$\frac{\partial E}{\partial t} + v_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ (2.6)

Çizelge 2.2 Çizelge 2.1’ de kullanılan eşitliklere ait semboller

Sembol	Birimi	Açıklama
t	s	Zaman
v	m.s ⁻¹	Hız
x	m	Mesafe
p	Pa	Hidrostatik basınç
s	Pa	Sapma gerilmesi
ρ	Kg.m ⁻³	Yoğunluk
σ	Pa	Gerilme
$\dot{\epsilon}$		Gerininin zamana bağlı türevi

ANSYS AUTODYN, dinamik problemi 6 köşeli karelere böler ve her nodu IJK koordinat eksenine göre tanımlandırır (Şekil 2.1) (ANSYS AUTODYN Theory Manual). Problem çözümünde bu bölünmüş elemanların boyutları önemli bir rol oynar. Eleman

boyutları ne kadar küçülürse, problem için eleman sayısı fazlalaşacak ve çözüm süresi artacaktır. Bu elemanların birbirine eklenmesi ile çözüm ağı elde edilir.



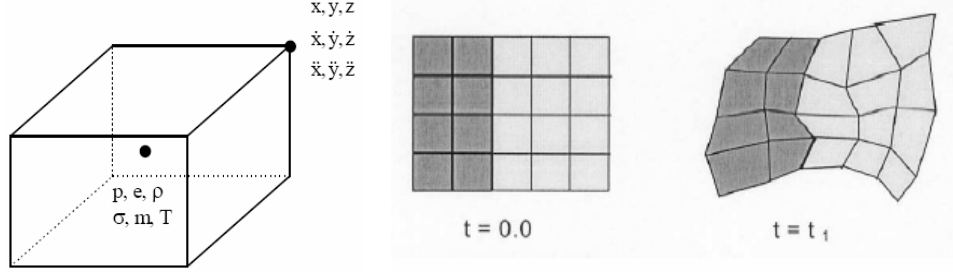
Şekil 2.1 Eleman IJK koordinat sistemi (ANSYS AUTODYN Theory Manual)

2.2 Çözücü Tipleri

ANSYS AUTODYN programı, içerisinde çok farklı çözücü tipleri barındırmaktadır. En optimum çözümü bulabilmek için uygun çözücünün kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada Lagrange, Shell ve Euler-FCT çözücüleri kullanılmıştır.

2.2.1 Lagrange Çözücü

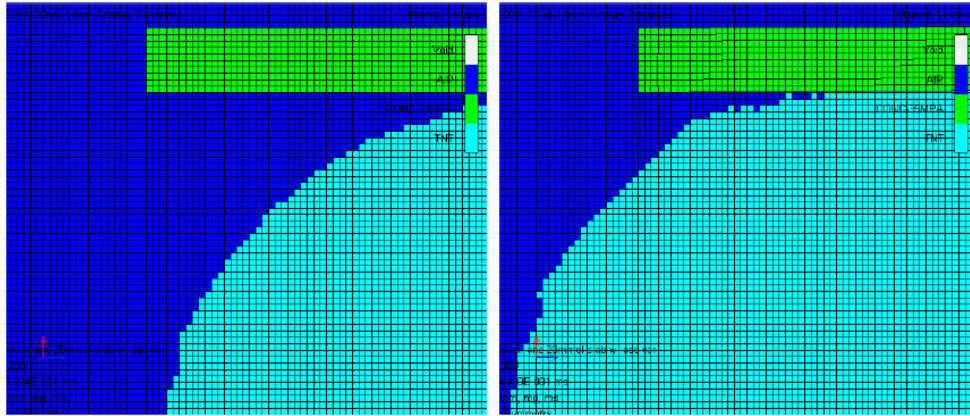
Lagrange çözücü, ANSYS AUTODYN programının kullandığı temel çözücülerden biridir. Bu çözücüde çözüm ağı, tanımlanmış malzeme özellikleri ile birlikte hareket eder. Yani malzeme özellikleri elemanlar arasında, eleman yüzeyleri üzerinden transfer edilmez. Özellikler her eleman için eleman köşe nodlarında x, y, z koordinat, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ hız, $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ ivme ve eleman merkezinde m kütle, σ gerilme, ε gerinim, p basınç, e iç enerji, ρ yoğunluk, T sıcaklık olarak tanımlanmıştır. Çözüm anında ağ malzeme özellikleri ile birlikte deformasyona uğrar (Şekil 2.2). Deformasyonlar fazla büyük olması beraberinde problemleri de getirir. Büyük deformasyonlar hesaplama zamanını arttırır ya da çözüm işleminin durmasına sebep olur (Black, 2006). ANSYS AUTODYN programı bu problemin üstesinden erozyon özelliğini kullanarak aşmıştır.



Şekil 2.2 Eleman özellikleri ve ağ deformasyonu (Black, 2006)

2.2.2 Euler Çözücü

Bu çözücüde çözüm ağı sabit tutulmakta, malzeme özellikleri ağ içerisinde hücreden hücreye taşınmaktadır (Şekil 2.3). Malzeme özellikleri sıvı, gaz ve çok büyük deformasyonların meydana geldiği problemlerin çözümünde kullanılır. Büyük deformasyonlar çözüm zamanını arttırmadıkları gibi, çözüm işleminin durmasına sebep olmazlar. Ancak çözüm zamanı Lagrange çözücüye göre daha fazladır. Bunun nedeni, Lagrange çözücüye göre eleman sayısının fazla olmasıdır. Problem kadar problemin içerisinde bulunduğu ortamda modellenmelidir. Ancak bu sayede hücreler arasında malzeme özelliklerinin geçişi sağlanabilmektedir.



Şekil 2.3 Euler çözücüsünde malzeme özelliklerinin ağ içerisinde iletimi

2.2.3 Shell Çözücü

Shell çözücü diğer boyutlarına göre eni çok ince olan yapıların modellenmesinde kullanılır. Bu çözücüde gerilme iki eksenli olarak kabul edilir. Bundan dolayı çözüm ağını oluşturan elemanların kalınlığı önemli değildir. Zaman adımı yalnızca bu elemanların boyu tarafından kontrol edilir (Black, 2006). Zaman adımının yalnızca eleman boyuna bağlı olmasından dolayı, program daha hızlı ve az çevrimle çalışır.

2.3 Malzeme Modelleri

ANSYS AUTODYN programında, temel olarak malzeme modeli üç kategoriye ayrılmıştır. Bunlar hal denklemleri, mukavemet modelleri ve kırılma modelleridir. Problemden kullanılan malzemeleri doğru tanımlayabilmek için bu üç malzeme kategorisini de iyi anlamak gerekmektedir. Aşağıda bu çalışmada kullanılacak olan hal denklemleri, mukavemet ve kırılma modelleri anlatılmaktadır.

2.3.1 Hal Denklemi (Equation Of State)

2.3.1.1 İdeal Gaz Hal Denklemi

p basınç, e iç enerji ve ρ yoğunluk arasındaki ilişkiyi tanımlar.

$$p = (\gamma - 1)\rho.e \quad (2.7)$$

Bu denklemde γ adyabatik sabit olarak adlandırılır.

2.3.1.2 John-Wilkins-Lee Hal Denklemi

Patlayıcılar için kullanılan bir hal denklemdir. ANSYS AUTODYN tarafından (2.8) denklemi şeklinde kullanılır.

$$p = A\left(1 - \frac{w}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{w}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{we}{V} \quad (2.8)$$

Burada A, B, R_1 , R_2 ve w değerleri patlayıcının türüne bağlı sabitlerdir. En çok kullanılan patlayıcı türlerine ait bu değerler ANSYS AUTODYN programının malzeme kütüphanesinde mevcuttur.

2.3.1.3 Lineer Hal Denklemi

Hook kanununa benzer şekilde p basınç, ρ yoğunluğun bir fonksiyonudur.

$$p = K\mu \quad (2.9)$$

Bu denklemde $\mu = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) - 1$ ve K malzemenin hacim modülüdür.

2.3.1.4 Orthotropik Hal Denklemleri

Bu denklem kompozit malzemeler için kullanılmaktadır. Hal denklemini yazabilmek için öncelikle orthotropik temel modelin anlaşılması gerekmektedir. Artımlı lineer elastik temel bağıntı (2.10) eşitliğinde verilmiştir (Composite Modeling In ANSYS AUTODYN).

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon_{11} \\ \Delta\epsilon_{22} \\ \Delta\epsilon_{33} \\ \Delta\epsilon_{23} \\ \Delta\epsilon_{31} \\ \Delta\epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Burada $[C]$ katılık matrisidir. Yukarıdaki eşitlikte gerinim, ortalama $\Delta\epsilon_{ave}$ ve sapma $\Delta\epsilon_{ij}^d$ olarak ayrılırsa (2.11) denklemi yazılabilir.

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Delta\epsilon_{ij}^d + \Delta\epsilon_{ave} \quad (2.11)$$

ve

$$\Delta\epsilon_{ave} = \frac{1}{3}(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \quad (2.12)$$

yazılabilir. Küçük gerinim artışları için volümetrik gerinim artışı (2.13) denklemindeki gibi tanımlanır.

$$\Delta\epsilon_{vol} \approx (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \quad (2.13)$$

Toplam gerinim artışı (2.14) denkleminde volümetrik ve sapma gerinim artışı olarak ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{22}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{33}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Yukarıdaki matris açılırsa ve volümetrik ve sapma terimleri gruplandırılırsa, gerilme artışı denklemleri bulunur.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{11} &= \frac{1}{3}(C_{11} + C_{12} + C_{13})\Delta\varepsilon_{vol} + C_{11}\Delta\varepsilon_{11}^d + C_{12}\Delta\varepsilon_{22}^d + C_{13}\Delta\varepsilon_{33}^d \\ \Delta\sigma_{22} &= \frac{1}{3}(C_{21} + C_{22} + C_{23})\Delta\varepsilon_{vol} + C_{21}\Delta\varepsilon_{11}^d + C_{22}\Delta\varepsilon_{22}^d + C_{23}\Delta\varepsilon_{33}^d \\ \Delta\sigma_{33} &= \frac{1}{3}(C_{31} + C_{32} + C_{33})\Delta\varepsilon_{vol} + C_{31}\Delta\varepsilon_{11}^d + C_{32}\Delta\varepsilon_{22}^d + C_{33}\Delta\varepsilon_{33}^d \end{aligned} \quad (2.15)$$

Eşdeğer basınç artışı da aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\Delta P = -\frac{1}{3}(\Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{22} + \Delta\sigma_{33}) \quad (2.16)$$

Burada $\Delta\sigma_{11}$, $\Delta\sigma_{22}$ ve $\Delta\sigma_{33}$ yerine koyulursa (2.17) denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \Delta P &= -\frac{1}{9}[C_{11} + C_{22} + C_{33} + 2(C_{12} + C_{23} + C_{31})]\Delta\varepsilon_{vol} \\ &\quad -\frac{1}{3}[C_{11} + C_{21} + C_{31}]\Delta\varepsilon_{11}^d \\ &\quad -\frac{1}{3}[C_{12} + C_{22} + C_{32}]\Delta\varepsilon_{22}^d \\ &\quad -\frac{1}{3}[C_{13} + C_{23} + C_{33}]\Delta\varepsilon_{33}^d \end{aligned} \quad (2.17)$$

İzotropik malzemeler için katılık matrisi katsayısı, hacim modülü ve kayma modülüne bağlı olarak yazılabilir.

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = K + \frac{4}{3}G$$

$$C_{12} = C_{21} = C_{23} = C_{32} = C_{31} = C_{13} = K - \frac{2}{3}G \quad (2.18)$$

(2.18) ve (2.16) denklemlerinden

$$\Delta P = -K\Delta\epsilon_{vol} - K(\Delta\epsilon_{11}^d + \Delta\epsilon_{22}^d + \Delta\epsilon_{33}^d) \quad (2.19)$$

elde edilir ve $\Delta\epsilon_{11}^d + \Delta\epsilon_{22}^d + \Delta\epsilon_{33}^d$ sıfıra eşitlenirse (2.20) denklemi elde edilir.

$$\Delta P = -K\Delta\epsilon_{vol} \quad (2.20)$$

Yukarıdaki ifadenin Hook kanununa benzerliği hemen dikkat çekmektedir. (2.17) denklemindeki birinci terim yerine, orthotropik malzemenin hacim modülü yazılırsa:

$$\begin{aligned} \Delta P = & K'\Delta\epsilon_{vol} \\ & - \frac{1}{3}[C_{11} + C_{21} + C_{31}]\Delta\epsilon_{11}^d \\ & - \frac{1}{3}[C_{12} + C_{22} + C_{32}]\Delta\epsilon_{22}^d \\ & - \frac{1}{3}[C_{13} + C_{23} + C_{33}]\Delta\epsilon_{33}^d \end{aligned} \quad (2.21)$$

Orthotropik malzemelerin katılık matris katsayılarına bağlı olarak hal denklemi elde edilmiş olur.

2.3.1.5 Şok Hal Denklemi

Bu tip hal denklemleri yoğunluk ρ , basınç p , iç enerji e , tanecik hızı u_p ve şok (darbe) hızı U arasındaki ilişki ile tanımlanır. Hal denklemlerinin bu formu oldukça sık kullanılır ve birçok malzeme için parametreleri tanımlanmıştır.

$$P = P_H + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (2.22)$$

Burada $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0 =$ sabit olduğu kabul edilirse,

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \quad (2.23)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (2.24)$$

elde edilir. Burada Γ Gruneisen sabiti, $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$, ρ_0 ilk yoğunluk, ρ son yoğunluk, c_0 hacim içerisindeki ses hızıdır. Bu tip hal denkleminde malzemenin erimesi buharlaşması gibi faz değişimlerine izin verilmez (Corbett, 2006).

2.3.2 Mukavemet Modelleri

Genel olarak malzemenin akma ve kesmeye karşı gösterdiği direncin formülasyonudur. Elastik ve plastik bölge arasındaki geçiş rejimi akma kriteri tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılacak akma kriterleri aşağıda açıklanmıştır.

2.3.2.1 Johnson-Cook Modeli

Metallerin bilinen deformasyon-sertleşme ilişkisi (2.25) denkleminde verilmiştir. Burada σ_0 akma gerilmesini, n deformasyon sertleşmesi üssünü, k ise mukavemet katsayısını ifade etmektedir.

$$\sigma = \sigma_0 + k \epsilon^n \quad (2.25)$$

Bu denklem yüksek hızdaki şekil değiştirmelerde ortaya çıkan ısının etkisini içermediğinden sonuçlarda hatalara sebep olur. Bu nedenle akma gerilmesi üzerindeki sıcaklığın etkisi (2.26) denklemi ile hesaplanabilir. Denkleminde T_m ergime sıcaklığını, T_r işlemin yapıldığı referans sıcaklığı, σ_r referans sıcaklıkta ölçülen referans gerilmeyi, T ise σ nın hesaplandığı sıcaklığı göstermektedir.

$$\sigma = \sigma_r \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2.26)$$

Johnson ve Cook (1983) bu eşitlikleri kullanarak (2.27) denklemini oluşturmuşlardır. Denkleminde kullanılan katsayılar deneysel çalışmalar sonucunda bulunmuştur. Burada σ_0 akma gerilmesini, B mukavemet katsayısını, C uzama oranı katsayısını, m deformasyon hızı

duyarlılığı üssünü göstermektedir. Özellikle balistik çalışmalarda kullanılan malzemeler için gerekli bu katsayılar ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde bulunmaktadır.

$$\sigma = (\sigma_o + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2.27)$$

2.3.2.2 Elastik Model

Bu model ideal durumda kusursuz elastik malzemeler için kullanılmaktadır. Akma gerilmesi sonsuz olarak değerlendirilmekte böylece von-Mises silindiri sonsuz yarıçapta kabul edilmektedir (Şekil 2.4) (ANSYS AUTODYN Theory Manual).

$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$
 or
 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = \frac{2Y^2}{3}$

Şekil 2.4 Elastik Model

2.3.3 Kırılma Modelleri

Yük altındaki malzeme, çekme gerilme limitini aşan gerilmelere dayanamaz. Kırılma modelleri, malzemenin nasıl hasara uğrayacağını yanında, ANSYS AUTODYN programının bu hasarı nasıl göstereceğini de belirler. Bu çalışmada orthotropik malzeme için malzeme gerilme/gerinim kırılma modeli, metal malzeme için Johnson-Cook kırılma modeli kullanılmıştır.

2.3.3.1 Gerilme-Gerinim Kırılma Modeli

Bu model kompozit malzemeler gibi orthotropik malzemeler için kullanılmaktadır. Hasar asıl malzeme gerilme veya gerinim değerlerinin, bu değerlerle alakalı kırılma değerlerini geçmesi ile başlar (Composite Modeling in ANSYS AUTODYN).

2.3.3.2 Johnson-Cook Kırılma Modeli

Bu model Johnson-Cook mukavemet modeli ile benzer şekilde oluşturulmuştur. Bu modelde plastik gerinim temel alınmıştır (Björklund, 2008). (2.28) denkleminde görülen hasar parametresi $D = 1$ değerine ulaştığı zaman kırılma başlar.

$$D = \int \frac{1}{\varepsilon_f} d\varepsilon_{eq}^p \quad (2.28)$$

Denklemden ε_f eşdeğer kırılma gerinimi ve $d\varepsilon_{eq}^p$ eşdeğer plastik gerinim artışını göstermektedir.

$$\varepsilon_f = \left(d_1 + d_2 e^{-d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{vM}}} \right) \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] (1 + d_5 T) \quad (2.29)$$

(2.29) denkleminde d_1 - d_5 deneylerden elde edilen malzeme sabitlerini, σ_m ortalama gerilmeyi, σ_{vM} eşdeğer von-Mises gerilmesini, $\dot{\varepsilon}_{eq}^p$ von-Mises eşdeğer gerinim oranını, $\dot{\varepsilon}_o$ referans gerilme oranı ve T sıcaklık değeridir. (2.29) denkleminde de görüldüğü gibi eşdeğer kırılma gerinimi, basıncın, gerinim oranının ve sıcaklığın fonksiyonudur. Özellikle balistik çalışmalarda kullanılan malzemeler için gerekli bu katsayılar ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde bulunmaktadır.

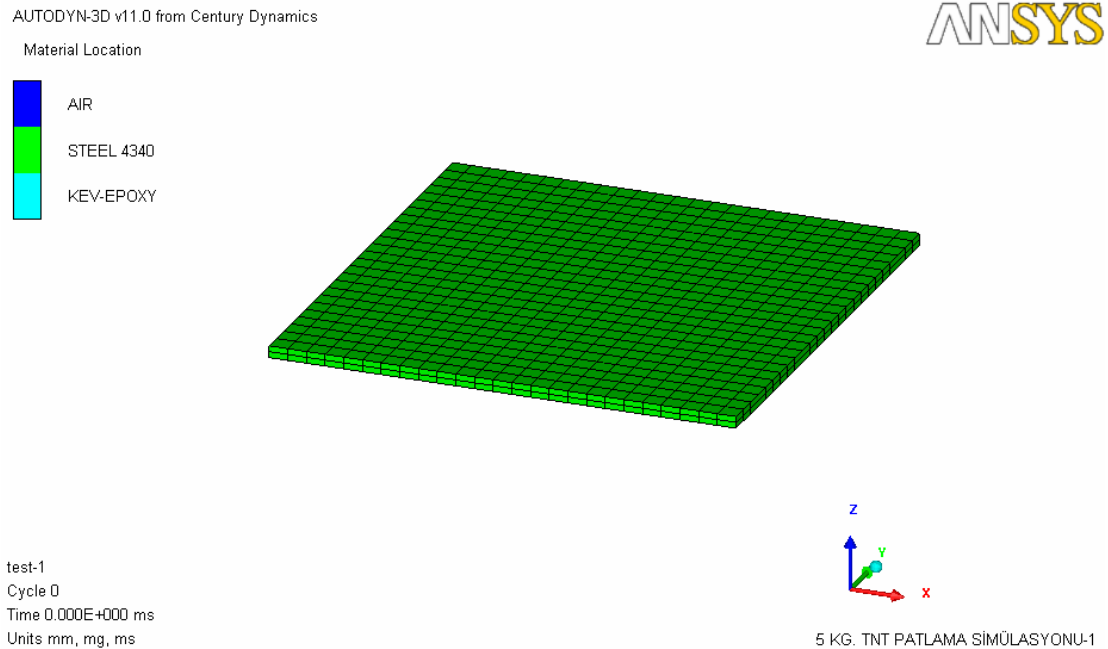
3. MODELLEME ve ANALİZLER

Modelleme genel olarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi, sınır koşullarının tanımlanması, parçaların oluşturulması, parçalar arasındaki ilişkilerin tanımlanması ve problemin çözümü adımlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada zırh çeliği önce tek başına modellenerek, patlama basıncının yaptığı etki incelenmiştir. Daha sonra çeliğin üzerine farklı yönlerdeki elyaf katlarından oluşturulmuş kompozit malzeme rijit olarak bağlanmış ve bu zırh sistemi için analizler yapılmıştır. En sonunda çelik ile kompozit malzeme arasına farklı kalınlıklarda polistiren köpük tabaka yerleştirilerek, patlamanın etkileri incelenmiştir. Bütün analizlerde zırh sisteminin yerden yüksekliği 300 mm. olarak belirlenmiştir. Hesaplama zamanının kısaltılması maksadıyla çeyrek model kullanılmıştır. Problem x ve y yönlerinde simetrik kabul edilmiştir.

3.1 Modelin Hazırlanması

3.1.1 Zırh Çeliği Modeli

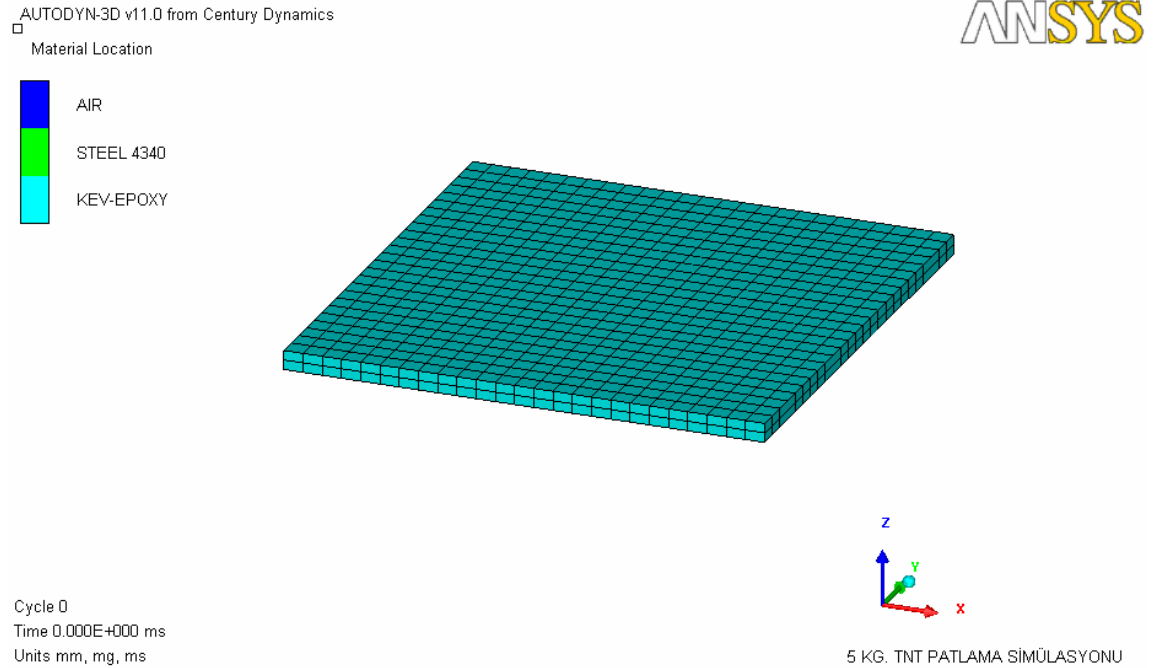
Zırh çeliği malzemesi olarak ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcut bulunan AISI 4340 seçilmiştir. Malzeme özellikleri Ek-1' de verilmiştir. Çelik plaka, kabuk (shell) olarak modellenmiştir. Model, 625 elemandan oluşturulmuştur. Kalınlık tüm analizlerde 12,7 mm., diğer boyutlar 500 mm olarak alınmıştır. Çelik dış kenarlarına 0 hız sınır şartı tanımlanmıştır. Zırh çeliği modeli Şekil 3.1' de görülmektedir.



Şekil 3.1 Zırh çeliği modeli

3.1.2 Kompozit Modeli

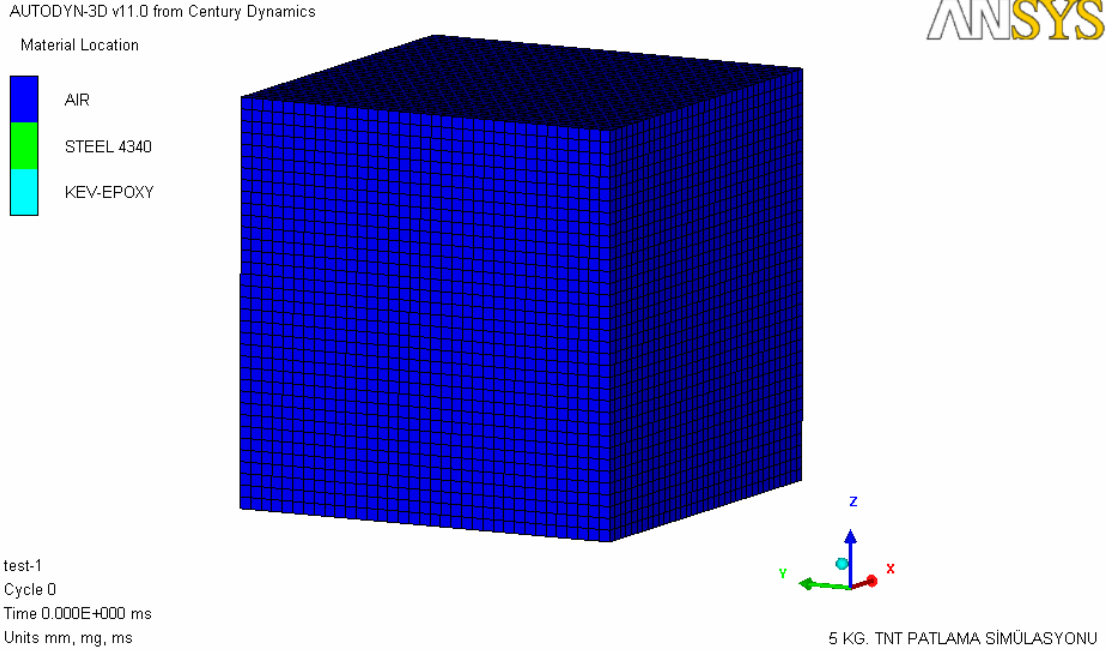
Kompozit malzemesi olarak ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcut bulunan Kevlar-Epoksi seçilmiştir. Malzeme özellikleri Ek-2' de verilmiştir. Kompozit plaka, kabuk (shell) olarak modellenmiştir. ANSYS AUTODYN programı kompozitlerin farklı katlarda modellenmesine izin vermektedir. Analizlerde kompozit modeli sırasıyla 0° , $0^{\circ}/90^{\circ}$, $45^{\circ}/-45^{\circ}$, $0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}$, 90° , $30^{\circ}/-30^{\circ}$, $+60^{\circ}/-60^{\circ}$ yönlerinde dizilmiş lif katlarından oluşturulmuştur. Model, 625 elemandan oluşmaktadır. Tüm analizlerde kalınlık 20 mm olarak sabit tutulmuş, diğer boyutlar 500 mm olarak alınmıştır. Kompozit dış kenarlarına 0 hız sınır şartı tanımlanmıştır. Kompozit modeli Şekil 3.2' de görülmektedir.



Şekil 3.2 Kompozit modeli

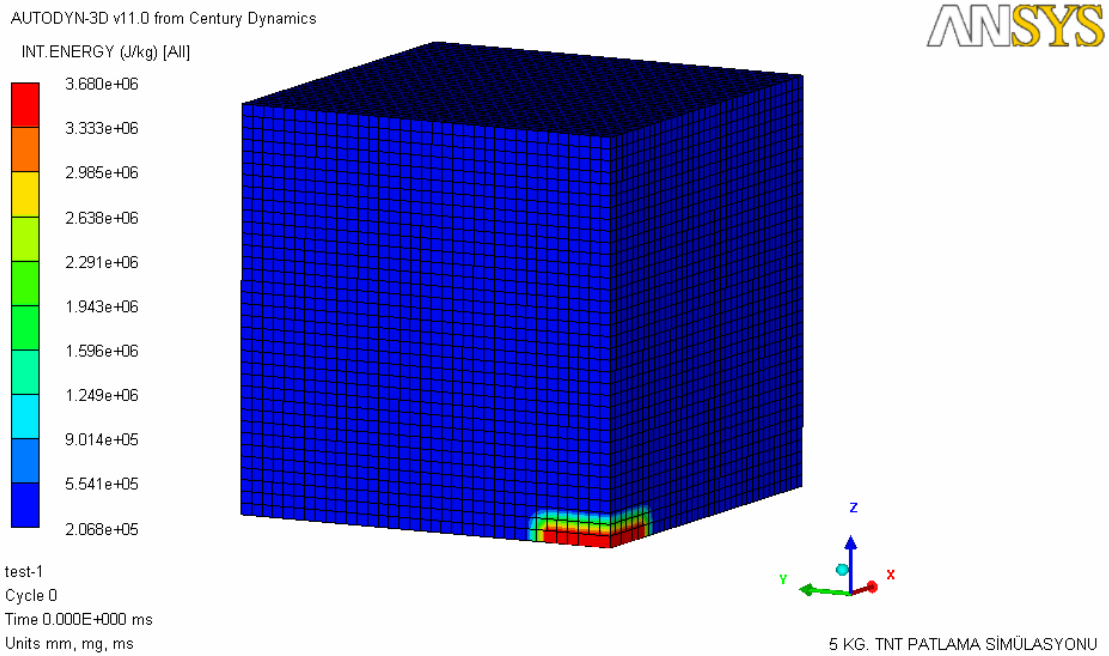
3.1.3 Hava ve Patlayıcı Modeli

Hava malzeme özellikleri ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcuttur. Malzeme özellikleri Ek-3' de verilmiştir. Hava, euler elemanlar kullanılarak kenar ölçüsü 700 mm. boyutlarında küp olarak modellenmiştir. Hava dış kenarlarına, iç enerji, basınç gibi patlayıcıdan meydana gelen etkilerin problemi terk etmesi için dışa akış sınır şartı tanımlanmıştır. Model, 42875 eleman kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Euler elemanlarla modellenmiş hava

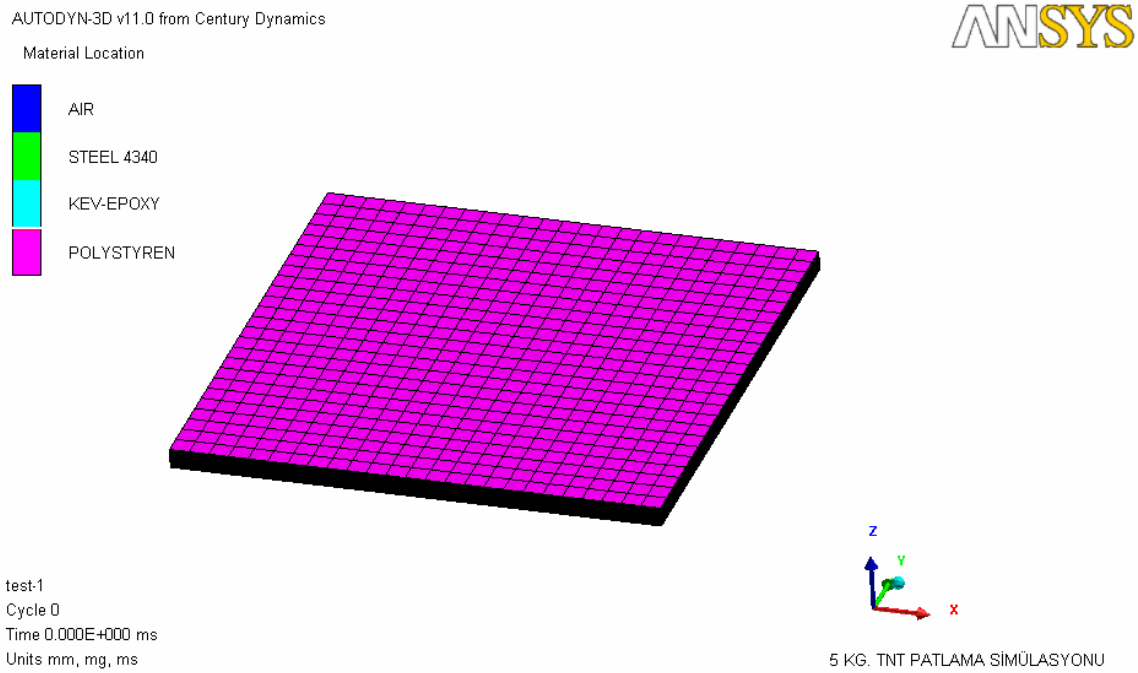
Patlayıcı olarak 5 kg. TNT kullanılmıştır. TNT malzeme özellikleri ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcut bulunmaktadır. Bu özelliklerden yola çıkılarak lagrange elemanlarla TNT' yi modellemek yerine, hava modelindeki 392 euler elemana yoğunluk olarak 1.63 g/cm^3 , iç enerji olarak $3.68 \times 10^6 \text{ J/kg}$. değeri girilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Patlayıcı modeli

3.1.4 Elastomer Modeli

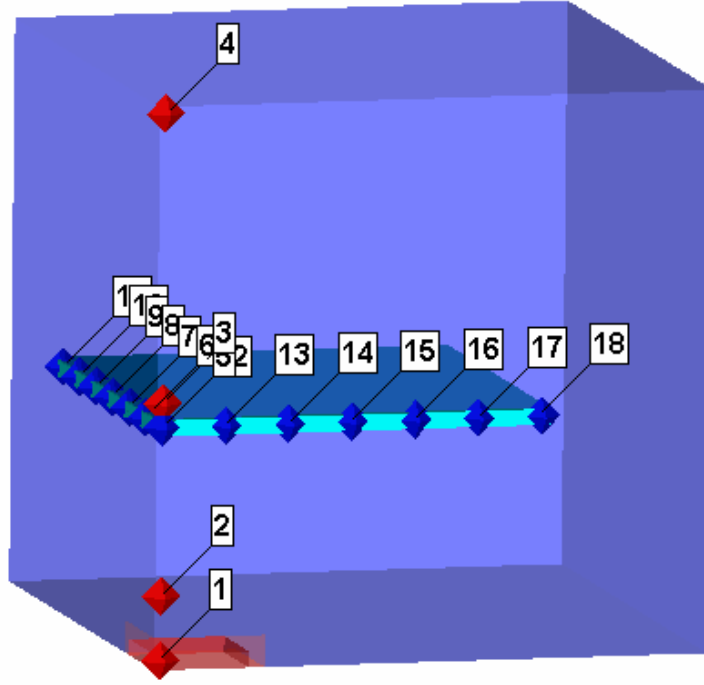
Elastomer olarak polistiren köpük kullanılmıştır. Bu tip malzemeler darbe sönümleyici olarak farklı alanlarda kullanılmaktadırlar. Polistiren malzeme özellikleri ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcuttur. Malzeme özellikleri Ek-5’ de verilmiştir. Polistiren köpük lagrange elemanlar kullanılarak sırasıyla 10 mm., 15 mm. ve 20 mm. kalınlığında, diğer boyutlar 500 mm. ölçüsünde modellenmiştir. Polistiren köpük dış kenarlarına 0 hız sınır şartı tanımlanmıştır. Model 25x25x20 olarak, toplam 12500 eleman kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Polistiren köpük modeli

3.1.5 Patlama Analizleri

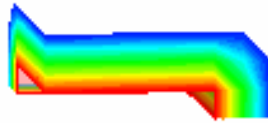
Patlama analizleri çelik, çelik-kompozit ve çelik-elastomer-kompozit olmak üzere üç ana zırh konfigürasyonu için yapılmıştır. Konfigürasyonlar kendi içlerinde farklı kombinasyonlarda hazırlanmışlardır. Tüm konfigürasyonlarda gerekli ölçümlerin yapılabilmesi için model üzerine gauge adı verilen sayaçlar yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Şekilde görülen kırmızı sayaçlar sabit olup hava içerisindeki basınç ölçümünü yapmak üzere yerleştirilmişlerdir. Mavi sayaçlar ise hareketli sayaçlar olup, çelik ve kompozitin hız ve deplasmanının ölçülmesi için kullanılmaktadırlar.



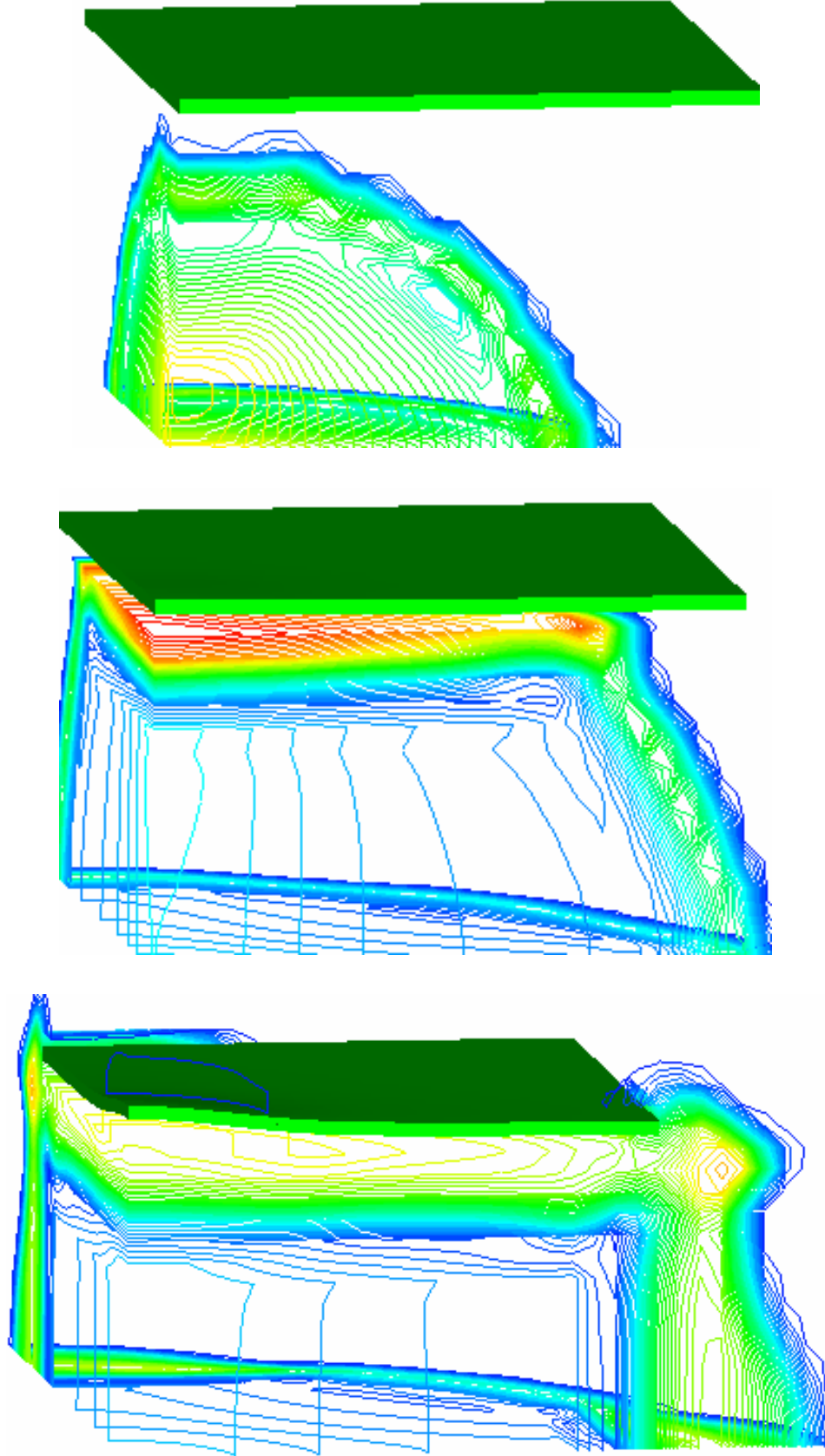
Şekil 3.6 Sayaçların model üzerindeki yerleşimi

3.1.6 Zırh Çeliği

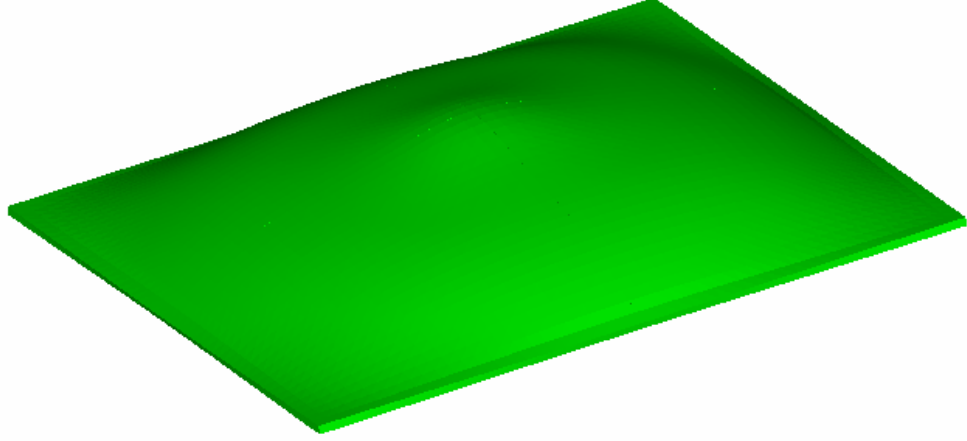
Zırh çeliği yerden 300mm. yükseklikte konumlandırılmış ve patlama gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7' de patlama testinin aşamaları ve patlama sonucu ortaya çıkan enerjinin çelik üzerinde yaptığı deformasyon görülmektedir.



Şekil 3.7 Zırh çeliği patlama simülasyonu

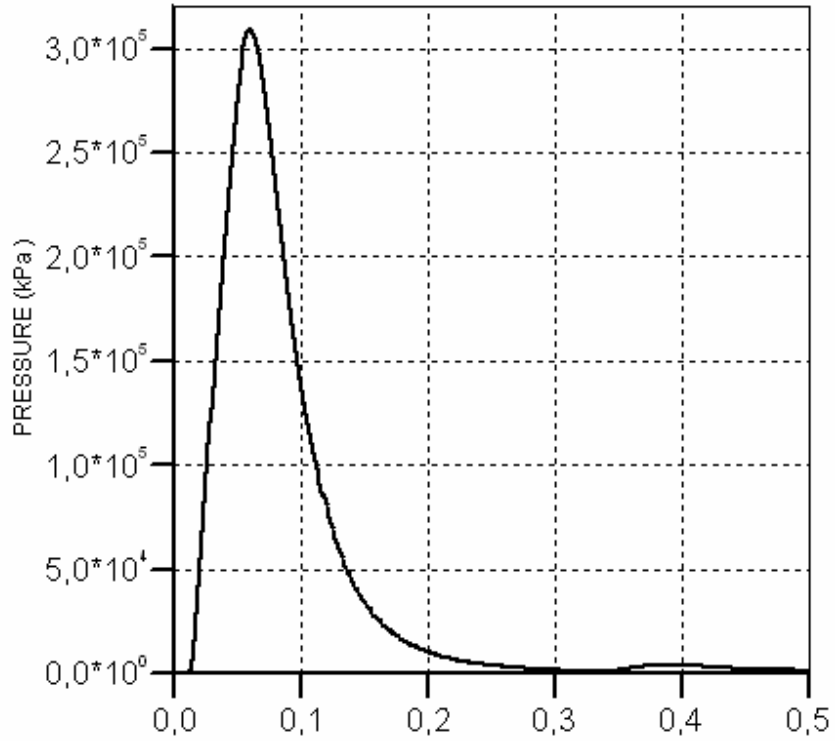


Şekil 3.7 Zırh çeliği patlama simülasyonu

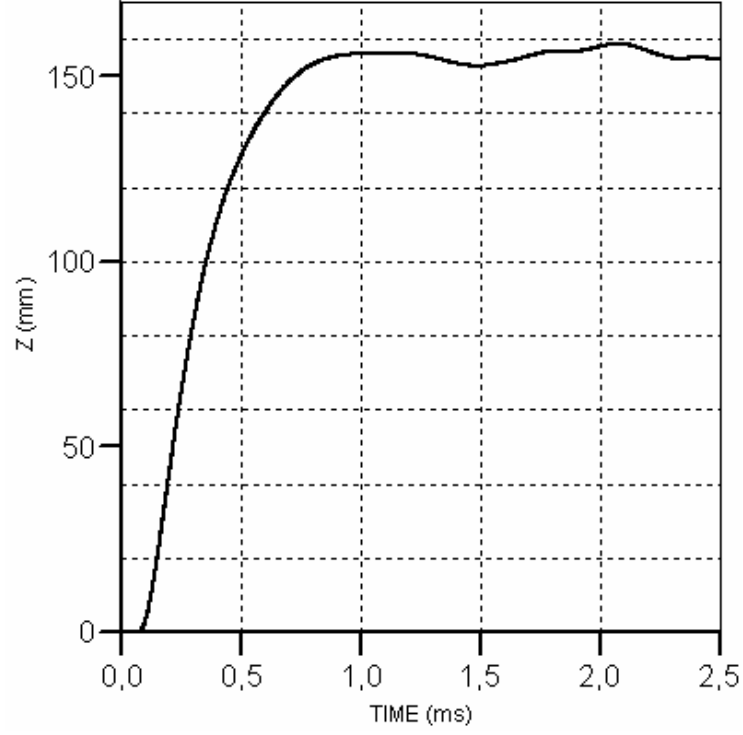


Şekil 3.7 Zırh çeliği patlama simülasyonu

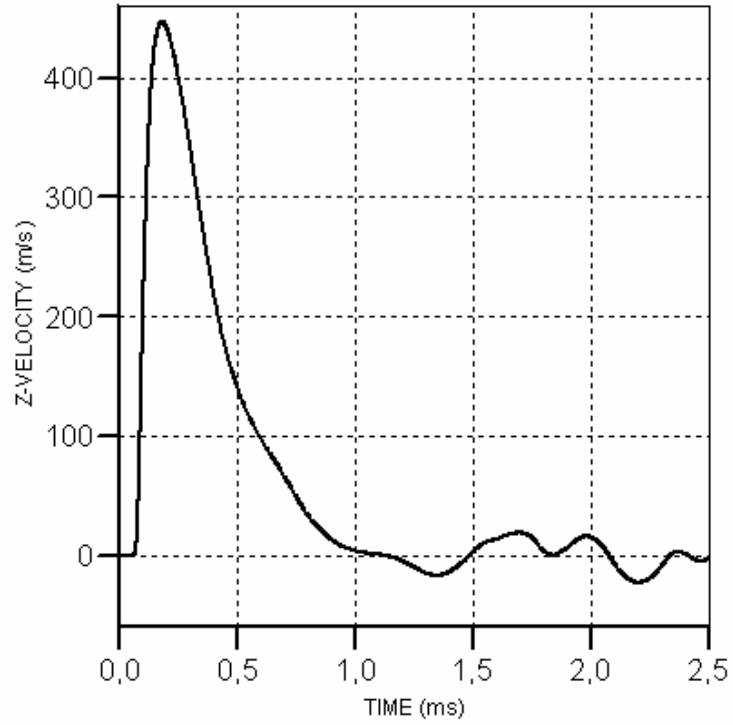
Patlama testi boyunca hava üzerindeki sayaçlardan basınç değeri (Şekil 3.8) ve çelik üzerindeki sayaçlardan deplasman ve hız değerleri alınmıştır (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).



Şekil 3.8 Patlama basıncı – zaman eğrisi



Şekil 3.9 Zırh çeliği deplasman – zaman eğrisi

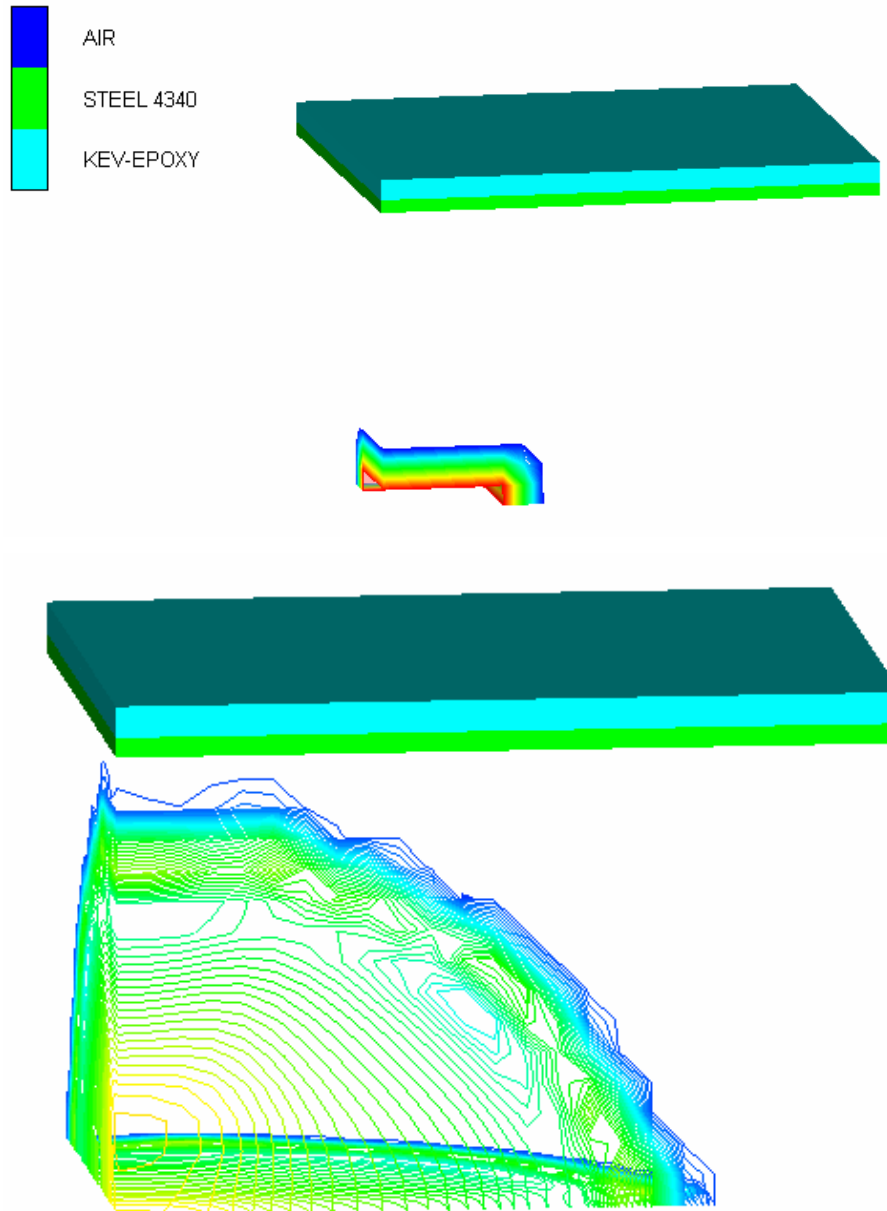


Şekil 3.10 Zırh çeliği hız – zaman eğrisi

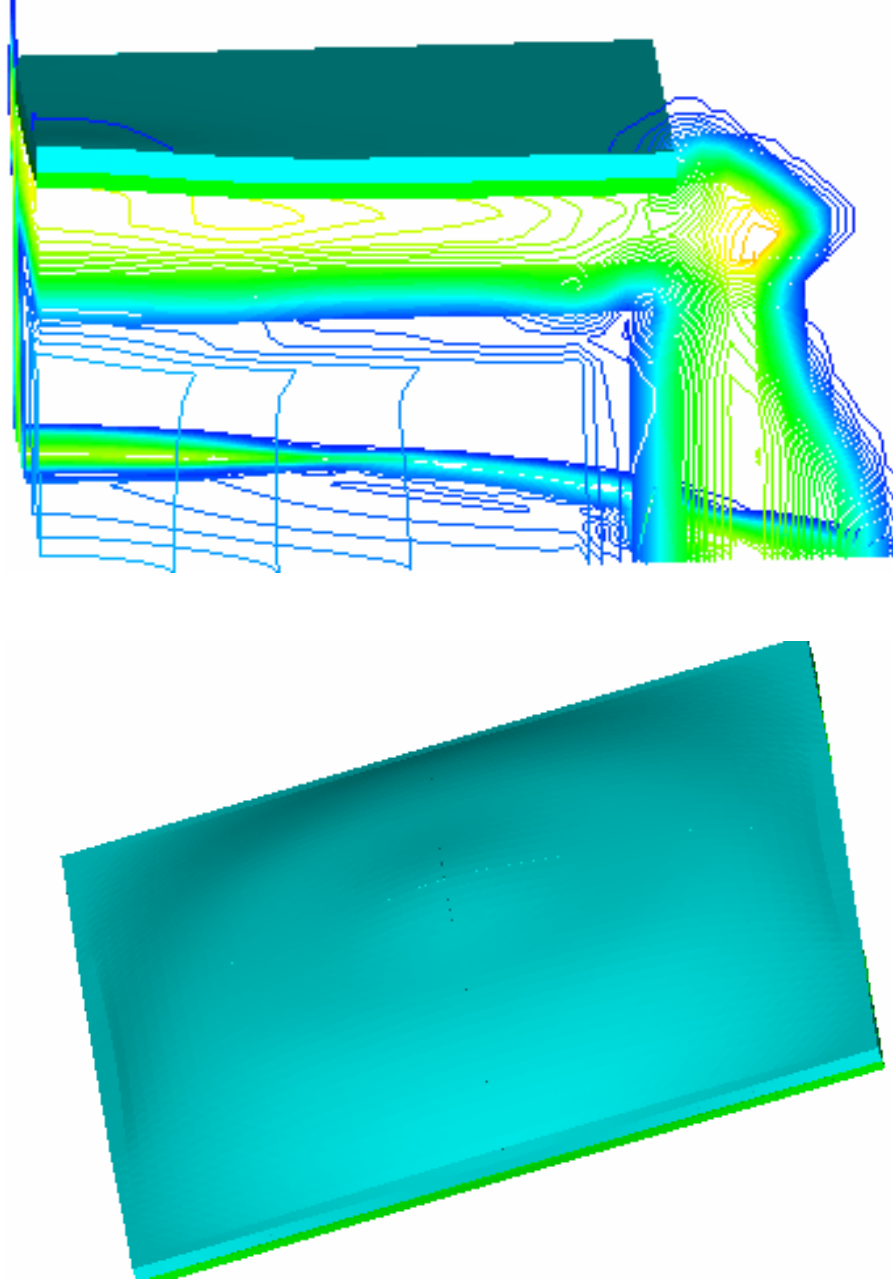
Grafiklerden de görüleceği gibi çeliğin en büyük deformasyonuna ait deplasman değeri 158,717 mm., çeliğin patlama etkisi ile yukarıya doğru deformasyon hızı 446,569 m/s. olarak gerçekleşmiştir.

3.1.7 Çelik – Kompozit Konfigürasyonu

Zeminden 300 mm. yükseklikte konumlandırılmış zırh çeliği üzerine farklı elyaf yönü dizilimindeki kevlar-epoksi kompozit malzeme rijit olarak bağlanmış ve patlama testleri yapılmıştır (Şekil 3.11).

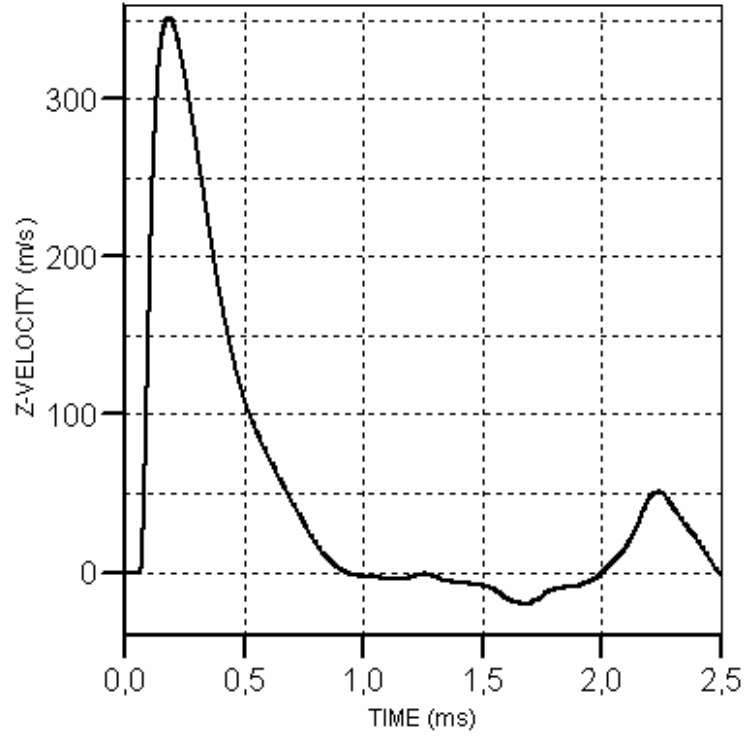
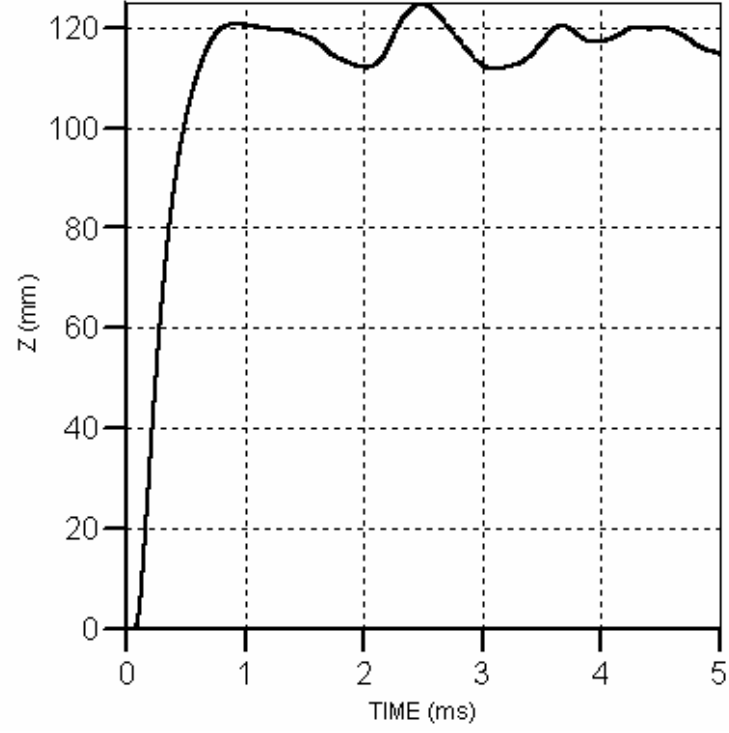


Şekil 3.11 Zırh çeliği – kompozit patlama simülasyonu

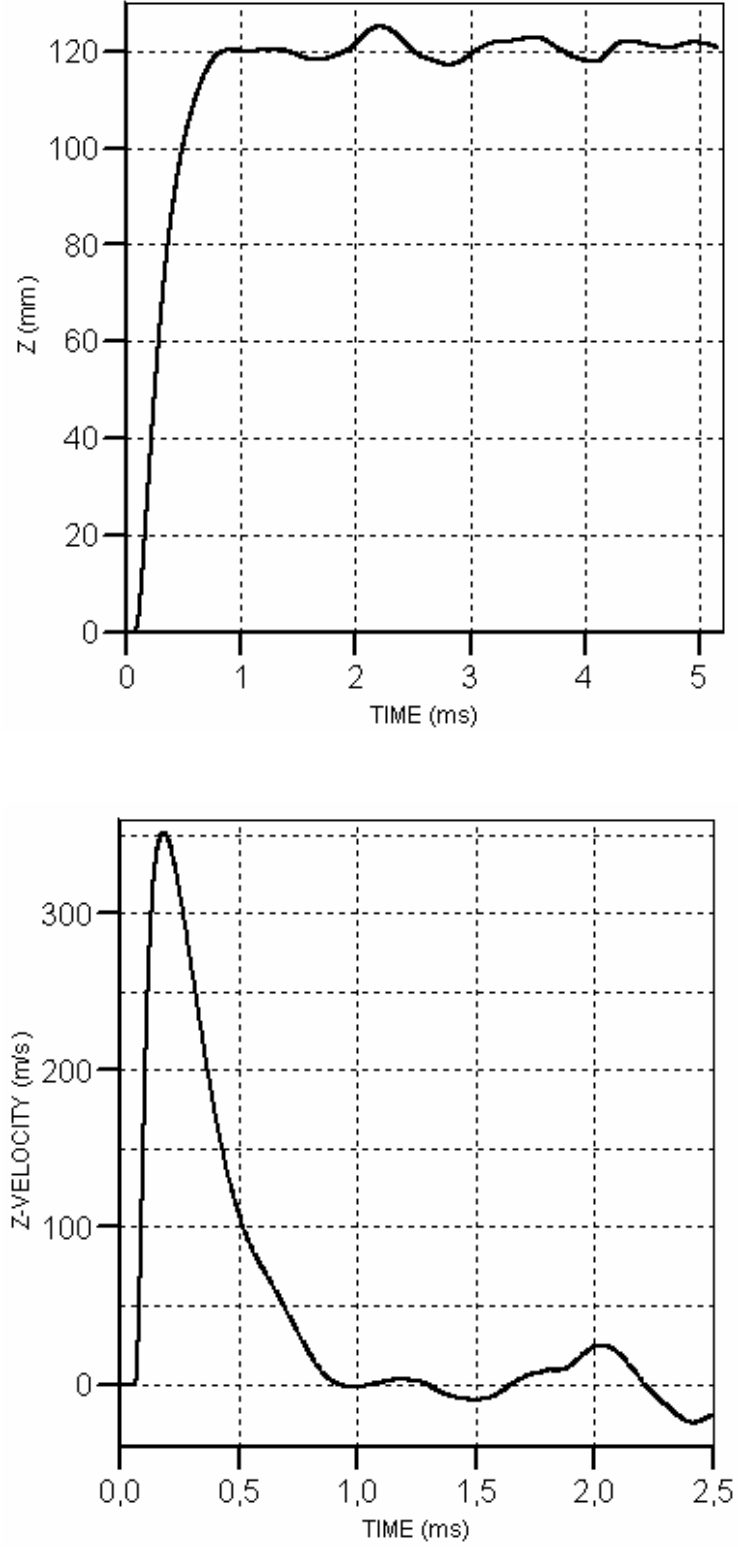


Şekil 3.11 Zırh çeliği – kompozit patlama simülasyonu

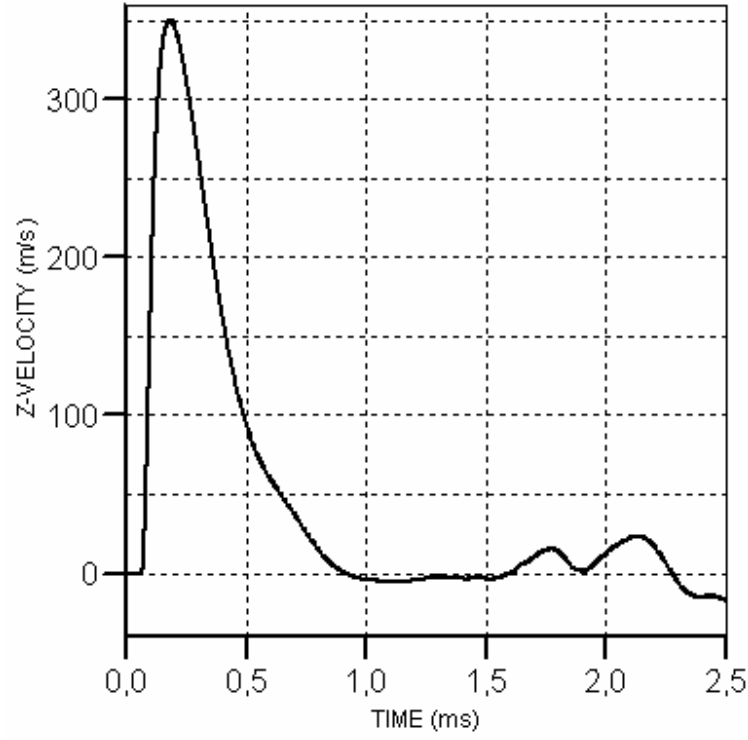
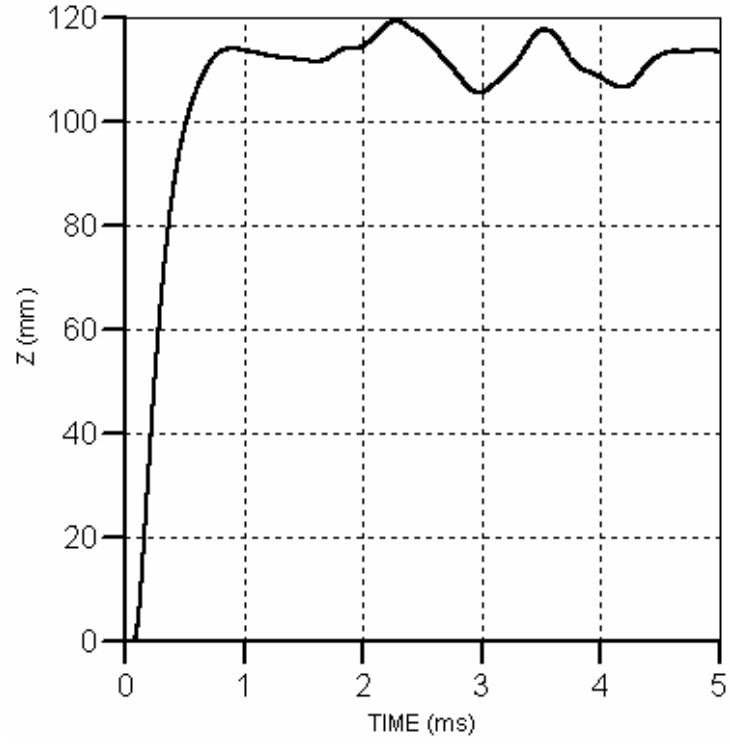
Patlama testi boyunca çelik ve kompozit üzerindeki sayaçlar yardımıyla deplasman ve hız değerleri alınmıştır (Şekil 3.12 - Şekil 3.18). Grafiklerden de görüleceği gibi zırh çeliği ile kompozit malzemenin patlama esnasındaki deformasyon hızı ve deplasmanı, kompozitin lif yönüne bağlı olarak Çizelge 3.3’ de sunulmuştur.



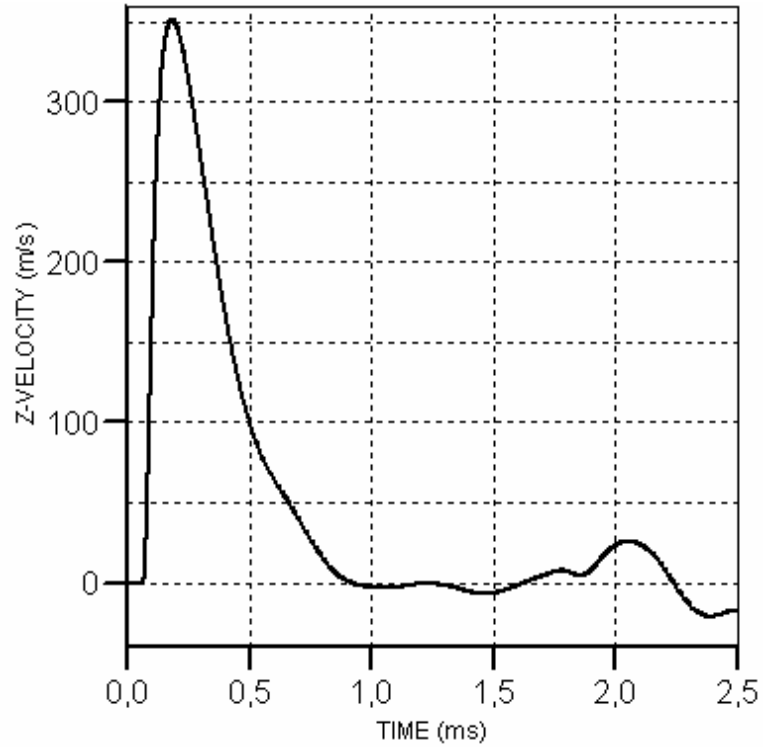
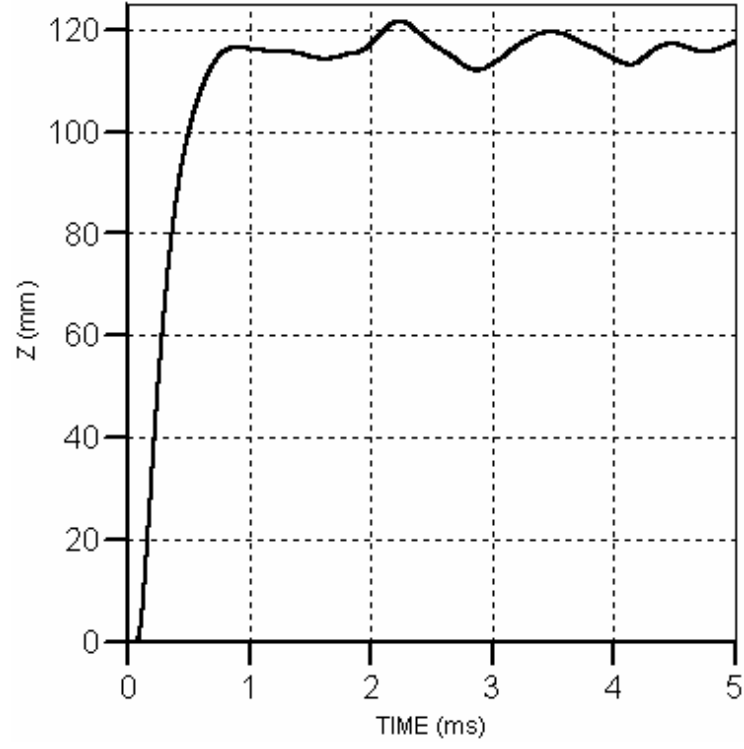
Şekil 3.12 Zırh çeliği – kompozit (0^0 Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



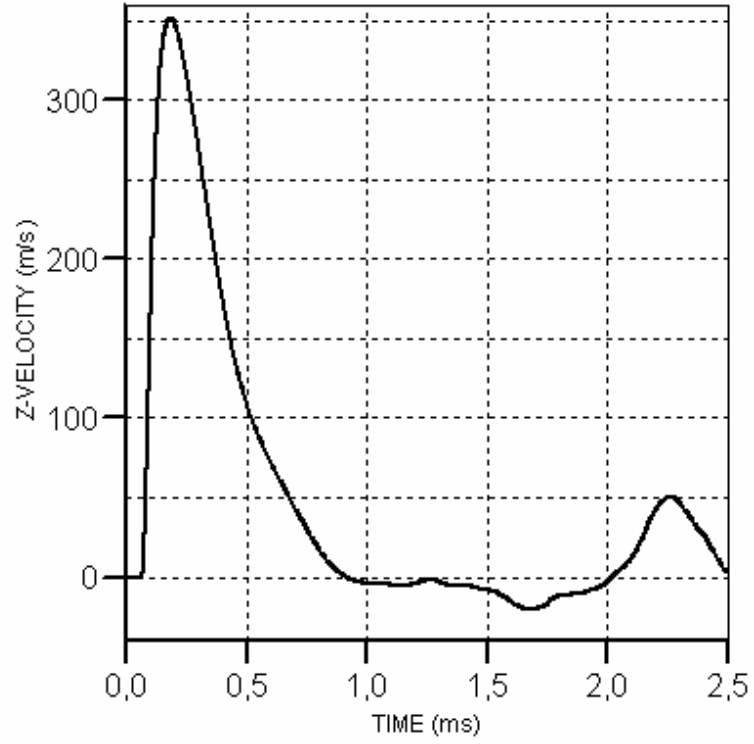
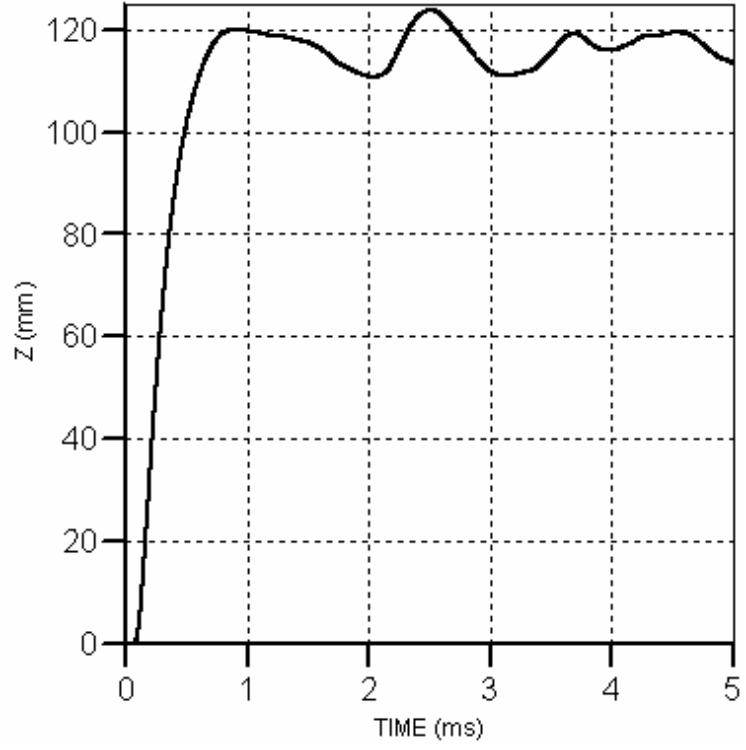
Şekil 3.13 Zırh çeliği – kompozit ($0^0/90^0$ Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



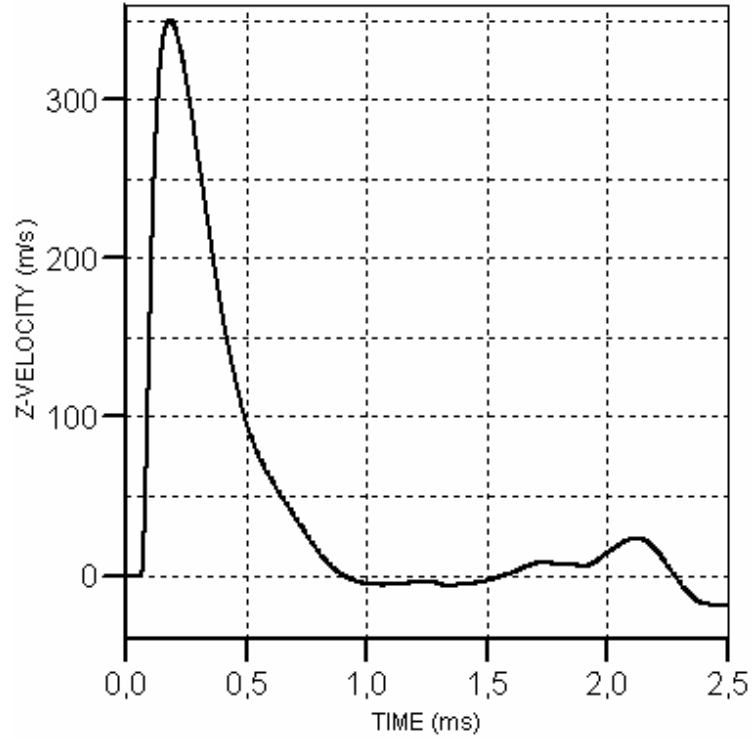
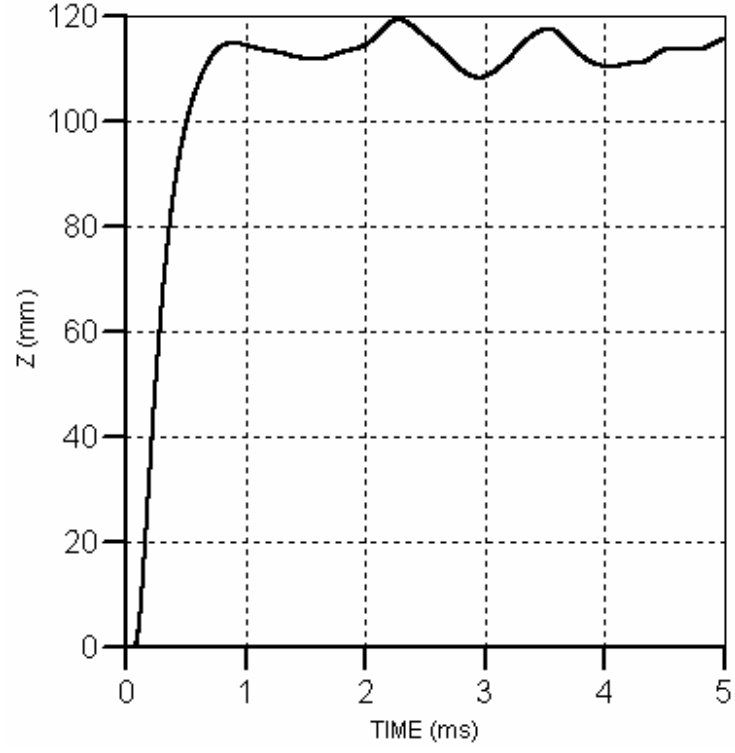
Şekil 3.14 Zırh çeliği – kompozit (45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



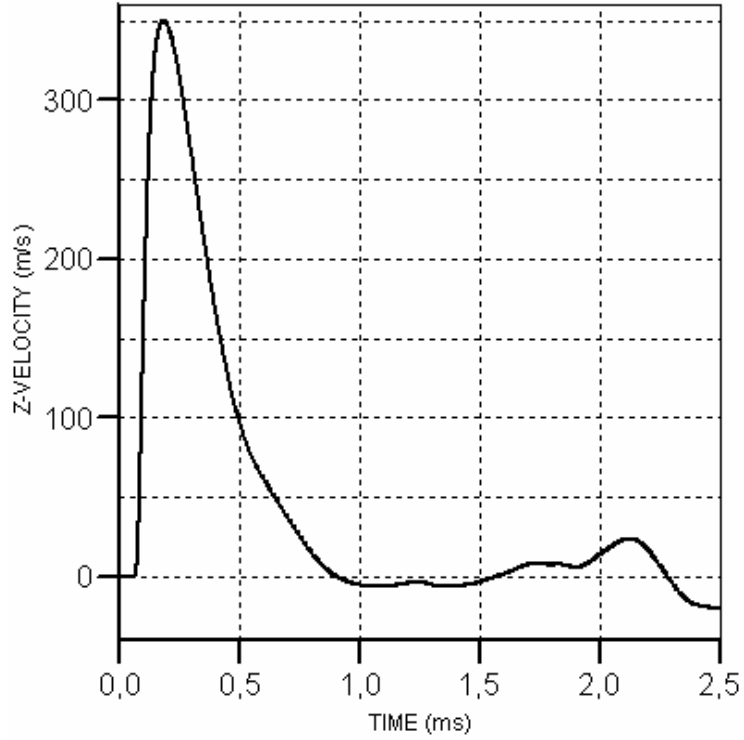
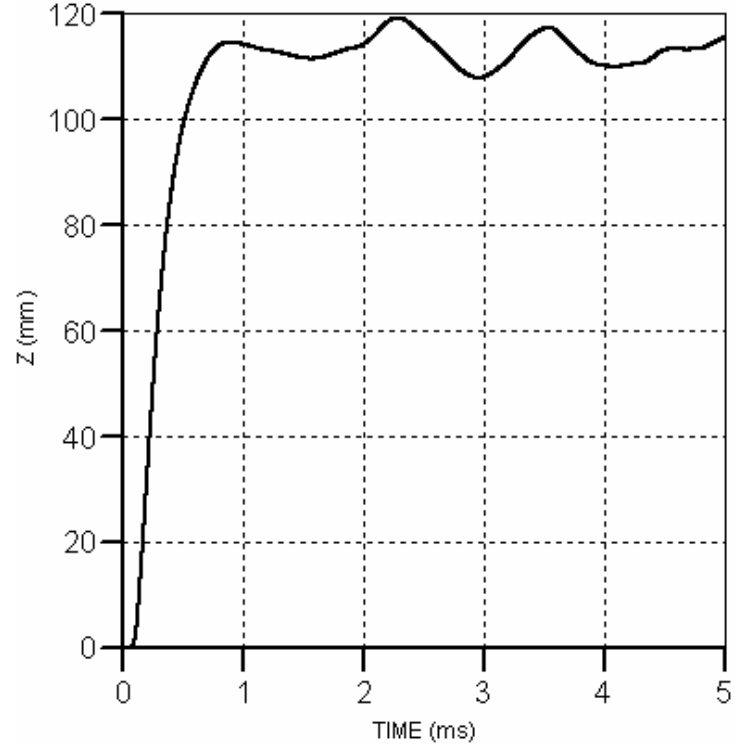
Şekil 3.15 Zırh çeliği – kompozit ($0^0 / 45^0 / -45^0 / 90^0$ Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



Şekil 3.16 Zırh çeliği – kompozit (90^0 Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



Şekil 3.17 Zırh çeliği – kompozit (30° / -30° Yönu) hız ve deplasman – zaman eğrileri



Şekil 3.18 Zırh çeliği – kompozit ($60^{\circ} / -60^{\circ}$ Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri

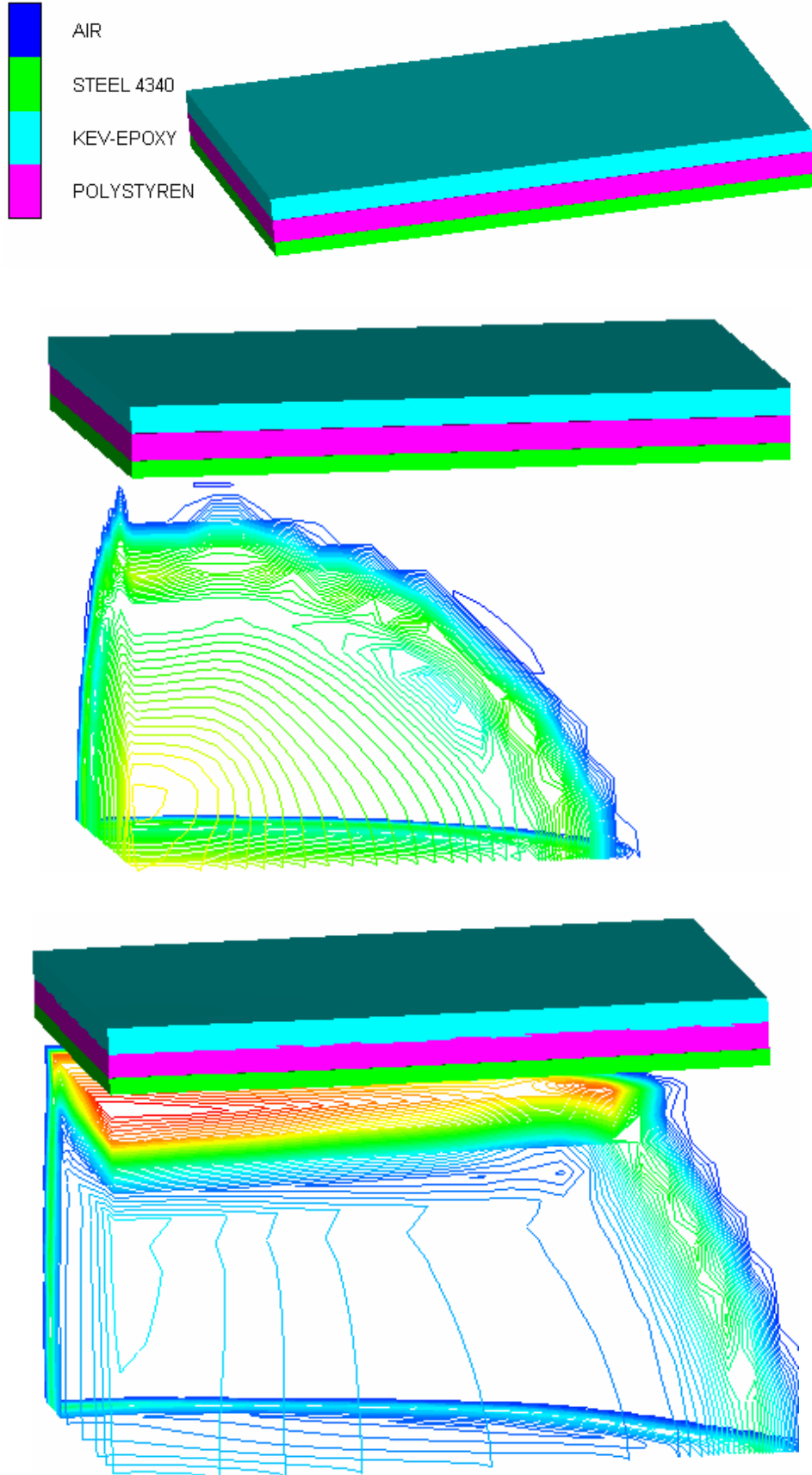
Çizelge 3.3 Zırh çeliği-kompozit konfigürasyonu deplasman ve deformasyon hızları

Konfigürasyon	Lif Yönü	Deplasman (mm)	Deformasyon Hızı (m/s)
Çelik	---	158,717	446,569
Çelik- Kompozit	0 ⁰ Yönü	124,585	351,571
Çelik- Kompozit	0 ⁰ / 90 ⁰ Yönü	125,022	351,550
Çelik- Kompozit	+45 ⁰ / -45 ⁰ Yönü	119,212	349,940
Çelik- Kompozit	0 ⁰ / +45 ⁰ / -45 ⁰ / 90 ⁰ Yönü	121,597	351,092
Çelik- Kompozit	90 ⁰ Yönü	123,668	351,573
Çelik- Kompozit	+30 ⁰ / -30 ⁰ Yönü	119,171	350,257
Çelik- Kompozit	60 ⁰ / -60 ⁰ Yönü	119,085	350,261

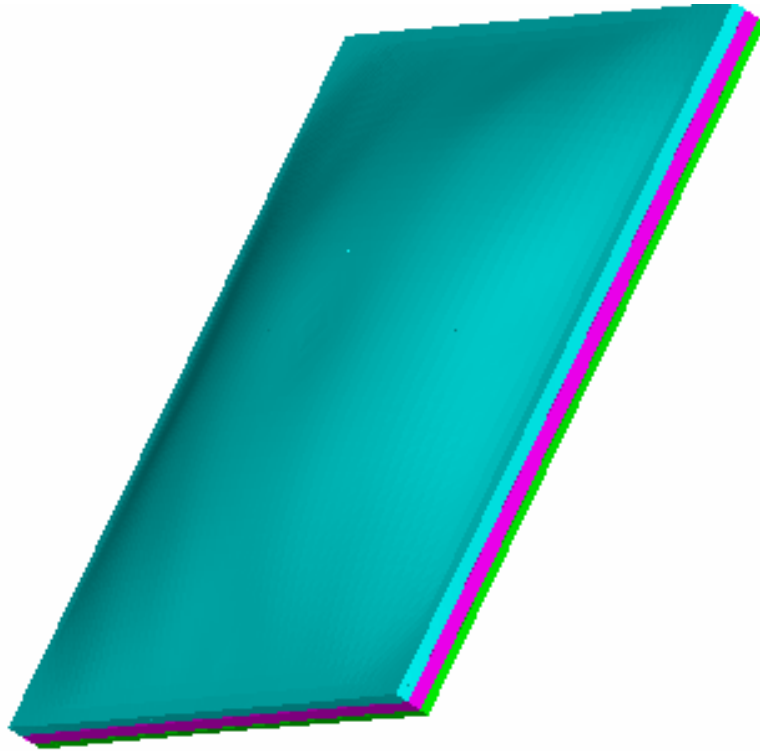
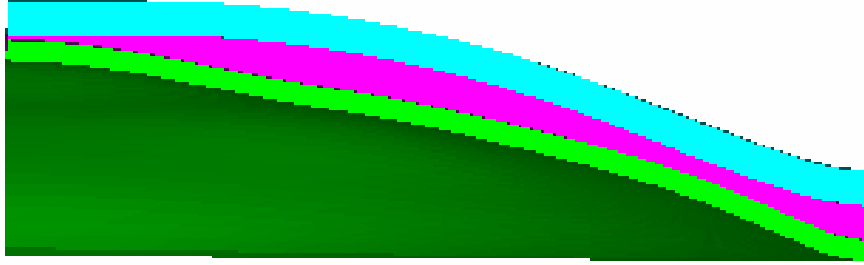
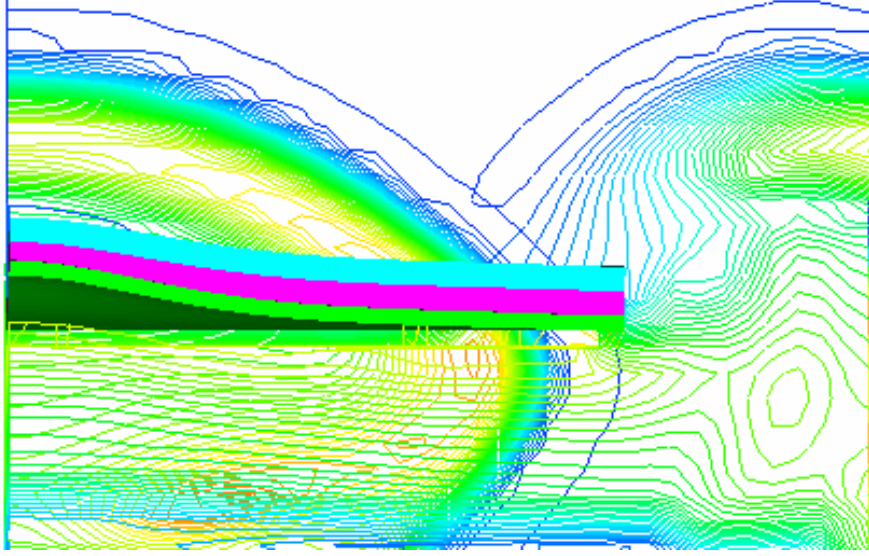
Çizelge 3.3' den görüldüğü gibi en düşük deplasman lif yönünün 60⁰ / -60⁰ olduğu durumda gerçekleşmiş, en düşük deformasyon hızı ise lif yönünün +45⁰ / -45⁰ olduğu durumda meydana gelmiştir. Araç tabanlarında kullanılacak zırhlarda istenilen genel özellik düşük deformasyon hızı dolayısı ile düşük ivme değerlerdir.

3.1.8 Zırh Çeliği – Elastomer – Kompozit Konfigürasyonu

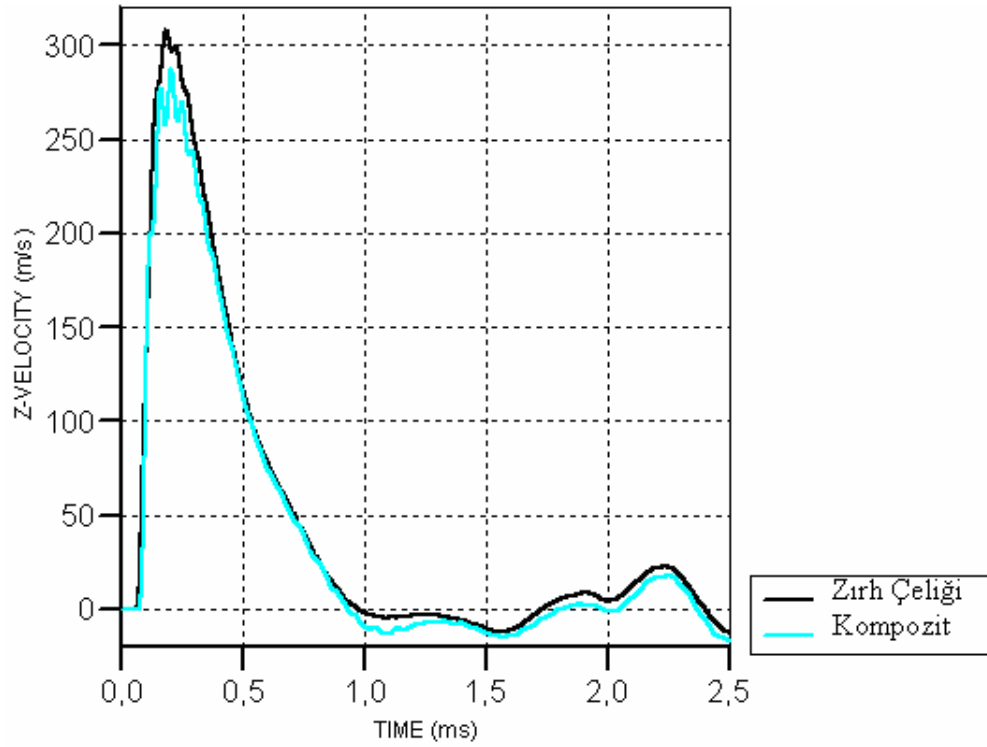
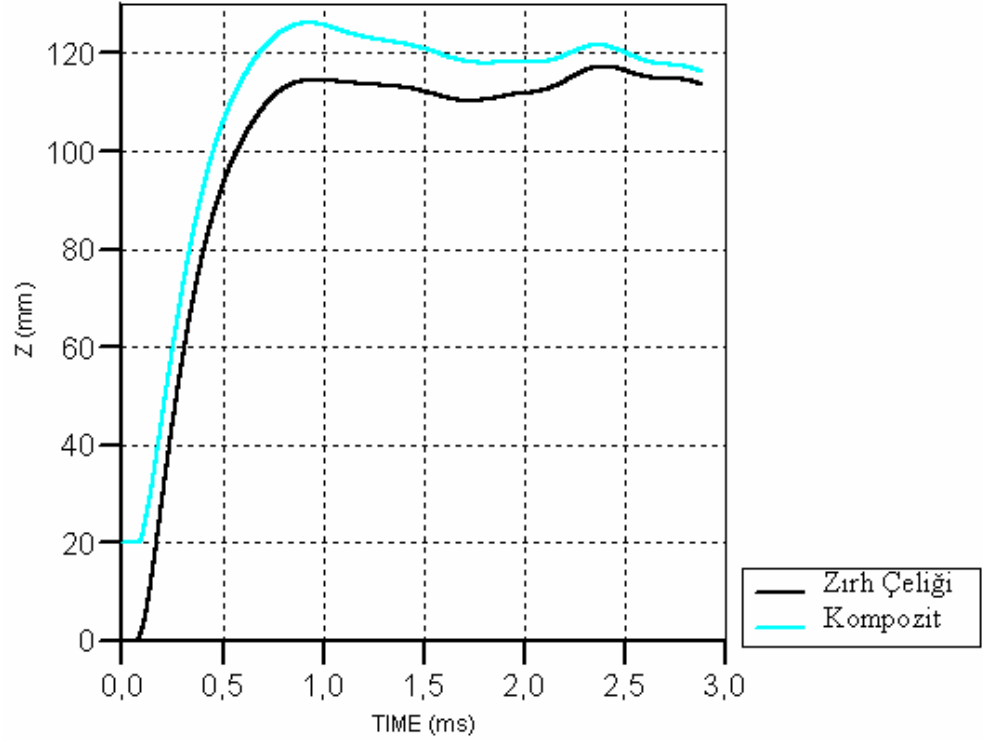
Zırh çeliği – kompozit konfigürasyonu için farklı lif yönlerine sahip kompozit üzerinde yapılan testlerde en düşük deformasyon hızı değeri +45⁰ / -45⁰ yönündeki lif dizilimi için elde edilmiştir. Bu nedenle zırh çeliği – elastomer – kompozit konfigürasyonunda kompozit malzeme için +45⁰ / -45⁰ yönündeki lif dizilimi kullanılmıştır. Elastomer malzeme olarak üç farklı testte 10mm., 15 mm., 20 mm. kalınlığa sahip polistiren köpük kullanılmıştır. Şekil 3.19' da patlamanın malzemeler üzerindeki etkileri net olarak görülebilmektedir. Polistiren köpük, sıkışarak enerjinin bir kısmını üzerinde sönmülemiş ve böylece kompozit daha az deformasyona uğramıştır. Şekil 3.20-3.22' de farklı kalınlığa sahip zırh konfigürasyonlarına ait deplasman, deformasyon hızı, zaman eğrileri görülmektedir. Siyah çizgiler zırh çeliği üzerindeki, mavi çizgile ise kompozit üzerindeki sayaçlar tarafından elde edilmiş verileri göstermektedir.



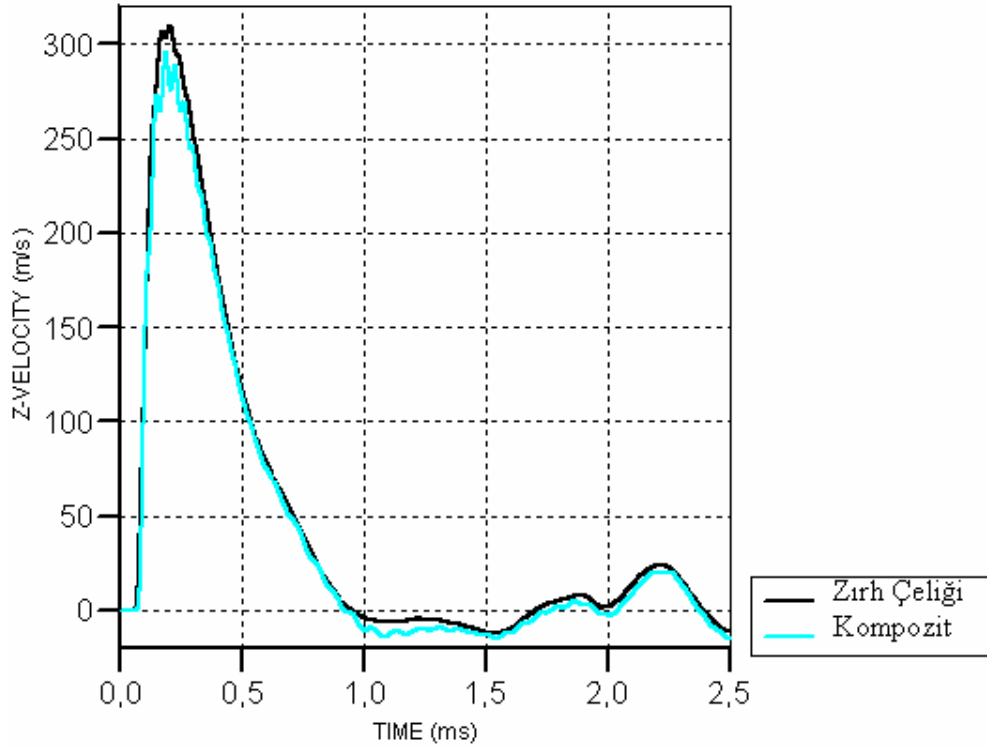
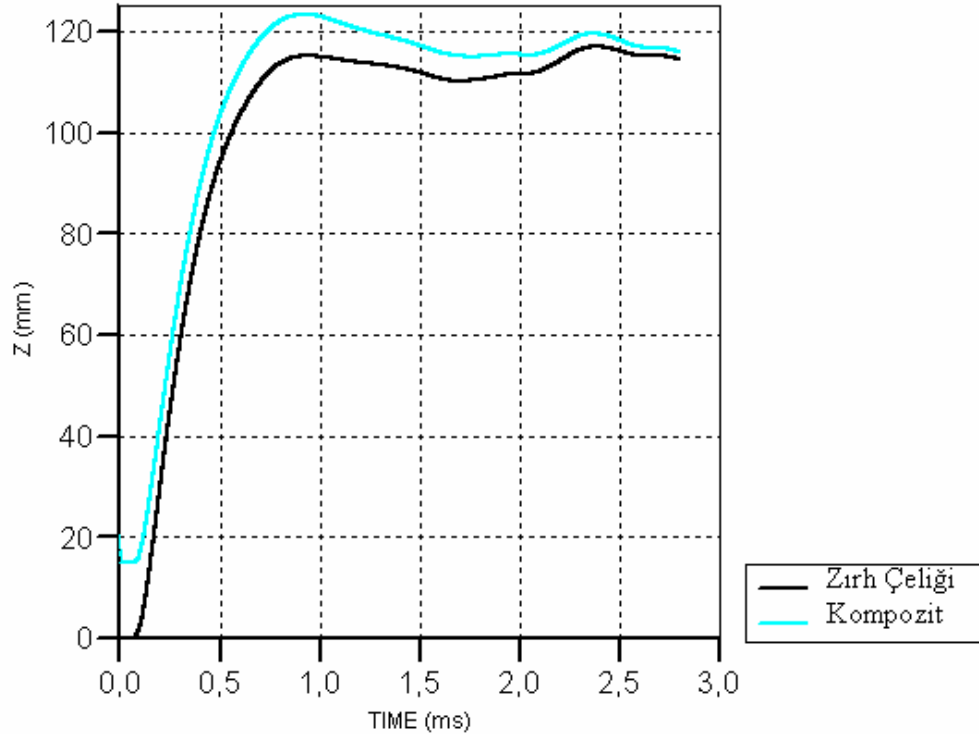
Şekil 3.19 Zırh çeliği - elastomer - kompozit (+45⁰ / -45⁰ Yönü) patlama simülasyonu



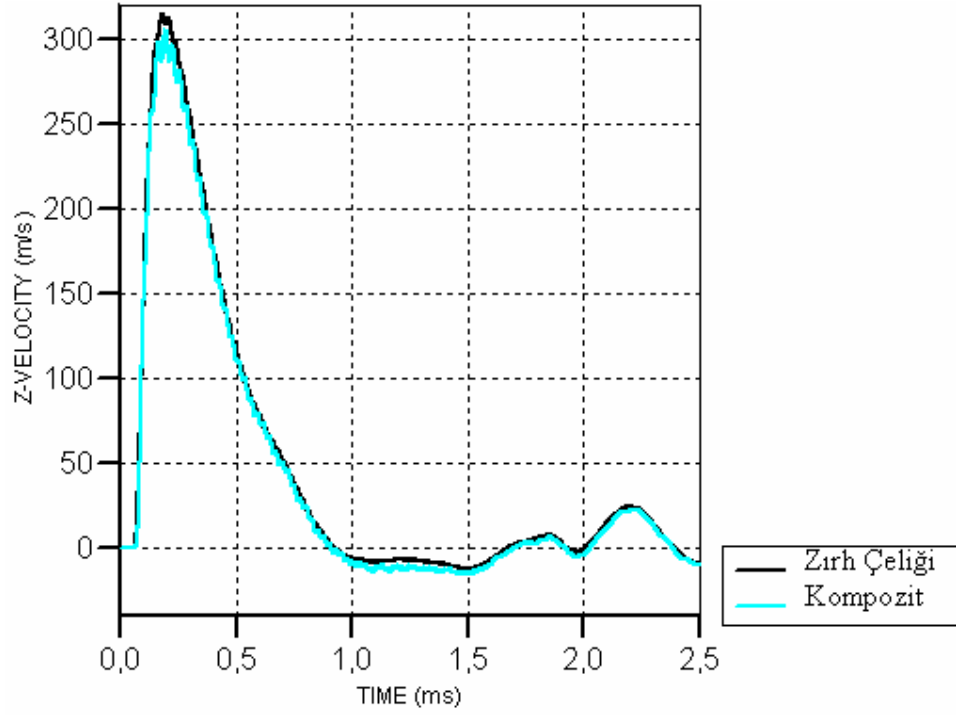
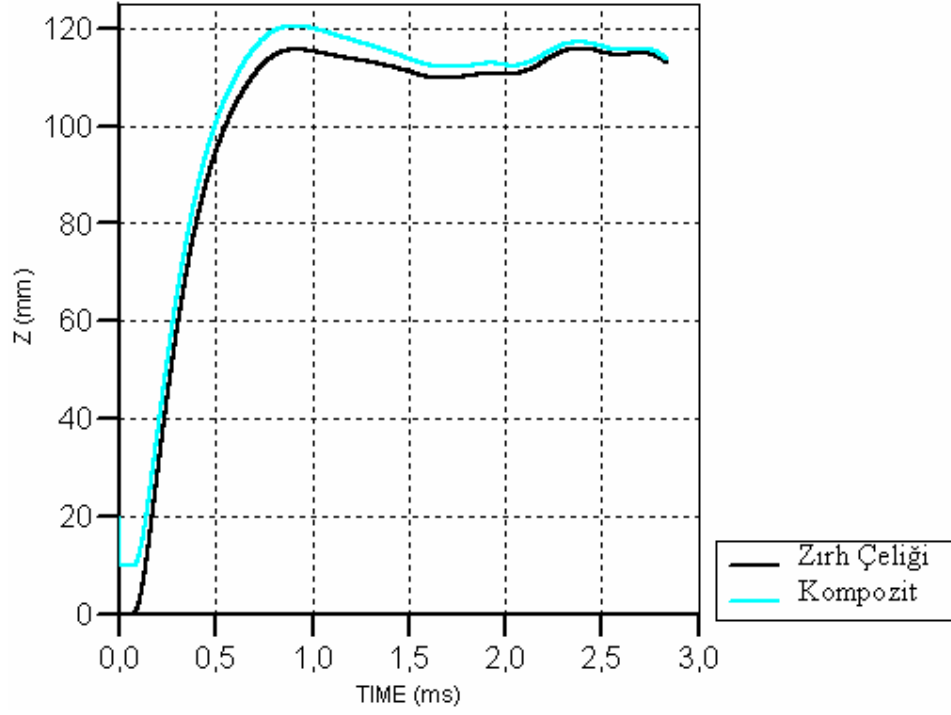
Şekil 3.19 Zırh çeliği - elastomer - kompozit (+45° / -45° Yönü) patlama simülasyonu



Şekil 3.20 Zırh çeliği - elastomer (kalınlık 20 mm.) - kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



Şekil 3.21 Zırh çeliği – elastomer (kalınlık 15 mm.) - kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri



Şekil 3.22 Zırh çeliği - elastomer (kalınlık 10 mm.) - kompozit (+45° / -45° Yönü) hız ve deplasman – zaman eğrileri

Şekil 3.19-22' deki deplasman ve deformasyon hızı –zaman grafikleri incelendiğinde polistiren köpük kalınlığının artmasıyla doğal olarak kompozit malzemenin deplasmanının ve deformasyon hızının azaldığı görülmektedir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Zırh çeliği - elastomer - kompozit konfigürasyonu deplasman ve deformasyon hızları

Konfigürasyon	Lif Yönü	Deplasman (mm)	Deformasyon Hızı (m/s)
Çelik	---	158,717	446,569
Çelik - Kompozit	+45 ⁰ / -45 ⁰ Yönü	119,212	349,94
Çelik – Elastomer (20 mm.) - Kompozit	+45 ⁰ / -45 ⁰ Yönü	106,18	287,41
Çelik – Elastomer (15 mm.) - Kompozit	+45 ⁰ / -45 ⁰ Yönü	108,31	295,46
Çelik – Elastomer (10 mm.) - Kompozit	+45 ⁰ / -45 ⁰ Yönü	110,41	305,76

4. SONUÇLAR

Çelik – kompozit katmanlı zırh malzemelerinin mayın patlaması karşısındaki davranışını incelemek maksadıyla yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Çelik – kompozit katmanlı zırh malzemelerinin mayın patlaması karşısındaki dinamik davranışını incelemek maksadıyla ilk olarak 12,7 mm. kalınlığındaki zırh çeliği tek başına modellenmiş ve 5 kg.lık TNT karşısındaki deplasman ve deformasyon hızları bulunmuştur. Daha sonra aynı kalınlıktaki çeliğin üzerine farklı yönlerde dizilmiş lif katmanlarından oluşan 20 mm. kalınlığa sahip kompozit malzeme rijit bağlanarak testler tekrar edilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde (Çizelge 3.3), bu tip zırh konfigurasyonunun kompozit malzemelerin dizilim yönüne bağlı olarak yaklaşık 40 mm. daha az deplasman gösterdiği ve deformasyon hızının yaklaşık 100 m/s azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan testlerde deformasyon hızı dikkate alındığında ANSYS AUTODYN malzeme kütüphanesinde mevcut bulunan Kevlar – Epoksi malzemesi için en uygun lif yönü diziliminin $+45^0 / -45^0$ yönü olduğu gözlenmiştir.

Çalışmanın son bölümünde 12,7 mm. kalınlığa sahip zırh çeliği ile 20 mm. kalınlığa sahip $+45^0 / -45^0$ yönündeki liflerden oluşan kompozit malzeme arasına sırasıyla 20 mm., 15 mm. ve 10 mm. kalınlığında polistiren köpük tabaka konularak testler tekrarlanmıştır. Polistiren köpüğün ezilerek patlama sonucu ortaya çıkan kinetik enerjinin bir bölümünü emdiği, böylece kompozit malzemenin deplasmanının; yalnız çeliğe göre yaklaşık 53 mm., çelik – kompozit katmanlı olana göre 13 mm. azaldığı, deformasyon hızının; yalnız çeliğe göre yaklaşık 159 m/s ve çelik-kompozit katmanlı olana göre 62,5 m/s azaldığı tespit edilmiştir (Çizelge 3.4).

Elde edilen veriler ışığında, mayın patlamasına karşı yalnız çelik malzemeler yerine çelik - kompozit veya çelik - elastomer köpük - kompozit katmanlı malzemelerin kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmektedir. Farklı malzeme özelliklerine sahip kompozitlerin ve farklı mekanik değerlere sahip köpük malzemelerin ve bunların farklı kalınlıklarının yapılacak nümerik testlerle optimize edilerek deplasman ve deformasyon hızı büyüklüklerinin istenilen değerlere indirilebileceği değerlendirilmektedir. Elastomer köpük ve kompozit malzemeler kullanılarak belirli bir koruma seviyesine sahip zırhın, daha az çelik kalınlığı ile sağlanması böylece zırh ağırlığının düşürülmesi bir başka çözüm önerisidir.

KAYNAKLAR

Adamik V., Vageknecht J., Vavra P. ve Trzcinski W.A., (2004), "Effect Of TNT Charges Orientation On Generated Air Blast Waves-Numerical Simulation Using Ls-Dyna", 7th International Seminar, New Trends in Research of Energetics Materials, University of Pardubice, Proc.- part II, 393-402.

ANSYS AUTODYN Theory Manual

Björklund O., (2008), "Modelling Of Failure", Master Thesis carried out at Division of Solid Mechanics, Linköpings University

Black G., (2006) "Computer Modeling Of Blast Loading Effects On Bridges", NSF-REU University of Delaware, Newark, Delaware USA

Brill A., Cohen B. ve Dubouis P.A., (2006), "Simulation Of A Mine Blast Effect On The Occupants Of An APC", 6th European LS-DYNA Users Conference, 28-30 May 2006, Sweden

Composite Modeling In ANSYS AUTODYN

Corbett B.M., (2006), "Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity into elevated and room temperature bumpers", International Journal of Impact Engineering 33, 431-440

De Rosa V., Friis J. ve L.A. Louca, (2003), "Nonlinear Analysis Of Stainless Steel Corrugated Panels Under Blast Loading: A Numerical Study", Research Report 102, Health & Safety Executive, United Kingdom.

Fiserova D., (2006), "Numerical Analyses Of Buried Mine Explosions With Emphasis On Effect Of Soil Properties On Loading", Phd Thesis Defence College Of Management And Technology, Cranfield University

Grujicic M., Pandurangan B., Haque I., Cheeseman B.A., Roy W.N. ve Skaggs R.R., (2007), "Computational Analysis Of Mine Blast On A Commercial Vehicle Structure", Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Volume 3, Number 4, 2007 , pp. 431-460(30)

Gupta A.D., (1999), "Estimation Of Vehicle Floor Plate Loading And Response Due To Detonation Of A Mine Shallow-Buried In Dry Sand And Wet Tuff", US Army Ground Vehicle Survivability Symposium, March 29-April 1999, USA.

Johnson G. R. ve Cook W. H., (1983), "A Constitutive Model And Data For Metals Subjected To Large Strains, High Strain Rates And High Temperatures", Presented at the Seventh International Symposium on Ballistics, Hague.

Kurtaran H., Büyük M. ve Bedewi N.E., (2004), "Chevrolet C2500 Pikap Aracının Mayın Patlaması Altındaki Dinamik Davranışının Bilgisayar Ortamında Simülasyonu", SAVTEK 2004 Savunma Teknolojileri Kongresi, 24-25 Haziran 2004, ODTÜ, Ankara

Tabiei A. ve Nilakantan G., (2006), "Reduction of acceleration induced injuries from mine blast under infantry vehicles", 6th European LS-DYNA Users Conference, 28-30 May 2006, Sweden

Tuncer B., Tezcan E., Kuntay A. ve Garcia J., (2002) "Patlayıcıların Zırhlı Araç Yapıları Üzerine Etkisinin Araştırılması" SAVTEK 2002 Savunma Teknolojileri Kongresi, 24-25 Ekim 2002, ODTÜ, Ankara

Williams K., (2002), "Numerical Simulation Of Light Armoured Vehicle Occupant Vulnerability To Anti-Vehicle Mine Blast", 7th International LS-DYNA Users Conference, 19- 21 May 2002, Dearborn, Michigan

Wong W., Horsfall I., Champion S.M. ve Watson C.H., (2001), "The Effect Of Matrix Type On The Ballistic And Mechanical Performance Of E-Glass Composite Armour", 19th International Symposium of Ballistics, 7-11 May 2001, Interlaken, Switzerland

EKLER

- Ek-1 AISI 4340 elięi Malzeme zellikleri
- Ek-2 Kevlar-Epoksi Malzeme zellikleri
- Ek-3 Hava Malzeme zellikleri
- Ek-4 TNT Malzeme zellikleri
- Ek-5 Polistiren Malzeme zellikleri

Ek-1 AISI 4340 Çeliği Malzeme Özellikleri

Equation of State	Linear
Reference density	7.83000E+00 (g/cm ³)
Bulk Modulus	1.59000E+08 (kPa)
Reference Temperature	3.00000E+02 (K)
Specific Heat	4.77000E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	Johnson Cook
Shear Modulus	8.18000E+07 (kPa)
Yield Stress	7.92000E+05 (kPa)
Hardening Constant	5.10000E+05 (kPa)
Hardening Exponent	2.60000E-01 (none)
Strain Rate Constant	1.40000E-02 (none)
Thermal Softening Exponent	1.03000E+00 (none)
Melting Temperature	1.79300E+03 (K)
Ref. Strain Rate (/s)	1.00000E+00 (none)
Strain Rate Correction	1st Order
Failure	None
Erosion	Plastic Strain
Erosion Strain	2.00000E-01 (none)
Reference:	Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson & Cook

Ek-2 Kevlar-Epoksi Malzeme Özellikleri

Equation of State	Ortho
Reference density	1.65000E+00 (g/cm ³)
Stiffness	Stiffness Matrix
C11	3.42500E+06 (kPa)
C22	1.35000E+07 (kPa)
C33	1.35000E+07 (kPa)
C12	1.14000E+06 (kPa)
C23	1.20000E+06 (kPa)
C31	1.14000E+06 (kPa)
Shear Modulus 12	1.00000E+06 (kPa)
Shear Modulus 23	1.00000E+06 (kPa)
Shear Modulus 31	1.00000E+06 (kPa)
Material axes	I-J-K Space
Rotation angle about 11 (degrees)	0.00000E+00 (none)
Volumetric response	Linear
Strength	Elastic
Shear Modulus	1.00000E+06 (kPa)
Failure	Material Stress/Strain
Tensile Failure Stress 11	1.00000E+20 (kPa)
Tensile Failure Stress 22	1.00000E+20 (kPa)
Tensile Failure Stress 33	1.00000E+20 (kPa)
Maximum Shear Stress 12	1.00000E+20 (kPa)
Maximum Shear Stress 23	1.01000E+20 (kPa)
Maximum Shear Stress 31	1.01000E+20 (kPa)
Tensile Failure Strain 11	1.00000E-02 (none)
Tensile Failure Strain 22	8.00000E-02 (none)
Tensile Failure Strain 33	8.00000E-02 (none)
Maximum Shear Strain 12	1.00000E+20 (none)
Maximum Shear Strain 23	1.01000E+20 (none)
Maximum Shear Strain 31	1.01000E+20 (none)
Material Axes Option	IJK Space

Rotation angle about 11 (degrees)	0.00000E+00 (none)
Post Failure Option	Orthotropic
Residual Shear Stiffness Fraction	2.00000E-01 (none)
Maximum Residual Shear Stress	1.00000E+20 (kPa)
Decomposition Temperature	7.00000E+02 (K)
Matrix Melt Temperature	1.01000E+20 (K)
Failed in 11, Failure Mode	11 only
Failed in 22, Failure Mode	22 only
Failed in 33, Failure Mode	33 only
Failed in 12, Failure Mode	12 & 11 only
Failed in 23, Failure Mode	23 & 11 only
Failed in 31, Failure Mode	31 & 11 only
Melt Matrix Failure Mode	Bulk
Stochastic failure	No

Erosion**None****Reference:**

Hiermaier, Riedel, Hayhurst, Clegg, Wentzel
- "Advanced Material Models for HVI
Simulations" - E MI Report No. E43/99, ESA
CR(P) 4305, 1999

Ek-3 Hava Malzeme Özellikleri

Equation of State	Ideal Gas
Reference density	1.22500E-03 (g/cm ³)
Gamma	1.40000E+00 (none)
Adiabatic constant	0.00000E+00 (none)
Pressure shift	0.00000E+00 (kPa)
Reference Temperature	2.88200E+02 (K)
Specific Heat	7.17600E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-02 (m/s)
Maximum Soundspeed	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.00000E+16 (K)
Reference:	"Thermodynamic and Transport Properties of Fluids, SI Units", GFC Rogers, YR Mayhew

Ek-4 TNT Malzeme Özellikleri

Equation of State	JWL
Reference density	1.63000E+00 (g/cm ³)
Parameter A	3.73770E+08 (kPa)
Parameter B	3.74710E+06 (kPa)
Parameter R1	4.15000E+00 (none)
Parameter R2	9.00000E-01 (none)
Parameter W	3.50000E-01 (none)
C-J Detonation velocity	6.93000E+03 (m/s)
C-J Energy / unit volume	6.00000E+06 (kJ/m ³)
C-J Pressure	2.10000E+07 (kPa)
Burn on compression fraction	0.00000E+00 (none)
Pre-burn bulk modulus	0.00000E+00 (kPa)
Adiabatic constant	0.00000E+00 (none)
Auto-convert to Ideal Gas	Yes
Additional Options (Beta)	None
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-06 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	JWL Equations of State Coeffs. for High Explosives Lee Finger & Collins. UCID-16189. January 1973

Ek-5 Polistiren Malzeme Özellikleri

Equation of State	Shock
Reference density	1.04400E+00 (g/cm ³)
Gruneisen coefficient	1.18000E+00 (none)
Parameter C1	2.74600E+03 (m/s)
Parameter S1	1.31900E+00 (none)
Parameter Quadratic S2	0.00000E+00 (s/m)
Relative volume, VE/V0	0.00000E+00 (none)
Relative volume, VB/V0	0.00000E+00 (none)
Parameter C2	0.00000E+00 (m/s)
Parameter S2	0.00000E+00 (none)
Reference Temperature	0.00000E+00 (K)
Specific Heat	0.00000E+00 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniots

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	28.05.1976	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1990–1993	Ankara Anıttepe Lisesi
Lisans	1994–1999	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006–2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı

Çalıştığı kurumlar

2001-2002	600' üncü Ana Depo ve Fabrika Komutanlığı
2002-Devam ediyor	7' nci Bakım Merkezi Komutanlığı