

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIN PATLAMASINA MARUZ KALAN ZIRHLI BİR
ARACIN SAYISAL SİMÜLASYON MODELİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Atıl ERDİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : Makina Tasarım ve İmalat
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vahdet UÇAR

Temmuz 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

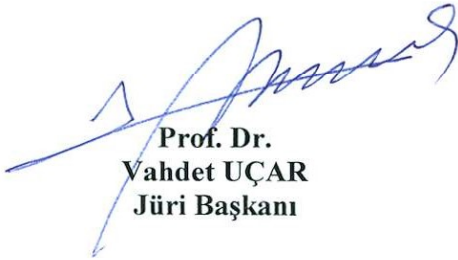
**MAYIN PATLAMASINA MARUZ KALAN ZIRHLI BİR
ARACIN SAYISAL SİMÜLASYON MODELİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

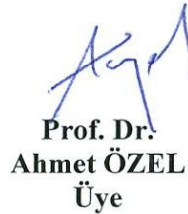
DOKTORA TEZİ

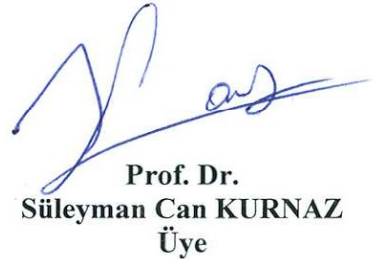
Atıl ERDİK

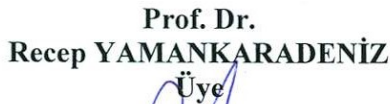
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 31/ 07 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Vahdet UÇAR
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Ahmet ÖZEL
Üye


Prof. Dr.
Süleyman Can KURNAZ
Üye


Prof. Dr.
Recep YAMANKARADENİZ
Üye


Doç. Dr.
Fatih KARPAT
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Atıl ERDİK

31.07.2017

ÖNSÖZ

“Mayın patlamasına maruz kalan bir zırhlı araç için sayısal simülasyon yönteminin geliştirilmesi” başlıklı doktora tezimin hazırlanması ve tamamlanması esnasında yardımlarını benden esirgemeyen, bilgi birikiminden ve deneyimlerinden çokça faydalandığım, bu çalışmaya derinlik katan, beni teşvik eden ve yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Vahdet UÇAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın bir doktora tezine dönüşmesine olanak sağlayan, on iki yıldır bir parçası olmaktan gurur duyduğum şirketim, OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş.’ye desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim esnasında bana gösterdiği anlayış, sabır ve desteğinden ötürü sevgili eşim Yasemin ERDİK’e sonsuz teşekkür ederim. Onun eşsiz desteği olmadan bu çalışmayı bitiremezdim. Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv

BÖLÜM 1.

MAYIN PATLAMALARI.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kara Mayınları	2
1.3. Patlama Dalgaları ve Patlama Yüğü	5
1.4. Hava Ortamında Patlama Dalgaları	5
1.5. Küresel Şekilli Patlayıcılar İçin Patlama Dalgası Denklemleri	6
1.5.1. Patlayıcı maddenin iç bölgesi	6
1.5.2. Patlayıcı maddenin dış bölgesi	11
1.6. Patlama Dalgası Önyüzü Parametreleri	12
1.7. Diğer Önemli Patlama Dalgası Parametreleri	15
1.8. Patlama Dalgası Ölçeklendirme Kuralları	20
1.9. Katılarda Şok Dalgaları	22
1.9.1 Tek eksenli şekil değiştirme	23
1.9.2. Dalga yayılımı	29
1.10. Toprak Altında Patlama	33
1.11. Patlama Yüğüne Karşı Yapının Davranışı	35

BÖLÜM 2.

PATLAMA DENKLEMLERİNİN SAYISAL BENZETİM MODELLERİNİN

OLUŞTURULMASI	40
2.1. Kullanılacak Sayısal Yöntemin Belirlenmesi	42
2.2. CONWEP Patlama Yöntemi	42
2.3. Arbitrary Lagrangian Eulerian Yöntemi	43
2.3.1. Patlayıcı modeli	44
2.3.2. Hava modeli	45
2.3.3. Patlama analizlerinde kullanılan malzeme modeli	45
2.3.3.1. Johnson-Cook mukavemet modeli	45
2.3.3.2. Johnson-Cook kırılma modeli	46

BÖLÜM 3.

PLAKA ÜZERİNDE YAPILAN PATLAMALARIN BENZETİM

ÇALIŞMALARI	48
3.1. Giriş	48
3.2. Literatür Araştırması	48
3.3. Tek Plaka Sayısal Benzetim Çalışmaları	53
3.3.1. Patlama modellerinin Boyd'un patlama testi ile mukayesesi	53
3.3.1.1. LS-DYNA – CONWEP tekniği ile patlama simülasyonu	56
3.3.1.2. LS-DYNA – ALE tekniği ile patlama simülasyonu ...	56
3.3.1.3. Patlamada kullanılan hal denklemleri	58
3.3.1.4. Patlayıcıya ait Jones-Wilkins-Lee denklemleri	58
3.3.1.5. Havaya ait doğrusal polinom denklemi	60
3.3.1.6. Analiz sonuçlarının Boyd'un test sonuçları ile karşılaştırması	61
3.3.1.7. Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi	65
3.3.2. Patlama modellerinin Tabatabaei'nin patlama testi ile mukayesesi	67
3.3.2.1. Birleşik CONWEP – ALE patlama modeli	68

3.3.2.2. ALE hassasiyet analizi	71
3.3.2.3. Analiz sonuçlarının Tabatabaei'nin test sonuçları ile kıyaslanması	72
3.3.3. Araç patlama simülasyonunda kullanılacak patlama modeli	75
 BÖLÜM 4.	
ARAÇ PATLAMASI BENZETİM ÇALIŞMASI	77
4.1. Giriş	77
4.2. Zeminde Serbest Patlama Testi	78
4.3. Zeminde Serbest Patlama Testinin Sayısal Benzetimi	82
4.3.1. Sayısal benzetim modeli detayları	82
4.3.2. Kontrol parametreleri	83
4.3.3. Patlayıcıya ve havaya ait hal denklemi parametreleri	83
4.4. Zeminde Serbest Patlama Testi ve Sayısal Benzetim Modelinin Sonuçlarının Mukayesesi	84
4.5. Tam Ölçekli Araç Patlama Testi	85
4.6. Tam Ölçekli Patlama Testi Sayısal Benzetim Modeli	87
4.7. Sonuçların Mukayesesi	92
4.8. Değerlendirme	93
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	95
 KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	107

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Birimsiz dalga şekli sayısı
a_0	: Havanın ortam basıncındaki hızı
a_{ex}	: Tepkimeye girmemiş patlayıcı içerisindeki ses hızı
a_g	: Patlayıcı gazların içindeki ses hızı
a_o	: Hava içerisindeki ses hızı
ALE	: Arbitrary Lagrangian Eulerian
$C_0, C_1, C_2, C_3,$ C_4, C_5, C_6	: Doğrusal polinom denklemi parametreleri
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAE	: Computer Aided Engineering (Bilg. Destekli Mühendislik)
CFL	: Courant-Friedrich Levy
C_v	: Sabit hacimdeki özgül ısı
D	: Hasar parametresi
$D_1, D_2, D_3,$ D_4, D_5	: Johnson – Cook modeli hasar parametreleri
d_1	: 1 nu.lı patlayıcının çapı
d_2	: 2 nu.lı patlayıcının çapı
de	: Maddenin iç enerjisi
dS	: Sistemin iç enerjisi
E	: İlk enerjinin birim hacme oranı
EOS	: Equation of state (Hal denklemi)
f_i	: Dış kuvvet bileşeni
HEL	: Hugoniot Elastik Limit
IVFG	: Initial Volume Fraction Geometry
i_s	: Dalganın özgül itkisi
JC	: Johnson-Cook

JWL	: Jones Wilkins Lee
K	: Hacimsel esneklik katsayısı
p	: Basınç
$p(t)$	: t anındaki basınç
p_0	: Atmosfer basıncı
p_s	: Ara katmanda patlama dalgası yüzündeki basınç/Maksimum statik basınç
p_{so}	: Maksimum basınç
Q/Q_{TNT}	: TNT eşdeğeri
q_s	: Maksimum dinamik basınç değeri
R	: Gaz sabiti
R_1	: 1 nu.lı patlayıcının hedef yapıya olan mesafesi
R_2	: 2 nu.lı patlayıcının hedef yapıya olan mesafesi
R_c	: Patlayıcı maddenin yarıçapı
R_d	: İnfilak dalgası önyüzü yarıçapı
T	: Sıcaklık
T^-	: Patlamanın negatif evresi
t	: Zaman
t_a	: Varış zamanı
t_o	: Basıncın pozitif olduğu süre
T_{ex}	: Ortam sıcaklığı
T_H	: Deneyin yapıldığı sıcaklık
T_M	: Ergime sıcaklığı
TNT	: Trinitrotolüen
T_o	: Atmosfer sıcaklığı
T_R	: Oda sıcaklığı
T_s	: Basıncın ortam basıncını aştığı durumlardaki pozitif evre süresi
u	: Parçacık hızı
u_d	: İnfilak dalgası önyüzünün arkasındaki parçacık hızı
u_s	: Ara katmanda patlama dalgası yüzündeki parçacık hızı
U_s	: Patlama dalgası önyüzü hızı
W	: TNT patlayıcısının kütlesi

W_1	: 1 nu.lı patlayıcı kütlesi
W_2	: 1 nu.lı patlayıcı kütlesi
Z	: Ölçekli mesafe
γ	: Özgül ısı oranı
ρ	: Yoğunluk
ρ_0	: Patlama dalgasının önyüzündeki havanın yoğunluğu
ρ_1	: İnfilak dalgası önyüzündeki yoğunluk
ρ_s	: Dalga önyüzü arkasındaki havanın yoğunluğu
ΔP_{min}	: Patlamanın negatif evresi boyunca alçak basıncın pik değeri
λ_{rw}	: Seyreli dalgasının büyüklüğü (m)
λ	: 1 nu.lı patlayıcının 2 nu.lı patlayıcının çapına oranı
ε^e	: Elastik birim şekil değiştirme
ε^p	: Plastik birim şekil değiştirme
ε_{eff}^p	: Efektik plastik şekil değiştirme
σ	: Gerilme
σ_{eff}	: Efektif gerilme
σ_{ij}	: Gerilme tensörü
σ_{HEL}	: Tek eksenli birim şekil değiştirme için akma noktası, Hugoniot Elastik Limit
S_{ij}	: Gerilme tensörünün deviatorik bileşeni
ν	: Poisson oranı
Y_0	: Statik akma mukavemeti

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dünya üzerinde patlayıcı miktarına göre Anti-Tank mayınlarının yüzdesi [6]	3
Şekil 1.2. Küresel şekilli patlayıcının iç bölgeleri [8]	7
Şekil 1.3. Birim kontrol hacmi	7
Şekil 1.4. Patlayıcı maddenin dışı [8]	12
Şekil 1.5. Yan yüz maksimum basınç - ölçeklendirilmiş mesafe: deney-analiz mukayesesi	15
Şekil 1.6. Patlama esnasında oluşan şok dalgasının basınç-zaman eğrisi [11]	16
Şekil 1.7. Küresel şekilli TNT patlayıcıları için yan yüz patlama dalgası parametreleri [11]	17
Şekil 1.8. Alçak basınç - ölçekli mesafe	18
Şekil 1.9. Patlayıcıdan olan mesafeye bağlı olarak patlama dalgası parametrelerinin tayini	19
Şekil 1.10. Küresel şekilli TNT patlayıcısı için patlama dalgası parametrelerinin ölçekli mesafeye bağlı olarak değişimi [7]	20
Şekil 1.11. Hopkinson - Cranz ölçeklendirme kuralının temeli [7]	22
Şekil 1.12. Test numunesi ve tek eksenli gerilme durumları için tipik gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri	23
Şekil 1.13. Katı bir cisim içerisinde ilerleyen düzlemsel şok dalgasının detayları	24
Şekil 1.14. Tek eksenli şekil değiştirme durumları içi gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi	24
Şekil 1.15. Tek eksenli şekil değiştirmede yükleme - yüklemenin kalkması (boşalma) çevrimi	29
Şekil 1.16. Elastik, elasto-plastik bölgeler ve şok dalgasının yayılımı	30
Şekil 1.17. Yüksek basınçlı dalganın yayılımı [20]	31
Şekil 1.18. Basınç dalgasının şok dalgasına dönüşmesi [20]	32

Şekil 1.19. Şok dalgasının, arkadan gelen seyrelti dalgasının etkisiyle gücünü kaybetmesi durumu	32
Şekil 1.20. Yarım krater profili, A.B.D ordusu [15]	35
Şekil 1.21. Çarpma basıncının farklı değerleri için yansıma katsayısının çarpma açısıyla olan karşılaştırması [2]	36
Şekil 1.22. Üç farklı durum için yapının davranışı [26]	39
Şekil 3.1. Boyd [41]'un test düzeneği	54
Şekil 3.2. Testte kullanılan sensörlerin plaka üzerindeki yerleşimi	55
Şekil 3.3. Kübik patlayıcı modeli	57
Şekil 3.4. Küresel patlayıcı modeli	57
Şekil 3.5. CONWEP tekniği ile elde edilen patlama yükleriyle plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları	61
Şekil 3.6. ALE tekniği ile elde edilen patlama yükleriyle plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları	62
Şekil 3.7. ALE-IVFG tekniği ile elde edilen patlama yükleriyle plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları	62
Şekil 3.8. Plakanın orta noktasındaki maksimum deplasman değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 3.9. A1 ivmeölçeri üzerinden okunan maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 3.10. A2 ivmeölçeri üzerinden okunan maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 3.11. 40 µs anında patlayıcının patlaması ve hava ortamı içerisindeki hareketi (Basınç: Mbar)	64
Şekil 3.12. 240 µs anında şok dalgasının plakaya çarpması (Basınç: Mbar)	65
Şekil 3.13. 400 µs anında şok dalgasının plakadan yansıması (Basınç: Mbar)	65
Şekil 3.14. Basınç sensörlerinin ve patlayıcının panele göre yerleşimi	67
Şekil 3.15. Basınç sensörlerinin panel üzerindeki yerleşimi	68
Şekil 3.16. Ampirik patlama yükünün tanımlandığı kartlar (cm-g-mikrosaniye)	69
Şekil 3.17. Birleşik CONWEP-ALE modeli	69
Şekil 3.18. Birleşik CONWEP - ALE patlama modelinin ALE özelliklerini içeren kartları (cm-g-mikrosaniye)	70

Şekil 3.19. ALE yönteminde ağ örgüsü eleman boyutuna bağlı olarak basınç değerinin değişimi	71
Şekil 3.20. Patlama dalgalarının 200 µs anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)	72
Şekil 3.21. Patlama dalgalarının 400 µs anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)	73
Şekil 3.22. Patlama dalgalarının 600 µs anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)	73
Şekil 3.23. Patlama dalgalarının 800 µs anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)	74
Şekil 4.1. Çelik çanak ve patlayıcı ölçüleri	79
Şekil 4.2. Kara mayınının çanak içerisine konumlandırılması	79
Şekil 4.3. Kalem tipi patlama basıncı ölçüm sensörü	80
Şekil 4.4. Patlama basınç sensörü oryantasyonu	80
Şekil 4.5. Patlama basıncı sensör yerleşimi	81
Şekil 4.6. Test düzeneğinin şematik gösterimi	81
Şekil 4.7. Testte ve sayısal benzetimde elde edilen “Çarpan basınç – zaman” eğrileri	84
Şekil 4.8. Sayısal benzetimden bulunan yansıyan ve çarpan basınçlar	85
Şekil 4.9. Mayın patlaması için 1/1 ölçek hazırlanmış araç test düzeneği	86
Şekil 4.10. TNT’nin yerleştirilmesi	86
Şekil 4.11. Deplasman borularının araç içerisindeki yerleşimi	87
Şekil 4.12. Tam ölçekli patlama testinin sayısal benzetim modeli	89
Şekil 4.13. Şok dalgalarının hava ortamında ilerlemesi ve 300 µs anındaki basınç değerler	89
Şekil 4.14. Şok dalgalarının hava ortamında ilerlemesi ve 600 µs anındaki basınç değerleri	90
Şekil 4.15. Şok dalgalarının hava ortamında ilerlemesi ve 900 µs anındaki basınç değerleri	90
Şekil 4.16. Patlama dalgalarının 300 µs anında araç gövdesindeki ilerleme hızı	91
Şekil 4.17. Patlama dalgalarının 600 µs anında araç gövdesindeki ilerleme hızı	91
Şekil 4.18. Patlama dalgalarının 900 µs anında araç gövdesindeki ilerleme hızı	92

Şekil 5.1. Basınç doğrulama testi	96
Şekil 5.2. Ağ yapısı hassasiyet analizi	97
Şekil 5.3. Araç patlama simülasyonu	98
Şekil 5.4. Kare şekilli bal peteği enerji sönümleme sistemi: (a) Plastik birim şekil değiştirme = 0.16; (b) Plastik birim şekil değiştirme = 0.47	100
Şekil 5.5. Alüminyum köpük ile oluşturulmuş enerji sönümleyici sandviç yapı ...	100



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı patlayıcılar için TNT eşdeğeri dönüşüm katsayıları	4
Tablo 1.2. Patlama dalgası içindeki havanın statik ve dinamik basınç değişimleri ..	13
Tablo 3.1. Sayısal benzetim çalışmasında kullanılan malzeme ait mekanik özellikler [41]	55
Tablo 3.2. Pentolit'e ait malzeme parametreleri [53]	60
Tablo 3.3. Hava'ya ait doğrusal polinom denklem parametreleri	60
Tablo 3.4. Ağ yapısı hassasiyet analizinde kullanılan eleman boyutları ve sayıları .	71
Tablo 3.5. Modellerin eleman sayıları ve çözüm süreleri	72
Tablo 3.6. Üç yöntem için pik basınç değerleri	74
Tablo 4.1. TNT için JWL hal denklemi parametreleri [53]	83
Tablo 4.2. Adi çelik malzeme özellikleri	88
Tablo 4.3. Yüksek sertlikte zırh çeliğine ait Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri [58]	88
Tablo 4.4. Tam ölçekli araç simülasyon modeli detayları	88
Tablo 4.5. Ölçeklendirilmiş deplasman ve ölçüm sapma değerleri	93
Tablo 5.1. #7 nu.lı test ölçümüne göre normalize edilmiş deplasman değerleri ve sapmalar	98

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mayın patlaması, sayısal simülasyon, Arbitrary Lagrangian Eulerian yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi

Bu çalışmada zırhlı bir aracın mayın koruma seviyesinin, sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak mayın patlamaları ile ilgili genel bilgiler verilip, patlama esnasında oluşan şok dalgalarının 1 ve 2 boyutta hesaplamaları anlatılmıştır. Akademik ortamda sıklıkla kullanılan, farklı patlayıcı miktarları ile aynı patlama yüklerinin benzetimini ifade eden “Ölçeklendirme”den bahsedilmiştir. Daha sonra katı malzemelerin iç yüzeyinde şok dalgalarının hareketi incelenmiş ve dalga yayılımına ait hesaplamalar verilmiştir. Şok dalgalarının hareketinin, çarptığı hedef yapı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Mayın patlama simülasyonlarında kullanılacak sayısal yöntemin belirlenmesi amacıyla farklı teknikler incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı mayın patlama testinden elde edilen ivme ve deplasman değerleri sayısal simülasyon modelindeki değerler ile kıyaslanarak bir benzetim yapılmış ve Arbitrary Lagrangian Eulerian yönteminin zırhlı araç mayın patlama simülasyonunda kullanılmasına karar verilmiştir.

Araç patlaması benzetim çalışmalarında patlama modeli parametreleri, serbest patlama testi sonuçları vasıtasıyla kalibre edilmiş ve yüksek doğruluk derecesine haiz patlama modeli oluşturulmuştur. Geliştirilmiş patlama modeli kullanılarak araç patlama testinin simülasyonu yapılmıştır. Araç içinde kritik görülen belli bölgelere yerleştirilen deplasman ölçerler kullanılarak gerçek ölçekli araç patlama testinden elde edilen deplasman değerleri, sayısal simülasyon sonuçları ile mukayese edilmiş ve simülasyon sonuçlarının test sonuçları ile yaklaşık %85 oranında benzeştiği tespit edilmiştir. Bu şekilde sayısal simülasyon modeli patlama testleri ile doğrulanıp, zırhlı araç mayın geliştirme çalışmalarında, mayın patlamasının yorumlanmasına olanak vermiş ve optimum çözümün elde edilmesini sağlanmıştır.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR AN ARMORED VEHICLE EXPOSED TO LANDMINE BLAST

SUMMARY

Keywords: Mine blast, numerical simulation, Arbitrary Lagrangian Eulerian method, finite element method

In this thesis, it is aimed to develop mine protection level of an armored vehicle using numerical simulation methods. First, it was drawn a guideline for blast phenomenon and was explained hand calculations of shock waves in one and two dimension accordingly. “Scaling method” that expresses obtaining same pressure levels with in variety of explosive amounts at different target distances was also described, which is frequently used for blast studies in academic environment. Shock wave propagations both in solids and at target were investigated and their calculations were presented.

In order to determine the methodology of blast simulations, different techniques were investigated. For this purpose, acceleration and displacement values collected from two different blast experiments were compared with those of blast simulations. As a result of this comparison, it was concluded that Arbitrary Lagrangian Eulerian method provides the best approximation to the experimental measurements.

Blast simulation parameters were calibrated through the measured data in the free field blast experiments. Thus, the blast simulation model that possesses calibrated parameters with high accuracy and small deviation with respect to blast experiments was established. Blast simulation of full-scale vehicle was performed with aforementioned parameters. Displacement values gathered from the full-scale blast testing were compared to the simulation results. It was observed that the maximum deviation between numerical calculations and experimental measurements was less than 20%. Therefore, it can be concluded that the numerical simulation model was validated with blast test and it provided the interpretation of the blast phenomenon as well as obtaining the optimum design solution in the development process of mine protected armored vehicle.

BÖLÜM 1. MAYIN PATLAMALARI

Bu tez çalışmasının amacı, zırhlı bir aracın mayın patlamasına maruz kalması durumunu sayısal yöntemler kullanarak benzetim yapmaktır. Bu kapsamda, ilk olarak mayınlar, mayın patlamaları ve patlama sonucunda oluşan şok dalgaları hakkında genel bilgiler verilip, farklı patlamalar için hangi yükleme tiplerinin kullanılması gerektiği ve patlama yüküne bağlı olarak yapıların davranışları irdelenmiştir. Daha sonra, mayın patlamalarının sayısal modellerinde kullanılan sayısal hesaplama yöntemleri kısaca açıklanıp, yeteneklerinden bahsedilmiştir. Benzer şekilde, patlama yüklerinin hesaplanmasında kullanılan tekniklerden bahsedilmiş, avantajları ve dezavantajları vurgulanmıştır. Mayın patlaması ve mayın patlamalarının araç gövde geometrisi üzerindeki etkilerini konu olan literatür araştırması sunulmuştur. Sayısal simülasyon yöntemine karar vermek için literatürden plakalar üzerinde yapılan iki farklı patlama testinin sonuçları, hazırlanan simülasyon modelinin çözdürülmesi sonucunda elde edilen analiz sonuçları ile mukayese edilmiş ve en uygun simülasyon yöntemine karar verilmiştir. Belirlenen bu yöntem daha sonra bir zırhlı aracın tam ölçekli mayın patlatma testinin benzetim çalışmasında kullanılmıştır. Son olarak, gerçek ölçekli araç patlatma testinde ölçülen değerler ile araç patlama simülasyon modelinin sonuçları karşılaştırılmış ve durum hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır.

1.1. Giriş

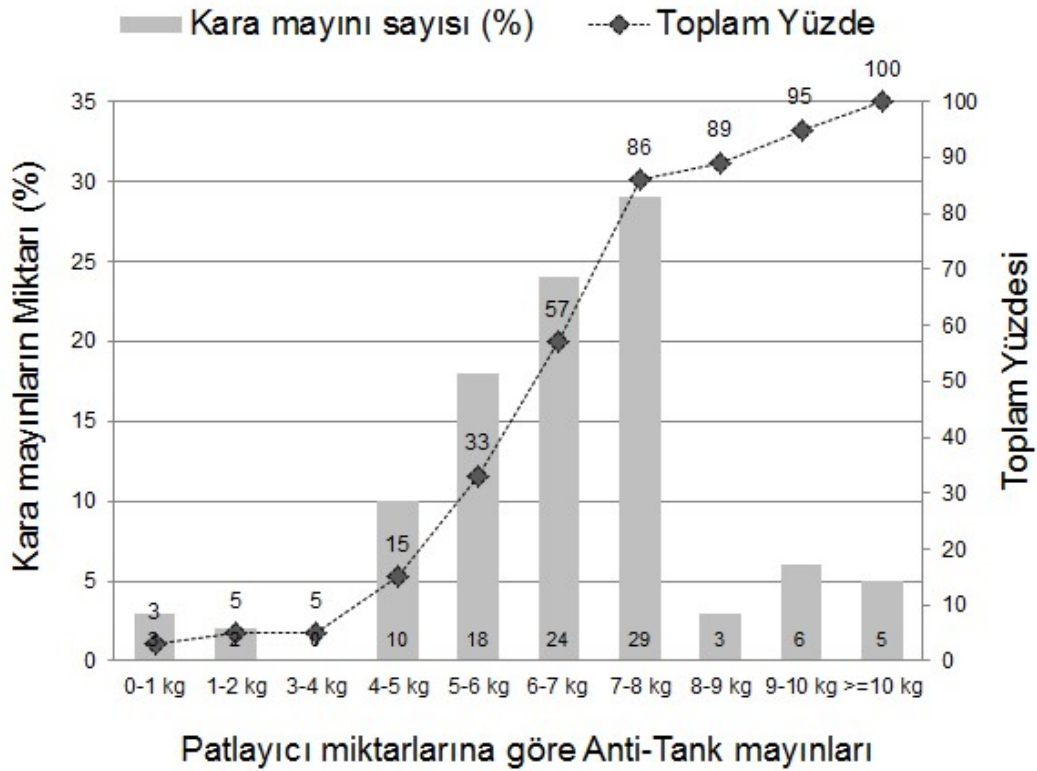
Zırhlı araçlardaki mürettebatın mayın patlamasında hayatta kalabilmelerini sağlamak, araç tasarım sürecinin en kritik konularından biridir. Her yıl yaklaşık 10,000 kişinin mayın patlamaları neticesinde ciddi şekilde yaralandığı ve bir kısmının da öldüğü tahmin edilmektedir [1].

Patlama neticesinde oluşan şok dalgaları, patlayıcının meydana getirdiği kimyasal enerjiyi, bulundukları ortama bağlı olarak belli hızlarda, kinetik enerji olarak çevresine aktarır. Benzer şekilde mayın patlaması esnasında şok dalgasının taşıdığı enerji de araç gövdesine iletilir. İletilen enerji, araç zemini ve koltuk gibi yapısal elemanlar vasıtasıyla araç içindeki mürettebata aktarılır. Eğer bu yükler yapı tarafından sönmülenmezse, mürettebatta ölümcül yaralanmalar meydana gelebilir.

Bir aracın tam ölçekli mayın testi maliyetli ve uzun sürmektedir. Sayısal yöntemleri mayın patlamasının araç ve içerisindeki personel ile etkileşimini öngörebilmek için kullanmak, tam ölçekli mayın testlerinin sayısını asgari düzeye çekmektedir. Sayısal yöntemleri kullanarak tasarım değişiklikleri yapılabilen, böylece aracın bütünlüğü korunmakta ve mürettebatın hayatta kalma olasılıkları arttırılmaktadır. Williams ve Poon [2], yaptıkları çalışmada araç zemininin tasarımını değiştirerek, mürettebatın yaralanma riskini azalttıklarını belirtmişlerdir. Diğer yandan, gerçek ölçekli deneysel verileri kullanarak, sayısal modeli kalibre etmek, sayısal analizlerin güvenilirliği açısından son derece faydalıdır [3, 4]. Mayının lokasyonundaki, gömüldüğü derinlik ve toprağın fiziksel özelliklerindeki belirsizlikler, patlama yüklerinin hesaplanmasını, neticesinde araç ve mürettebat üzerinde oluşacak hasarın tayinini son derece olumsuz etkilemektedir [5].

1.2. Kara Mayınları

Dünya üzerinde yaklaşık 110 milyon adet kara mayını olduğu ve bu mayınların 45 ila 50 milyonunun toprak altına gömüldüğü tahmin edilmektedir [6]. Şekil 1.1.'de dünya üzerinde bulunan kara mayınları, yüzdesel miktarlarına göre sınıflandırılmıştır. Grafikten görüleceği üzere 10 kg ve üzeri ağırlıklardaki mayınların toplam mayın miktarına oranı % 5'dir. Buna karşılık dünya üzerinde en yaygın olarak kullanılan mayının % 29 ile 7-8 kg ağırlığındaki mayınlar olduğu görülmektedir. Ağırlıkça en az bulunan mayın tipini ise % 1'den daha az oranda olan 3 – 4 kg arasındaki mayınlar oluşturmaktadır. Dünya üzerindeki mayınların yüzdesel ağırlıkları bize mayına dayanıklı araç tasarım çalışmalarında hedeflenen mayın koruma seviyesine ilişkin bir ipucu da vermektedir.



Şekil 1.1. Dünya üzerinde patlayıcı miktarına göre Anti-Tank mayınlarının yüzdesi [6].

Tiplerine bağlı olarak kara mayınları bileşimlerinde farklı miktarlarda TNT (Trinitrotolüen), PETN, RDX (Cyclonite) ya da Composite B gibi patlayıcıları bulundurlar. TNT dışında farklı bir patlayıcının enerji miktarını belirlemek için, o patlayıcının TNT cinsinden dönüşümü yapılır. Bu dönüşüm için en basit yol, ilgili patlayıcının ve TNT'nin özkütleleri baz alınarak, patlayıcının kütlesini bir dönüşüm katsayısıyla çarparak TNT cinsinden ağırlık olarak ifade etmektir. Diğer yandan, Baker [7]'in bazı patlayıcıların kütle özgül enerjilerine göre oluşturduğu TNT eşdeğerleri Tablo 1.1.'de verilmiştir. Bu hesaba göre, örneğin RDX ve TNT arasında bir dönüşüm yapılması istenirse; RDX'in TNT'nin özgül enerjisine oranı $5360/4520=1,185$ olacağından, 100 kg RDX patlayıcısının 118,5 kg TNT'ye tekabül ettiği kabul edilir. Diğer alternatif yöntem, iki dönüşüm katsayısı kullanmaktır. Hangi katsayısının kullanılacağı, dönüşümü istenilen patlayıcı ve TNT eşdeğeri için maksimum basınç ya da itki miktarına bağlıdır. Bu durum Comp B patlayıcısı için örneklenirse, Comp B'nin TNT eşdeğer basıncı 1,11 iken, eşdeğer itki değeri 0,98 olmaktadır.

Tablo 1.1. Bazı patlayıcılar için TNT eşdeğeri dönüşüm katsayıları

Patlayıcı	Kütle özellik enerjisi, Q (KJ/kg)	TNT eşdeğeri (Q/Q _{TNT})	Yoğunluk, kg/m ³	İnfilak hızı, km/s	İnfilak Basıncı, GPa
Amatol (%80 amonyum nitrat, %20 TNT)	2630	0,586	1600	5,20	--
Baranal (%50 Baryum nitrat, %35 TNT, %15 Alüminyum)	4750	1,051	2320	--	--
Comp B (%60 RDX, %40 TNT)	5190	1,148	1690	7,99	29,5
RDX (Cyclonite)	5360	1,185	1650	8,70	34,0
Patlayıcı D (amonyum pikrat)	3350	,740	1650	6,85	--
HMX	5680	1,256	1900	9,11	38,7
Kurşun Azid	1540	0,340	3800	5,50	--
Kurşun stinat	1910	0,423	2900	5,20	--
Civa fulminat	1790	0,395	4430	--	--
Nitrogliserin (Sıvı)	6700	1,481	1590	--	--
Oktol (%70 HMX, %30 TNT)	4500	0,994	1800	8,48	34,2
PETN (Pentaeritol tetranitrat)	5800	1,282	1700	8,26	34,0
Pentolit (%50 PETN, %50 TNT)	5110	1,129	1660	7,47	28,0
Pikrik Asit	4180	0,926	1710	7,26	26,5
Silver Azit	1890	0,419	5100	--	--
Tetrit	4520	1,000	1730	7,85	26,0
TNT	4520	1,000	1600	6,73	21,0
Torpeks					
(%42 RDX, %40 TNT, %18 Al)	7540	1,667	1760	--	--
Tritonal (%80 TNT, %20 Al)	7410	1,639	1720	--	--
C4 (%91 RDX, %9 Plastikleştirici)	4870	1,078	1,58	--	--
PBX 9404 (%94 HMX, %3 nitrosetülöz, %3 plastik tutkal)	5770	1,277	1844	8,80	37,5
Patlayıcı jelatin (%91 nitrogliserin, %7.9 nitrosetülöz, %0.9 antasit, %0.2 su)	4520	1,000	1300	--	--
%60 geleneksel Nitrogliserin dinamit	2710	0,6	1300	--	--

1.3. Patlama Dalgaları Ve Patlama Yüğü

Kimyasal ve nükleer patlatmalarda ortama yüksek miktarlarda enerji açığa çıkar. Bu ortaya çıkan enerji beraberinde ortam sıcaklığını muazzam oranda arttırırken, o bölgede çok yüksek basınç oluşturur. Bu basınç, bulunduğu ortamdan dışa doğru hareket etmek ister ve patlama dalgasına dönüşür. Yüksek yoğunluklu patlayıcı bir malzeme infilak ettiğinde, açığa çıkan enerjinin tamamı patlama enerjisine dönüşür. Patlama doğası itibariyle nükleer patlamaya benzese de, nükleer patlamada enerjinin yaklaşık %50'si patlama enerjisine dönüşürken, geri kalan kısmı ısı ve ışıınım enerjisi olarak ortama yayılır.

Bölüm 1.4., 1.5. ve 1.6.'da patlayıcıların ve nükleer cihazların infilak etmesi sonucunda havada ve zeminde oluşan patlama dalgaları ile ilgili bilgiler verilirken, patlama dalgası önyüzünden (blast wavefront) detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

1.4. Hava Ortamındaki Patlama Dalgaları

Yüksek yoğunluklu patlayıcı infilak ettiğinde, patlama reaksiyonu olarak ortama 3000 - 4000°C'lerde, 100 kb - 300 kb arası basınçlarında sıcak gazlar meydana gelir. Bu patlayıcı gazların ortama çok hızlı olarak yayılımı sonucunda mevcut gazlar havayı itmeye zorlar. Neticede sıkıştırılmış havadan oluşan bir katman ve içinde patlama esnasında açığa çıkan patlama enerjisinin büyük bir kısmını ihtiva eden sıcak gazlar, ortamın dış katmanını (Patlama dalgası önyüzü) oluşturur. Patlama dalgası patlamanın olduğu noktadan dışa doğru ilerledikçe, patlayıcı ile şekillendirilmiş gazların basınçları ortamda yayılırken, değerleri atmosferik basınca doğru azalır. Patlama dalgası önyüzünde bulunan sıkıştırılmış havanın basınç değeri de aynı zamanda mesafe arttıkça azalır [8]. Nihayet patlayıcı gazları hava ortamı içerisinde genişlemeye devam ederken, giderek soğurlar ve basınçları atmosferik basıncın çok az altına iner. Her ne kadar bu gazların statik basınçları atmosferik basınçta olmasına rağmen, gaz moleküllerinin kütleleri olduğu ve hareket halinde oldukları için, tüm momentumları tükenmeden önce bir miktar daha ilerlerler. Bu şekilde gazlar aşırı genişlemiştir ve sonuçta patlamanın merkezine doğru atmosferik

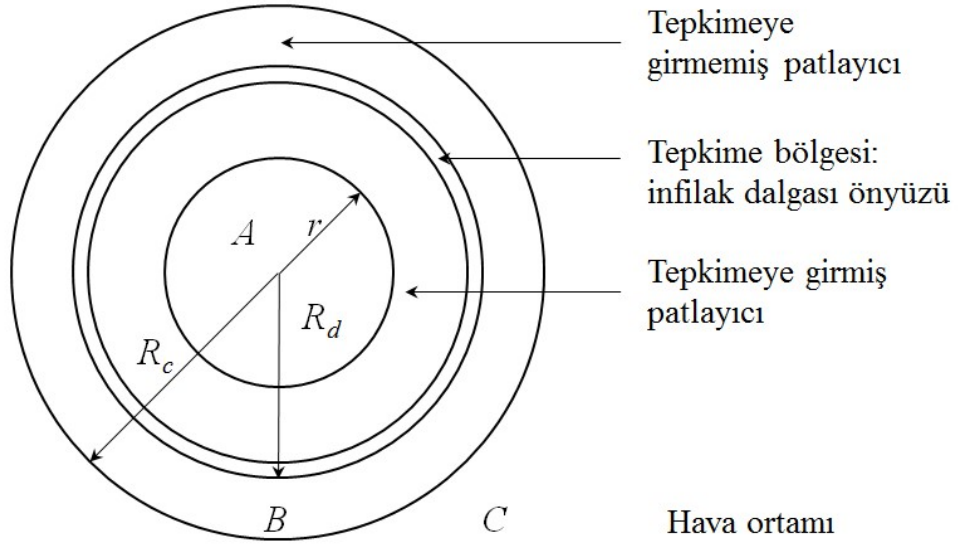
koşullar ve gazların basıncı arasındaki küçük farklardan dolayı ters yönde akış gerçekleşir. Patlama dalgası şeklindeki etki, alçak basınç (underpressure) bölgesini oluşturur. Bu bölgedeki basınç, atmosfer basıncının altındadır. Bu duruma “Negatif evre” denmektedir. Neticede bir müddet sonra, havanın ve gazların patlama merkezinden uzaklaşmasıyla sistem denge haline geri döner.

1.5. Küresel Şekilli Patlayıcılar İçin Patlama Dalgası Denklemleri

Patlama denklemlerini daha iyi tarif edebilmek için, bu bölümde üç bölge için patlama dalgalarının yapısı, tanımı ve etkilerinden bahsedilecektir. Birinci bölge patlayıcı malzemesinin kendi içinde patlayıcının infilak ettiği bölgeyi kapsarken, ikinci bölge patlayıcının dışındaki patlama dalgasının şekil aldığı hava ortamıdır. Son olarak, üçüncü bölge ise patlama dalgalarının yapısal yük meydana getirdiği etkileşim bölgesidir.

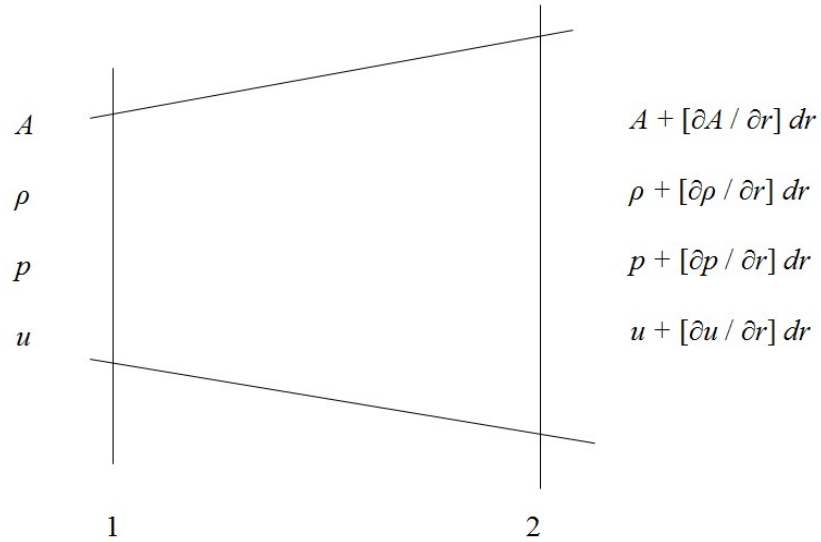
1.5.1. Patlayıcı maddenin iç bölgesi

Şekil 1.2.’de gösterildiği üzere küresel şekilli, yüksek patlama gücüne sahip bir patlayıcı maddenin yarıçapı R_c olsun. Patlayıcı madde, tam merkez noktasından infilak ettirilmektedir ve infilak dalgası önyüzü yarıçapı R_d ’dir. Tepkime bölgesi ince bir katman olup, infilak dalgası önyüzünün arkasındadır. Tepkimenin tamamlandığı A bölgesindeki basınç p , yoğunluk ρ , parçacık hızı u ve sıcaklık T olup, t zamanına ve patlayıcı maddenin merkezinden r yarıçapına bağlı olarak değişmektedir. Basınç, yarıçap ve zaman arasındaki gerçek ilişki patlayıcı maddenin türüne bağlıdır. B bölgesi ince tepkime katmanının arkasında ve R_d çapındaki infilak dalgası önyüzünün önünde olup, tepkimeye girmemiş patlayıcı sırasıyla ortam basıncında p_{ex} ve ortam sıcaklığında T_{ex} olup, parçacık hızı sıfır “0” olarak durağan haldedir. Birim kütle başına iç enerjisi (özellik enerjisi) e_{ex} olup, tepkimeye girmemiş patlayıcı içerisindeki ses hızı a_{ex} ’dir. C bölgesi patlayıcıyı çevreleyen katmandır ve atmosferik koşulları barındırmaktadır. Bu nedenle, basınç atmosfer basıncı p_o olup, sıcaklık T_o , parçacık hızı sıfır “0”, havanın özgül enerjisi e_o ve ses hızı a_o ’dır.



Şekil 1.2. Küresel şekilli patlayıcının iç bölgeleri [8].

Basınç ve parçacık hızı değişimlerini hesaplamak için gerekli denklemler çıkartılmak istendiğinde, infilak etmiş veya tepkimeye girmiş madde içerisinde, Şekil 1.3.'te gösterildiği üzere r yarıçapında bir birim kontrol hacmi olduğu farzedilsin.



Şekil 1.3. Birim kontrol hacmi

Kütle korunumu denkleminin neden ihtiyaç olduğu şu şekilde açıklanabilir; Kontrol hacmi ele alındığında, (sisteme giren kütle – sistemden çıkan kütle farkı), yoğunluk değişiminden dolayı korunan herhangi bir kütleye eşit olmalıdır. Bu anlatılanlar aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

$$A u \rho \partial t - \left[A + \frac{\partial A}{\partial r} dr \right] \left[u + \frac{\partial u}{\partial r} dr \right] \left[\rho + \frac{\partial \rho}{\partial r} dr \right] = A \partial r \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \quad (1.1)$$

Burada A , 1 numaralı kesitin alanıdır. Bu durum kullanılarak sadeleştirme yapılırsa;

$$\frac{\partial \rho}{\partial r} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial r} = 0 \quad (1.2)$$

Momentum korunumu denklemi için kontrol hacmi içindeki malzemeye etki eden kuvvetler toplamı, o hacim içindeki elemana ait kütle ve ivme çarpımına eşit olmalıdır:

$$pA - \left[p + \frac{\partial p}{\partial r} dr \right] \left[A + \frac{\partial A}{\partial r} dr \right] + \left[p + \frac{\partial p}{\partial r} \frac{dr}{2} \right] dA = A \rho dr \frac{du}{dt} \quad (1.3)$$

(1.3) denkleminde ilk terim kontrol hacminin 1 numaralı yüzündeki kuvvet, ikinci terim 2 numaralı yüzdeki kuvvet ve üçüncü terim 1 ile 2 yüzü arasındaki radyal yöndeki kuvvet bileşenidir. Denklem (1.3) sadeleştirilirse,

$$A \frac{\partial p}{\partial r} dr = A \rho dr \frac{du}{dt} \quad (1.4)$$

Yukarıdaki denklem aşağıdaki şekilde yazılırsa,

$$du = \left[\frac{\partial u}{\partial r} \right] dr + \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right] dt \quad (1.5)$$

ve $u = dr/dt$ olarak ifade edilirse,

$$\frac{du}{dt} = u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.6)$$

olur. (1.6) denklemini, (1.4) denklemine bölünürse, (1.7) denklemini elde edilir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (1.7)$$

Enerjinin korunumu prensibinde, bir maddenin birim kütlesi için, dQ ısısındaki bir birimlik artış, maddenin de iç enerjisinin bir birimlik artışının ve termodinamiğin ilk kanundaki özgül hacim, v olmak üzere $p dv$ maddesinin değişen hacmi içinde yapılan herhangi bir işin toplamına eşittir.

$$dQ = de + p dv \quad (1.8)$$

Özgül hacim $v = \frac{1}{\rho}$ ve buradan $\frac{dv}{dp} = -\frac{1}{\rho^2}$

$$dv = -\frac{dp}{\rho^2} \quad (1.9)$$

olur ve (1.8) nu.lı denklem aşağıdaki hali alır:

$$dQ = de - \frac{p}{\rho^2} d\rho \quad (1.10)$$

(1.10) denklemi T sıcaklık değerine bölünürse (1.11) denklemi elde edilir:

$$dQ = \frac{de}{T} - \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{T} = dS \quad (1.11)$$

Burada dS , sistemin entropi değişimidir. Denklem dt 'ye bölünür ve tekrar düzenlenirse aşağıdaki yeni denklem elde edilir:

$$T \frac{dS}{dt} = \frac{de}{dt} - \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} \quad (1.12)$$

Aynı zamanda bir hal denklemine ihtiyaç vardır ve (1.13)'te olduğu gibi yazılabilir:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.13)$$

Burada R gaz sabitidir ve sistemin iç enerjisini içeren bir denklemle birlikte aşağıdaki formu alır:

$$e = C_v T - \int_{p_c}^p \left[T \left[\frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_{\rho} - p \right] \frac{d\rho}{\rho^2} \quad (1.14)$$

Burada C_v , sabit hacimdeki özgül ısıdır.

Buraya kadar (1.09) – (1.14) arasındaki toplam beş denklemde bilinmeyen sayısı altıdır. Bu parametreler Basınç, yoğunluk, parçacık hızı, sıcaklık, iç enerji ve entropidir. Bahsedilen denklem sisteminin çözülebilmesi için son bir denkleme yani altıncı denklem ihtiyaç vardır. Altıncı bağıntı üzerinde bazı kabuller yapılarak altıncı denkleme ulaşılabilir.

$$f(\rho, p, u, T, r, t) = 0 \quad (1.15)$$

İnfilak olayı, Chapman-Jouget gibi özel bir form ile tanımlanabilir.

$$D - u_d = a_g \quad (1.16)$$

Burada D , infilak dalga hızı, u_d , infilak dalgası önyüzünün arkasındaki parçacık hızı ve a_g , patlayıcı gazların içindeki ses hızıdır.

Altı bilinmeyenli altı denklemin çözümü için sınır koşulları bilinmektedir: Tüm anlardaki parçacık hızı, $r=0$ için sıfır, infilak dalgası önyüzündeki basınç p_1 , yoğunluk ρ_1 ve parçacık hızı u_d 'dir. Buradan

$$u(0, t) = 0 \quad p(R_d) = p_1$$

$$\rho(R_d, t) = \rho_1 \quad u(R_d, t) = u_d \quad 1.17$$

elde edilir. Böylece altı bilinmeyenli altı denklem yardımıyla sayısal benzetim modeli kurularak sonuç bulmak mümkün olacaktır.

1.5.2. Patlayıcı maddenin dış bölgesi

Patlayıcı maddenin iç bölgesi için verilen yukarıdaki denklemler sistemi infilak olayını tarif etmektedir. Patlama dalgaları parametreleri benzer bir şekilde çıkartılabilir. Bu durum Şekil 1.4.'te ifade edilmiştir.

Şekil 1.4.'te I olarak gösterilen bölgede, genişleyen patlayıcı gazların etkisi ile hareket denklemleri, (1.1) – (1.15)'e kadar olan denklemlerin analizi ile ifade edildi. II. bölgede patlayıcının etrafındaki sıkıştırılmış hava ortamında ise gene yukarıda kullanılan denklemlere benzer şekilde hareket tanımlanabilir. Dikkat edilmesi gereken husus, hal denklemi, ortamda bulunan madde cinsinden ifade edilmelidir. Aynı zamanda (1.15) nu.lı eşitlik farklı olabilir. Daha önce sınır koşulları tam ve eksiksiz bir biçimde tanımlanmıştı. Parçacık hızı $r = 0$ 'da daima sıfırdır. Patlayıcı tarafından ortaya çıkartılan gazlar ve patlama dalgasının kuyruk kısmı ($r = R_g$ 'de) arasındaki arayüzün hızı ile arayüzün genişlemeye başladığı andaki hız, aynı parçacık hızına sahip olmalıdır. Ara katmandaki basınç değeri, birinci bölgedeki patlayıcı gazın yoğunluğu ile ikinci bölgedeki sıkıştırılmış havadan oluşan ortamın yoğunluğu farklı olsa bile her iki bölgede de aynı değildir. R_f yarıçapındaki patlama dalga yüzündeki basınç p_s ve ilgili parçacık hızı u_s 'dir. Buradan;

$$u(0, t) = 0$$

$$p_g(R_g, t) = p_m(R_g, t)$$

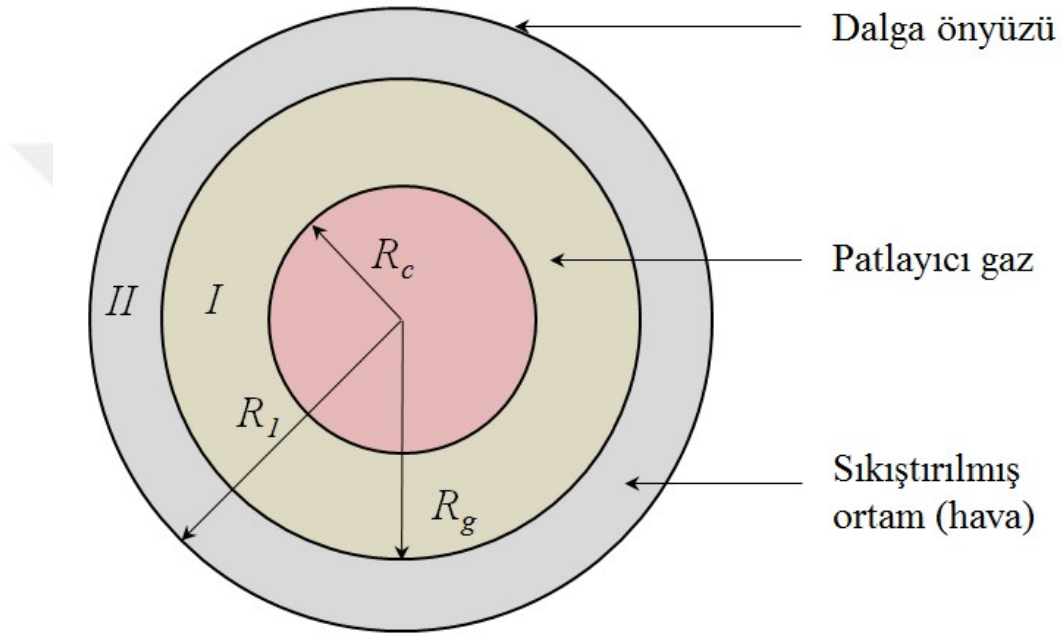
$$u_g(R_g, t) = u_m(R_g, t) = \frac{dR_g}{dt}$$

$$\rho_g(R_g, t) \neq \rho_m(R_g, t)$$

$$p(R_f, t) = p_s$$

$$u_g(R_f, t) = u_s \quad (1.18)$$

elde edilir. (1.18) denkleminde g alt indisi patlayıcı gazları temsil etmekte olup, m alt indisi çevreleyen havayı ve s alt indisi ise patlayıcı dalga yüzündeki temsil etmektedir. Bu şekilde bir kez daha altı bilinmeyen için altı denkleme sahip olunur ve bu altı bilinmeyen sayısal olarak da çözülebilir.



Şekil 1.4. Patlayıcı maddenin dışı [8].

1.6. Patlama Dalgası Önyüzü Parametreleri

Dalga önyüzü parametreleri oldukça önemlidir. Bu parametreler ilk olarak Rankine ve Hugoniot tarafından 1870 yılında, ideal gazlar içerisinde normal şokların tanımlanması için kullanılmıştır. Patlama dalgası önyüzü hızı U_s , dalga önyüzü arkasındaki havanın yoğunluğu ρ_s ve maksimum dinamik basınç değeri q_s 'e ait denklemler şu şekildedir:

$$U_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} a_0 \quad (1.19)$$

$$\rho_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \rho_0 \quad (1.20)$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \quad (1.21)$$

Burada p_s maksimum statik basınç, p_0 patlama dalgasının önünde ilerleyen ortamdaki hava basıncı ve ρ_0 patlama dalgasının önündeki ortam basıncında havanın yoğunluğu ve a_0 ise havanın ortam basıncındaki hızıdır.

(1.20) nu.lı denklemden, p_0 değeri 101 kPa olarak girildiğinde, Tablo 1.2.'de verildiği üzere bir patlama dalgası içindeki havanın statik ve dinamik basınç değişimleri elde edilir.

Tablo 1.2. Patlama dalgası içindeki havanın statik ve dinamik basınç değişimleri

p_s (kPa)	q_s (kPa)
200	110
350	290
500	518
650	778

Tablo 1.2.'den görüleceği üzere maksimum statik basınç değeri 500 kPa mertebelerine ulaşana kadar, dinamik basınç değeri, statik basınç değerinden daha düşüktür. 500 kPa'ı aşan basınç değerlerinde dinamik basınç, statik basıncı geçer.

Brode'nin yaptığı çalışma [9], maksimum basınç değeri p_s için patlayıcıya yakın mesafedeki bölgede (p_s 10 bar'dan büyük olduğunda) ve orta-uzak mesafedeki bölgelerde (p_s 0,1 ve 10 bar değerleri arasında iken) aşağıda verilen sonuçlara götürür:

$$p_s = \frac{6,7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (p_s > 10 \text{ bar}) \quad (1.22)$$

$$p_s = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad (0,1 > p_s > 10 \text{ bar}) \quad (1.23)$$

Burada Z parametresi aşağıdaki denklemde ifade edildiği üzere ölçekli mesafedir:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1.24)$$

R patlayıcının merkez noktasından hedefe metre cinsinden uzaklık, W ise kilogram cinsinden TNT patlayıcısının kütlesidir. Z parametresi anlamlandırılırken, dünya genelinde TNT referans patlayıcı olarak kabul görmüştür.

Patlama dalgası önyüzüne dair sayısal ve deneysel ölçümlerden elde edilmiş diğer çözümler de mevcuttur. Henrych [10], temel olarak Brode'nin denklemlerini kullanarak benzer şekilde aşağıdaki denklemleri oluşturmuştur:

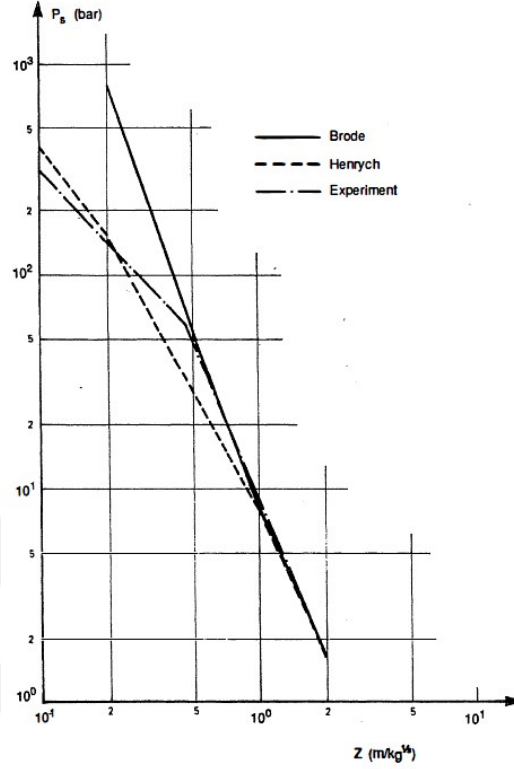
$$p_s = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \text{ bar} \quad (0,05 \leq Z < 0,3) \quad (1.25)$$

$$p_s = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3} \text{ bar} \quad (0,3 \leq Z \leq 1) \quad (1.26)$$

$$p_s = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \text{ bar} \quad (1 \leq Z \leq 10) \quad (1.27)$$

Hedef yapıya yakın mesafede gerçekleşen patlamalarda, öngörülen hesapların ve ölçüm değerlerinin doğruluğu, orta-uzak mesafe patlamalarına göre daha düşüktür. Bunun sebebi, patlayıcıya yakın bir alanda patlayıcı gazların etkinlik derecesinin ölçümünün zor olmasıdır. Bu durum, bu bölgedeki patlama dalgasına şekil veren patlama akışının karmaşıklığından kaynaklanabilir. Şekil 1.5.'teki grafikte basınç p_s değerinin ölçeklendirilmiş mesafeye göre değişimi gösterilmiştir. Z değerinin 0,5'den düşük olduğu durumlarda oldukça dağınık sonuçlar elde edilmiştir. Böyle bir

ortamda, Z değerin 0,5'in altında olduğu koşullarda, basınç ölçümü ve tahmin edilebilirlik oldukça zordur.



Şekil 1.5. Yan yüz maksimum basınç - ölçeklendirilmiş mesafe: deney-analiz mukayesesi

1.7. Diğer Önemli Patlama Dalgası Parametreleri

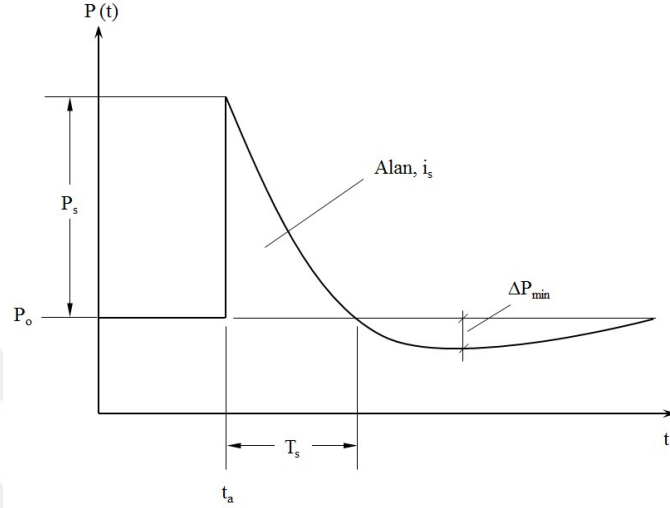
Diğer önemli patlama parametreleri; T_s , basıncın ortam basıncını aştığı durumlarda pozitif evre süresi, i_s , basınç – zaman eğrisinin t_a varış zamanından başlayıp pozitif evrenin sonuna kadar olan alan olup, dalganın özgül itkisidir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+T_s} p(t) dt \quad (1.28)$$

Havada herhangi bir patlama dalgasına özgü basınç – zaman eğrisi Şekil 1.6.'da gösterilmiştir. Burada ΔP_{min} , patlamanın negatif evredeki T^- süreci boyunca ortam basıncından düşük basınç değerinin, alçak basıncın (underpressure) en yüksek

değeridir. Bu değer patlama dalgasının seyrelti dalgası (rarefaction) bileşenidir. ΔP_{min} (bar) için Brode'nin çözümü (1.29) nu.lı denklemdedir.

$$\Delta P_{min} = -\frac{0,35}{Z} \quad (Z > 1,6) \quad (1.29)$$



Şekil 1.6. Patlama esnasında oluşan şok dalgasının basınç-zaman eğrisi [11].

Negatif (emme) evrenin süresi;

$$T^- = 1,25W^{1/3} \quad (1.30)$$

ve negatif evredeki ilgili özgül itki i^- ;

$$i^- \approx i_s \left[1 - \frac{1}{2Z} \right] \quad (1.31)$$

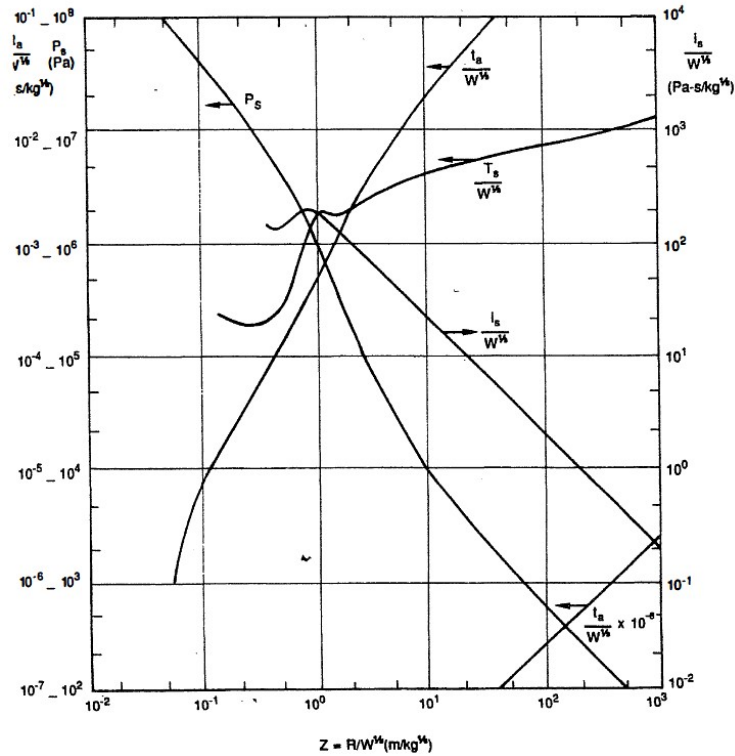
Son olarak λ_{rw} , seyrelti dalgasının büyüklüğü metre cinsinden, T^- saniye olarak (Sesin havadaki hızının 340 m/s olduğu varsayımıyla) aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\lambda_{rw} = 340T^- \quad (1.32)$$

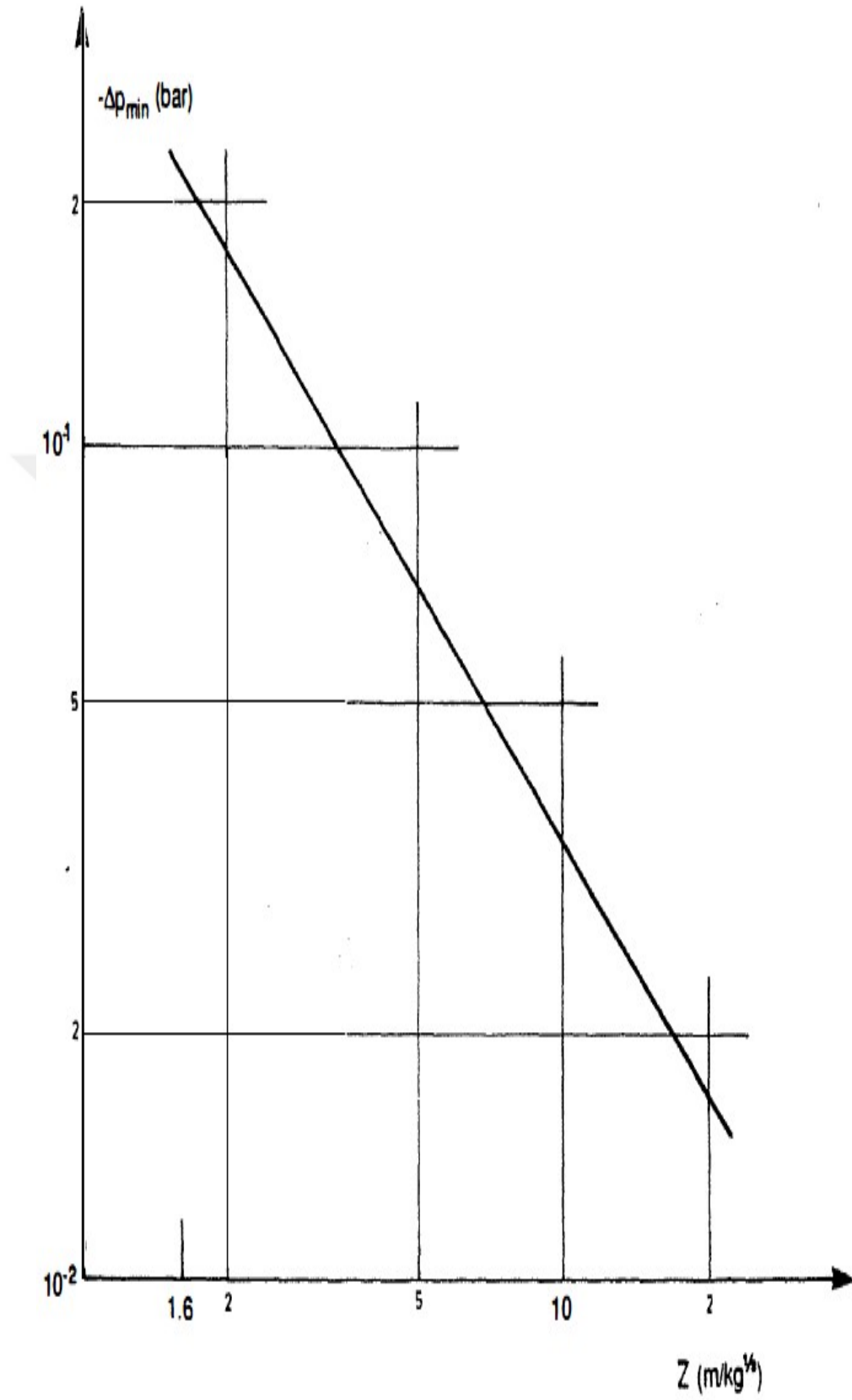
Büyük boyutlardaki patlama dalgası parametrelerinin ölçekli mesafeye bağlı olarak grafik olarak gösterimi mümkündür. Baker [7], Baker [12] ve TM5-1300 [13] gibi

farklı kaynaklardaki grafiklerden derlenen patlama dalgası parametreleri tek bir grafik altında Şekil 1.7.'de sunulmuştur. Alçak basıncın ölçekli mesafeye bağlı olarak değişimi Şekil 1.8.'de gösterilmiştir.

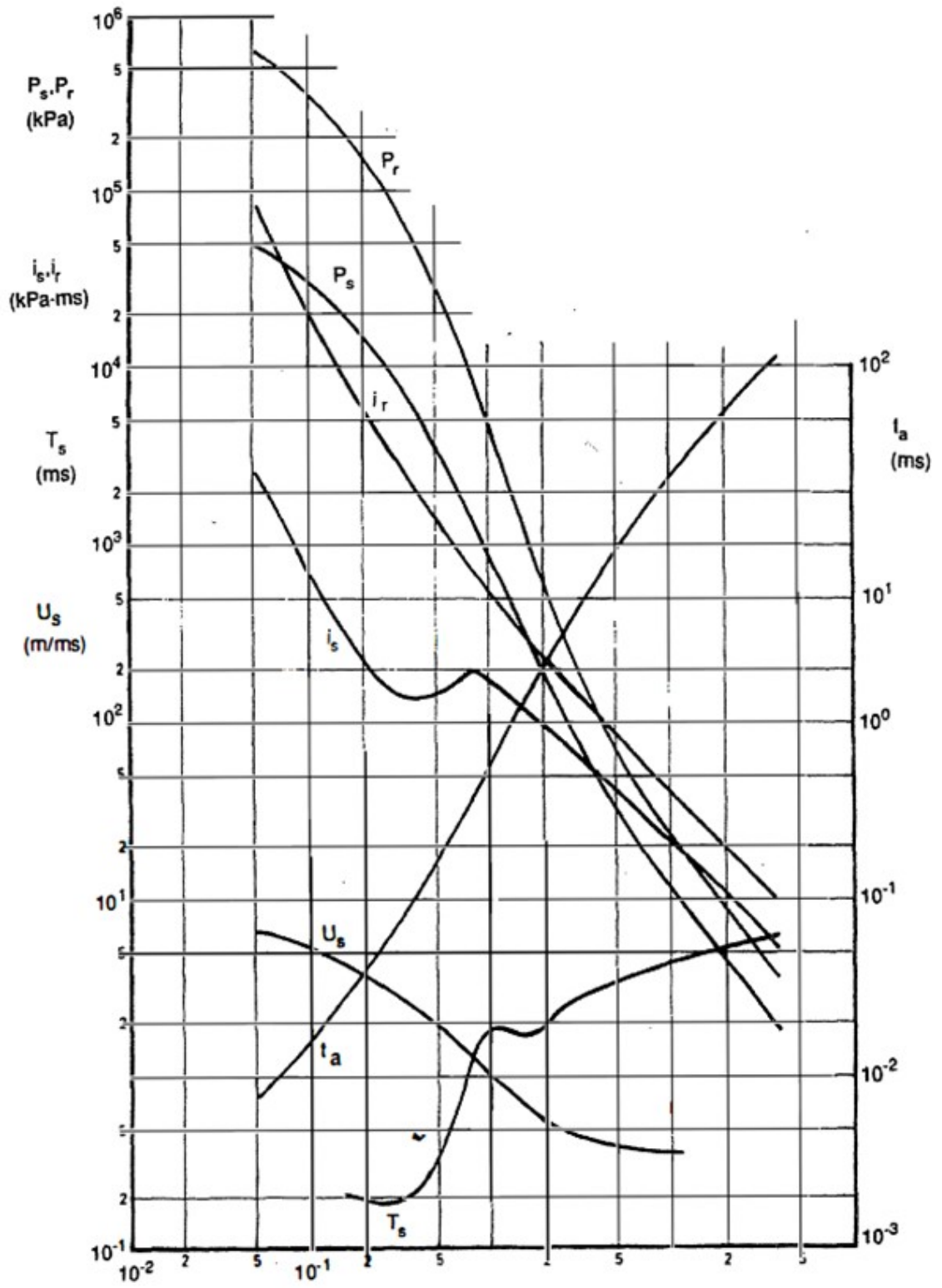
Bir başka yaklaşımda Şekil 1.9.'da verildiği üzere, parametreler 1 kg'lık TNT patlayıcısından uzaklığa bağlı olarak çizdirilir. Bu grafik Kingery ve Bulmash'ın yaptıkları çalışmadan uyarlanmıştır [14]. Kingery ve Bulmash'ın grafik olarak sundukları bu veriler daha sonra, "Eğri uydurma" yöntemi kullanılarak, hazırlanmasında TM5-855-1 [15]'in baz alındığı "Silah etkileri hesaplama programı CONWEP [16]" içerisine konulmuştur. Diğer önemli patlama dalgası parametreleri olarak dinamik basınç q_s , patlama dalgası ön yüzünün hızı U_s ($U_s, \bar{U}(= \frac{U_s}{a})$ ile tarif edilmiştir), dalga önyüzünün hemen arkasındaki parçacık hızı u_s ($u_s, \bar{u}(= \frac{u_s}{a})$ ile tarif edilmiştir) ve patlama dalgasının geçmişini gösteren basınç – zaman grafiğini açıklayan Friedlander denkleminde (2.7) dalga önyüzü parametresi b verilebilir. Şekil 1.7.'de bahsedilen bu parametrelerin ölçekli mesafe Z 'ye bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Küresel şekilli TNT patlayıcıları için yan yüz patlama dalgası parametreleri [11].

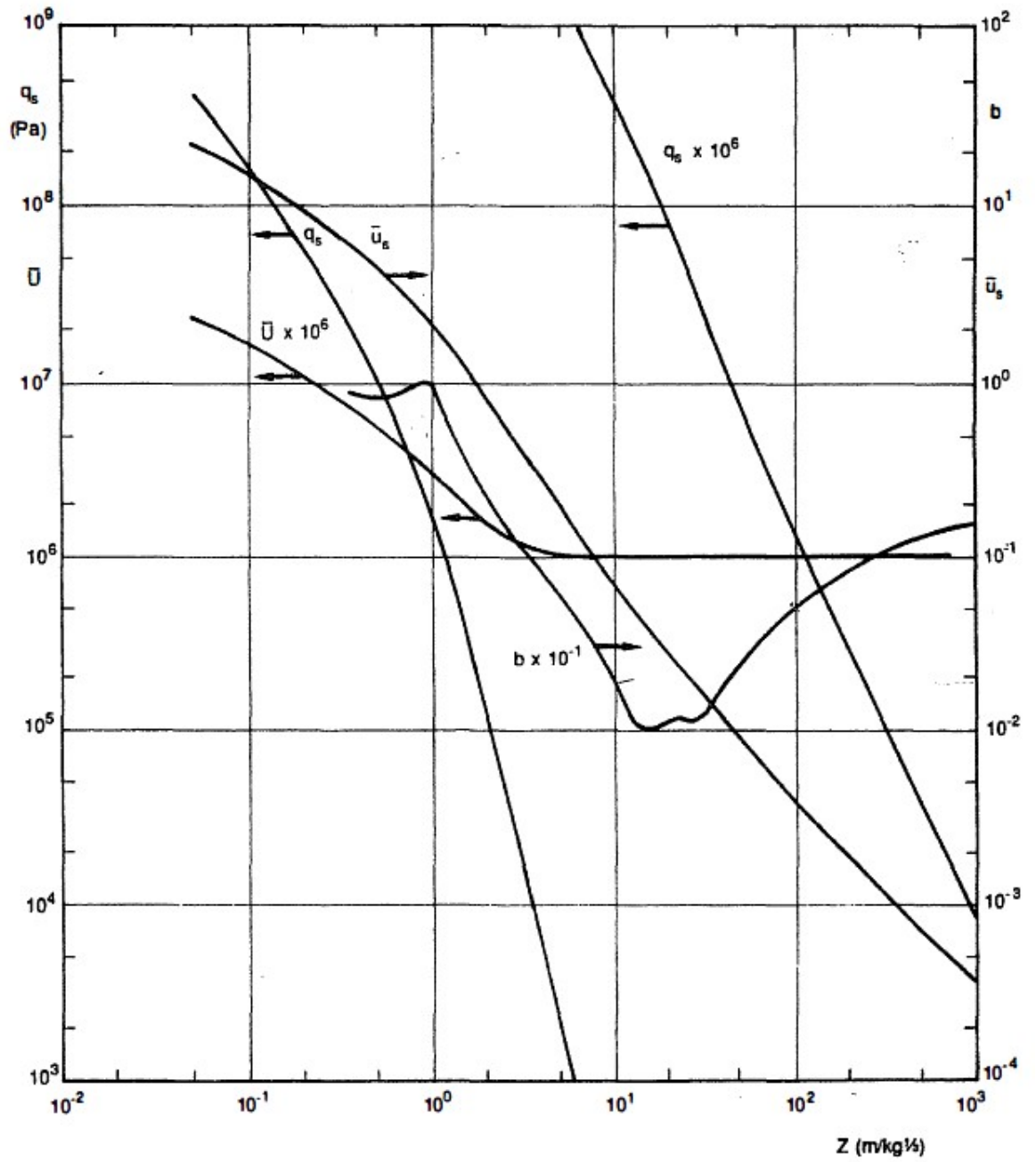


Şekil 1.8. Alçak basınç - ölçekli mesafe



Patlayıcıya olan uzaklık

Şekil 1.9. Patlayıcıdan olan mesafeye bağlı olarak patlama dalgası parametrelerinin tayini



Şekil 1.10. Küresel şekilli TNT patlayıcısı için patlama dalgası parametrelerinin ölçekli mesafeye bağlı olarak değişimi [7].

1.8. Patlama Dalgası Ölçeklendirme Kuralları

Patlama dalgasını ölçeklendirmek için genelde kullanılan yaklaşım, Hopkinson'un [17] ve Cranz'ın [18] ayrı ayrı yaptığı çalışmaların formüle edildiği tekniktir. Hopkinson – Cranz ölçeklendirmesi, Baker'in aşağıdaki ifadesinden ötürü küpkök ölçeklendirmesi olarak adlandırılır.

Benzer geometride, aynı malzemeden üretilmiş fakat farklı ebatlardaki iki patlayıcı aynı atmosferik ortamda infilak ettirildiğinde, özbenzeş (Self-similar) patlama dalgaları özdeş ölçekli mesafede oluşturulur [7].

Buradan aynı patlayıcı malzeme için kütleleri W_1 ve W_2 , çapları d_1 ve d_2 olan iki patlayıcı arasındaki aşağıdaki benzerlik oluşturulabilir;

$$W_1 \propto d_1^3$$

$$W_2 \propto d_2^3$$

$$\therefore \frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$$

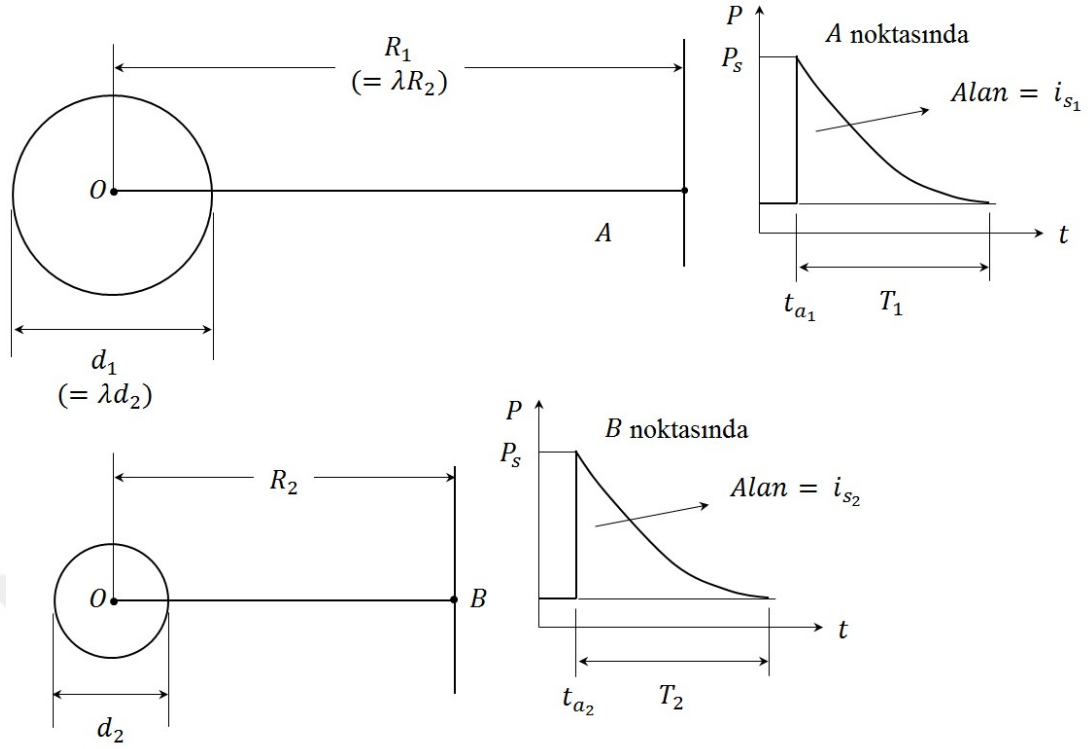
$$\therefore \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (1.33)$$

Eğer iki patlayıcının çapları oranı arasında $\frac{d_1}{d_2} = \lambda$ gibi bir oran var ise, Şekil 1.11.'de belirtildiği üzere, eğer iki patlayıcıdan aynı yüksek basınç değeri p_s oluşturulursa, belli basınç değerindeki mesafelerin, pozitif evrenin sürelerinin ve itkinin oranları da λ olur.

Verilen yüksek basınç değeri oluşturulduğunda, bu basınç değerlerine bağlı mesafeler (1.33) denklemi yardımıyla hesaplanabilir. Örnek olarak vermek gerekirse;

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (1.34)$$

Burada R_1 , belli bir basınç değeri W_1 patlayıcısı tarafından oluşturulurken, patlayıcı ve hedef arasındaki mesafe, R_2 ise aynı basınç değeri W_2 patlayıcısı tarafından oluşturulurken, patlayıcı ve hedef arasındaki mesafedir.



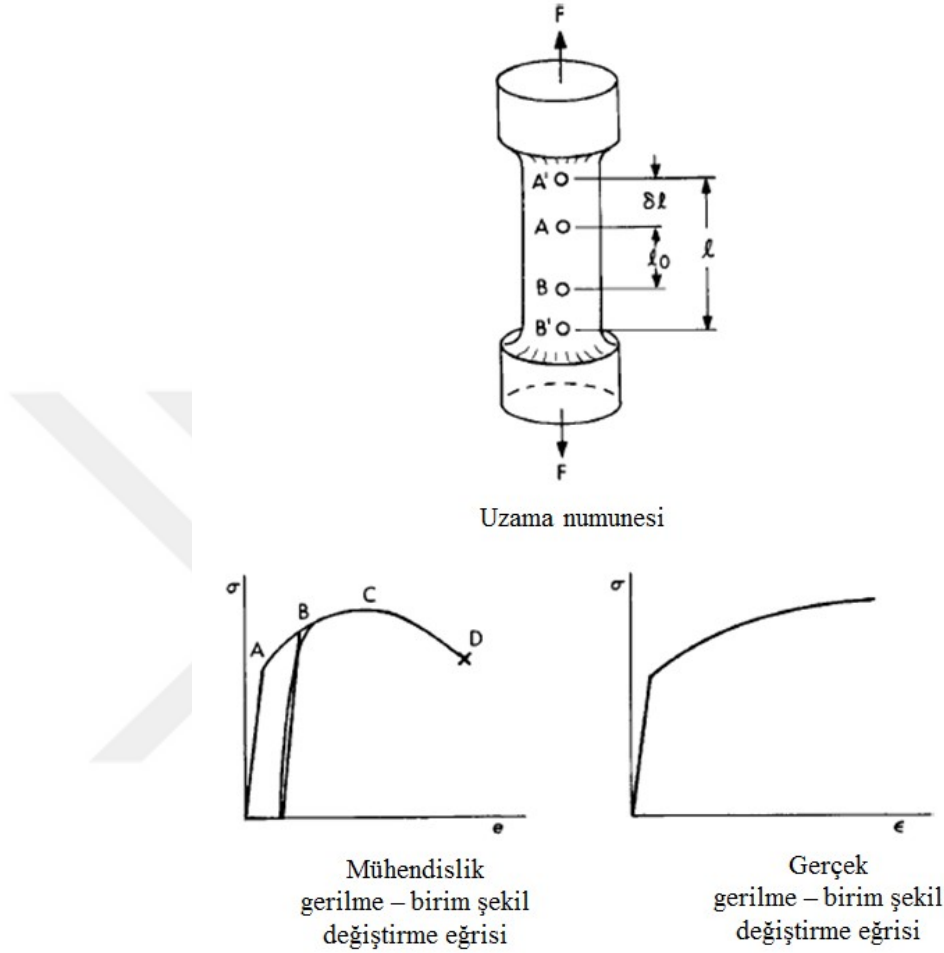
Şekil 1.11. Hopkinson - Cranz ölçeklendirme kuralının temeli [7].

1.9. Katılarda Şok Dalgaları

Çubuk geometrileri üzerinde malzeme davranışını inceleyen çalışmalarda gerilmeler malzemenin akma mukavemetine kadar ve birim şekil değiştirme hızları da 10^2 ila 10^3 s^{-1} değerleri ile sınırlandırılmıştır. Tek eksenli tipik gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 1.12.’de gösterilmiştir. Bu eğrilerden görüleceği üzere, sertleşme olsa dahi, gerilme değeri çok fazla yükselmez. Bazı malzemelerde tek boyutlu gerilme durumundan sapma veya kırılma başlama anından hemen önce gerilme değeri, akma mukavemetinin 2-3 katına çıkabilmektedir [19]. Malzemenin plastisitesi daha yüksek akma değerlerine çıkmayı engellemektedir. Bu yüzden yüksek gerilme ve birim şekil değiştirme hızlarını içeren mukavemet bölgelerinin hesaplanması gerekmektedir.

Şekil 1.12.’de gösterilen tek eksenli gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi, şok yüküne maruz kalmış bir malzemenin gerilme ve birim şekil değiştirme durumunu izah etmede yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple böyle bir eğriye ait elastisite modülü,

akma muvemeti, kopma mukavemeti ve uzama gibi nicelikler, şok yükü altında malzemenin davranışını tanımlamak için uygun değildir.



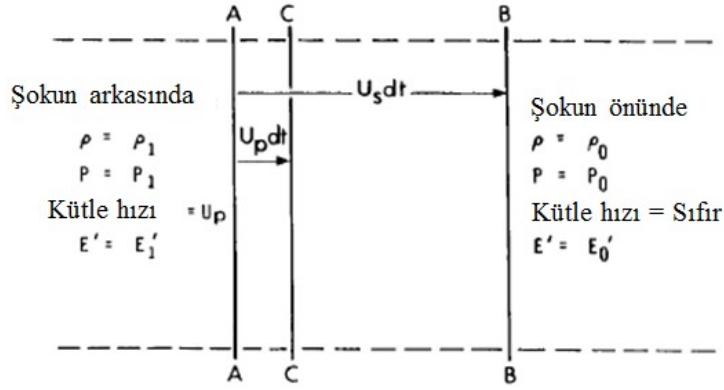
Şekil 1.12. Test numunesi ve tek eksenli gerilme durumları için tipik gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri

Malzemelerin şok yüklemesi altında davranışlarını incelemek için farklı bir perspektiften olaylara bakmak gerekir.

1.9.1. Tek eksenli şekil değiştirme

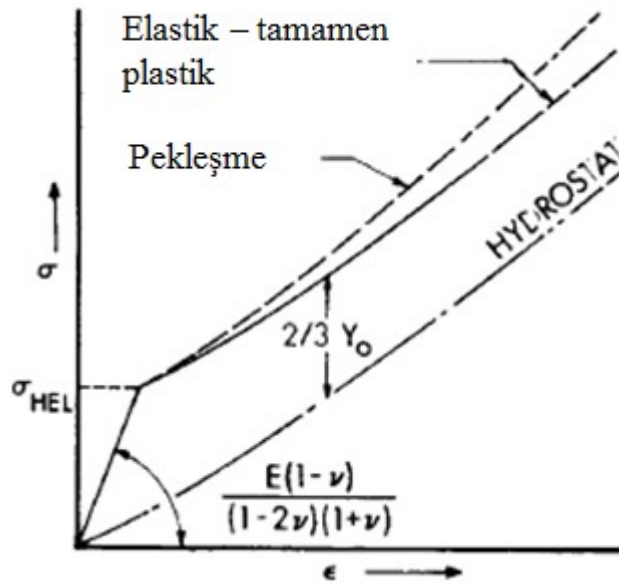
Şekil 1.13.'te gösterildiği üzere, deformasyonun tek boyut ile sınırlı olduğu, düzlemsel dalgaların bir malzeme boyunca ilerlediği ve yanıl birim şekil değiştirme gibi boyutların ve kısıtlamaların sıfır olduğu bir durum farzedildi. Bu durum için, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 1.14.'teki durumu alacaktır.

Düzlemsel şok dalgasının ilerlemesi



Şekil 1.13. Katı bir cisim içerisinde ilerleyen düzlemsel şok dalgasının detayları

Şekil 1.12. – 1.14. arasındaki değişimi anlamak için, gerilmelerin ve birim şekil değiştirmelerin tek boyuttaki deformasyon için gerçekleştiği farzedilmiştir. Bu çalışmalarda birim şekil değiştirme değerleri %30'un altında seyretmektedir, aksi takdirde termomekanik etkileşim önemli olacak ve deneysel sonuçları öngörebilmek için daha karmaşık bir analiz modeli gerekecektir.



Şekil 1.14. Tek eksenli şekil değiştirme durumları içi gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi

Üç asal birim şekil değiştirme, elastik ve plastik bileşenlere ayrılırsa;

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p \quad (1.35)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2^e + \varepsilon_2^p \quad (1.36)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_3^e + \varepsilon_3^p \quad (1.37)$$

Üst indisler e ve p , sırasıyla elastik ve plastik anlamına gelmektedir ve alt indisler 3 asal eksenini temsil etmektedir.

Tek boyutlu deformasyonda

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0 \quad (1.38)$$

Buradan

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^p &= -\varepsilon_2^e \\ \varepsilon_3^p &= -\varepsilon_3^e \end{aligned} \quad (1.39)$$

elde edilir. Birim şekil değiştirmenin plastik kısmı sıkıştırılmaz olarak alınır;

$$\varepsilon_1^p + \varepsilon_2^p + \varepsilon_3^p = 0 \quad (1.40)$$

$\varepsilon_2^p = \varepsilon_3^p$ 'i kullanarak, simetriden ötürü;

$$\varepsilon_1^p = -\varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = -2\varepsilon_2^p \quad (1.41)$$

yazılabilir. Asal birim şekil değiştirme ilişkilerini bir kenarda tutarak, $\varepsilon_1^p = 2\varepsilon_2^e$ olarak varsayılırsa;

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p = \varepsilon_1^e + 2\varepsilon_2^e \quad (1.42)$$

$$\varepsilon_1^e = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{2\nu}{E}\sigma_2 \quad (\sigma_2 = \sigma_3 \text{ olduğu için}) \quad (1.43)$$

$$\varepsilon_2^e = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1-\nu}{E}\sigma_2 - \frac{\nu}{E}\sigma_1 \quad (1.44)$$

$$\varepsilon_3^e = \frac{\sigma_3}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{1-\nu}{E}\sigma_3 - \frac{\nu}{E}\sigma_1 \quad (1.45)$$

Yukarıdaki denklem ve ε_1 için olan ilişki kullanılırsa, (1.46) eşitliği elde edilir;

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1(1-2\nu)}{E} + \frac{2\sigma_2(1-2\nu)}{E} \quad (1.46)$$

Bu uygulamada Tresca veya vonMises'e göre plastisite şartı;

$$\sigma_1 - \sigma_2 = Y_0 \quad (1.47)$$

σ_2 için bu tanım kullanılırsa;

$$\sigma_1 = \frac{E}{3(1-2\nu)} + \frac{2}{3}Y_0 = K\varepsilon_1 + \frac{Y_0}{3} \quad (1.48)$$

elde edilir. Burada K “Hacimsel Esneklik Katsayısı”dır (Bulk modulus). Eğer yukarıdaki denklemler gerilme için basınç olarak çözdürülürse, (1.49) eşitliği bulunur.

$$\sigma_1 = P + \frac{4}{3}Y_0 \quad (1.49)$$

(1.49) eşitliği tek eksenli birim şekil değiştirme için gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisidir. Tek eksenli gerilme için Hooke kanununa göre $\sigma = E\varepsilon$ idi. Bu nedenle, tek eksenli gerilme ve tek eksenli birim şekil değiştirme arasındaki en önemli fark,

“Hacimsel esneklik sıkıştırılabilirliği”dir. Gerilme bundan sonra noktadan itibaren akma gerilmesine ve pekleşme bakmadan artmaya devam eder.

Malzemenin yanal olarak deforme olabilmesi için yeterli zamanın olmadığı yüksek hız olayları için, tek eksenli birim şekil değiştirmenin bir şartı oluşur. Zaman boyutunda daha sonra, yanal yüzeylerden dalgalar geri döner ve yanal deformasyon gerçekleşmeye başlar. Bundan sonra gerilme düşmeye başlar ve tek eksenli gerilme şartı oluşmaya başlar.

Bu tek boyuttaki elastik şekil değiştirmenin özel hali için;

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e \quad (1.50)$$

(1.50) denklemi elde edilir. Benzer şekilde diğer iki eksen için de (1.51) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2^e = \varepsilon_3 = \varepsilon_3^e = 0 \quad (1.51)$$

Şekil değiştirmenin plastik bileşenleri de üç eksenle birbirine ve sifıra eşittir:

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_2^p = \varepsilon_3^p = 0 \quad (1.52)$$

Poisson oranına, gerilmeye ve elastisite modülüne bağlı olarak elastik şekil değiştirme (1.53) denklemindeki gibi elde edilir.

$$\varepsilon_2^e = 0 = \frac{1 - \nu}{E} \sigma_2 - \frac{\nu}{E} \sigma_1 \quad (1.53)$$

(1.53) denkleminde ikinci eksenledeki gerilme yalnız bırakılırsa, birinci eksenledeki gerilmeye bağlı olarak (1.54) eşitliği bulunur.

$$\sigma_2 = \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \right) \sigma_1 \quad (1.54)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - 2\nu^2 \frac{\sigma_1}{E(1-\nu)} \quad (1.55)$$

(1.55) denkleminde gerilme yalnız bırakılarak, tek eksenli gerilme hali, Poisson oranına, elastisite modülüne ve şekil değiştirmeye bağlı olarak (1.56) denklemindeki gibi yazılabilir.

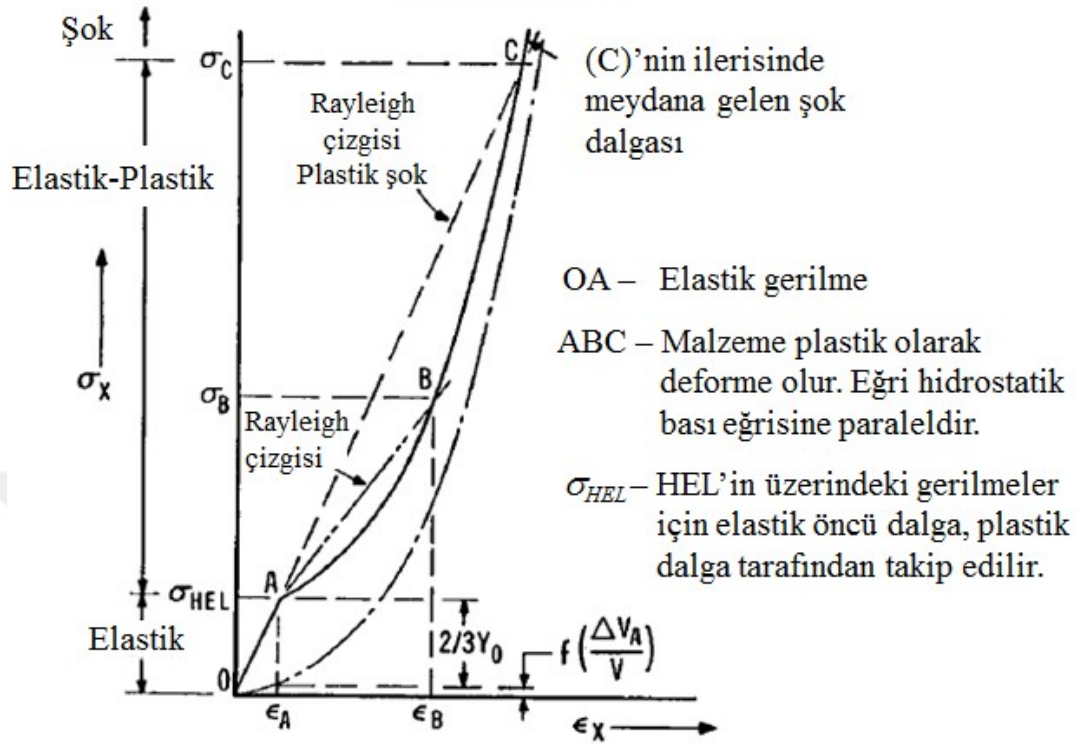
$$\sigma_1 = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} E \varepsilon_1 \quad (1.56)$$

Şekil 1.14.'te sırasıyla tek eksenli gerilme ve birim şekil değiştirme durumları için temsili gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri verilmişti. Üzerinde durulması gereken farklar aşağıdaki gibidir:

- Tek eksenli birim şekil değiştirme hali için modülde $\frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}$ katında bir artış vardır.
- Tek eksenli birim şekil değiştirme için akma noktası “Hugoniot Elastik Limit” olarak ifade edilir, σ_{HEL} ile gösterilir. Plaka geometrilerdeki tek boyutlu elastik dalga yayılımı için σ_{HEL} maksimum gerilme değeridir.
- Tek eksenli birim şekil değiştirme aynı zamanda “Hugoniot Eğrisi” olarak bilinir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, Hugoniot eğrisindeki σ_1 gerilme değerinden $\frac{2}{3}Y_0$ değeri kadar bir sapma vardır. Burada Y_0 , statik akma mukavemetidir. Eğer akma mukavemeti, pekleşen bir malzemede değişebiliyorsa, o zaman σ_1 ile P eğrileri arasında da bir farklılık görülecektir. “Hydrostat” ise, mukavemeti düşük bir malzemenin izleyeceği bir eğridir.

Şekil 1.15.'de tek eksenli birim şekil değiştirme halindeki bir elastik – tamamen plastik malzeme için bilindik bir yükleme çevrimi verilmiştir. Tersine yüklemenin C noktasında olduğuna özellikle dikkat edilmelidir.

Hugoniot Eğrisinin Elastik, Elastik-Plastik ve Şok Dalgası Alanları



Şekil 1.16. Elastik, elasto-plastik bölgeler ve şok dalgasının yayılımı

$$c_E^2 = \frac{E(1-\nu)}{\rho_0(1-2\nu)(1-\nu)} \quad (1.57)$$

Yukarıdaki hıza haiz elastik dalgayı plastik bir dalga takip edecektir. Plastik dalganın hızı birim şekil değiştirme değeri verilen belli bir gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin eğiminin bir fonksiyonudur. Plastik dalganın hızı:

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \quad (1.58)$$

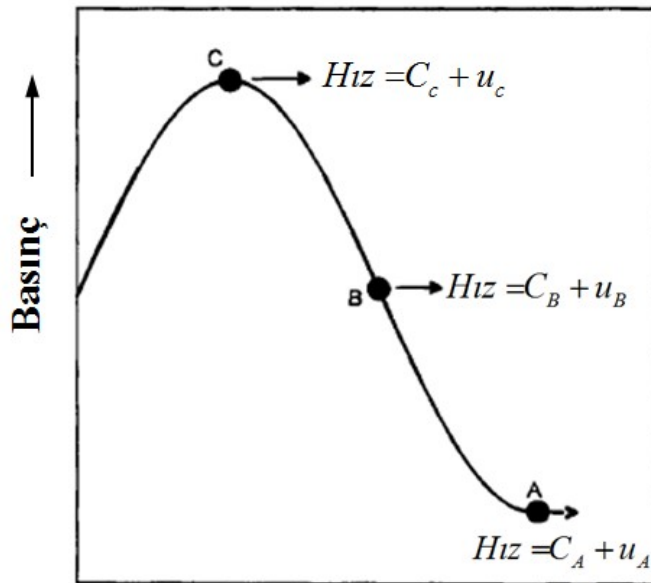
Şekil 1.16.'daki σ_0 değerinin üzerinde, güçlü şok dalgaları bölgesi mevcuttur. Malzeme plastik gibi davranır ve akışkana benzer karakteristikler sergiler. Tek, keskin bir ön şok dalgası bu bölgede genelde U ifade edilen bir hızda yayılır. Bu U hızı bir hal denklemi (Equation-Of-State, EOS) yardımıyla bulunur. "Bu duruma

nasıl erişilir?” sorusuna yanıt şu şekilde verilir. Elastik bölgede, malzeme içindeki dalga hızı veya ses hızı “ c ”, sabittir. Genelde ses hızı, basınçtaki değişimin, yoğunluktaki değişime oranıdır:

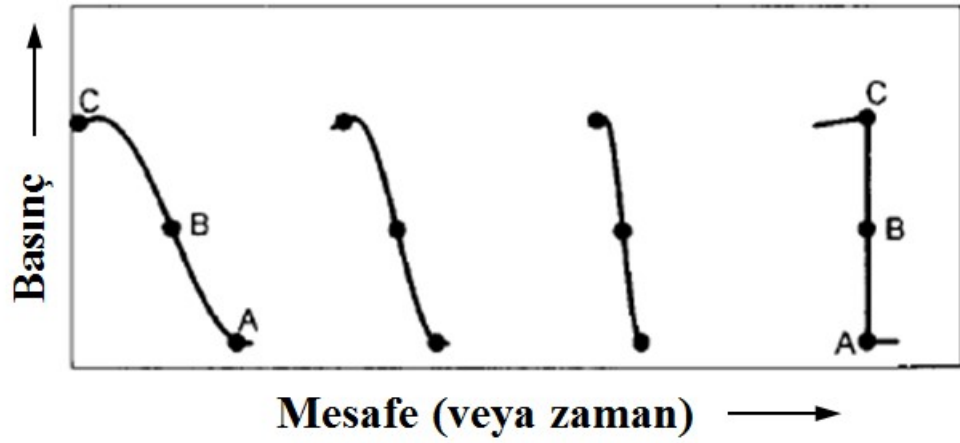
$$c = \frac{dp}{d\rho} \quad (1.59)$$

Elastik bölgede, basınç ve yoğunluk birbirleriyle doğrusal olarak ilişkilidir. Elastik bölgenin ilerisinde, dalga hızı basınçla veya yoğunlukla artarken, P/ρ , doğrusal olarak orantılı değildir. Dalga hızı gerilme ya da basınçla birlikte artmaya devam eder.

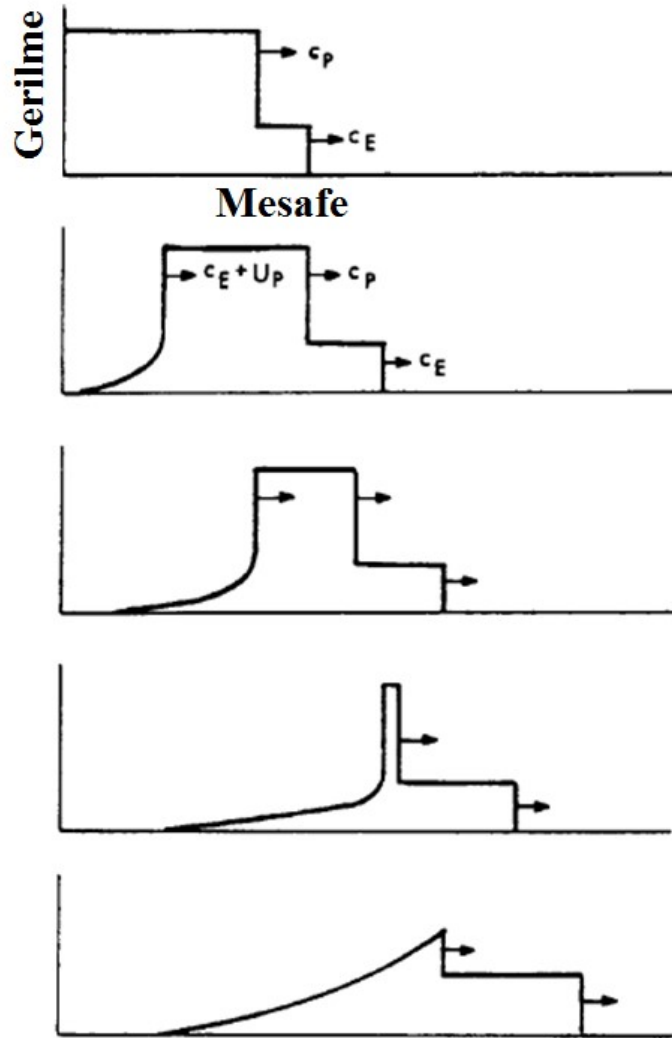
Cooper [20], şok olayının çok açık bir şekilde tanımını yapmıştır. Şekil 1.17.’de sağ tarafa doğru hareket eden bir basınç dalgasının belli bir kısmı gösterilmiştir. A noktasında basınç azdır, dolayısıyla parçacık hızı da oldukça düşüktür. Bundan dolayı basınç dalgasının toplam hızı düşüktür. B noktasındaki dalga hızı, A noktasındaki dalga hızından daha yüksektir. Bunun sebebi, elastik limitin üstündeki bölgede, dalga hızı basınç yükseldikçe artar. C noktasındaki dalga hızı da B noktasından yüksektir.



Şekil 1.17. Yüksek basınçlı dalganın yayılımı [20].



Şekil 1.18. Basınç dalgasının şok dalgasına dönüşmesi [20].



Şekil 1.19. Şok dalgasının, arkadan gelen seyrelti dalgasının etkisiyle gücünü kaybetmesi durumu

Net sonuçlar Şekil 1.18.'de verilmiştir. Dalga düşey yönde bir çizgi halini alıncaya kadar dikleşmeye devam etmektedir. Bu düşey yönde oluşan dalgaya “Şok Dalgası” denmektedir. Bu andan itibaren dalganın önündeki ve arkasındaki maddelerinin birbirlerine düzgün geçişi mümkün değildir. Bir diğer deyişle, maddenin bu iki durumu arasında bir süreksizlik meydana gelmiştir.

Şekil 1.19.'da gösterildiği üzere, eğer uygulanan yüklemenin belli bir süresi varsa, yükün kaldırılmasından sonra elastik bir yük boşaltma dalgası (Elastic unloading wave), oluşur. Boşaltma dalgası, bası dalgasından daha hızlı hareket eder ve bu durumdan ötürü kısa süreli bir darbe için, bası genliğinin şiddeti arkadaki boşaltma tarafından hafifletilebilir. Yük boşaltmanın gerçekleştiği nokta “Yakalama mesafesi (Catch-up distance)” olarak adlandırılır ve genelde “Gelen darbe kalınlığı (incident pulse thickness)” göz önünde bulundurularak tanımlanır.

1.10. Toprak Altında Patlama

Kara mayınları genelde toprak altına saklanırlar. Fiserova [21], toprak yapısının karmaşık bir sistem olduğunu yaptığı çalışmada açıklamıştır. Toprak, katı parçacıkların oluşturduğu iskeletin arasındaki boşlukların, su ve hava gibi maddeler ile doldurmasıyla oluşur. Parçacıklar arasındaki temas alanlarında iki farklı kuvvet vardır. Elektro-kimyasal reaksiyon sonucunda oluşan yüzey kuvveti toprağı sıkılaştırırken, yerçekimi kuvveti toprağı gevşetir. Mayın patlaması sırasında ilk olarak infilak dalgası patlayıcı madde boyunca ilerleyerek, ortamda yüksek basınç ve sıcaklık oluşturur. Bu yüksek basınç ve sıcaklık, toprağı ve havayı ortamdaki uzaklaştırmaya zorlarken, patlama noktasından her yöne yayılan bir basınç dalgası meydana getirir. Bu esnada toprak krater formunu alırken, patlama esnasında oluşan parçacıklar yüzeye çıkar. Toprağın kinetik enerjisi artar ve yukarı doğru hareket etmeye başlar. Hedefe çarptığında ya da ulaşabileceği maksimum yüksekliğe vardığında toprak geri döner ve nihai krater yüzey şeklini alır.

Krater, A.B.D Ordusu tarafından Şekil 1.20.'de gösterildiği gibi patlamanın meydana getirdiği çukur olarak tarif edilmektedir [15]. Krater normalde, patlamanın ardından

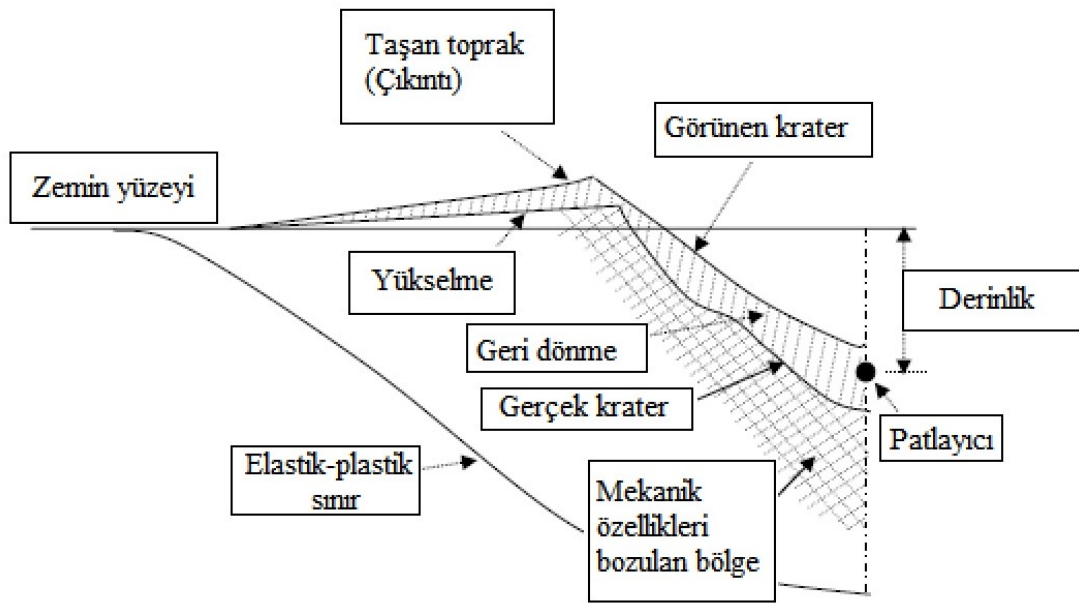
gözükten çukur olan “Görünen krater” olarak tanımlanır. “Gerçek krater” ise patlamanın şiddetiyle toprakta meydana gelen çukur olup, toz ve kırıntılar tarafından kapatılmıştır. Genelde gerçek krater yarıçapı tüm patlayıcı derinlikleri için görünen krater çapından %10 ila 15 daha büyüktür.

Patlayıcı derinliği (DOB) optimum değerinden daha düşüktür. Optimum patlayıcı derinliği krater hacminin maksimum olduğu değerdir. Yüksek patlayıcının infilak etmesi sonucu oluşmuş krater derinliklerinde, toprak ağırlığından dolayı krater şeklini bozma eğilimindedir. Yüzeyde, mekanik özellikleri bozulmuş bölge ve plastik bölge yüzey yer değiştirmelerinin ve yükselmelerin olduğu bölge haline dönüşür. Bu bölgeler taşan topraklar (çıkıntı) ile örtülür. Daha büyük krater, daha fazla çıkıntı demektir. Eğer taşan toprağın ağırlığı, hacmi ve yüksekliği yeterli miktarda ise çıkıntı hedef yapıya ve personele zarar verebilir. Bu durum havada veya sert bir zemin üzerinde gerçekleştirilen patlamaların meydana getirdiği patlama yüklerinden farklıdır. Böyle bir koşulda yüzeyde çıkıntı oluşmamaktadır.

Islak toprak, kuru topraktan daha geniş krater meydana getirdiği için, kumlu toprak içerisinde oluşan krater, çamur içerisindekinden farklı bir yapıda ve şekildedir. Toprağın bünyesindeki su bileşenleri zeminde, bağlayıcı toprak içindeki şok dalgalarının hareketi üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Özellikle toprak yoğunluğunun derecesi %95’in üzerinde olan durumlarda bu etki daha da artmaktadır [15].

Nem oranı, toprak içerisindeki bağlayıcılığı arttıran bir etkidir ve çıkıntı üzerinde yığın oluşmasına yardımcı olmaktadır [22]. Bundan dolayı nem oranı arttıkça yığın miktarı artar. Yığın miktarının artması, taşınan enerji miktarını arttırarak hedef yapıya daha fazla enerji iletilmesine sebep olur.

Patlayıcı derinliği ne kadar fazla olursa, toprak tarafından taşınan enerji miktarı ve yapı üzerindeki hasarı da o derece yüksektir. Patlayıcı derinliği eğer patlayıcının şiddeti az ise zeminde herhangi bir çıkıntı oluşturmaz.



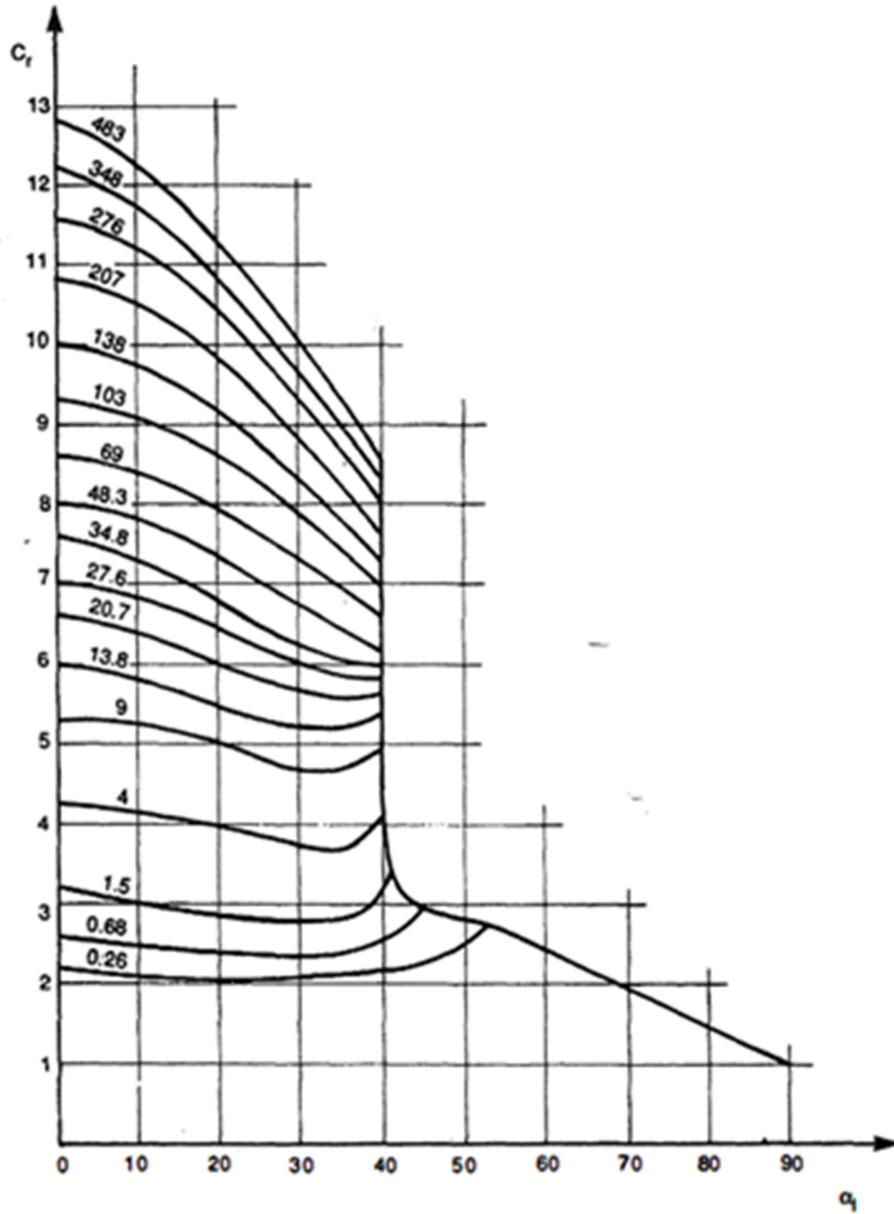
Şekil 1.20. Yarım krater profili, A.B.D ordusu [15].

1.11. Patlama Yüküne Karşı Yapının Davranışı

Elliot, May ve Smith [23], şok dalgalarının yapı ile etkileşimlerini dış yükleme ve iç yükleme olarak ikiye ayırmışlardır. Yükleme durumu, patlamanın hedef yapının iç tarafında veya dış tarafında olmasına bağlı olarak değişmektedir.

Şok dalgası yapının dış tarafında oluşursa, yapının yüzeyine doğru ilerler. Hızlı ilerleyen sıkıştırılmış hava ilk olarak yapının dayanak noktalarına iletilir ve buradan yansıyarak yüzeyde bir basınç oluşturur. Şok dalgası, dalğanın ilerlediği yüzeye belli bir açı ile bakan sert bir yüzeye veya yapıya çarptığında (0° ve 180° dışındaki tüm açılarda), yüzeyde yansıyan basınç (reflected pressure) oluşturur ve bu basınç çarpma basıncından (incident pressure) çok daha yüksek bir değer ulaşır [15]. Yüksek yansıyan basınç daha sonra düşük basınç bölgelerine ilerleyerek, o bölgelerde basınç miktarını artırır. Şok dalgasının ilerleme yönüne göre yansıyan basınç, yapıya dik yönde etki ediyorsa maksimum, yapıya paralel etki ediyor ise minimum değerini alır. Minimum yansıma basıncı çarpma basıncıyla aynı değerdedir. Yansıtan yüzey, üzerindeki basınç ve itki değişimleri çarpma açısının ve çarpma basıncının büyüklüğüne bağlı bir fonksiyonudur. Örneğin, Smith ve Hetherington [8]'in Şekil 1.21.'de belirttiği üzere 10° çarpma açısındaki yansıma katsayısı (yansıyan

basınç/çarpma basıncı), 0° yansımaya katsayısından daha düşüktür. Bu durum 10° çarpma açısındaki yansımaya basıncının, her zaman 0° çarpma açısındaki yansımaya basıncından daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca çok yakın mesafelerdeki patlama testlerindeki ölçümlerde yansımaya katsayısının 20'ye kadar çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.21. Çarpma basıncının farklı değerleri için yansımaya katsayısının çarpma açısıyla olan karşılaştırması [2].

Yansımayla birlikte yeteri büyüklükteki bir şok dalgası, yapının etrafını kuşatarak yayılabilir. Bundan dolayı şok dalgasına maruz kalan tüm yüzeyde bası yönünde bir

basınç oluşturur. Yapı aynı zamanda şok dalgasının büyüklüğüne ve şekline bağlı olarak değişken basınç bileşeni (havanın ve patlayıcı partiküllerinin yüksek hızlı ilerlemesiyle oluşan basınç) tarafından meydana getirilen sürüklenme kuvvetine maruz kalabilir. Araçlar ve insanlar gibi küçük hedefler, sürüklenme yükü bileşenine büyük yapılardan daha fazla reaksiyon gösterebilirler.

Eğer patlayıcı bir yapı içerisinde infilak ederse, yükleme çok daha karmaşık hale gelir. İlk olarak, yapı patlamanın sınırlandırılmış olması dolayısıyla bir dizi yansıyan şok dalgasıyla (süpersonik hızda) karşılaşır. Daha sonra, patlama ürünlerinden gelen ilave basıncın oluşturduğu yüke maruz kalır. Bu yük yapının şekline bağlı olarak patlama ürünlerini tahliye edip/etmemesiyle alakalı olarak değişir.

Plaka gibi bir yapı, patlama yükü (dış yükler) ile etkileşime geçtiğinde deforme olur ve iç yükler (yapının deforme olmasına direnç gösteren kuvvetler) yapı elemanları içine yerleşirler. Eğer dış yükler artarsa, deformasyon miktarı artar. Yapı elemanlarındaki maksimum bükülme ve gerilme miktarı, plaka geometrisinden ve plaka köşelerindeki destek tipinden etkilenmektedir [15].

Basit düz bir plaka üzerindeki büyük deformasyon miktarı, destek kirişleri ve güçlendiriciler kullanılarak azaltılabilir. Birçok plaka yapısında sınır koşulları ne basit destekli ne de sabit desteklidir. Sabit destekli sınır koşullarının sadece analizde kullanılması tutucu bir yaklaşım olup, eğer yapıda gerçekten hiç basit destek yok ise tercih edilmelidir.

Ogorkiewicz [24] mayın patlaması esnasında araç gibi bir hedefin gövde tabanında 150 mm veya daha fazla büyüklükte bir elastik deformasyon oluşacağını daha sonra tabanın $2.400.000 \text{ m/s}^2$ maksimum ivme ile geri döneceğini öngörmektedir. Ngo [25] patlama yüklerinin $10^2\text{-}10^4 \text{ s}^{-1}$ gibi çok yüksek birim şekil değiştirme hızlarına çıkabildiğini tahmin etmektedir. Bu seviye birim şekil değiştirme hızlarında malzemenin dinamik mekanik özellikleri statik yük altındakilerden farklı olabilmektedir. Aynı çalışmada 10^{-3} s^{-1} 'den $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızlarına çıkıldığında adi çeliğin akma mukavemeti de iki katına çıkabilmektedir. Bu nedenle

yapısal patlama yükleri modellenirken, yüksek birim şekil değiştirme hızlarının değişimini hesaplayabilen malzeme modelleri kullanılmalıdır.

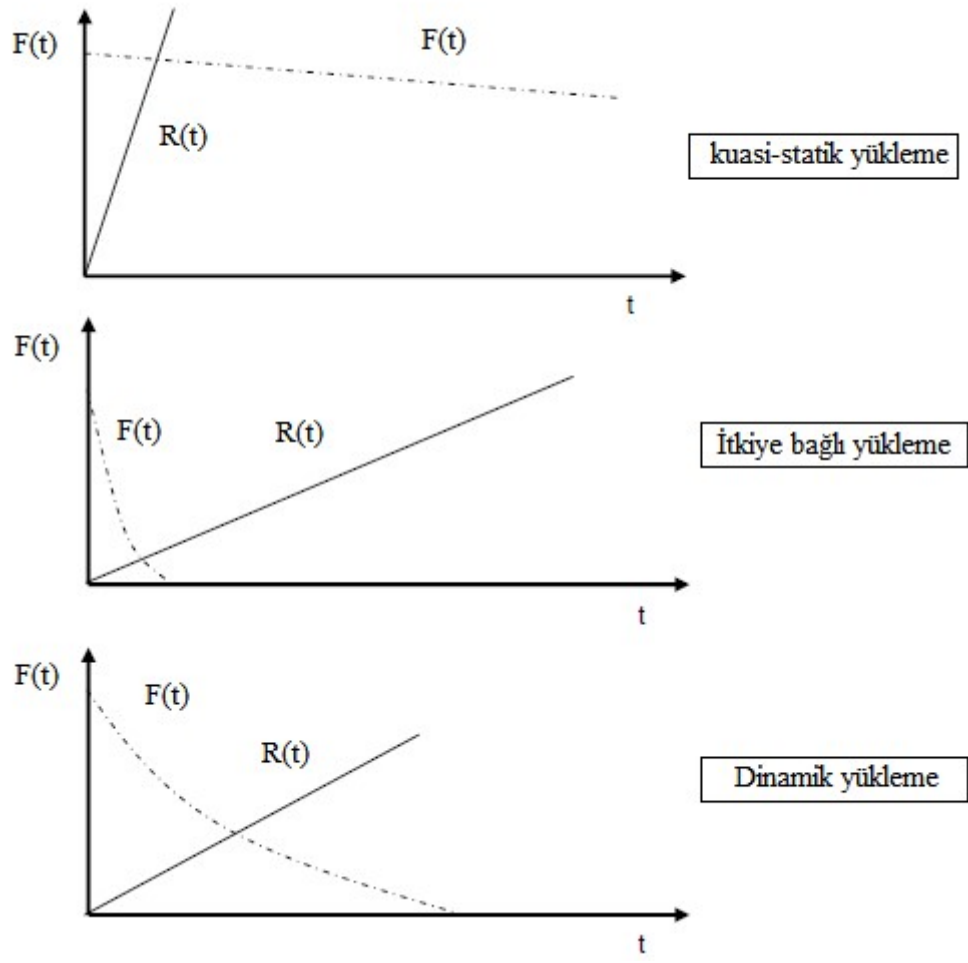
Smith ve Hetherington [8] patlama yükü ve yapının davranışı ile ilgili 3 durum tanımlaması yapmıştır. Şekil 1.22.'de bu 3 durum grafik olarak özetlenmiştir. Burada $R(t)$, zamana bağlı olarak yapının gösterdiği direnci ve $F(t)$ ise zamana bağlı patlama yükünü temsil etmektedir.

İlk durum olan kuasi-statik yüklemede, patlama yükü süresi yapının salınımının doğal frekansından çok daha uzundur. Bu duruma nükleer bir cihazdan çıkan şok dalgalarının orta veya uzun mesafedeki bir yapıya ilerlemesi örnek verilebilir. Maksimum yerdeğiştirme miktarı sadece patlama yükünün maksimum değerinin ve yapının katılığının bir fonksiyonu olup, ne pozitif evre süresiyle ne de yapının kütlesiyle ilişkilidir.

İkinci durum ise itkiye bağlı yükleme olarak tanımlanmaktadır ve patlamanın pozitif evre süresi hedefin doğal cevap frekansından çok daha kısadır. Bu durumda patlama yükü maksimum değerine erişir ve yapı reaksiyon göstermeden minimum değerine düşer.

Son durum ise dinamik yükleme halidir. Dinamik yüklemede patlama yükü süresi ile yapının tepkisi birbirine yakındır.

Yapı reaksiyonunun çözümüne dair temel yaklaşım Mays ve Smith [26] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, yapı üzerinde kuasi-statik yükleme halinde yapılan iş ya da itkiye bağlı yükleme durumunda toplam kinetik enerji, yapının deforme olması esnasında yapı üzerinde biriken birim şekil değiştirme enerjisine eşitlenmiştir. Bu analiz, yapı ve yükleme tiplerinin karmaşık olduğu durumlarda uzun sürmektedir. Bir diğer yaklaşım ise yapının davranışının, yapının tek serbestlik dereceli bir sistem gibi davrandığı düşünülerek değerlendirilmesidir. Burada yapının zamana bağlı deformasyonunu bulmak için, tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi analitik ve sayısal olarak çözülmesi ile elde edilir.



Şekil 1.22. Üç farklı durum için yapının davranışı [26].

BÖLÜM 2. PATLAMA DENKLEMLERİNİN SAYISAL BENZETİM MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Mayın patlaması gibi karmaşık bir kimyasal reaksiyon olayının benzetiminde, sayısal öngörüler yapmadan analitik çözüm elde etmek oldukça zordur. Bu gibi problemlerde sayısal yöntemler vasıtasıyla mayın patlamasının benzetiminin yapıldığı LS-DYNA [27] ve AUTODYN [28] gibi hidrokodlar sıklıkla kullanılmaktadır. Sayısal benzetim modelleri (Sayısal simülasyonlar) genelde Newton'un hareket kanununa, hal denklemine ve temel malzeme modeli esaslarına dayanmaktadır. Yapışkan olmayan sıkıştırılmaz sıvı akışı Newton'un hareket kanunu tarafından tanımlanabilir. Bu kanun kütle, momentum ve enerji korunumu ve enerji denklemleri haline getirilirse, matematiksel olarak aşağıdaki denklemler elde edilir;

Kütle korunumu:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Momentum korunumu:

$$\frac{dv_i}{dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2.2)$$

Enerji korunumu:

$$\frac{de}{dt} = \frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} S_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (2.3)$$

Burada ρ malzemenin yoğunluğunu, v_i hızı, e özgül iç enerjiyi, f_i kütle başına dış kuvveti, ε_{ij} deviatorik birim şekil değiştirme hızını ve σ_{ij} gerilme tensörünü ifade etmektedir. σ_{ij} gerilme tensörünün hidrostatik kısmı, basınç p ve deviatorik kısmı S_{ij} ’den oluşmaktadır.

Hal denklemi basınç, yoğunluk ve özgül iç enerji arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır ve akışkanlarda sıkıştırılabilirliğin etkilerini açıklar.

Hal denklemi:

$$p = p(\rho, e) \quad (2.4)$$

Temel malzeme modeli, malzemenin dayanımı gerilmenin deformasyon ile olan ilişkisini birim şekil değiştirme ε_{ij} , birim şekil değiştirme hızı etkisi $\dot{\varepsilon}_{ij}$, iç enerji e ve hasar D bakımından açıklamaktadır.

Temel malzeme modeli:

$$\sigma_{ij} = g(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, e, D) \quad (2.5)$$

İlave değişken tanımlayarak denklem çözümünü kolaylaştırmak için “Gerilme Tensör Denklemi” gibi denklemler kullanılabilir. Gerilme tensör denkleminde gerilme hidrostatik ve deviatorik bileşenler olmak üzere ikiye ayrılır ve viskoz terimi q ile birlikte kullanılırsa, şok dalgasının davranışı tanımlanabilir. Başlangıç ve sınır koşulları tanımlanarak değişkenler atanır ve denklem çözümü yapılır.

Gerilme tensörü:

$$\sigma_{ij} = -(p + q) + S_{ij} \quad (2.6)$$

Çok fazla değişkenin olduğu karmaşık bir problemde sayısal yöntemlerin kullanılması uygun bir yaklaşımdır. Bu tarz bir problemde farklı malzemeleri tanımlamak için çok sayıda hal denklemi ve temel malzeme denklemi kullanılır.

Sayısal simülasyonlar problemi daha küçük parçalara ayırırlar. Bu işleme ayırıklaştırma ve parçalama (discretization) denir. Problem zaman ve uzaysal alanda küçük parçalara ayrılır. Sayısal simülasyonda, problem zaman alanında sonlu sayıda küçük parçalara ayrılırsa, buna eksplisit yöntem denir. Eksplisit yöntemde yeni bir zaman adımındaki fonksiyon değerleri bir önceki zaman adımında bilinen fonksiyon değerlerinden elde edilir. Zaman adımı, Courant-Friedrich-Levy (CFL) şartını sağlaması için, sesin modeldeki en küçük elemanın içinden geçtiği süreden daha küçük olmak zorundadır. Böylece simülasyon modelindeki tüm elemanların içindeki aktivite görülebilecektir. Zaman adımı hesaplanırken, emniyet katsayısı ilave edilir. Emniyet katsayısı farklı hidrokodlar için değişebilir.

2.1. Kullanılacak Sayısal Yöntemin Belirlenmesi

Patlama simülasyonları temel olarak iki ana yöntem kullanılarak gerçekleştirilir. Bunlardan ilki CONWEP yöntemi, diğeri ise Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) adı verilen, Lagrange ve Euler tekniklerini birleştiren bir yöntemdir. Bu yöntemlerin LS-DYNA üzerinde farklı kombinasyonları mevcut olup, Bölüm 3'te bu kombinasyonlardan bahsedilecektir. Bu bölümde ise CONWEP ve ALE teknikleri detaylı olarak ele alınacak ve literatürde bu teknikler kullanılarak yapılan patlama simülasyonlarından örnekler verilecektir.

2.2. CONWEP Patlama Modeli

Kingery ve Bulmash [14] küresel şekilli hava içerisindeki patlamalardan ve yarı küresel şekilli zemin üzerindeki patlamalardan elde ettikleri patlama parametrelerini öngörebilmek için bir takım hesaplamalar yapmışlardır. Bu hesaplamalar, CONWEP adıyla zaman içerisinde çoğu mühendis tarafından kabul bulmuştur. CONWEP yöntemi Bölüm 1.7'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

$$P(t) = P_{so} \left[1 - \frac{t - T_a}{T_0} \right] \exp \left[\frac{-A \times (t - T_a)}{T_0} \right] \quad (2.7)$$

Yukarıdaki eşitlik Friedlander bağıntısı olarak anılır. Burada $P(t)$, t anındaki basıncı (kPa), P_{so} , maksimum basıncı (kPa), T_0 , basıncın pozitif olduğu süreyi (ms), T_a , basıncın varış zamanını ifade ederken, A ise P_{so} 'ya bağlı birimsiz dalga şekli sayısı olup, farklı patlamalar için farklı değerler alabilen katsayıyı temsil eder. Friedlander bağıntısındaki parametreler, Kingery ve Bulmash hesaplamalarından elde edilir [14]. Maksimum basınç, itki ve süre değerleri kullanılarak, birimsiz A katsayısı bulunur. Daha sonra (2.7) nu.lı denklem yardımıyla, farklı zaman dilimlerindeki patlama basınç değerleri elde edilir. CONWEP modeli Randers-Pehrson ve Bannister tarafından LS-DYNA içerisine *LOAD_BLAST formülasyonu ile ilave edilmiştir [29].

CONWEP modelinde basit ampirik denklemler vasıtasıyla yapı üzerinde gelen basınç dağılımının zamana göre değişimi hesaplanabilmektedir. Bu durum hacimsel hesap ağı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Diğer yandan, CONWEP'in bazı kısıtlamaları mevcuttur. Patlayıcı ve hedef yapı arasındaki engel ve benzeri yapıların gölgeleme etkilerini modellemek mümkün değildir. Hesaplama süresinin düşük olması nedeniyle hızlı sonuçlar vermesine rağmen, patlayıcı mesafesinin hedef yapıya çok yakın olduğu durumlarda (<0.3 m) ve hedef yüzeyin aracın geometrik yapısı tarafından gölgelendiği zırhlı araç modellerinde kullanılması uygun olmayabilir.

2.3. Arbitrary Lagrangian Eulerian Yöntemi

LS-DYNA hidrokodu içerisindeki Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) yöntemi vasıtasıyla yapısal analiz, akışkanlar mekaniği analizi ile aynı çatı altında toplanmıştır. Böylece patlama-yapı etkileşimi, patlama analizlerinde kullanılabilir hale gelmiştir [30]. ALE formülasyonu kullanılarak hava, su ve patlayıcı gibi ortam akışkanları Euler tekniğiyle, araç gövdesi gibi yapısal bileşenler ise Lagrange tekniği ile modellenir. *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID kartı kullanılarak

patlayıcı ve içinde bulunduğu akışkan ortamın hedef yapı ile etkileşime geçmesi sağlanmıştır.

Lagrange tekniğinde çevrimin başlangıcında, sınır koşullarının tanımlandığı düğüm noktalarından gelen dış kuvvetler ve iç kuvvetlerin toplamı alınarak, düğüm noktasındaki kuvvetler bulunur. Bu kuvvetlerin integrali alınarak yeni düğüm noktası ivmeleri bulunur. Bu şekilde integral alınmaya devam edilirse sırasıyla, düğüm noktasındaki hızlar ve yerdeğiştirmeler elde edilir. Yeni düğüm noktalarının koordinatlarındaki yeni yoğunluklar ve birim şekil değiştirme hızları, kütle korunum denkleminde veya direkt hesaplanarak bulunabilir. Yeni birim şekil değiştirme hızını denkleme katarak yeni basınç değeri, iç enerji ve gerilme, enerjinin korunum denkleminde ve malzeme modelinden hesaplanabilir. Her bir düğüm noktasındaki iç kuvvet momentumunun korunumu denklemini kullanılarak eleman üzerindeki yeni iç gerilmeler elde edilebilir. İç kuvvetler ve dış kuvvetler toplanarak yeni bir hesaplama çevrimi oluşturulur.

Euler tekniğinde, hesaplama işlemi Lagrange tekniğindeki gibidir fakat adveksiyon (sıvının tek yönde hareketi) adımı ilave edilir. Yeni düğüm noktasının koordinatları tıpkı Lagrange tekniğindeki gibi bulunduktan sonra, deforme olmuş eleman, uzayda sabit olan başlangıçtaki orijinal pozisyonuna geri döner. Adveksiyon adımı yeni kütle, momentum ve enerjisi yeni elemanın yoğunluğunun ve birim şekil değiştirme hızının hesaplanmasında kullanılır. Bundan sonraki adımlar Lagrange tekniğindeki gibi işlem sırasını takip eder.

ALE yönteminde patlayıcı ve patlayıcının içerisinde bulunduğu ortam için hal denklemleri ve parametreleri kullanılır.

2.3.1. Patlayıcı modeli

NATO STANAG 4569 [31]'da, el bombası ve mayın tehditlerine karşı zırhlı araçların koruma seviyelerinin belirlenmesi için bir test prosedürü hazırlanmıştır.

Toprakta ve çelik çanakta olmak üzere, test iki farklı yöntem kullanılarak yapılabilir. Toprakta yapılırsa, toprak bileşenlerinin standartta belirtilen oranda olması istenir. Bu oranı belirlenen düzeyde tutmak ve her testte bu oranı elde etmek oldukça güçtür. Bu sebeple testler genellikle toprak yerine çelik çanak içine mayın konularak gerçekleştirilir. Her iki durumda kullanılacak mayın miktarları farklıdır ama araç üzerinde oluşturduğu hasar aynıdır. Patlayıcı modeli LS-DYNA hidrokodu içerisinde *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN kartı kullanılarak oluşturulur. Patlayıcı modeline ait detaylar Bölüm 3.3.1.4'te açıklanmıştır.

2.3.2. Hava Modeli

Şok dalgalarının hareketini sağlamak için akışkan bir ortam gerekmektedir. Kara mayını patlamalarında bu akışkan malzemesi hava olurken, su altı mayın patlamalarında akışkan malzemesi su olmaktadır. Havanın davranışı farklı denklemler ile sayısal olarak hesaplanabilir [27]. Lineer polinom denklemi havanın davranışının gerçeğe uygun benzetimi için kullanılmıştır. Hava modelinin detayları Bölüm 3.3.1.5'te açıklanmıştır.

2.3.3. Patlama analizlerinde kullanılan malzeme modeli

Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli, esasen hesaplamalı analizler için hazırlanmış bir modeldir. Orta hızlar ve yüksek hızlardaki (100 dev/s - 1500 dev/s) malzeme davranışını incelemek için araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [32]. Bilindiği gibi, malzeme modeli ne kadar detaylı ise, çıkan sonuçlar da gerçeğe o derece yakındır. Bunun yanı sıra, yüksek hızlardaki malzeme davranışı bilinen plastisite teorisine dayanmamaktadır. Bu hızlarda metallerin darbe ve penetrasyon problemleri birkaç malzeme davranışına bağlıdır.

2.3.3.1. Johnson-Cook mukavemet modeli

Üç önemli malzeme davranışı olan pekleşme, birim şekil değiştirme hızı ve ısı yumuşama etkilerinin tek bir bağıntı içerisinde kullanılması halinde orta ve yüksek

hızlardaki metal malzemelerin davranışlarının benzetimlerinde gerçeğe yakın cevap verdiği Johnson ve Cook [9] tarafından gözlenmiştir. LS-DYNA'da bu model *MAT_JOHNSON_COOK kartı vasıtasıyla kullanılır. Johnson-Cook malzeme modeli (2.8) nu.lı denklemdaki gibidir;

$$\sigma_Y = \left[A + B(\varepsilon_{eff}^p)^N \right] [1 + C \ln \dot{\varepsilon}] [1 - (T_H)^M] \quad (2.8)$$

ε_{eff}^p , efektif plastik birim şekil değiştirme, $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}}{\dot{\varepsilon}_0}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$, A , B ve N katsayılarını hesaplamak için kullanılan birim şekil değiştirme hızı, $T_H = \frac{T_R}{T_M - T_R}$, deneyin yapıldığı sıcaklık, T_M , ergime sıcaklığı, T_R , oda sıcaklığı ve ρ , kütle yoğunluğudur.

İlk parantez içi akma gerilmesine ait birim şekil değiştirme sertleşmesi parametreleri, ikinci parantez içi yüksek birim şekil değiştirme hızlarında akma gerilmesindeki artışı ve son parantez içi ise akma gerilmesinin bölgesel ısı etkilerden dolayı malzemenin yumuşamasını hesaplar. Johnson-Cook malzeme modeli içinde beş parametre; A , B , N , C ve M ile üç malzeme karakteristiği ρ , C_p ve T_M mevcuttur. Ayrıca malzemeye ait elastik özelliklerini içeren parametreler de gerekmektedir. Kayma modülü ve hal denklemi (EOS) basınç-hacim uzama cevabını tanımlamak için beraber kullanılır. Düşük basınçlarda, hal denklemi “Hacimsel Esneklik Katsayısı (Bulk modulus)” olarak alınabilir.

2.3.3.2. Johnson-Cook kırılma modeli

Johnson ve Cook [2] 1985 yılında yaptıkları çalışmayla malzeme modellerini, toplam hasara dayalı kırılma modeli ekleyerek genişletmişlerdir. LS-DYNA içerisindeki toplam hasara bağlı kırılma modeli (2.9) nu.lı denklemdaki gibidir;

$$\varepsilon^F = \left(D_1 + D_2 \exp \left[D_3 \frac{P}{\sigma_{eff}} \right] \right) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}) (1 + D_5 + T_H) \quad (2.9)$$

$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\epsilon^F}$, dir. $D = 1$ olduğunda malzeme kırılır. Burada σ_{eff} , etkin gerilme P , ortalama basınçtır.

Kırılma modeli, Johnson-Cook mukavemet modeline benzer olarak üç çarpandan oluşmaktadır. İlk çarpan üç eksenlerdeki gerilmeyi, ikinci çarpan şekil değiştirme hızını, üçüncüsü ise sıcaklık etkisini tanımlar.



BÖLÜM 3. PLAKA ÜZERİNDE YAPILAN PATLAMALARIN BENZETİM ÇALIŞMALARI

3.1. Giriş

Bu bölümde patlama simülasyonlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, araç patlama modellerine altyapı oluşturmak üzere LS-DYNA'daki farklı patlama modellerinin düz plakalar üzerindeki davranışları açıklanmıştır. Literatürde iki farklı çalışmada tek plaka üzerinde yapılan patlama testleri, sayısal benzetim modelinin hazırlanması ve test ölçüm değerleri ile mukayese edilmesi için kullanılmıştır. 4 farklı patlama modeli tekniği kullanılarak, 4 farklı simülasyon yapılmış, plaka üzerinde patlama sonucunda oluşan deformasyon ve ivme değerleri test ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Bu şekilde test ölçümlerine en yakın sonucu veren patlama modeli elde edilerek, zırhlı araç patlama simülasyonunda patlama yükü oluşturacak yöntem seçilmiştir.

3.2. Literatür Araştırması

Mayın patlamasıyla ilgili sayısal simülasyon çalışmaları farklı teknikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen simülasyonlar fiziksel test sonuçları ile mukayese edilmekte ve bir yöntem oluşturulmaktadır. Daha sonra bu yöntemden faydalanılarak, sayısal simülasyonlar mayın koruma tasarım sürecinin içinde aktif olarak yer almakta ve fiziksel test gereksinimi azalmaktadır. Bu bölümde literatürdeki mayın patlamaları ile ilgili yapılan çalışmalardan derlemeler sunulmuştur.

Mayın patlamasına maruz kalan zırh plakalarının sayısal benzetimlerinin doğrulama çalışmaları, çoğunlukla tek plakalar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bunun sebebi oluşturulacak sayısal simülasyon modelinin basitliği ve fiziksel testlerin kolaylığıdır.

Bunun yanında, farklı malzemelerden üretilen plakaların da yapısal davranışları karşılaştırılabilmektedir. Literatürde çok sayıda çalışmada, zırh plakalarının mayın patlama davranışları incelenmiştir. Zakrisson [33] yakın mesafeden mayın patlamasına maruz plakaların davranışını araştırmıştır. Zakrisson, LS-DYNA yazılımı içerisinde ALE tekniği kullanarak yaptığı simülasyonlarında, havada ve zeminde olmak üzere iki farklı lokasyona mayını konumlandırmıştır. Patlama yüklerinin hassasiyetini ve doğruluğunu ölçmek için analiz ve patlama testinin sonuçlarını karşılaştırmış ve sayısal hesaplamaların test sonuçlarından %10 daha düşük olduğunu görmüştür. Benzer bir kıyaslama çalışması da Mullin [34] tarafından gerçekleştirilmiştir. Mullin, CONWEP ve ALE tekniklerinin enerji sönümleme kabiliyeti olan malzemelerin patlama davranışlarının benzetiminde kullanmıştır. Diğer yandan CONWEP tekniğini balistik sarkaç deney sonuçlarına göre de değerlendirmiştir. ALE tekniğinde elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar ağ yapısının sıklığına bağlıyken, CONWEP tekniğinde ise deneyde ölçülen deformasyonlardan daha düşük değerler elde edilmiştir. Mullin, CONWEP tekniği seçilmesi durumunda ölçeklendirme katsayısı kullanılarak test ölçümlerini yakalayacak şekilde analiz sonuçlarının büyütülmesi gerektiğini vurgulamıştır. Liu [35] içerisinde gözenekli ve gözeneksiz alüminyum köpük kullanılan sandviç plakaların enerji sönümleme kabiliyetlerini ve patlama dayanımlarını incelemiştir. Gözenekli ve gözeneksiz alüminyum köpükleri karşılaştırdıkları benzetim çalışmasında, gözenekli yapının enerji sönümleme kabiliyetinin daha iyi olduğunu görmüşlerdir. İlginç bir çalışma da Yuen [36] tarafından yapılmıştır. Yuen, yeni nesil zırhlı araçlarda kullanılan V-şekilli gövdelerin farklı açılarda olması durumunda, açının patlama dalgalarının yayınımına etkisini araştırmıştır. Mayın patlamasına maruz bırakılan farklı açılardaki (60° , 90° , 120° , 150° ve 180°) V-şekilli plakaların sayısal simülasyon ve saha testleri yapılarak, patlayıcının hedef plakaya olan mesafesinin tayin edilmiş ve patlayıcının kütlesi hesaplanmıştır. Yuen, küçük açılarda daha fazla enerjinin hedef yapıdan uzaklaştırıldığını gözlemlemiştir. Micallef [37] yaptıkları çalışmada odaklandırılmış patlama yüküne tabi tutulan dairesel kesitli çelik plakaların dinamik plastik davranışını, analitik bakış açısından incelemiştir. Analitik modelde patlayıcının hedef plakaya olan mesafesinin ve patlayıcı miktarının bir fonksiyonu olan patlama yükü altındaki dairesel kesitli bir plakanın enine şekil değiştirmesi hesaplanmıştır. Analitik

model ABAQUS/Explicit yazılımı ile doğrulanmış ve %15'in altında sapma ile korelasyon sağlanmıştır.

Williams ve McClennan [38] LS-DYNA kullanarak yaptıkları çalışmalarında, toprağın 5 cm altına gömülmüş mayın için patlama yüklerini CONWEP yöntemi kullanarak oluşturmuşlardır. Hedefin zeminden yüksekliği 40 cm'dir. FEMAP CAD/CAE ön işlemcisi ile test düzeneğinin katı modelleme ve sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Maksimum deplasman değeri 2.2 katsayısı ile çarpıldığında, CONWEP sonuçları test ölçümleriyle uyumlu olmaktadır. Westine [39] tarafından Southwest Araştırma Enstitüsü'nde A.B.D. Ordusu TACOM için geliştirilen modelde gömülü bir mayının oluşturduğu itkinin belli bir mesafedeki plakaya olan etkileri hesaplanmaktadır. Model mayın patlaması esnasında farklı koordinatlardaki itki miktarını ölmek için yapılan bir seri fiziksel test sonuçlarına dayanmaktadır. Bu sonuçlar daha sonra mayın derinliğinin, patlayıcı boyutlarının, hedefe olan mesafenin ve toprak yoğunluğunun etkilerini hesaplayan ampirik model geliştirmek için kullanılmıştır. Daha sonra Dumas ve Williams [40] tarafından LS-DYNA içerisinde kullanılmak üzere bir ön-işlemci geliştirilmiştir. Maksimum deplasman değeri 1.66 katsayısı ile çarpıldığında, simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu hale gelmiştir. Burada ilk yöntemde zemin altındaki etkiler patlama yükü hesabına dahil edilmediği için, ikinci yöntem ilkinde nazaran deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar vermektedir. CONWEP yönteminde patlama yükü, yarım küre patlayıcının yansıtıcı bir yüzeyde patlaması sonucunda oluşur. Toprak özellikleri CONWEP hesabına katılmaz. Ayrıca, CONWEP modeli deneylerden çıkarılmış ampirik hesaplamalardan formüle edilmiştir. Bu nedenle bazı durumlarda patlama yükü interpolasyon sonucunda hesaplanır. TACOM modelindeki toprak özellikleriyle deneylerdeki toprak özelliklerinin farklı olması simülasyon ve deneysel sonuçların farklı çıkmasına sebep olabilir.

Fairlie ve Bergeron [41] ve Fairlie [42] AUTODYN2D kullanarak sayısal benzetim modeli oluşturmuş ve çelik bir plakanın hedef momentumunu AUTODYN2D MM (Euler) ve AUTODYN2D SM (Euler FCT) tekniklerini kullanarak

karşılaştırmışlardır. Her iki teknikte elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu raporlanmıştır.

Vulitsky ve Karni [43] patlayıcının çelik yapılar üzerindeki etkilerini incelemek için LS-DYNA'da sayısal model oluşturmuşlardır. Bu modelde patlayıcı hava içerisinde infilak etmektedir. Simülasyonda patlayıcı özellikleri Jones-Wilkins-Lee hal denklemi kullanılarak tanımlanmıştır. Doğrusal polinom denklemi sayesinde havanın özellikleri tarif edilmiştir. Patlayıcının hava içerisindeki hareketi LS-DYNA çoklu malzeme özellikleri kullanılarak sağlanmıştır. Patlama dalgası hava içerisinde hareket edebilmekte ve yapı ile etkileşime gaz-yapı etkileşim algoritması kullanarak geçmektedir. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile mukayese edildiğinde, sayısal modelde % 20 ila % 40 daha düşük kalıcı deformasyon elde edilmiştir.

Literatürde az sayıda çalışmada araçların mayın dayanımlarına ait patlama simülasyonu ve testine dair bilgiler bulunmaktadır. Grujicic [44] sağ ön tekerleği altında mayın patlatılan F800 kamyonunun kinematik hareketini incelemek için sayısal simülasyon çalışması yapmıştır. Çalışmada patlamanın gerçekleştiği akışkan ortamındaki gaz ürünlerinin toprak ve araç gövdesi gibi yapısal bileşenler ile etkileşimini ALE formülasyonu kullanılarak yapılması anlatılmıştır. Toprak içerisindeki rutubet miktarının, aracın kinematik hareketine ve patlama sonucu araca aktarılan momentuma etkisinin olduğunu belirtmiştir. Ayrıca topraktan havaya yönelen şok dalgalarının aracın mayına bakan yüzünde lokalize olduğu ve şok dalgalarının o bölgede odaklandığı ifade edilmiştir. Larsen [45] M113 aracının mayın dayanımını, aracın altında 5.56 kg ağırlığında C4 patlayıcısı patlatılması durumunda sayısal benzetim ve saha testi yaparak incelemiştir. Aracın alt tabanı ve mürettebatın ayak basma tabanı arasına gözenekli seramik malzemeden oluşan bir kompozit enerji sönmüleme sistemi yerleştirerek, mürettebat ayak basma tabanında oluşan patlama yükü etkilerini azaltmayı hedeflemiştir. Sayısal benzetim modelinde ise, ALE tekniği kullanarak yapısal bileşenleri gaz ortamıyla etkileşime sokmuştur. Çalışma neticesinde mürettebat ayak basma tabanının hem sayısal modelde hem de test aracında yırtıldığını, bunun yanı sıra sayısal benzetim modelinde araç arkasında ölçülen hareketin, test ölçümlerinden daha yüksek olduğunu bulmuştur. Cendon [46]

çelik bir çanak içerisine yerleştirilen mayının patlaması sonucunda, düz tabanlı bir aracın patlama yükleri altındaki davranışını DYNA3D’de ALE tekniğini kullanarak incelemiştir. Cendon, sayısal benzetim modelinden elde edilen ivme ve deplasman değerlerinin test ölçümleri ile uyumlu çıktığını belirtmiştir.

Williams ve Fillion-Gourdeau [47] Cougar 6x6 LAV aracının kulesi, kapakları, klapeleri, tekerlekleri, aksları, motoru ve transmisyonu olmadan basit bir sayısal modelini oluşturmuşlar ve mayın patlamasında Hybrid III insan modeli üzerinde patlama yüklerinin etkilerini incelemiştir. Patlama yüklerini Westine [39] ile Williams ve Dumas [40] çalışmalarından almışlardır. Çalışmada insan modeline ait yaralanma sonuçları verilmiş fakat araca dair sonuçlar paylaşılmamıştır. Westine [39]’e ait çalışmadan elde edilen patlama yüklerine ait ampirik ifadeler Williams ve Poon [2] tarafından M113 aracının taban deformasyonunu incelemek için kullanılmıştır. M113 aracının altında toprağa gömülü 7,5 kg C4 plastik patlayıcısı patlatılmıştır. Aracın sayısal benzetim modeli LS-DYNA kullanılarak oluşturulmuş ve testte elde edilen kalıcı deformasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Motor, paletler, tekerlekler ve süspansiyon sistemi modele dahil edilmemiştir. Sayısal simülasyon sonuçları, test sonuçlarından %50 daha yüksek çıkmıştır. Westine’e ait patlama yükü modeli toprağı sadece yoğunluğu bakımından çeşitlendirmiştir. Toprak tipi, nem oranı, nem içeriği gibi diğer parametreler bu modelde hesaba katılmamıştır. Yazarlar bu çalışmada sayısal simülasyonda kullanılan toprak modelinin test alanındaki toprak yapısı ile örtüşmediği için, simülasyon sonuçları ile test ölçümleri arasında %50 farkın meydana geldiğini düşünmektedirler.

Gupta [48] CTH hidrokodunu kullanarak iki boyutlu simetrik bir düzlemde düz, V-şekilli ve çift V şekilli araç alt gövdesinin sayısal benzetim modellerini kurmuştur. Patlayıcı olarak 8 kg ağırlığında silindirik bir TNT kullanmıştır. TNT’yi tamamen yansıtıcı bir yüzeyin üzerine koymuştur. Bu üç tip gövdenin sayısal modelini oluştururken yekpare katı çelik yapı elemanları kullanmıştır. Bu yapı 719,12 mm genişliğinde ve gövde şekline bağlı olarak yaklaşık 600 mm yüksekliğindedir. Çalışma sonucunda en düşük momentumun V-şekilli gövde yapısında olduğu gözlenmiştir. Çift V gövde yapısında oluşan düşey momentum ise düz gövdeden

daha düşüktür. Bu çalışma 2 boyutlu düzlemde gerçekleştirildiği için, z eksenindeki hareketler dikkate alınmamıştır. Ayrıca mayından uzaklık ve patlayıcı miktarı gibi farklı özelliklerin parametrik çalışmaları yapılmamıştır.

3.3. Tek Plaka Sayısal Benzetim Çalışmaları

Mayın patlama testlerinde ve sayısal benzetim çalışmalarında kullanılan hedef bölge gerçek bir araç olduğu gibi, tek bir plakadan da ibaret olabilir. Patlama testlerinde araç gövdesi gibi karmaşık geometrilerin sonuçlarının değerlendirilmesi son derece zor ve meşakkatli olduğu için, genelde sayısal benzetim modellerinin doğrulanmasında basit zırh veya adi sac plakalarından oluşan test düzenekleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada benzer şekilde, literatürde Boyd [49]'un ve Tabatabaei [50]'nin tek plaka üzerinde yaptıkları patlama testlerinde elde ettikleri ölçüm sonuçları, farklı patlama modelleri sonuçları ile kıyaslanmış, patlama modelleri arasındaki farklar incelenerek, teste en yakın sonuç veren benzetim modelinin araç patlama simülasyonunda kullanılmasına karar verilmiştir.

Boyd [49]'un ve Tabatabaei [50]'nin tek plaka üzerinde gerçekleştirdiği patlama testleri referans alınarak, LS-DYNA'da CONWEP, ALE, ALE-IVFG ve Birleşik CONWEP - ALE patlama teknikleri ile oluşturulan sayısal modellerden elde edile simülasyon sonuçları test verileriyle mukayese edilmiştir. Boyd ile yapılan doğrulama çalışmasında ölçüt olarak plakalar üzerindeki deformasyon ve ivme miktarları kıyaslanırken, Tabatabaei'nin çalışmasında pik basınç değerleri ele alınmıştır. Boyd'un test düzeneği ile CONWEP, ALE ve ALE-IVFG yöntemleri kıyaslanırken, Tabatabaei'in test düzeneğiyle CONWEP, ALE ve Birleşik CONWEP – ALE yöntemleri karşılaştırılmıştır. CONWEP ve ALE yöntemleri temel patlama modelleri oldukları için her iki karşılaştırma problemi içinde yer almışlardır.

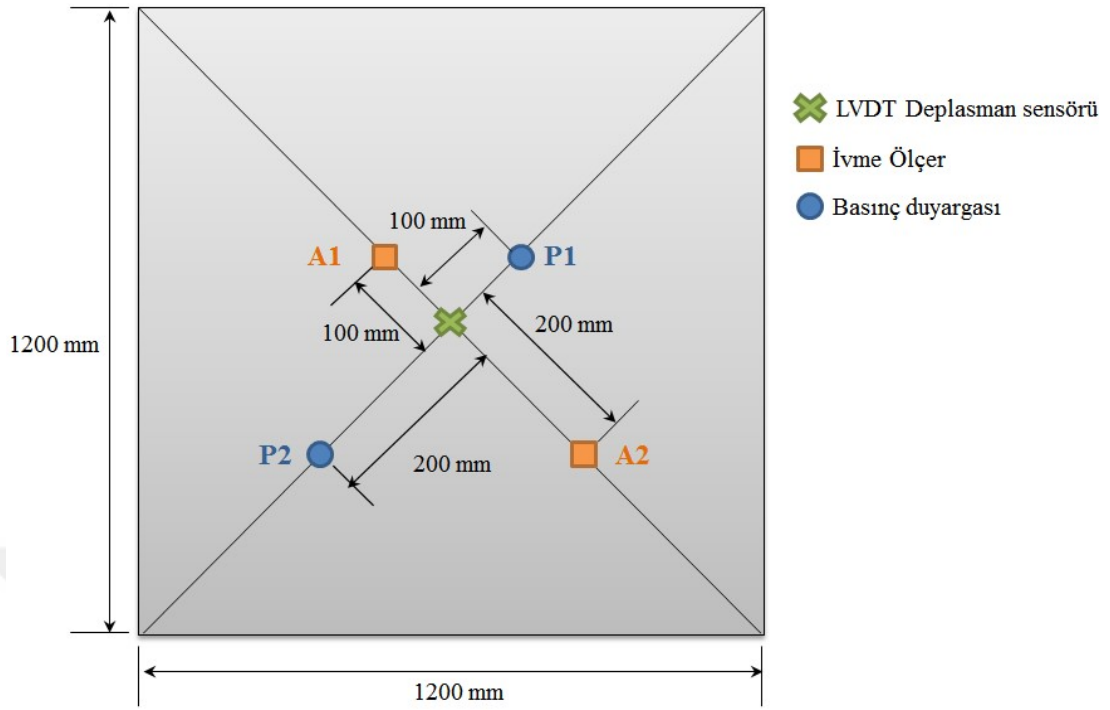
3.3.1. Patlama modellerinin Boyd'un patlama testi ile mukayesesi

Boyd [49], 1200 x 1200 x 5 mm ebatlarında, köşelerinden çerçeveye tutturulmuş AS36678-250 kodlu adi çelikten imal edilmiş bir plaka üzerinde patlama testleri

yapmıştır. Şekil 3.1.'de test düzeneği gösterilmiştir. Çelik çerçeveye cıvatalar ile bağlanmış plaka, bloklar üzerinde yerden belli bir mesafede tutulmaktadır. 250 gram ağırlığında Pentolit patlayıcısı, plakanın üzerinde merkez noktasına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Sırasıyla patlayıcıyı plakanın merkez noktasından düşey ekseninde 250, 400 ve 500 mm uzağa taşıyarak 3 patlama yapılmıştır. Bu patlamalarda, ivme ve deplasman datası toplanmıştır. Şekil 3.2.'de gösterildiği üzere plaka üzerine merkez noktasından 100 mm uzaklıkta 1 ivmeölçer ve 1 basınç duyargası, 200 mm uzaklığa yine bir ivmeölçer ve 1 basınç duyargası ve tam merkez noktasına 1 adet LVDT deplasmanölçer olmak üzere toplam 5 adet sensör yerleştirilmiştir. Testte 2 adet Endevco 7255A piezoelektrik ivmeölçer kullanılmıştır. A1 olarak tariflenen ivmeölçer merkez noktasından 100 mm uzaklığa, A2 olarak tariflenen ise 200 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. 2 adet PCB piezotronik 109A piezoelektrik basınç duyargasından P1 olarak adlandırılan merkez noktadan 100 mm uzaklığa, P2 olarak adlandırılan ise 200 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. 1 adet Novotechnik T150 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) deplasman ölçer X olarak belirtilip, plakanın merkezine yapıştırılmıştır.



Şekil 3.1. Boyd'un test düzeneği [49].



Şekil 3.2. Testte kullanılan sensörlerin plaka üzerindeki yerleşimi

Boyd, DYNA3D'de sayısal benzetim modeli oluşturmuştur. Modelde kullandığı Pik basıncı, pozitif itki ve varış zamanı gibi patlama parametrelerini Hyde'ın çalışmasından [16] almıştır. Basınç plaka üzerine eşit olarak dağıtılmıştır. Plaka elemanları, izotropik elastik/plastik iki boyutlu kabuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Plaka malzemesi olan AS36678-250 kodlu adi çeliğe ait mekanik özelliklerden yoğunluk, deformasyon sertleşmesi, poisson oranı, tanjant modülü ve akma gerilmesinin değerleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Sayısal benzetim modelinden elde edilen sonuçlar düğüm noktalarından hesaplanmıştır.

Tablo 3.1. Sayısal benzetim çalışmasında kullanılan malzeme ait mekanik özellikler [41].

Malzeme Özellikleri	Parametre
Yoğunluk, ρ	7850 kg/m ³
Sertleşme Parametresi, β	1,0
Poisson oranı, ν	0,3
Tanjant modülü, ET	470 MPa
Akma Gerilmesi, σ_Y	270 MPa
Young modülü, E	203 GPa

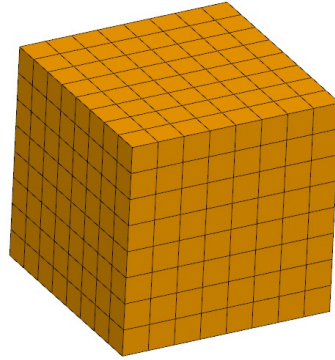
3.3.1.1. LS-DYNA - CONWEP tekniği ile patlama simülasyonu

Boyd'un yaptığı test düzeneği referans alınmış ve 2 boyutlu kabuk elemanlar kullanılarak LS-DYNA'da 1,2 m eninde 1.2 m boyunda bir plakanın sayısal benzetim modeli oluşturulmuştur. Plaka, düzenekte olduğu gibi köşelerinden tutturulmuş ve LOAD_BLAST kartı vasıtasıyla patlama yükleri tanımlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, CONWEP tekniğinde kullanılan patlayıcı tipinin TNT olmasıdır. TNT'den Pentolite dönüşüm ise 1.14 çarpım katsayısı ile sağlanmıştır [51]. ELEMENT_SEATBELT_ACCELEROMETER kartı kullanılarak, fiziksel testlerde kullanılan Endevco 7255A piezoelektrik ivmeölçerleri temsilen plaka üzerine 5 gram ağırlığında, “2” mikrosaniye’de bir, “1” data verecek şekilde sayısal ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Sayısal modelde, basınç duyargalarının bulunduğu noktadaki elemanlar üzerinden DATABASE_NODFOR kartı ile kuvvet datası hesaplanmış ve bu kuvvet datası elemanın alanına bölünerek istenilen basınç miktarı bulunmuştur. Fiziksel testlerde kullanılan PCB Piezotronic 109A basınç duyargalarının ağırlıklarına yönelik bir bilgi bulunamadığından, basınç duyargalarını temsilen elemanlara 25 gram ilave edilmiştir.

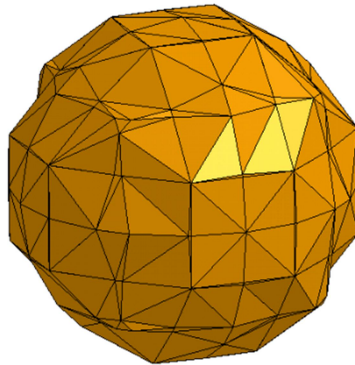
3.3.1.2. LS-DYNA – ALE tekniği ile patlama simülasyonu

LS-DYNA'da, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) yöntemi kullanılarak, yapısal analiz ve akışkanlar mekaniği çözücülerini aynı ortamda birleştirilmiştir. Bu şekilde patlama-yapı etkileşimi, patlama analizlerinde kullanılmaya başlanmıştır [52]. ALE tekniğinde ayrı ayrı modellenen ortam akışkanı (hava, su, patlayıcı vb.) ve yapısal elemanların etkileşime geçmeleri mümkün kılınmıştır. Patlayıcı ve şok dalgasının hareketini sağlayan akışkan ortam Euler bağıntısıyla, yapısal sistem ise Lagrange bağıntısıyla modellenmiştir. Bu iki birbirinden bağımsız sistem CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID kartı kullanılarak bütünleşik bir patlama analiz modeli oluşturulmuştur. Model temel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır; Patlayıcı (Euler model), Hava Ortamı (Euler model) ve Yapısal model (Lagrange model). Lagrange ve Euler elemanların birbirleriyle olan ilişkisi ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP kartı ile sağlanmıştır.

Boyd'un gerçekleştirdiği testlerde kullandığı patlayıcı küre şeklindedir. Sayısal model Kartezyen koordinat sistemine göre oluşturulduğundan, hava ve patlayıcının içinde bulunduğu Euler elemanların şekli 1:1:1 boyutlarında kübik elemanlardan oluşmaktadır. Bu durumda, fiziksel testlerde kullanılan patlayıcının şekli ile sayısal modeldeki patlayıcının şekli aynı olmamaktadır. Dolayısıyla infilaktan sonra ortama yayılacak patlama dalgalarının şekillerinin ve yapı üzerindeki etkilerinin farklı olması beklenmektedir. Bu durumu simüle etmek için, ALE tekniği içerisinde INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY (IVFG) kartı kullanılarak, patlayıcı küresel şekilli olarak modellenmiş ve kübik patlayıcı ve küresel patlayıcının plaka üzerindeki etkileri de mukayese edilmiştir. Şekil 3.3.'te Kartezyen koordinatlarda oluşturulmuş kübik patlayıcı ve Şekil 3.4.'te IVFG yöntemiyle oluşturulmuş küresel patlayıcı modeli gösterilmiştir. IVFG kartındaki NTRACE parametresi kullanılarak küresel patlayıcının eleman boyutu değiştirilebilmektedir.



Şekil 3.3. Kübik patlayıcı modeli



Şekil 3.4. Küresel patlayıcı modeli

3.3.1.3. Patlamada kullanılan hal denklemleri

Termodinamik kitaplarında, hal denklemi p , v ve T arasında $p v = RT$ gibi bir ilişkiyi tanımlarken veya Van Der Waals gibi daha karmaşık ilişkilerin olduğu eşitlikleri açıklarken kullanılır. Bunun yanında, denge denklemleri çıkartılırken belli bir hacimde özgül ısıya ait deneysel ya da teorik bilgiye sahip olmak gerekir. Daha sonra kısmi türevlerin elde edilmesiyle çıkarılan termodinamiğin genel bir sonucu olan aşağıdaki enerji denklemi kullanılarak;

$$dE = C_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv \quad (3.1)$$

özgül iç enerji T 'nin ve v 'nin bir fonksiyonu olarak bulunur. “İlk $T dS$ denklemi”

$$T dS = C_v dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad (3.2)$$

kullanılarak entropi T 'nin ve v 'nin bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Son olarak $E(S, v)$, T yok edilerek elde edilir.

Fiziğin şok dalgalarıyla ilgilenen dalında “Hal denklemi”, malzeme özellikleri üzerine çalışan araştırmacıya, üzerinde çalıştığı problemin çözümüne ulaşmaya imkân tanır. Araştırmacı çalıştığı konuda, literatürden edindiği hal denklemlerini problemin çözümünde kullanırken çok dikkat etmek zorundadır [51].

3.3.1.4. Patlayıcıya ait Jones-Wilkins-Lee hal denklemi

Patlayıcıların kullanıldığı tasarım araçlarında, tekrar kalibre edilebilen basit hal denklemine ihtiyaç vardır. Bir izentrop üzerindeki basınç-hacim ilişkisi her biri basınç alanlarının parçaları üzerinde önemli olan her bir fonksiyonun toplamı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$p_s = \sum \Phi_i(v) \quad (3.3)$$

Bu duruma örnek verilebilecek hal denklemi, Kury tarafından JWL formu olarak verilmiştir:

$$p_s = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + CV^{-(1+w)} \quad (3.4)$$

Bu denklemde A , B , C , basıncın bir boyutu olarak sabit iken, R_1 , R_2 ve w ise boyutsuz sabitlerdir. Diğer yandan $V = v/v_0$ 'dir. Denklemin sağ tarafındaki eşitlikte son terim düşük basınç (Yüksek hacim) terimidir ve direkt olarak politropik gaz izentropu $pv^\gamma = \text{sabit}$ ile karşılaştırılmalıdır. Üssü ifadeler yüksek basınç düşük hacim terimleri olup, genelde R_1 ve R_2 terimlerini farklı bölgelerde önemli kılmak için kullanıcı tarafından $R_1/R_2 \approx 4$ olacak şekilde seçilir. Termodinamik eşitliğin integrali alınırsa, aşağıda gösterilen izentrop üzerindeki enerji elde edilir:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial v}\right)_s = -p \text{ veya } \left(\frac{\partial e}{\partial V}\right)_s = -p, e = \rho_0 E \text{ ile kullanılırsa,}$$

$$e_s(v) = \frac{A}{R_1} e^{-R_1V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2V} + \frac{C}{w} V^{-w} \quad (3.5)$$

elde edilir. Burada S alt indisi izentrop üzerindeki değerleri ifade etmektedir. Bu durumda (3.5) denklemi kullanılarak C yok edilirse aşağıdaki denklem bulunur.

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1V}\right) e^{-R_1V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2V}\right) e^{-R_2V} + \frac{we}{V} \quad (3.6)$$

Birçok patlayıcı için kalibre edilmiş JWL hal denklemi içerisindeki sabitlere ait tabloyu Dobratz ve Crawford kendi çalışmalarında sunmuşlardır [53]. JWL hal denklemi bir bilgisayar programı kullanılarak deneysel sonuçlarla uyuşması için oldukça kolay bir şekilde kalibre edilebilir. JWL hal denkleminin mühendislik hesaplamaları için çok faydalı olduğu doğrulanmış ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

LS-DYNA içerisinde patlayıcı modeli MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Dobratz ve Crawford [53] Pentolit 50/50 için malzeme modeli parametrelerini Tablo 3.2.'de gösterildiği üzere sunmuşlardır:

Tablo 3.2. Pentolit'e ait malzeme parametreleri [53].

C-J parametreleri					Hal denklemi parametreleri					
ρ_0 (g/cm ³)	P (Mbar)	D (cm/ μ s)	E_0 (Mbar-cm ³ /cm ³)	Γ	A (Mbar)	B (Mbar)	C (Mbar)	R_1	R_2	ω
1,70	0,255	0,753	0,081	2,73	5,4094	0,093726	0,01033	4,5	1,1	0,35

3.3.1.5. Havaya ait doğrusal polinom hal denklemi

Hava, şok dalgalarının hareketini sağlamak için modellenmiştir. Havanın davranışı farklı denklemler ile sayısal olarak hesaplanabilir (Örn, Gruneisen denklemi, ideal gaz denklemi, Doğrusal Polinom denklemi). Doğrusal polinom denklemi havanın davranışının gerçeğe uygun olarak benzetimi için kullanılmıştır.

$$P = C_0 + C_1 m + C_2 m^2 + C_3 m^3 + (C_4 + C_5 m + C_6 m^2) E \quad (3.7)$$

Burada $m = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 'dir. $\frac{\rho}{\rho_0}$, o anki yoğunluğun ilk yoğunluğa oranı, C_x sabittir. Gazlar için $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 'dir. Burada γ , özgül ısı oranıdır. ve (3.7) nu.lı denkleme gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (3.8) nu.lı denkleme dönüşür;

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (3.8)$$

Havaya ait doğrusal polinom denkleminin parametreleri Tablo 3.3.'de verilmiştir.

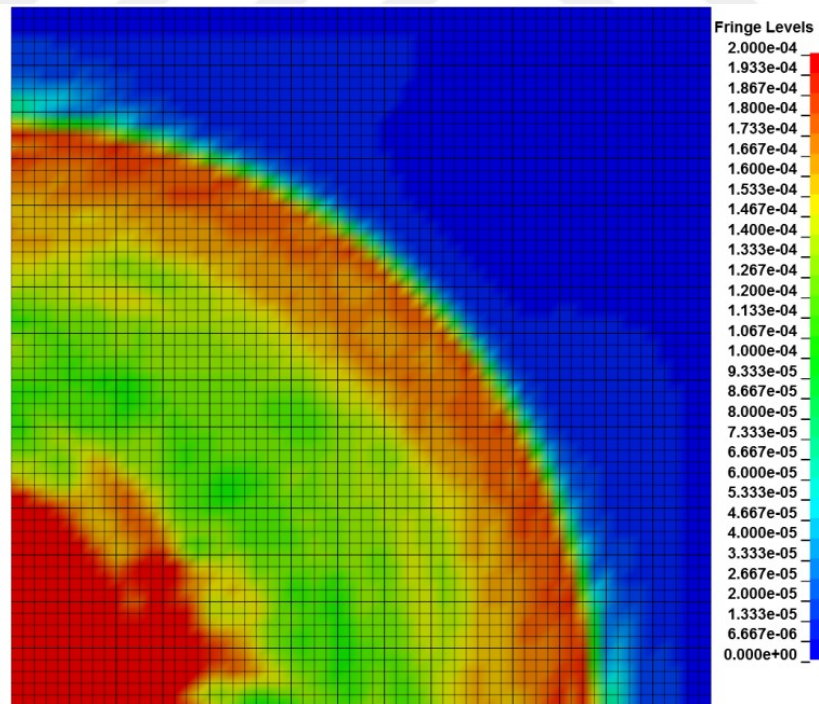
Tablo 3.3 Hava'ya ait doğrusal polinom denklem parametreleri

ρ_0 (kg/m ³)	γ	C_4	C_5
1,025	1,4	0,4	0,4

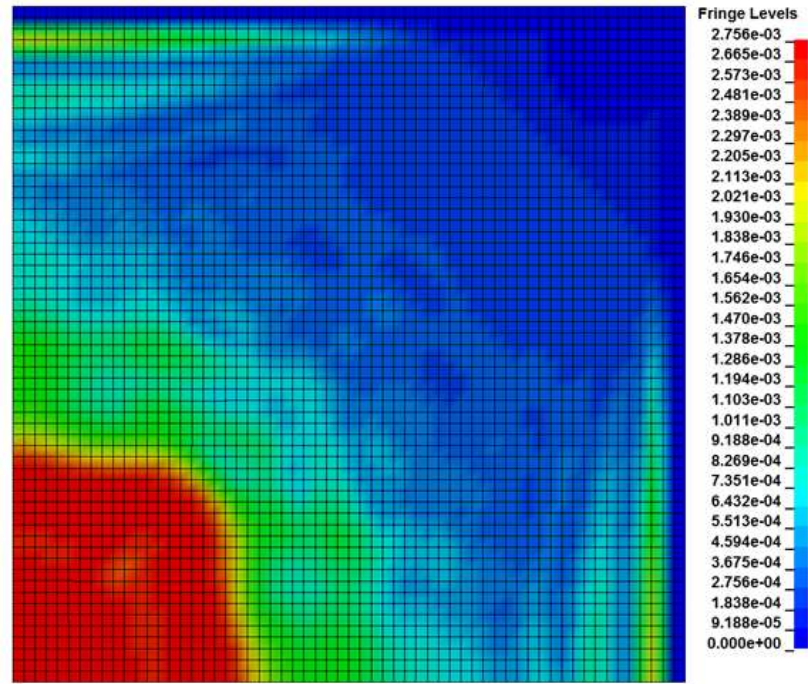
Burada ρ_0 ve ρ sırasıyla havanın ilk andaki ve olay anındaki özgül ağırlık, E ise ilk enerjinin birim hacme oranıdır.

3.3.1.6. Analiz sonuçlarının Boyd'un test sonuçları ile karşılaştırması

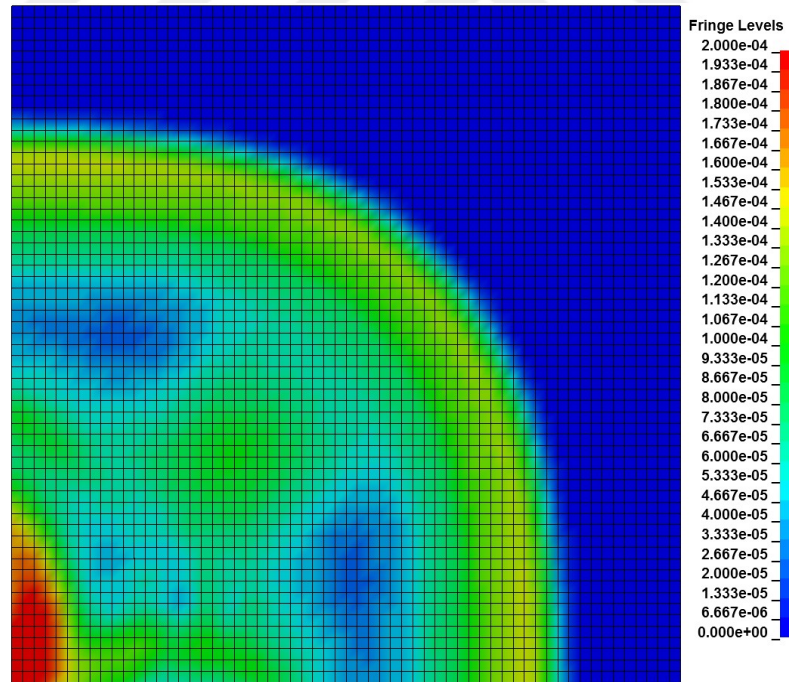
Plakaya 500 mm uzaklıkta bulunan patlayıcının CONWEP, ALE ve IVFG teknikleri kullanılarak yapılan patlama analizlerinde, plaka üzerinde basınç dağılımları sırasıyla Şekil 3.5., 3.6. ve 3.7.'de gösterilmiştir. CONWEP tekniğinde, basınç plaka üzerine mesafeyle orantılı olarak dağıtıldığı için, basınç dağılımının düzenli olduğu görülmektedir. ALE tekniğinde enerji akışı elemanların köşegenlerindeki düğüm noktalarından gerçekleşmektedir. Ağ yapısı kartezyen koordinatlarda modellendiği için, elemanlar arası iletim “zig-zag” şeklinde sağlanmaktadır. Bu nedenle patlamanın küresel şekli tam olarak sağlanamamıştır. IVFG tekniğinde ise patlayıcı küre şeklinde modellendiğinde, ALE tekniğine göre kısmen küreye daha benzeyen bir şekil oluşmuştur.



Şekil 3.5. CONWEP tekniğiyle elde edilen patlama yüklerinin plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları



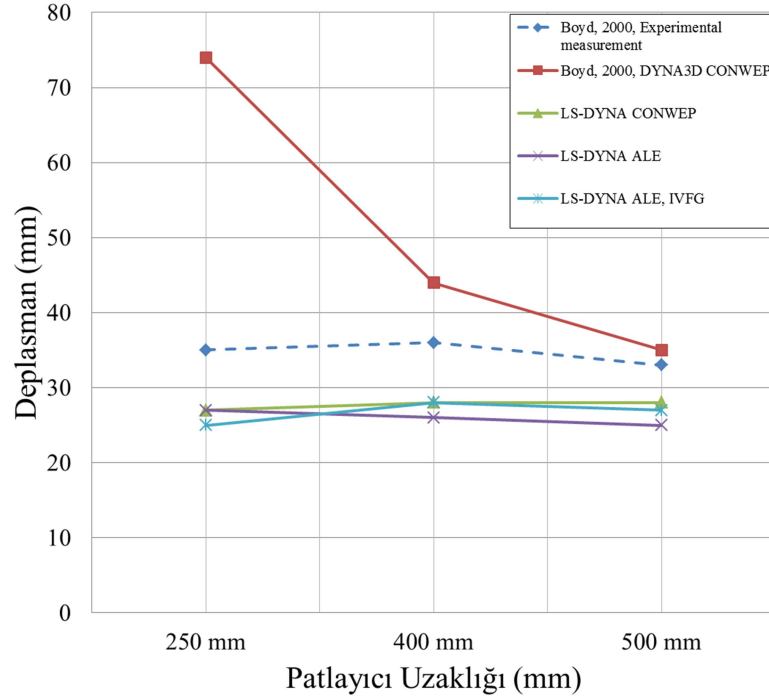
Şekil 3.6. ALE tekniğiyle elde edilen patlama yüklerinin plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları



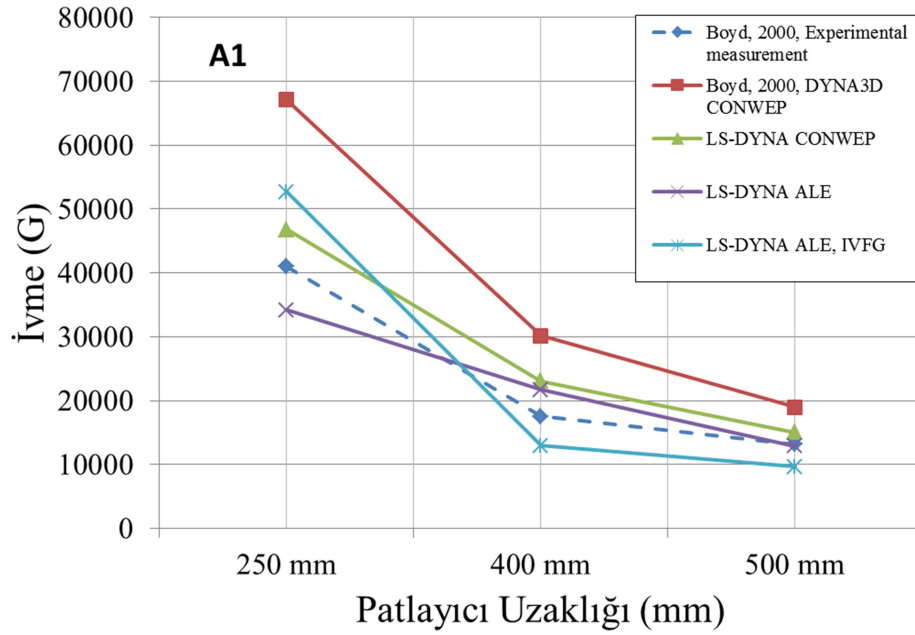
Şekil 3.7. ALE-IVFG tekniğiyle elde edilen patlama yüklerinin plaka üzerindeki vonMises gerilme dağılımları

Boyd'un yaptığı test ve sayısal simülasyon sonuçları, LS-DYNA'da gerçekleştirilen CONWEP, ALE ve ALE-IVFG yöntemleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 3.8.'de plaka üzerindeki maksimum deplasman miktarları, Şekil 3.9.'da A1 ivmeölçeri üzerinde

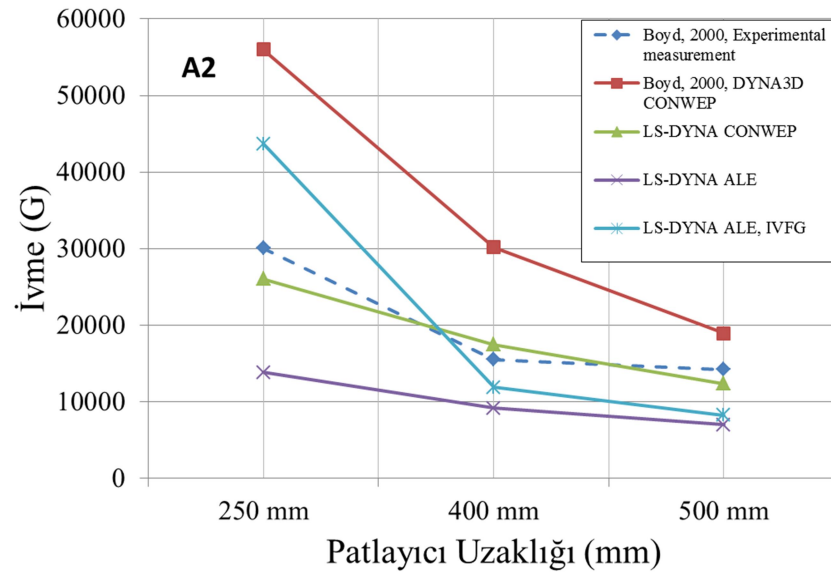
maksimum ivme değerleri ve Şekil 3.10.'da ise A2 ivmeölçerindeki maksimum ivme değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.8. Plakanın orta noktasındaki maksimum deplasman değerlerinin karşılaştırılması

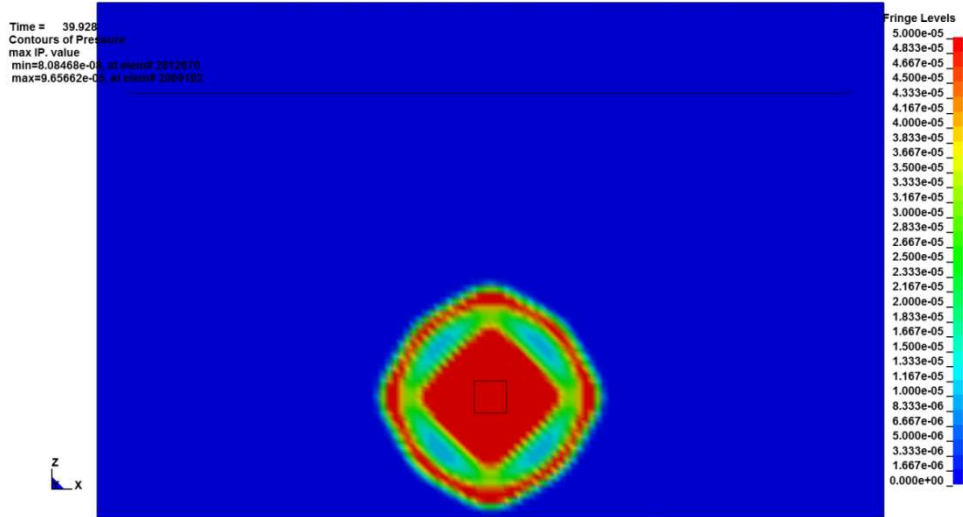


Şekil 3.9. A1 ivmeölçeri üzerinden okunan maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması

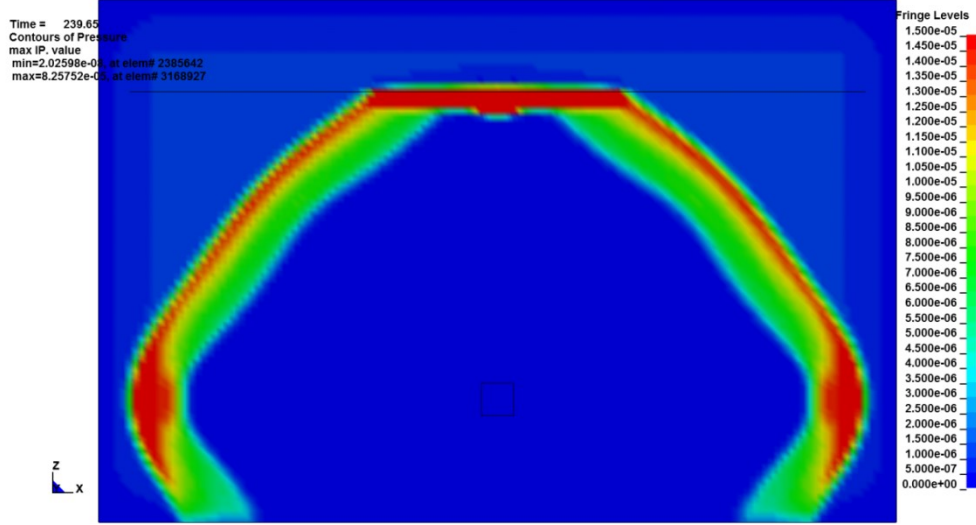


Şekil 3.10. A2 ivmeölçeri üzerinden okunan maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması

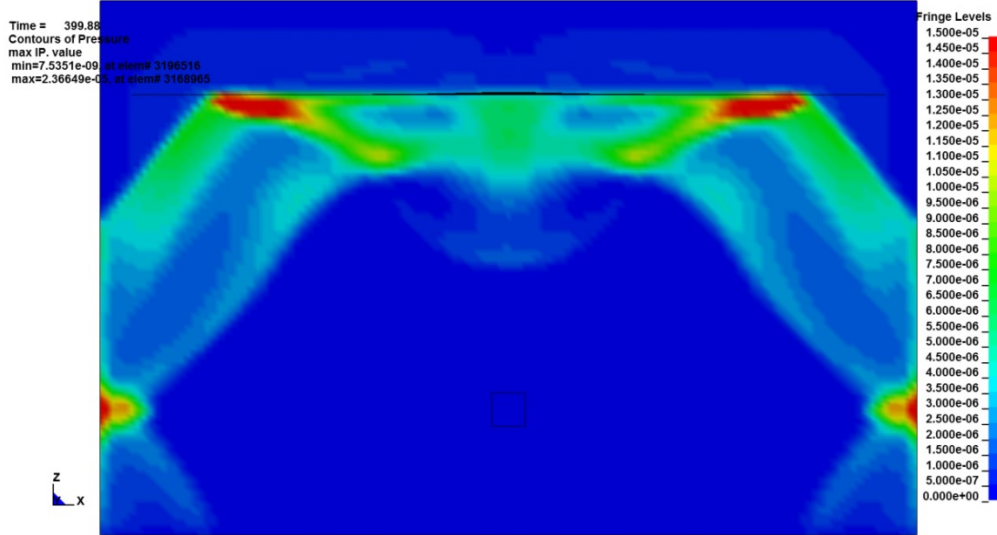
Şekil 3.11., Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.'de ALE yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonda belli zaman aralıklarında patlayıcının patlaması, hava içerisindeki hareketi, plakaya çarpması ve plakadan yansıdıktan sonraki hareketi basınç skalasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.11. 40 μ s anında patlayıcının patlaması ve hava ortamı içerisindeki hareketi (Basınç: Mbar)



Şekil 3.12. 240 μ s anında şok dalgasının plakaya çarpması (Basınç: Mbar)



Şekil 3.13. 400 μ s anında şok dalgasının plakadan yansıması (Basınç: Mbar)

3.3.1.7. Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

CONWEP, ALE ve ALE-IVFG teknikleri kullanılarak yapılan mayın patlama simülasyonu ile elde edilen sonuçlar, 3 tekniğin de test sonuçlarına belli oranlarda yakınsama sağladığını göstermektedir. Patlayıcı ile hedef plaka arasındaki mesafe arttığında, plaka deformasyonu ve ivme değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Smith ve Brode [9]'nin (1.23) denkleminde ifade edildiği üzere, patlayıcı ve hedef plaka arasındaki mesafe, R , arttığında, maksimum basınç düşmektedir.

Boyd'un deneysel çalışması, sayısal benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu tez çalışması kapsamında LS-DYNA CONWEP, LS-DYNA ALE, LS-DYNA ALE-IVFG yöntemleri kullanılarak yapılan simülasyonların, belli oranlarda deneysel çalışmaya yakınsadığı ve yaklaşık % 20 altında kaldığı bulunmuştur. Maksimum deplasmanlar incelendiğinde ise Boyd'un simülasyon sonuçlarının, test ölçümlerinin 2 katından daha fazla çıktığı görülmüştür. Başarılı bir simülasyon olduğu söylenemez. Diğer yandan, LS-DYNA CONWEP ve LS-DYNA ALE-IVFG teknikleri ile yapılan simülasyon sonuçlarının kendi içlerinde tutarlılığı olmadığı gözlenmiştir. Örneğin, CONWEP ile yapılan analizde 250 mm için deplasman miktarı 27 mm iken, bu değerlerin 400 mm ve 500 mm için Smith'in yukarıda bahsedilen formülasyonuna göre, uzaklık arttıkça düşmesi gerekirken, yükseldiği görülmüştür. Gene ALE-IVG tekniği kullanılarak yapılan analizde, 250 mm için 25 mm maksimum deplasman ölçülmüşken, bu değer 400 mm ve 500 mm için sırasıyla 28 mm ve 27 mm olarak bulunmuştur. Bunun yanında, ALE tekniği kullanılarak yapılan simülasyonlarda 250 mm için 27 mm maksimum deplasman bulunurken, 400 mm ve 500 mm için sırasıyla 26 mm ve 25 mm deplasman değerleri ölçülmüştür. Bu durumda deplasman değerleri göz önüne alındığında ALE tekniğinin düz plaka testi için diğer tekniklerden daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

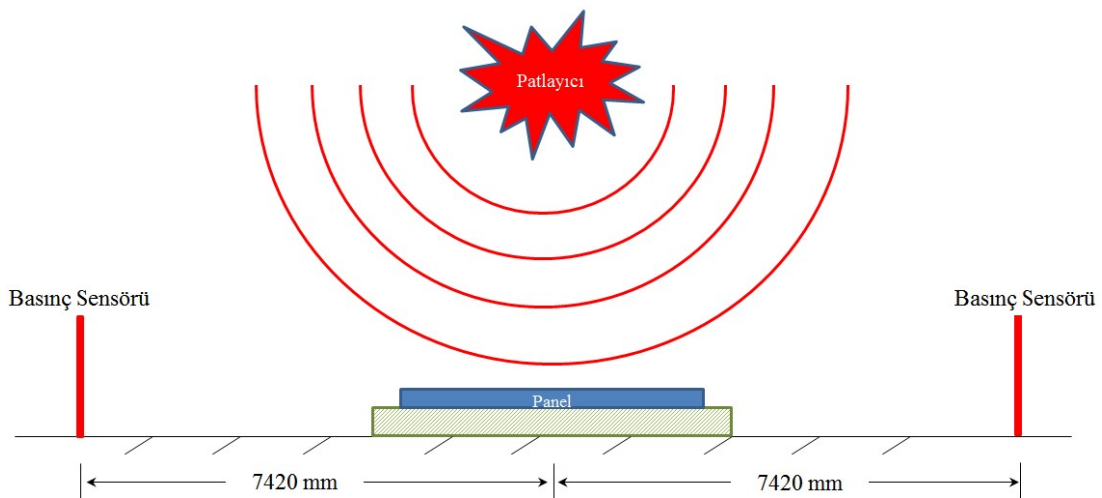
İvme değerleri açısından bir kıyaslama yapıldığında, Boyd'un simülasyon sonuçlarının test ölçümlerinden fazla olduğu görülmektedir. LS-DYNA CONWEP tekniğinde ise A1 noktası için test değerlerinin üstünde sonuçlar elde edilirken, A2 noktasında 250 mm ve 500 mm için üstünde, 400 mm için altında sonuçlar bulunmuştur. ALE – IVFG tekniği ile yapılan analizlerde A1 noktasında 250 mm için üstünde, 400 mm ve 500 mm için altında, A2 noktasında ise 250 mm için üstünde, 400 ve 500 için altında değerler elde edilmiştir. Analiz sonuçları, ALE – IVFG tekniğinde, plakanın orta noktasında basınç değerlerinin test ölçümlerinden daha fazla, köşelere gidildikçe daha düşük olduğunu söylemektedir. ALE tekniğinin, diğer iki tekniğe göre ivme açısından daha kararlı olduğu söylenebilir. A1 noktası için sadece 400 mm olan mesafede test sonucunun üstünde bir değer elde edilirken, 250 mm ve 500 mm için test sonuçlarının altındadır. A2 noktası için ise 250 mm, 400

mm ve 500 mm için ALE sonuçları, test ölçümlerine göre daha düşüktür. İvme değerleri yaklaşık % 50 daha azdır.

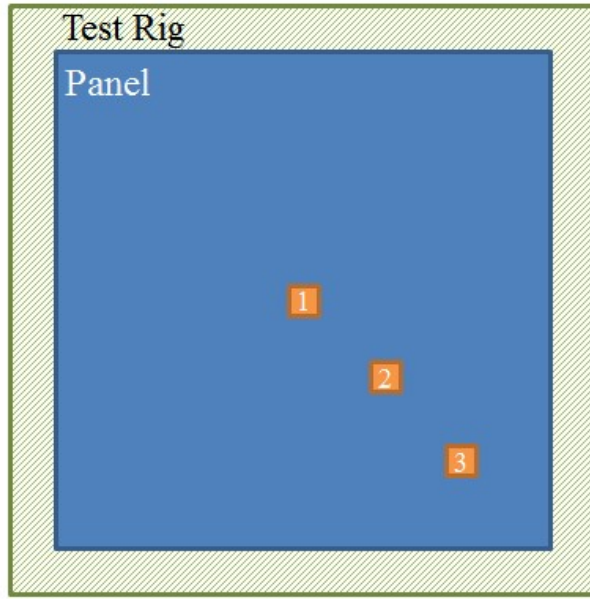
Burada dikkat edilmesi gereken husus, Boyd'un, testte ölçülen ivme değerlerinin hassasiyetini gösterebilmek için 500 mm mesafede 2 farklı patlama testi yapmasıdır. Boyd, iki farklı patlama testi sonucunda, A1 ve A2 noktaları için farklı ivme değerleri bulmuştur. Bu durum, ivmeölçerlerin hassasiyet derecesinin yüksek olmasının yanında kalibrasyonunun da zor olması ile açıklanabilir. Sonuç olarak sayısal benzetim çalışmalarında farklı ivme değerleri bulmak fazla şaşırtıcı olmamalıdır.

3.3.2. Patlama modellerinin Tabatabaei'nin patlatma testi ile mukayesesi

Sayısal modeller, Tabatabaei [50]'nin çalışmasındaki saha testi sonuçları ile mukayese edilmiştir. Saha testinde kütlesi 34 kg olan TNT patlayıcısı, 1830 x 1830 mm genişliğinde, 165 mm kalınlığında bir panelin 1675 mm önüne yerleştirilmiştir. Şekil 3.14.'te patlama testinde sırasıyla panelin merkez noktasından 7420 mm uzağa çarpma (incident) basınç sensörleri (I1) konumlandırılmıştır. Şekil 3.15.'de görüldüğü üzere panelin üzerinde 3 noktaya sırasıyla tam merkezine, merkezden köşegene doğru 430 mm ve 860 mm uzağa 3 adet yansıyan basınç duyargası yapıştırılmıştır (Sırasıyla R1, R2 ve R3).



Şekil 3.14. Basınç sensörlerinin ve patlayıcının panele göre yerleşimi



Şekil 3.15. Basınç sensörlerinin panel üzerindeki yerleşimi

Bölüm 3.3.1.1. ve 3.3.1.2.’de CONWEP ve ALE yöntemleri açıklandığı için, bu bölümde sadece Birleşik CONWEP – ALE patlama yöntemi ve LS-DYNA kullanımına dair bilgiler verilecektir.

3.3.2.1. Birleşik CONWEP – ALE patlama modeli

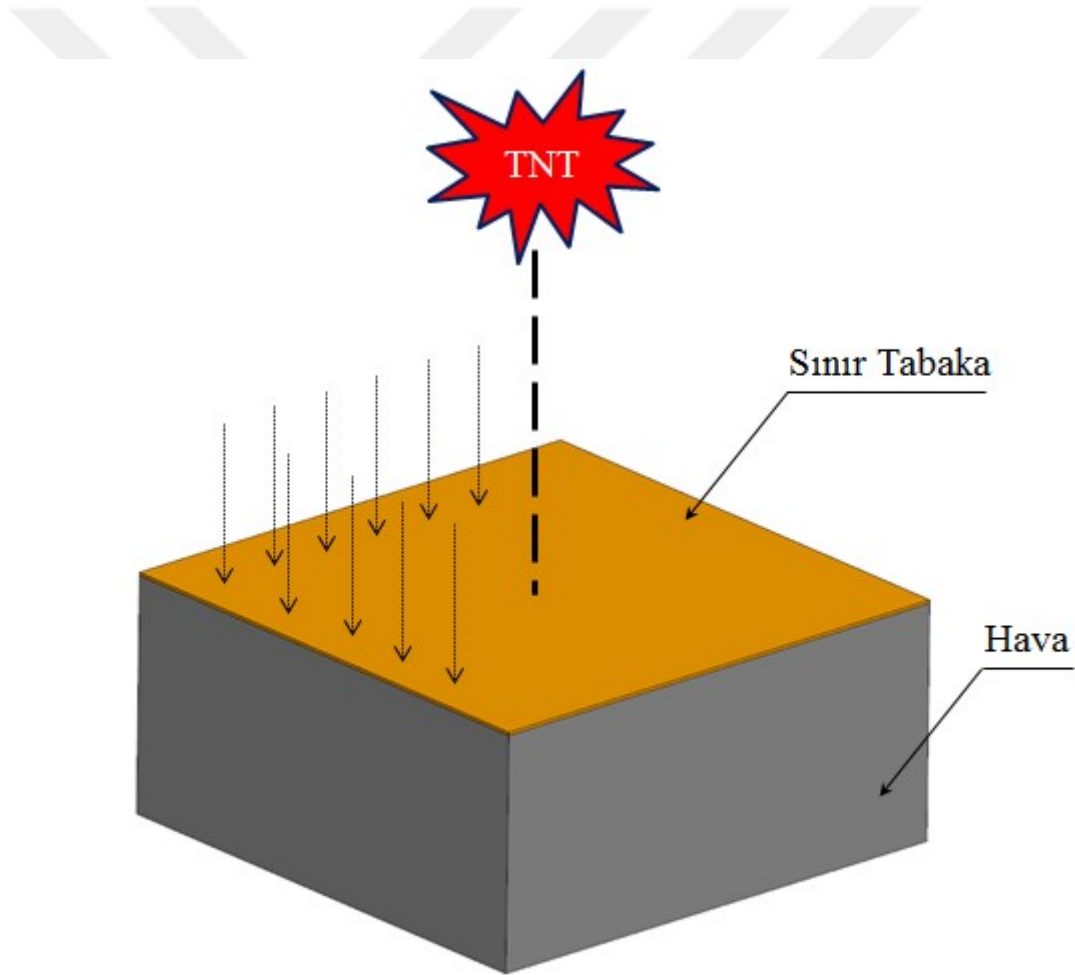
Birleşik CONWEP-ALE Patlama Modelinde, şok basıncının doğruluğunu arttırmak ve çözüm süresini kısaltmak için melez bir çözüm uygulanır. LS-DYNA’da *LOAD_BLAST_ENHANCED kartı kullanılarak oluşturulan bu çözümde, CONWEP yöntemiyle elde edilen basınç, hedef yapıya yakın bir noktadan ALE ortamına “sınır tabaka elemanları” tarafından aktarılır. Sınır tabaka elemanları da basıncı ALE elemanlarına iletirler. Bu yöntemde patlayıcı modeli oluşturulmaz ve hava modelinin sadece Lagrange yapıya olan yakın kısmı modellenir. Bu şekilde oldukça önemli bir hesaplama külfetinden feragat edilmiş olunur. Diğer yandan CONWEP’in sağlayamadığı gölgeleme etkilerinin hedef yapı üzerine iletilmesi Birleşik CONWEP-ALE yöntemiyle mümkündür [54].

CONWEP modelinde farklı olarak ampirik patlama modelinin tanımlanması, *LOAD_BLAST yerine *LOAD_BLAST_ENHANCED kartının kullanılmasıyla

gerçekleşir. Ampirik patlama yükü Şekil 3.16.'da detayları verilen *LOAD_BLAST_SEGMENT kartındaki SSID kısmı, *SET_SEGMENT kartı kullanılarak Şekil 3.17.'de gösterilen sınır tabaka elemanlarının patlayıcıya bakan yüzeyleri tanımlanarak oluşturulmalıdır.

*LOAD_BLA								
\$#	bid	ssid	alepid	sfnrb	scalep			
	1	1	2	0.000	1.000000			
*LOAD_BLA								
\$#	bid	m	xbo	ybo	zbo	tbo	unit	blast
	1	34000.0	0.0	0.0	167.5	0.000	4	2
\$#	cfm	cfl	cft	cfp	nidbo	death	negphs	
	0.000	0.000	0.000	0.000	0	1.E+20	0	

Şekil 3.16. Ampirik patlama yükünün tanımlandığı kartlar (cm-g- μ s)



Şekil 3.17. Birleşik CONWEP-ALE modeli

CONWEP ampirik patlama modelinin ALE modeliyle bir arada kullanılabilmesi için gereken uygulamaları Slavik [54] yaptığı çalışmada açıklamıştır. Buna göre, sınır

tabaka elemanları, *SECTION_SOLID kartında ALE elemanları gibi ELFORM=11 kullanılarak tanımlanmalı, diğer yandan ALE elemanlarından farklı olarak reseptör özelliği olan ambiyant elemanlar olarak (AET=5) eklenmelidir. Aynı şekilde *LOAD_BLAST_SEGMENT_SET kartındaki ALEPID parametresi, sınır tabaka elemanlarının parça numarası olacak şekilde doldurulmalıdır. Bu şekilde tarif edilen patlama modeliyle, ALE modelindeki patlayıcının hedef plakaya ulaşma zamanı kısaltılmış olacaktır. Şekil 3.18.'de modelin ALE özelliklerini içeren kart detayları verilmiştir.

```

*PART
$# title
ALE
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
   1    1    1    1    1    0    0    0
*SECTION_SOLID
$# secid elform aet
   1    11    0
*MAT_NULL
$# mid ro pc mu terod cerod ym pr
   1 1.2900E-3 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
$# eosid c0 c1 c2 c3 c4 c5 c6
   1    0.000 0.000 0.000 0.000 0.400000 0.400000 0.000
$# e0 v0
 2.5000E-6 1.000000
*HOURLGLASS
$# hgid ihq qm ibq q1 q2 qb/vdc qw
   1    1 1.0000E-4 0 0.000 0.000 0.000 0.000
*PART
$# title
sinir tabaka elemanlari
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
   2    2    1    1    0    0    0    0
*SECTION_SOLID
$# secid elform aet
   2    11    5
*PART
$# title
patlayici
$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid
   3    3    3    3    0    0    0    0
*SECTION_SOLID
$# secid elform aet
   3    11    0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN
$# mid ro d pcj beta k g sigy
   3 1.570000 0.693000 0.210000 0.000 0.000 0.000 0.000
*EOS_JWL
$# eosid a b r1 r2 omeg e0 vo
   3 3.712000 3.2310E-2 4.150000 0.950000 0.300000 7.0000E-2 1.000000
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP_PART
$# pid
   1
   3
   2
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID
$ 5000001 no.lu parça hedef plaka
$# slave master sstyp mstyp nquad ctype direc mcoup
 5000001 1 1 1 2 4 1 0
$# start end pfac fric framin norm normtyp damp
 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0 0 0
$# cq hmin hmax ileak pleak lcldpor nvent blockage
 0.000 0.000 0.000 0 0.000 0 0 0
$# iboxid ipenchk intforc ialesof lagmul pfacmm thkf
 0 0 0 0 0.000 0 0.000

```

Şekil 3.18. Birleşik CONWEP - ALE patlama modelinin ALE özelliklerini içeren kartları (cm-g-mikrosaniye)

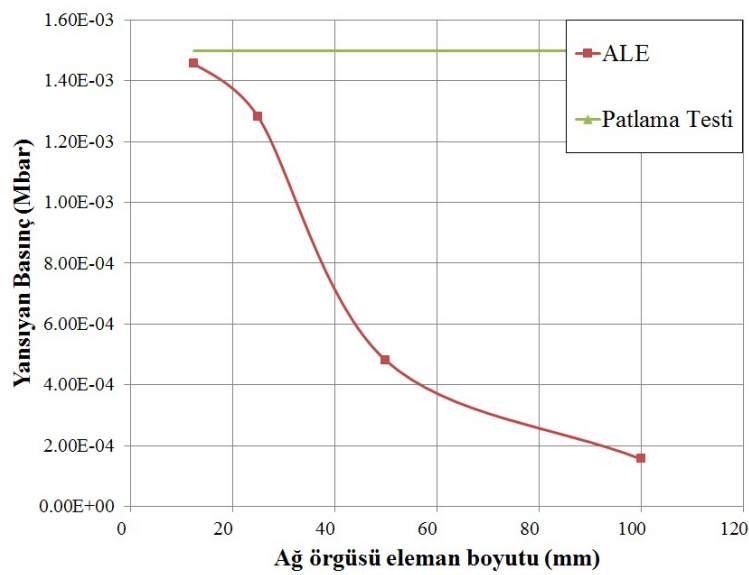
3.3.2.2. ALE hassasiyet analizi

ALE modelinde sayısal benzetim çalışmasında kullanılacak uygun ağ yapısı boyutunu belirlemek için ağ yapısı hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. 100, 50, 25 ve 12,5 mm olmak üzere 4 farklı kenar uzunluğu için küp elemanlar ile patlama modeli oluşturulmuş ve test sonucu ile mukayese edilerek, analizde kullanılacak optimum eleman boyutu bulunmuştur. Tablo 3.4.'de eleman boyutları için eleman sayıları listelenmiştir.

Tablo 3.4. Ağ yapısı hassasiyet analizinde kullanılan eleman boyutları ve sayıları

Küp eleman boyutu (mm)	Eleman Sayısı
100	13.230
50	105.840
25	846.720
12,5	6.773.760

Ağ yapıları için yapılan hassasiyet analizi sonucunda hesaplanan yansıyan basınç değerleri Şekil 3.19.'da gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 25 mm'lik kenar uzunluğu olan küp elemanların testin benzetim çalışmasında kullanılmasının optimum çözüm olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.19. ALE yönteminde ağ örgüsü eleman boyutuna bağlı olarak basınç değerinin değişimi

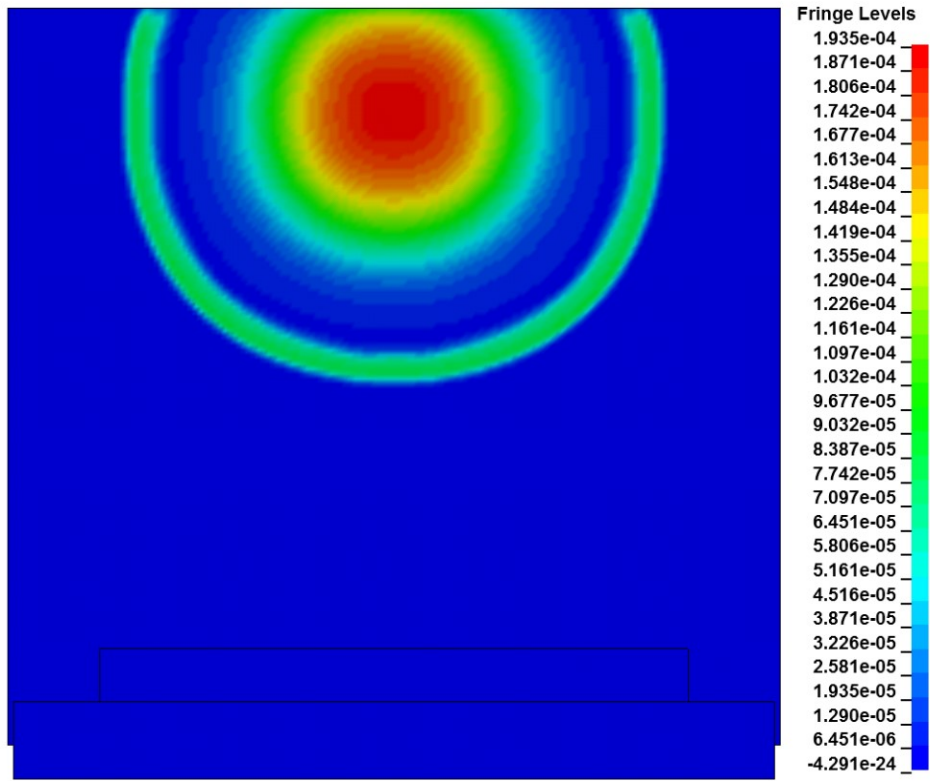
3.3.2.3. Analiz sonuçlarının Tabatabaei'nin test sonuçları ile kıyaslanması

Üç farklı modele ait eleman sayıları ve toplam analiz hesaplama süreleri Tablo 3.5.'de verilmiştir.

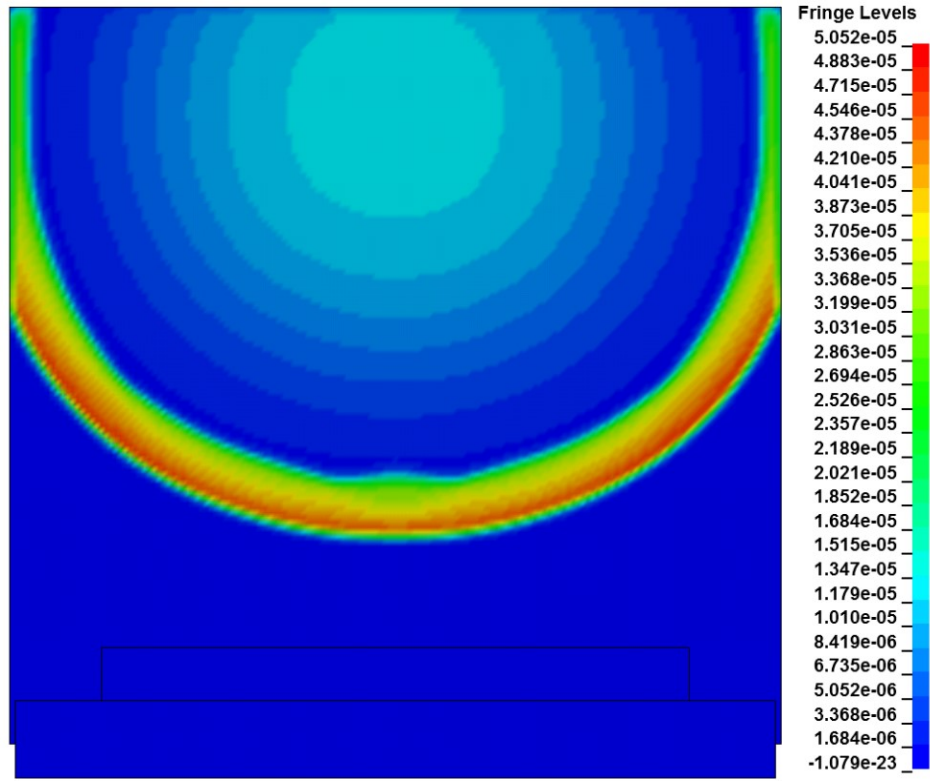
Tablo 3.5. Modellerin eleman sayıları ve çözüm süreleri

Model	Eleman Sayısı	Hesaplama Süresi (s)
ALE	4.684.800	2,709
Birleşik ALE-CONWEP	1.894.440	328
CONWEP	1	2

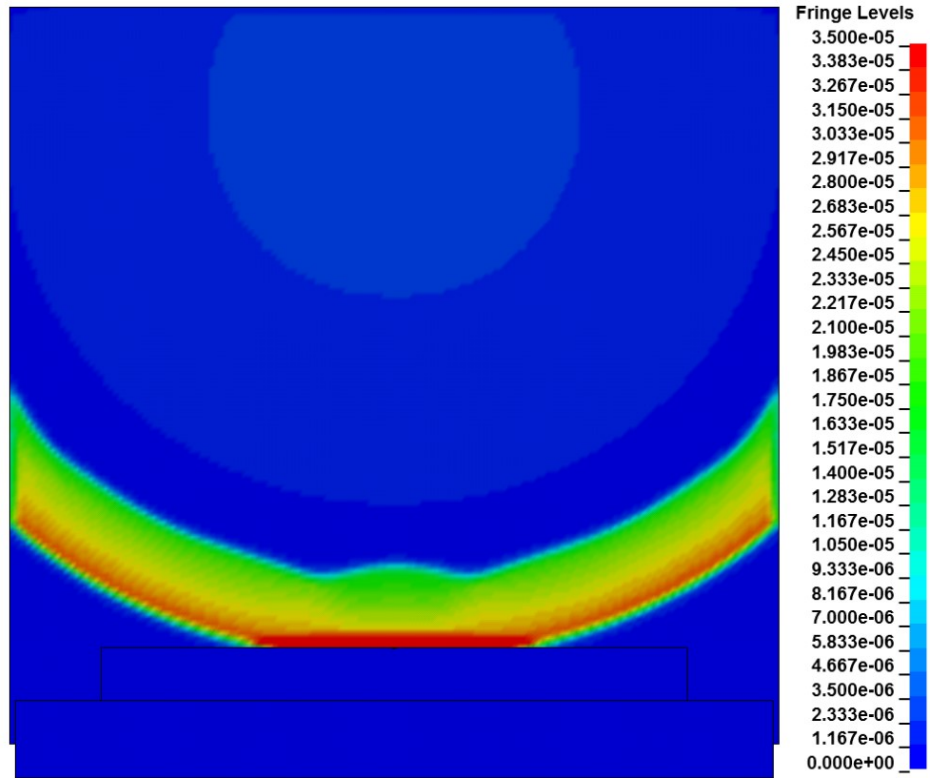
ALE analizinde şok dalgasının 200, 400, 600 ve 800 μ s zamanlarında hava içerisindeki hareketleri sırasıyla Şekil 3.20., 3.21., 3.22. ve 3.23.'de gösterilmiştir.



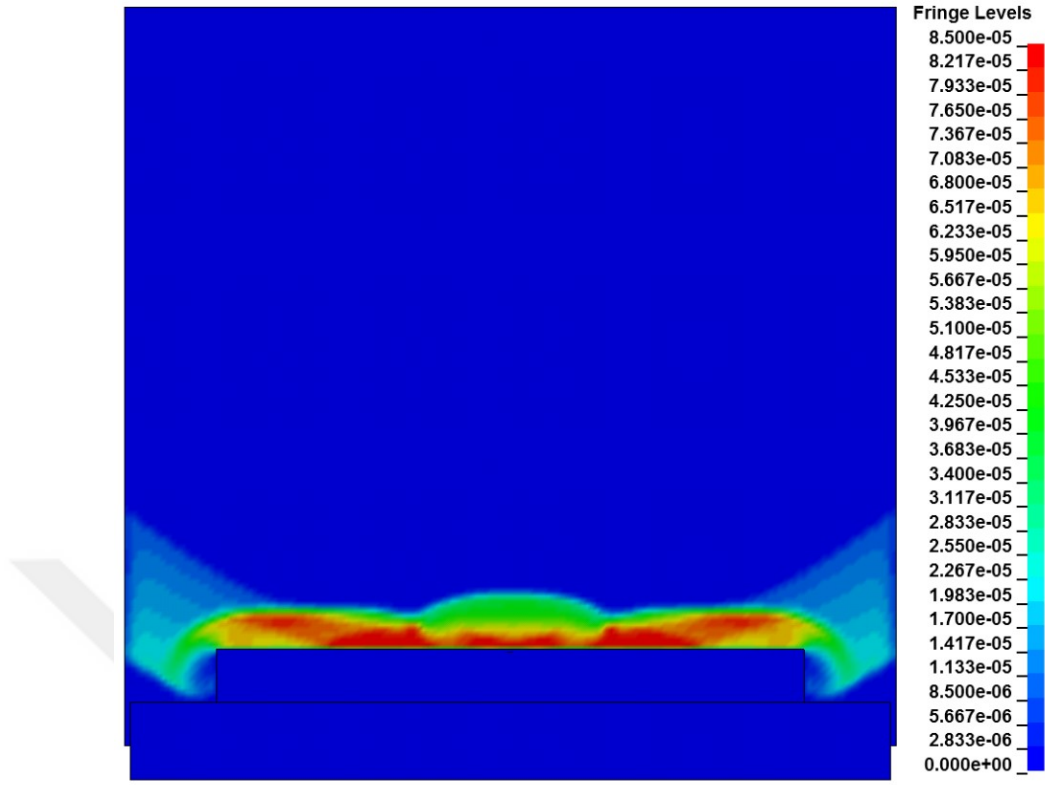
Şekil 3.20. Patlama dalgalarının 200 μ s anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)



Şekil 3.21. Patlama dalgalarının 400 μ s anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)



Şekil 3.22. Patlama dalgalarının 600 μ s anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)



Şekil 3.23. Patlama dalgalarının 800 μ s anında hava ortamındaki ilerleyişi (Basınç Skalası Mbar)

Üç yönteme ait sayısal benzetim çalışmasından elde edilen yansıyan basınç için pik değerleri Tablo 3.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Üç yöntem için pik basınç değerleri

Yöntem	Pik basınç değeri (Mbar)
Test Sonucu [50]	1.5 e-3
CONWEP	0.35 e-3
ALE	1.28 e-3
Birleşik ALE-CONWEP	1.14 e-3

Tabatabaei [50]'nin yaptığı çalışma referans olarak alınırsa, patlama testine en yakın sonucu ALE yöntemi vermiştir. Test ölçümleriyle CONWEP modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, referans çalışmadaki patlayıcı miktarı ve hedef mesafe için CONWEP modelinin doğruluğu sorgulanmalıdır. Düşük işlemci gücüne sahip hesaplama sistemlerinde Birleşik ALE-CONWEP yöntemi, ALE yöntemine göre bir alternatif olabilir.

3.3.3. Araç patlama simülasyonunda kullanılacak patlama modeli

Simülasyon sonuçlarını etkileyen bir çok patlama modeli parametresi vardır. Örneğin patlayıcının tam lokasyonu, plakanın ayarlanması ve plakanın durumu, test düzeneğinin patlama esnasında hareketi ve ölçüm hassasiyeti gibi konular test sonuçlarını etkilerken, diğer yandan eleman boyutu, akışkan-katı etkileşiminde kullanılan parametreler, patlayıcı modeli, patlayıcının ve hedef yapının malzemeleri de simülasyon sonuçlarına direkt etki eder. Vulitsky ve Karni [55] yaptıkları çalışmada, patlamayla ilgili literatürde, deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasındaki farkın %100'ü geçebileceğinden bahsetmektedir. Hata oranının yüksek olması simülasyon sonuçlarının doğruluğunun sorgulanmasına neden olmaktadır. Patlama gibi karmaşık mühendislik problemlerinde simülasyon parametrelerinin test ölçümleriyle kalibrasyonu, simülasyon sonuçlarının güvenilirliği açısından oldukça önemlidir.

Hesaplamaların seri şeklinde yapılabilmesi için tek plaka patlama düzeneklerinin kullanıldığı Boyd'un ve Tabatabaei'nin çalışmaları referans alınarak modeller hazırlanmıştır.

Boyd'un gerçekleştirdiği patlama testinin sonuçlarıyla ALE, CONWEP ve ALE-IVFG teknikleri karşılaştırılmıştır. ALE tekniğinin CONWEP tekniğine göre şok dalgasının modellenmesi, hareket yönünün ve hızının ölçülebilmesi, yansıma yani şok dalgasının bir engelle çarpıp, engelden sonra hızının, yönünün ve şiddetinin değişmesi durumunun simüle edilebilmesi gibi üstünlükleri bulunmaktadır. Bunun yanında, CONWEP tekniği kompleks yüzeylerde şok basıncını simüle etmekte yetersiz kalırken, ALE yönteminde patlama olayı (blast phenomenon) modellenemediği için, şok basıncı geometriden bağımsız olarak ifade edilmektedir. Diğer yandan simülasyon sonuçları test sonuçları ile mukayese edildiğinde, ALE tekniğinin ALE-IVFG tekniğine göre daha başarılı öngöründe bulunduğu anlaşılmaktadır.

Tabatabaei'nin patlama testi ölçümleriyle ALE, CONWEP birleşik ALE-CONWEP tekniklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, testte ölçülen değerlere en yakın sonuç, ALE tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, her iki test simülasyon karşılaştırmasında ALE tekniği test ölçümlerine göre en iyi sonucu verdiği için, araç patlama simülasyonunda ALE tekniği kullanılmasına karar verilmiştir.



BÖLÜM 4. ARAÇ PATLAMASI BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde, askeri bir aracın geometrik bilgisinden sayısal benzetim modeli oluşturulup, ALE yöntemi kullanılarak kara mayını patlama simülasyonu yapılmış ve gerçek ölçekteki askeri aracın mayın patlama testlerinden elde edilen sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda sayısal benzetim modelinin, gerçek test sonuçlarıyla örtüşme oranı hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilecek patlama metodolojisinin, gelecekteki mayına dayanıklı araç tasarım çalışmalarında referans olarak kullanılması planlanmaktadır.

4.1. Giriş

Birçok ülkede zırhlı araçların asimetrik tehditlere maruz kalması sonucunda, araç üzerinde ciddi hasarlar oluşmakta ve içindeki mürettebat yaralanmakta, hatta hayatını kaybetmektedir. Bu olayların büyük bir kısmı, zırhlı araçları ve mürettebatı ciddi bir biçimde etkileyen kara mayını patlamalarından kaynaklanmaktadır. Patlama yüklerini sönümleyen anti-mayın koruma sistemleri, mayın patlaması esnasında aracın yapısal bütünlüğünü korurken, mürettebatın hayatta kalmasına da yardımcı olur. Bilinen yöntemlerle anti-mayın koruma sistemleri geliştirilirken, patlama yükü etkilerinin araç üzerindeki etkilerini indirmek için, tam ölçekli mayın patlama testleri yapılmaktadır. Zırhlı araçların tam ölçekli mayın patlama testleri oldukça yüksek maliyetli olmakla beraber, hazırlanma ve data toplanma süreçleri de oldukça meşakkatlidir. Bunun yanında test koşulları (Toprağın kompozisyonu ve nem oranı, hava şartları, vb.) fiziksel testlerin gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Özetlenirse, mayın patlama testleriyle yönlendirilen mayına dayanıklı tasarım geliştirme çalışmaları tam olarak istenilen seviyelere ulaşmayabilir. Diğer yandan sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak, zırhlı araçların mayın dayanım performanslarını iyileştirmek mümkündür.

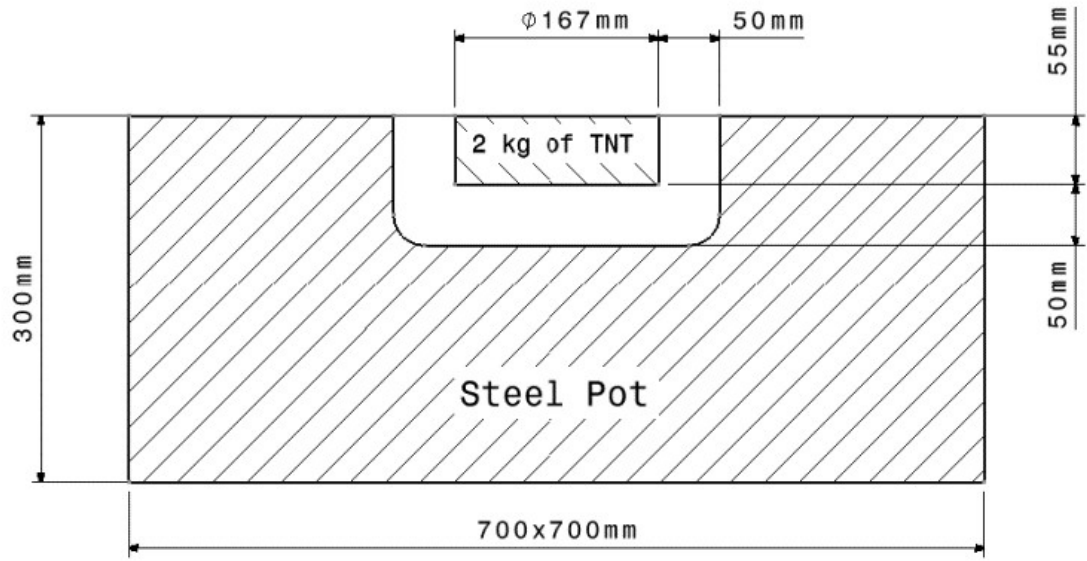
Bu çalışmada, zemindeki bir çelik çanak içerisine yerleştirilen 2 kg ağırlığındaki TNT patlayıcısının patlatılması sonucu ortamdaki basınçölçerler vasıtasıyla patlama basıncının zamana bağlı değişimi ölçülmüştür. Elde edilen basınç-zaman profili, sayısal simülasyonda ALE tekniği kullanılarak patlama modelinin doğrulanmasında ve kalibre edilmesinde kullanılmıştır. Daha sonra kalibre edilen patlama simülasyonu parametreleri zırhlı bir aracın tam ölçekli patlama testi sonuçlarıyla karşılaştırılmak amacıyla sayısal benzetim modeline dahil edilmiştir. Son olarak, zırhlı araç patlama testinin ölçüm değerleriyle sayısal benzetim modelinin hesaplama sonuçlarının mukayesesi yapılmıştır.

4.2. Zeminde Serbest Patlama Testi

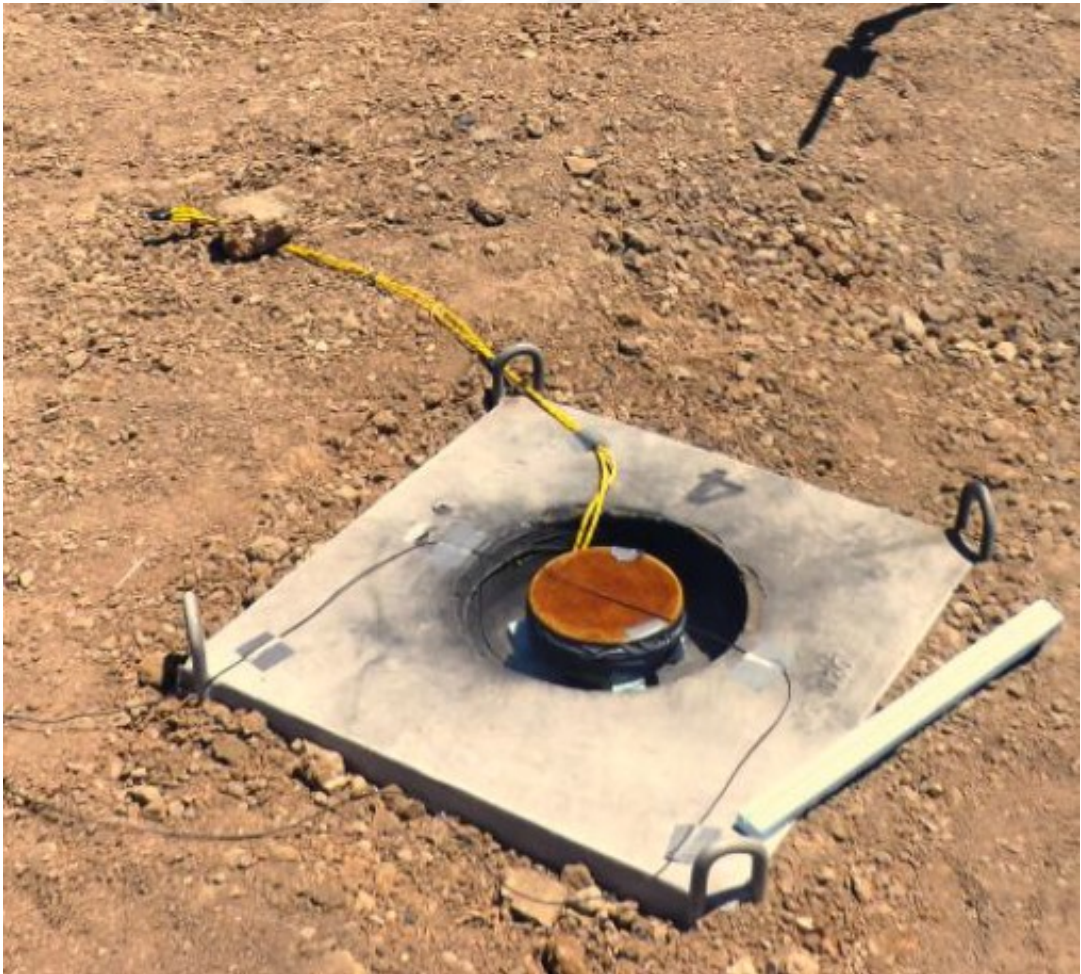
NATO AEP-55 [56] standardında el bombasına ve mayın tehdidine maruz kalan hafif zırhlı araçların NATO STANAG 4569 [57]'a göre belirlenen dayanım seviyelerinin tespiti için patlatma testlerinin koşulları belirtilmiştir. Standartta göre mayın toprak içerisinde veya çelik bir çanak içerisinde bulunabilir. Patlatma testlerinde kullanılacak toprağın nem oranı, sertliği, temini gibi toprağın hazırlanma sürecinde karşılaşılan bir takım zorluklar ve belirsizlikler elde edilecek sonuçların doğruluğuna direkt etki edebildiği için, mayının toprağa gömülmesi, yerine çelik bir çanak içerisine yerleştirilmesi tercih edilmiştir.

Zeminde serbest patlama testi, aracın patlama analizinde kullanılacak parametrelerin doğrulanması ve kalibrasyonu için yapılmıştır. Patlama test düzeneği, TNT patlayıcısı, çelik çanak ve iki adet basınçölçerden oluşmaktadır. 2 kg ağırlığındaki silindirik TNT, 42CrMo4 malzemesinden imal edilmiş çelik bir çanağın içerisine yerleştirilmiştir.

Şekil 4.1.'de çelik çanak ve silindirik TNT'nin ölçüleri verilirken, Şekil 4.2.'de patlayıcı ve çanağın test düzeneği gösterilmiştir. 1 m yüksekliğinde çelik çubuklara bağlanan, 2 adet basınçölçer, çelik çanağın merkezinden 1,7 m uzaklığa yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Çelik çanak ve patlayıcı ölçüleri



Şekil 4.2. Kara mayınının çanak içerisine konumlandırılması

Basınç ölçümü için, Şekil 4.3.'te gösterilen kalem tipi patlama ölçüm sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler patlama esnasında oluşan basınç (incident overpressure) değerlerini kaydetmektedir. Patlama öncesi basınç sensörünün oryantasyonu yapılarak, toprağa saplanmış çelik bir boruya sabitlenmiş sensörün diyaframı (sivri uç noktası),

Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'teki gibi gelen basıncı kayıpsız şekilde okuyabilmek için diyafram, çelik çanak içerisindeki silindirik patlayıcının merkez noktasından düşey ekseninde 90° yapacak şekilde hizalanmıştır. Şekil 4.6.'da test düzeneğinin şematik gösterimi mevcuttur.



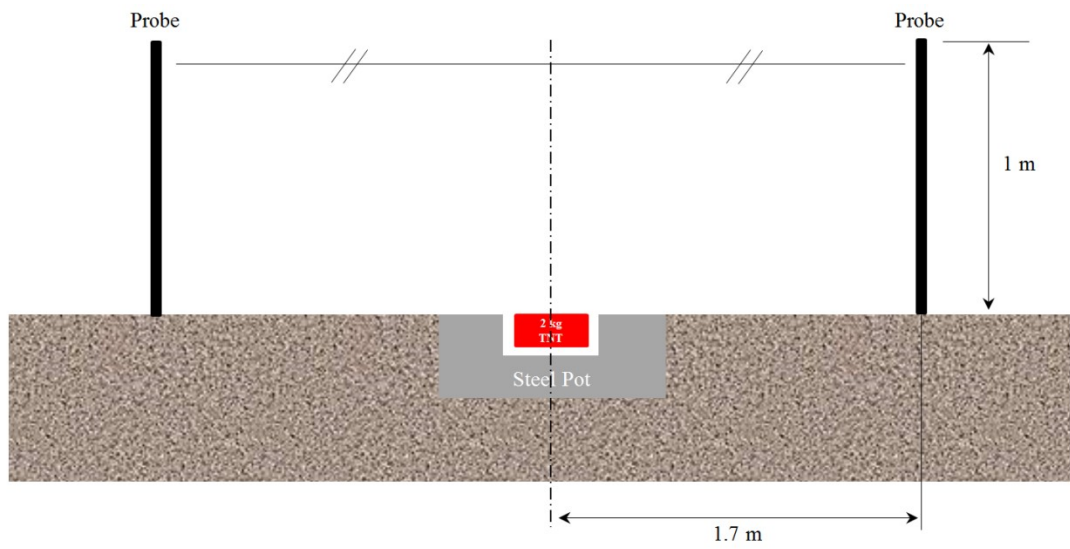
Şekil 4.3. Kalem tipi patlama basıncı ölçüm sensörü



Şekil 4.4. Patlama basınç sensörü oryantasyonu



Şekil 4.5. Patlama basıncı sensör yerleşimi



Şekil 4.6. Test düzeneğinin şematik gösterimi

4.3. Zeminde Serbest Patlama Testinin Sayısal Benzetimi

Patlama testinde ölçülen çarpma basıncı (incident pressure) sayısal simülasyon parametrelerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Patlama parametreleri kalibre edildikten sonra, tam ölçekli araç patlama simülasyonu bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar OTOKAR Otomotiv ve Savunma Sanayi A.S. bünyesindeki, 36 işlemcili, 216 GB RAM kapasiteli yüksek başarılı hesaplama kümesinde, LS-DYNA yazılımının V971 R6.1.0 versiyonunda yapılmıştır. Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) tekniği kullanılarak, patlama esnasında oluşan şok dalgalarının hareketi, hava ortamında modellenmiş ve patlama yüklerinin hava ortamında hedef yapı ile etkileşime girmesi sağlanmıştır. ALE tekniği Lagrange ve Euler hesaplama yöntemlerinin birleştirilmiş özel bir hali olup, Navier-Stokes akışkanlar dinamiği denklemlerinin patlama dalgalarının yayılımının hesaplanmasında kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sayısal modelleme ile ilgili detaylar Bölüm 4.3.1., 4.3.2. ve 4.3.3.'te açıklanmıştır.

4.3.1. Sayısal benzetim modeli detayları

Sayısal benzetim modeli, patlama dalgalarının yayıldığı hava ortamı, patlayıcı, çelik çanak ve hedeften oluşmaktadır. Hava ortamı ve patlayıcı Euler ağ yapısı ile tanımlanırken, çelik çanak ve hedef plaka Lagrange ağ yapısı olarak modellenmiştir. Hava ortamında alınan bir nokta çarpan basıncın ölçüm sensörü olarak oluşturulurken, dörtkenarlı kabuk eleman ise hedef olarak seçilerek, yansıyan basınç sensörü olarak kullanılmıştır. Hedef yapı, sonsuz katılıkta bir plaka olarak tanımlanırken, çelik çanak ise adi çelik olarak kabul edilmiştir. Hedef plaka ve çelik çanak hava ortamı içerisinde olup, hava ortamının elemanları ile ortak düğüm noktası paylaşımı yoktur. Bunun yanında hava ve patlayıcı modeli Multi-Material olarak tanımlanırken, ortak düğüm noktaları vasıtasıyla birbirleriyle etkileşim halindedirler. Patlayıcı malzemesi olarak TNT seçilmiş ve altıyüzlü katı elemanları olarak modellenmiştir. MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN kartı ve Jones-Wilkins-Lee (JWL) hal denklemi, sırasıyla patlayıcının malzemesini ve davranışını tanımlanmıştır. Diğer yandan kübik elemanlar kullanılarak tanımlanan hava ortamı

MAT_NULL malzeme kartı vasıtasıyla oluşturulurken, akışkan ortamın hareketi Doğrusal Polinom hal denklemi ile belirlenmektedir.

4.3.2. Kontrol parametreleri

Sayısal benzetim çalışmasının Akışkan-Yapı Etkileşim hesaplarında kullanılan önemli kontrol parametreleri bu kısımda açıklanmıştır. ALE formülasyonu CONTROL_ALE kartıyla, Van Leer yöntemini kullanan, ikinci dereceden monotonik “half-index-shift” tekniği olarak tanımlanmıştır. Seçilen bu akış algoritması düşük çözünürlükteki ağ yapılarında oldukça doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Akış adımları arasındaki çevrim sayısı “1” alınmıştır. CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID kartı kullanılarak gaz-yapı etkileşimi sağlanmıştır. Akışkan ortamdaki plaka ve katı elemanlar için “Penalty coupling” yöntemi tercih edilmiş ve etkileşim için her bir elemanda “2” kontrol noktası kullanılmıştır. Gaz-yapı etkileşim hesaplamalarında sıklıkla karşılaşılan gaz sızıntısı problemi için herhangi bir parametre kullanılmamıştır. Bunun yerine, gaz-yapı etkileşim yüzeyleri etrafındaki Euler ve Lagrange elemanların boylarının oranları “1”e sabitlenerek yüzeylerde doğru temas kuvvetlerinin oluşması sağlanmış ve Lagrange elemanlara doğru olan gaz sızıntısı asgari seviyede tutulmuştur.

4.3.3. Patlayıcıya ve havaya ait hal denklemi parametreleri

Patlayıcıya ait hal denklemi Bölüm 3.2.1.4.’te açıklanmıştı. Dobratz ve Crawford [53]’un TNT için hazırladıkları JWL hal denklemine ait parametreler Tablo 4.1.’de verilmiştir.

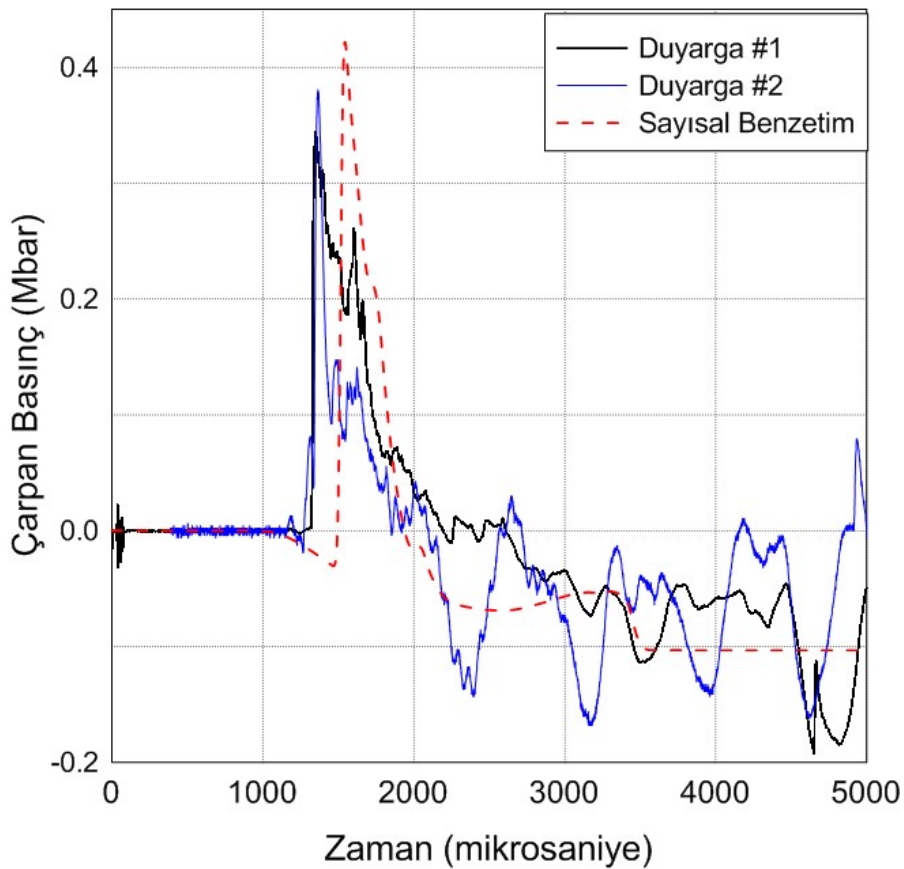
Tablo 4.1. TNT için JWL hal denklemi parametreleri [53].

ρ_0 (kg/m ³)	D (m/s)	P_{CJ} (GPa)	E_0/V (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1 (-)	R_2 (-)	W (-)
1630	6930	21.0	7.0	371.213	3.231	4.15	0.95	0.30

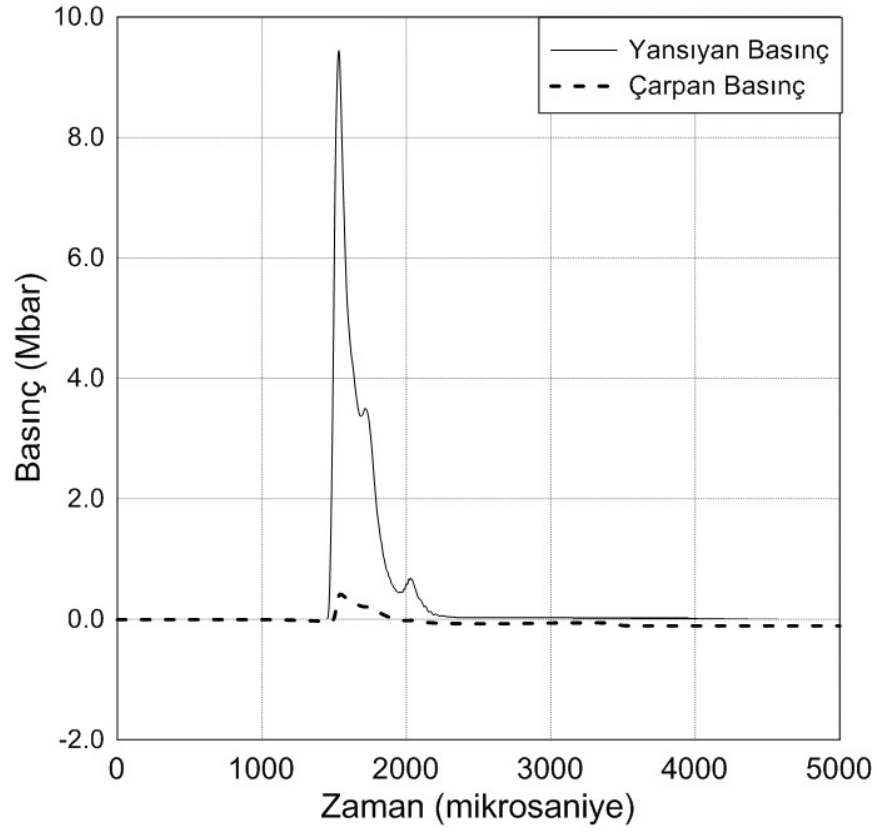
Havaya ait hal denklemi parametreleri, Bölüm 3.2.1.5.’de verilmiştir.

4.4. Zeminde Serbest Patlama Testi ve Sayısal Benzetim Modelinin Sonuçlarının Mukayesesi

Patlama testi ve sayısal benzetime ait çarpan basıncın zamana bağlı değişimini gösteren sonuçlar Şekil 4.7.'deki grafikte özetlenmiştir. Burada altı çizilmesi gereken önemli noktalardan biri testte basınç ölçümü yapılan duyargaların özdeş olmasına rağmen, az da olsa birbirlerinden farklı cevap vermeleridir. Bu durum duyargaların bağlandığı demir çubukların toprağa oturtulması esnasında oluşabilen küçük açı değişimlerine bağlanabilir. Bir diğer önemli husus ise testte ölçülen basıncın ve sayısal benzetimden elde edilen basıncın duyargalara ulaşma süreleri arasındaki farklılıktır. Bu gecikmenin ağ örgüsünün çözünürlüğünden kaynaklanma olasılığı yüksektir. Şekil 4.8.'de sayısal simülasyon sonucunda elde edilen yansıyan basınç ve çarpan basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikten görüleceği üzere, yansıyan basınç, çarpan basıncın yaklaşık 9 katı şiddetindedir.



Şekil 4.7. Testte ve sayısal benzetimde elde edilen “Çarpan basınç – zaman” eğrileri



Şekil 4.8. Sayısal benzetimden bulunan yansıyan ve çarpan basınçlar

4.5. Tam Ölçekli Araç Patlama Testi

Test ve sayısal benzetim sonuçlarını kıyaslamak amacıyla, zırhlı bir aracın altında mayın patlatılarak tam ölçekli bir patlama testi gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği Şekil 4.9.'da gösterildiği gibidir.

Şekil 4.10.'de verildiği üzere 6 kg ağırlığındaki TNT patlayıcısı toprağa gömülmüş çelik bir çanağın içerisine yerleştirilerek, aracın arka gövdesinin orta noktasının altına gelecek şekilde pozisyonlanmıştır.

Test düzeneğinde araç gövdesi, kapılar, tavan klapeleri, camlar, şaftlar, transmisyon kutusu ve süspansiyon gibi alt sistem komponentleri ve test fikstürü mevcuttur. Araç tekerlekleri temsilen iki temsili ayak üzerine oturtulmuştur.

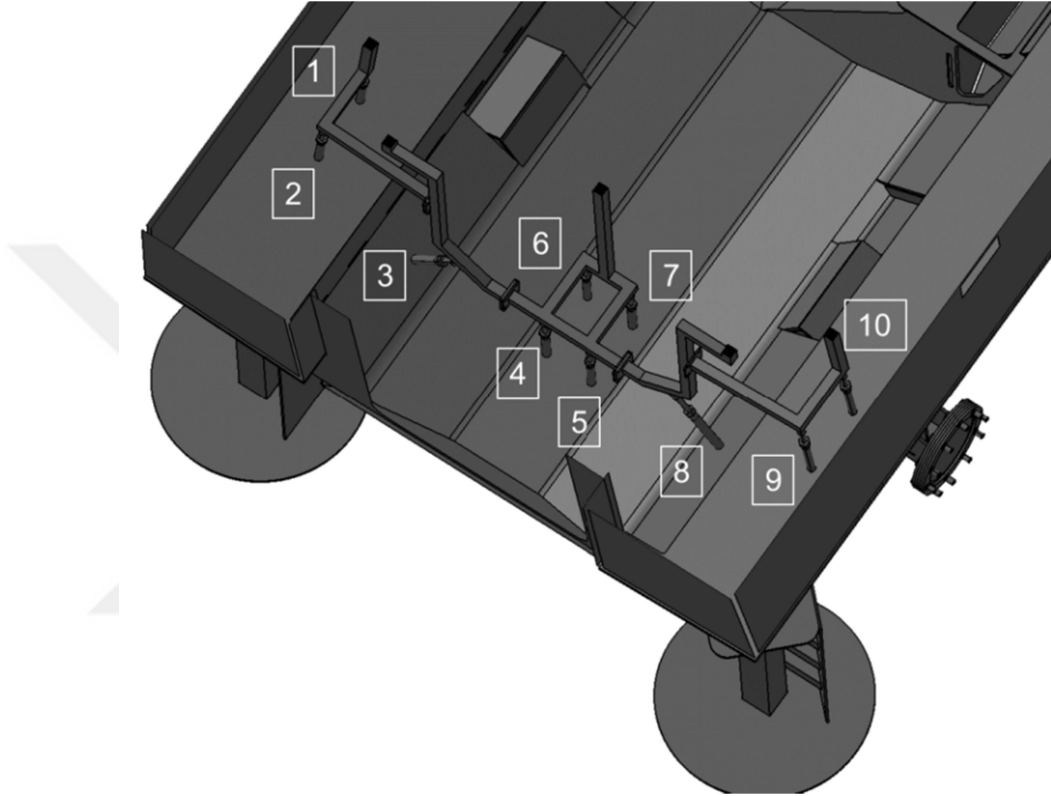


Şekil 4.9. Mayın patlaması için 1/1 ölçek hazırlanmış araç test düzeneği



Şekil 4.10. TNT'nin yerleştirilmesi

Test sırasında aracın belirli noktalarına yerleştirilmiş ezilebilir borular vasıtasıyla elastik deformasyon miktarları ölçülmüştür. Bu noktalar Şekil 4.11.'de gösterildiği üzere, aracın arka kapısına yakın bölgesindeki mürettebat ayak basma tabanına ve yan duvarlara yerleştirilmiştir. Borular kurşun malzemesinden imal edilmiş olup, kurşunun mekanik özelliklerinden ötürü hassas ölçüm alınabilmektedir.



Şekil 4.11. Deplasman borularının araç içerisindeki yerleşimi

4.6. Tam Ölçekli Patlama Testi Sayısal Benzetim Modeli

Sayısal benzetim modeli, hava ortamı, patlayıcı, çelik çanak ve zırhlı aracın sonlu elemanlar modelinden oluşmaktadır. Şekil 4.12.'de sayısal benzetim modelinin izometrik görünüşü verilmiştir. Hava ve patlayıcıda Euler ağ örgüsü tekniği kullanılırken, araç gövdesi ve çelik çanak Lagrange ağ örgüsü ile tanımlanmıştır. Gaz-yapı etkileşim birleştirme tekniğine ait parametreler Bölüm 4.3.1.'de verilmişti. Lagrange elemanlar arasındaki temas algoritması için “Penalty” formülasyonu kullanılmıştır. Transmisyon, akslar, süspansiyon ve direksiyon sistemi ve çelik çanak katı elemanlar ile modellenmiştir. Bu komponentlerin malzemesi adi çelik olarak

seçilirken, LS-DYNA içerisinde MAT_ELASTIC_KINEMATIC malzeme kartıyla tanımlanmıştır. Adi çeliğe ait malzeme parametreleri Tablo 4.2.'de verilmiştir. Cıvatalar kırılma modeli olan kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Kaynaklar rijit kiriş elemanlar olarak tanımlanmış, kopma ve kesme kuvvetleri tariflenmiştir. Araç gövdesi Belytscho-Tsay 5 kontrol noktalı, plaka elemanlar kullanılarak modellenmiş, gövde malzemesi yüksek birim şekil değiştirme hızlarında büyük deformasyonların oluşmasına olanak sağlayan Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak yüksek sertlikte zırh çeliği olarak tanımlanmıştır. Tablo 4.3.'de Nsiampa'nın çalışmasından [58] malzeme parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Adi çelik malzeme özellikleri

Yoğunluk (kg/m ³)	Elastik modül (GPa)	Poisson Oranı	Akma Mukavemeti (GPa)
7860	210	0,30	0,355

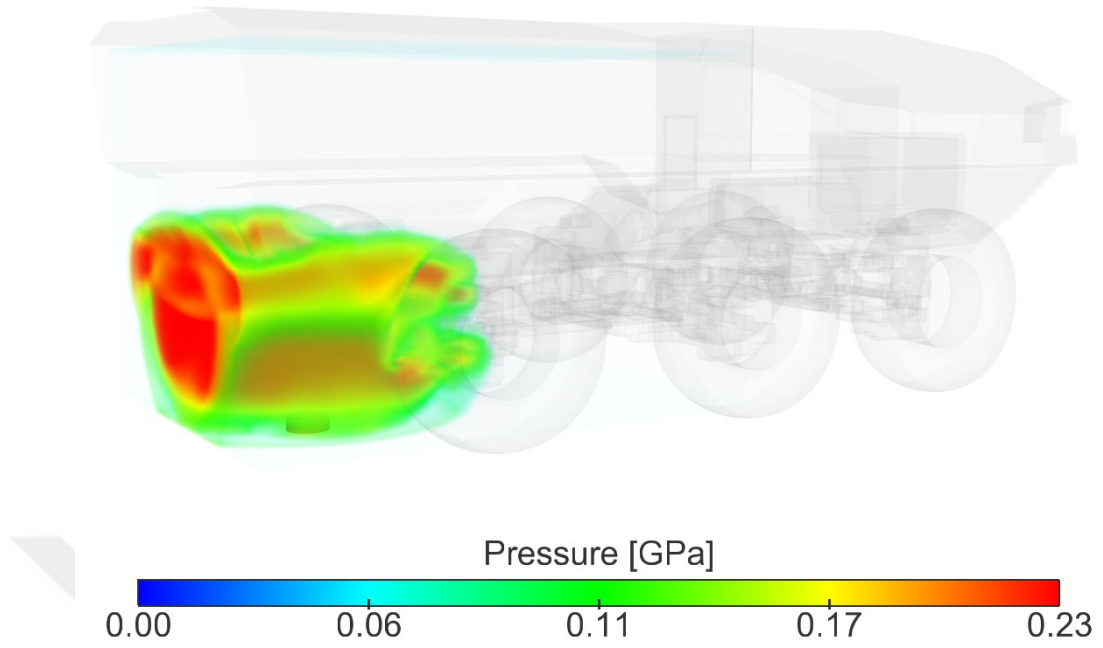
Tablo 4.3. Yüksek sertlikte zırh çeliğine ait Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri [58]

A (MPa)	B (MPa)	c	m	n
1299	2230	0,044474	0,961240	0,55853

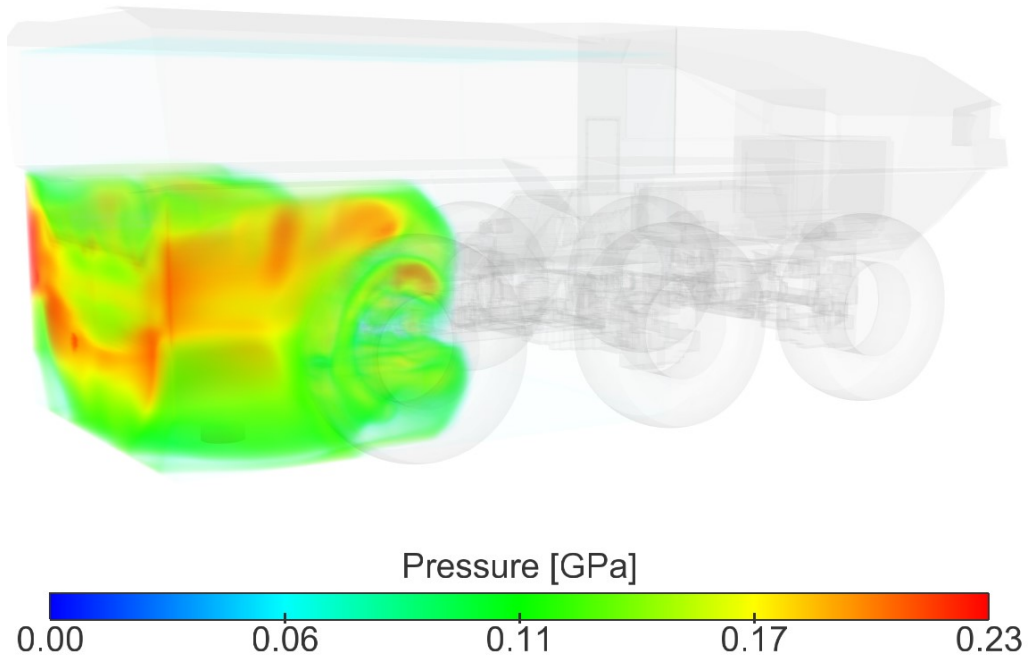
Sayısal benzetimde kullanılan sonlu elemanlar modeli detayları Tablo 4.4.'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. Tam ölçekli araç simülasyon modeli detayları

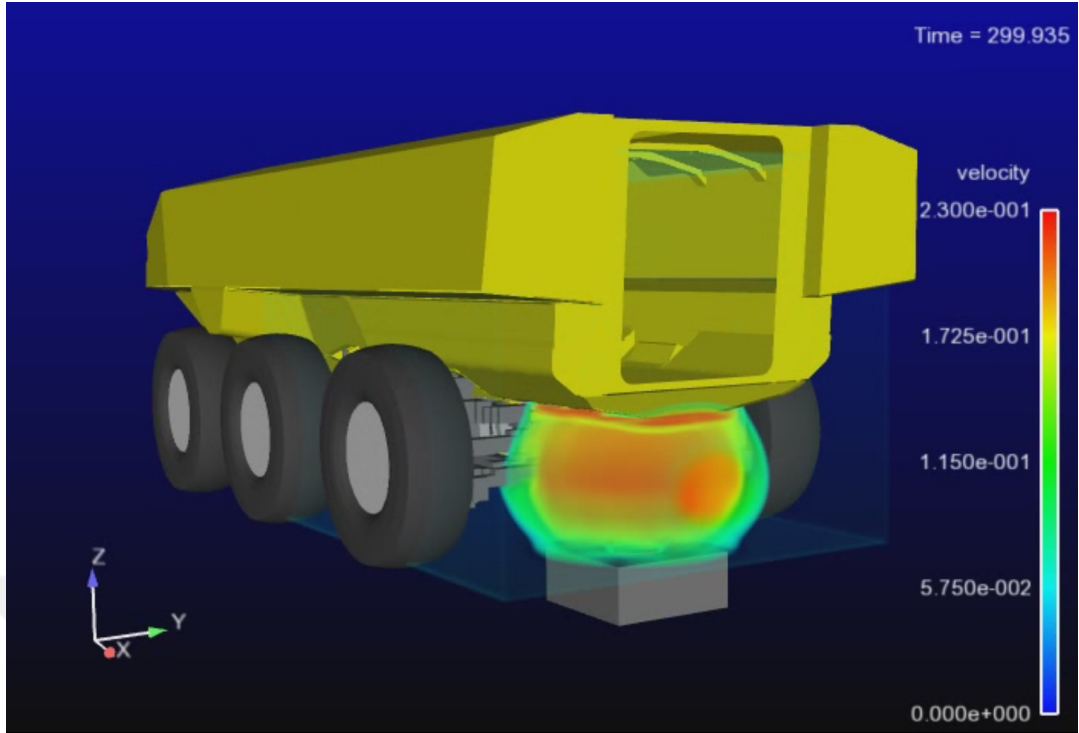
Patlayıcı içerisindeki katı elemanlar	1.518
Çelik çanaktaki katı elemanlar	14.608
Hava ortamına ait katı elemanlar	694.158
Araç gövdesindeki Kabul elemanlar	307.113
Alt sistemlerdeki katı elemanlar	53.606
Kiriş elemanlar	1.136
1-boyutlu rijit eleman	27.958
Modeldeki toplam eleman	1.100.017
Modeldeki toplam düğüm noktası	1.141.412



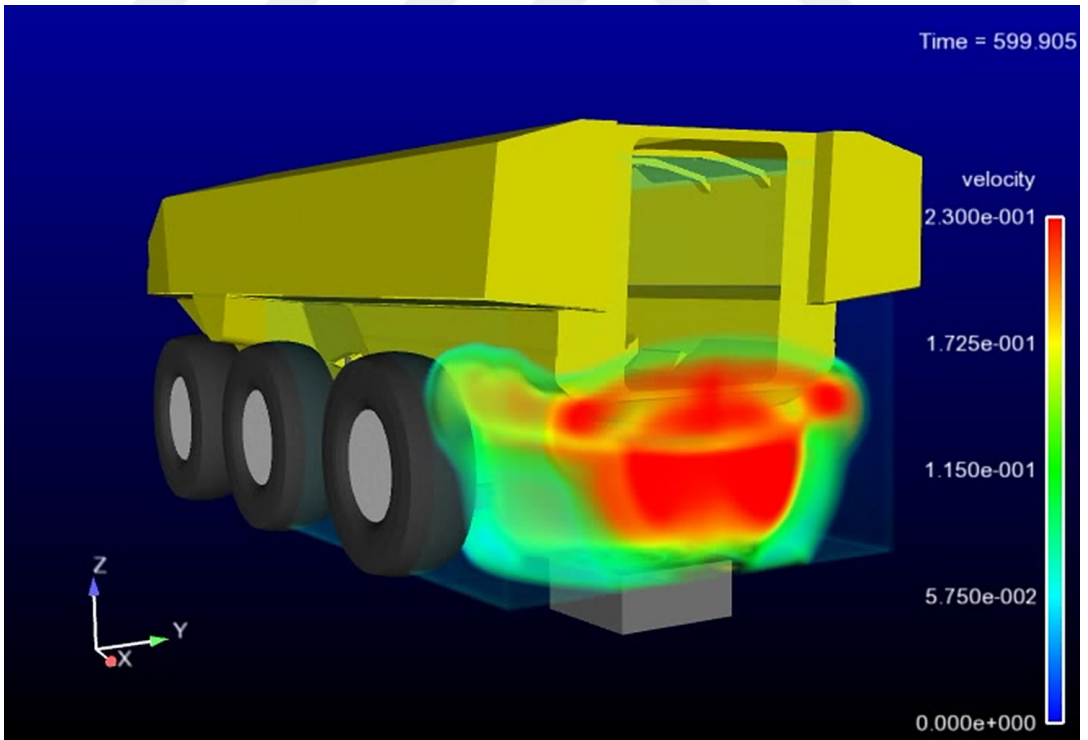
Şekil 4.14. Şok dalgalarının hava ortamında ilerlemesi ve 600 μs anındaki basınç değerleri



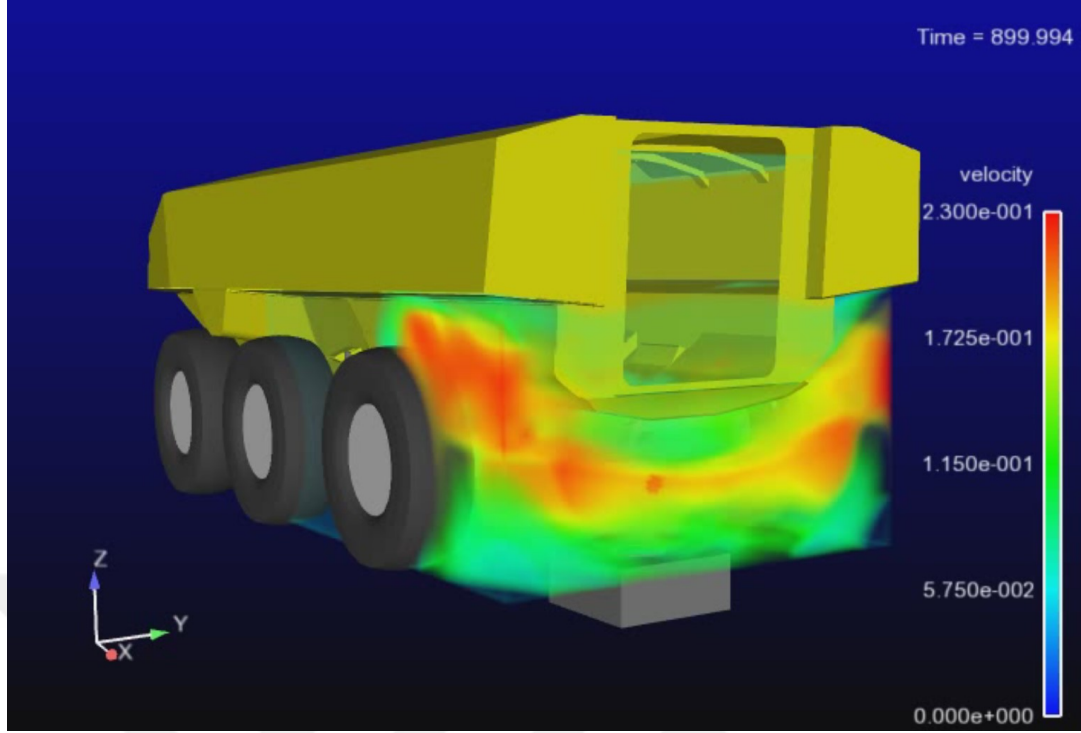
Şekil 4.15. Şok dalgalarının hava ortamında ilerlemesi ve 900 μs anındaki basınç değerleri



Şekil 4.16. Patlama dalgalarının 300 μ s anında araç gövdesindeki ilerleme hızı



Şekil 4.17. Patlama dalgalarının 600 μ s anında araç gövdesindeki ilerleme hızı



Şekil 4.18. Patlama dalgalarının 900 µs anında araç gövdesindeki ilerleme hızı

4.7. Sonuçların Mukayesesi

Tam ölçekli zırhlı aracın patlama testinde deplasman ölçerlerden elde edilen ölçüm sonuçları, Şekil 4.11.'de verilen numaralandırma baz alınarak 10 nokta için patlama simülasyonundan elde edilen deplasman sonuçları ile mukayese edilmiştir.

Tablo 4.5.'de bu kıyaslama ve sapma miktarları gösterilmiştir. Maksimum deplasmanın olduğu 7 nu.lı ölçüm noktasına göre bir ölçeklendirme yapılmış ve deplasman değerleri bu noktanın deplasman miktarı bir "1" olacak şekilde tekrar düzenlenmiştir.

Sayısal benzetim modelinde ortalama sapma değeri % 14,4 olup, maksimum sapma miktarı %21 bulunmuştur. Sonuç olarak, sayısal simülasyondan taban üzerinden hesaplanan deplasman sonuçları, saha testlerinden ölçülen değerler ile uyumlu çıkmıştır.

Tablo 4.5. Ölçeklendirilmiş deplasman ve ölçüm sapma değerleri

Deplasman çubukları (No#)	Test ölçümü	Sayısal simülasyon	Sapma (%)
1	0,35	0,28	19
2	0,28	0,26	8
3	0,43	0,52	20
4	0,74	0,89	21
5	0,74	0,89	21
6	0,67	0,72	6
7	1,00	0,85	15
8	0,46	0,52	14
9	0,24	0,24	0
10	0,33	0,26	20

4.8. Değerlendirme

Bu tez çalışması kapsamında, mayın patlamasına maruz kalmış zırhlı bir aracın yapısal davranışını incelemek için ALE tekniğini kullanarak sayısal benzetim modeli geliştirilmiştir. Bunun için ilk olarak zeminde serbest bir mayın patlatılarak, basınç değerleri kaydedilmiş ve sayısal benzetim modelindeki patlama parametrelerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Sayısal benzetim modelindeki basınç değeri, test ölçümlerinden % 10 yüksek çıkmıştır. Bu sapma miktarı çok sayıda sayısal benzetim varsayımlarından kaynaklanabilmektedir. Genellikle, yetersiz malzeme ve fiziksel özelliklere ait parametre değerleri kullanıldığında sayısal modellerin sonuç çıktılarında sapmalara neden olmaktadır. Bu çalışmada hava ortamı ve patlayıcı için kullanılan malzeme modelleri ve hal denklemleri, bu tarz patlama çalışmalarının çoğunda kullanılan ve doğrulanmış modellerdir. Bu sebeple etkilerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, çelik çanağın malzeme modelinin sonuçlara pek bir etkisi olmayıp, sadece çanağın dayanımını etkilemektedir. Diğer yandan, hava ortamı ve patlayıcının ağ yapısı çözünürlüğünün hesaplanan basınç değerlerine, şok dalgasının hedef yapıya ulaşmasına etkisi büyüktür. Yüksek çözünürlükteki ağ yapıları Euler ve Langrange yüzeyler arasındaki temas kuvvetlerini daha doğru hesaplarken, düşük çözünürlükte hesaplamalar daha

dikkatli yapılmalıdır. Yapılan hassasiyet analizlerinde 25 mm'lik eleman boyutunun optimum çözüm sağladığı görülmüştür.

Mayın patlamasına maruz kalan zırhlı bir aracın tam ölçekli fiziksel testi ve sayısal benzetim çalışması yapılmış, “Gaz-yapı etkileşim” parametreleri kalibre edilmiş sayısal benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ve test ölçümleriyle mukayese edilmiştir.

Özetlenecek olursa, kalibre edilmiş patlama parametreleriyle yapılan sayısal benzetim modelinden elde edilen sonuçlar oldukça tatminkâr olabilmektedir. Sayısal benzetim modeli test ölçümleriyle doğrulandıktan sonra, zırhlı araçların mayın geliştirme çalışmalarında önemli bir tasarım aracı olarak kullanılabilir. Bu şekilde araç tasarım çalışmalarının süresi birkaç yıldan aylar mertebesine indirgenirken, maliyet olarak da ciddi tasarruflar elde edilebilmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mayın patlamasına maruz kalan zırhlı bir aracın sayısal modelinin benzetim çalışması, iki safhaya ayrılarak yapıldı. İlk safhada, analizlerde kullanılacak metodu belirlemek için literatürde Boyd'un ve Tabatabaei'nin tek plaka mayın patlatma deneylerinde elde ettikleri basınç, deplasman ve ivme değerleri alınarak dört farklı patlama modeli sonuçları ile kıyaslandı. Bu karşılaştırma neticesinde patlatma testlerinde elde edilen değerlere en yakın sonucu veren patlama modelinin "ALE Yöntemi" olduğu tespit edildi ve zırhlı aracın mayın patlama simülasyonunda ALE yönteminin kullanılmasına karar kılındı.

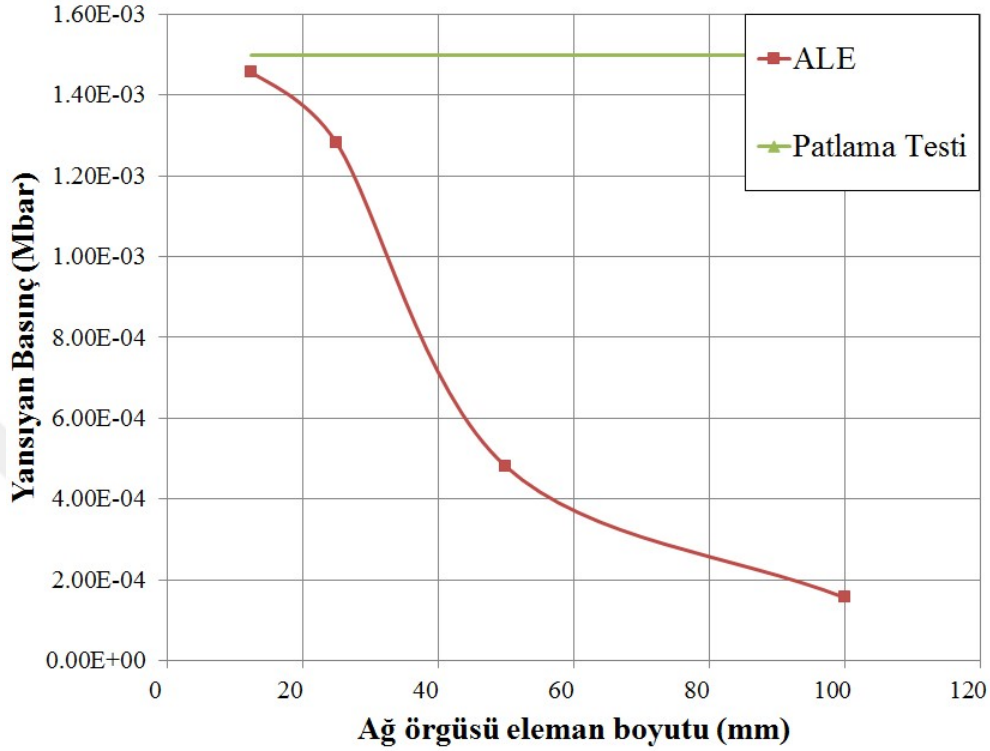
İkinci safhada, Şekil 5.1.'de gösterildiği üzere, ALE yönteminde kullanılan patlama parametrelerini kalibre etmek için, çelik çanak içerisine yerleştirilen 2 kg TNT patlayıcısı patlatılarak, 1,7 m uzaktaki sensörler kullanılarak basınç değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra, zamana bağlı olarak elde edilen basınç değerleri, simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanmış ve sayısal benzetim modelindeki maksimum basınç değeri, test ölçümlerinden %10 daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu sapma miktarı, çok sayıdaki sayısal benzetim varsayımlarından kaynaklanabilmektedir. Genellikle, yetersiz malzeme ve fiziksel özelliklere ait parametre değerleri kullanıldığında sayısal modellerin sonuç çıktılarında sapmalara neden olmaktadır. Bu çalışmada hava ortamı ve patlayıcı için kullanılan malzeme modelleri ve hal denklemleri, bu tarz patlama çalışmalarının çoğunda kullanılan ve doğrulanmış modellerdir. Benzer şekilde, çelik çanağın malzeme modeli tipinin sonuçlara etkisi olmayıp, sadece çanağın dayanımını etkilemektedir.



Şekil 5.1. Basınç doğrulama testi

Diğer yandan Şekil 5.2.'de gösterildiği üzere, hava ortamı ve patlayıcının ağ yapısı çözünürlüğünün hesaplanan basınç değerlerine, şok dalgasının hedef yapıya ulaşmasına etkisi büyüktür. Yüksek çözünürlükteki ağ yapıları Euler ve Langrange yüzeyler arasındaki temas kuvvetlerini daha doğru hesaplarken, düşük çözünürlükte hesaplamalarda basınç değerleri daha düşük çıkacağından, düşük çözünürlükteki ağ yapısı ile yapılan analiz sonuçlarında bu durum gözönünde bulundurulmalıdır. Tablo 3.4.'te hassasiyet analizi sonuçları incelendiğinde, 25 mm'lik eleman boyutunun toplam eleman sayısı ve çözüm süresi hesaba katıldığında optimum çözüm sağladığı görülmüştür. Bu sebeple, zırhlı araç modelinde 25 mm'lik eleman boyutu kullanılmasına karar verilmiş olup, tam ölçekli gerçek araç patlatma testinin

simülasyonunda, ALE parametreleri 25 mm’lik eleman boyutu gözetilerek kalibre edilmiştir.

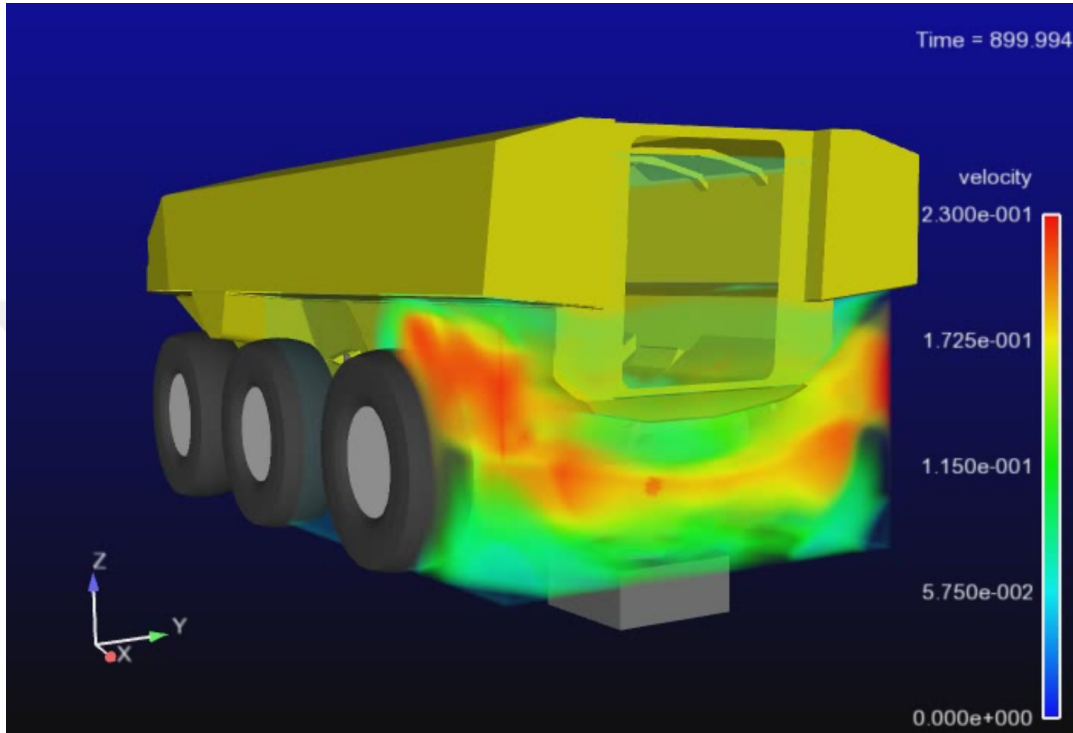


Şekil 5.2. Ağ yapısı hassasiyet analizi

Kalibre edilen parametreler ile gövde altında belli bir lokasyonda patlama analizi yapıldı. Şekil 5.3.’ten görüleceği üzere, şok dalgaları araç gövdesinin altından yan duvarlara doğru ilerlemekte ve tüm gövdeyi z-ekseninde yukarı yönde kaldırmaya çalışmaktadır. Eğer aracın konstrüksiyonunda, kiriş noktalarının dağılımı patlama yüklerinin ilerleyiş yönünde düzenlenmemiş ise, mukavemet açısından zayıf bölgede malzemedan ya da kaynak noktasında bir zafiyet görülecektir.

Değerlendirme neticesinde patlama bölgesine yakın, arka koltukların olduğu bölgedeki kritik görülen bir kesit üzerindeki toplam on nokta için deplasman sonuçları hesaplandı. Daha sonra aynı koşullarda tam ölçekli fiziksel araç patlatma testi gerçekleştirildi. Tablo 5.1.’de görüldüğü üzere, “Gaz-yapı etkileşim” parametreleri ile kalibre edilmiş simülasyon sonuçlarının patlatma testinde ölçülen deplasman değerlerine yakın sonuçlar verdiği ve en büyük sapmanın % 21 ile

dördüncü ve beşinci ölçüm noktalarında oluşturduğu görülmektedir. Dördüncü ve beşinci ölçüm koordinatları patlayıcının bulunduğu konumun izdüşümünün gövdeyle 90° açı yaptığı noktada olup, patlama modelinin hedef yüzeyin normaline gelen dik açılarda daha yüksek enerji oluşturduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 5.3. Araç patlama simülasyonu

Tablo 5.1. #7 nu.lı test ölçümüne göre normalize edilmiş deplasman değerleri ve sapmalar

Deplasman çubukları (No#)	Test ölçümü	Sayısal simülasyon	Sapma (%)
1	0,35	0,28	19
2	0,28	0,26	8
3	0,43	0,52	20
4	0,74	0,89	21
5	0,74	0,89	21
6	0,67	0,72	6
7	1,00	0,85	15
8	0,46	0,52	14
9	0,24	0,24	0
10	0,33	0,26	20

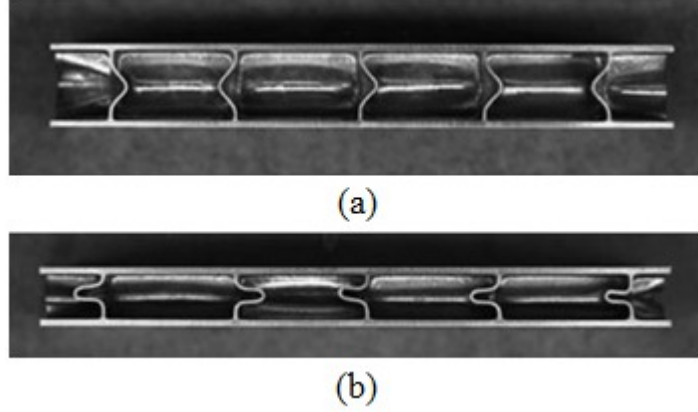
Farklı gövde geometrilerine sahip zırhlı araçların mayın patlamalarındaki dayanımlarının incelenmesi uzun zamandır araştırılmaktadır. V-şekilli gövde geometrisine sahip araçlar, gövde altında meydana gelen patlamalarda, gövde geometrisinin avantajı kullanarak üzerine gelen şok yükünün önemli bir kısmını V-şeklinin sağladığı avantaj ile araç dışına yönlendirmektedir. V-şekilli gövde yapısı yüksek koruma sağlarken, V-şekilli geometri, ekipmanların araç içi yerleşimlerinde zorluklar getirmektedir. Araç içi yerleşim zorluğu, bu tip araçların silüetlerinin yükselmesine sebebiyet vermektedir. Yüksek silüet, aracın vurulabilirliğini arttırdığı gibi mobilitesini de olumsuz anlamda etkilemektedir. Tam tersi olarak düşük silüetli, yere yakın araçların vurulabilirliği ve mobilitesi iyileşirken, mayın patlamalarındaki performansı kötüleşmektedir. Dünya genelinde bu iki tip aracın yükseklikleri karşılaştırıldığında, genelde yüksek silüet ve düşük silüete sahip araçlar arasındaki boy farkı 500 mm civarındadır.

Mayın patlamalarında gövde altında kullanılan malzemeler geçmişte sadece alaşımlı çeliklerden oluşurken, günümüzde çok çeşitli malzeme tipleri kullanılmaktadır. Fiber yapılı, yüksek çekme dayanımına sahip kompozit malzemelerin kullanıldığı sandviç yapılar ileri seviyede koruma sağlayabilmektedirler. Sertlik dereceleri farklı zırh çelikleri, oluşabilecek farklı tiplerdeki tehditlere karşı etkin koruma sağlayabilmektedirler.

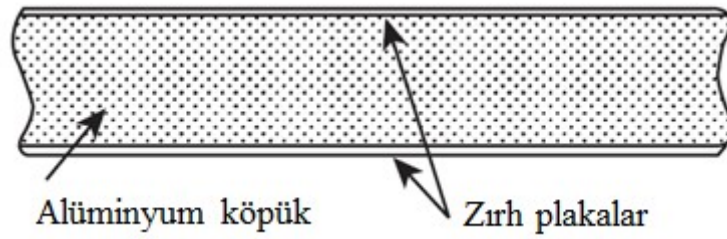
Sünek zırh çeliklerinin enerjiyi üzerine çekebilme yetenekleri yüksektir ve iç hacmin yeterli olduğu durumlarda kullanılabilirler, ayrıca bu çelikler parçacık tesirli patlayıcılara karşı da koruma sağlayabilmektedirler. Yüksek alaşımlı zırh çeliklerinin mayın patlamalarındaki dayanımları daha yüksek olmasına karşın, parçacık tesirli bombalar da kırılğan olmaları nedeniyle bu tehditlerin fazla olduğu asimetric koşullarda tercih edilmektedirler.

Şekil 5.1. ve 5.2.'de gösterildiği üzere alüminyum köpükler ve bal peteği yapıları enerji sönümleyici yapılar olarak mayın koruma çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir [59 - 68]. Çeşitli enerji sönümleyici malzeme tipleriyle oluşturulan modüler mayın kitleri, yüksek korumaya haizdirler ve sökölüp-takılabilir

olduklarından, operasyonel faaliyetler dışındaki aksiyonlarda aracın mobilitesini de arttırıcı bir unsur taşırlar.



Şekil 5.4. Kare şekilli bal peteği enerji sönümlleme sistemi: (a) Plastik birim şekil değıştirme = 0.16; (b) Plastik birim şekil değıştirme = 0.47



Şekil 5.5. Alüminyum köpük ile oluşturulmuş enerji sönümleyici sandviç yapı

Doğru yorumlanmış simülasyon sonuçları baz alınarak gerçekleştirilen mayına dayanıklı zırhlı araç tasarımı, patlama test ölçümleriyle doğrulandıktan sonra hızlı bir şekilde imalat programlarına girebilmektedir. Simülasyonun zırhlı araçların mayın geliştirme çalışmalarında önemli bir tasarım aracı olarak kullanılmasıyla, araç tasarım süreçleri birkaç yıldan aylar mertebesine indirgenebilirken, maliyet olarak da ciddi tasarruflar elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, mayın patlamalarına maruz kalan bir askeri aracın mayın koruma seviyesi, çoklu fiziksel patlama testlerine ihtiyaç duymadan, sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak, sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak kompozit, bal peteği veya metal köpük gibi farklı tipteki enerji sönümleyici malzemeler ile zırhlı araçların mayın koruma

seviyesinin geliştirilmesi incelenebilir. Bu şekilde yenilikçi malzemelerin patlama dayanımları çıkartılırken, aynı zamanda bu malzemelerin yüksek birim şekil değiştirme hızlarında patlama yükleri altındaki davranışları hakkında da bilgi sahibi olunur.



KAYNAKLAR

- [1] Conley, C.H., Hutchison, C.R.A., Baker, P., A.P. Ground, Operational Verification of the VIMF, in: 11th Annual Army Research Laboratory, United States Military Academy Technical Symposium, Monterey, CA, 2003.
- [2] Williams, K., Poon, K., A numerical analysis of the effect of surrogate anti-tank mine blasts on the M113, in, DTIC Document, 2000.
- [3] O'Daniel, L.A., Krauthammer, T., Koudela, K.L., Strait, L.H., An UNDEX response validation methodology, International Journal of Impact Engineering, 27, 919-937, 2002.
- [4] Sun, J., Vlahopoulos, N., Hu, K., Model update under uncertainty and error estimation in shock applications, in, SAE Technical Paper, 2005.
- [5] Gupta, A., Modeling and analysis of a blast deflector for a tactical vehicle due to detonation of a mine buried in dry vs. saturated sand, in: US Army Ground Vehicle Survivability Symposium, 2002.
- [6] Hilmes, R., Minenschutz bei militärischen Landfahrzeugen, Soldat und Technik, 42, 469-473, 1999.
- [7] Baker, W., Cox, P., Westine, P., Kulesz, J., Strehlow, R., Explosion hazards and evaluation, in, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, 1993.
- [8] Smith, P., Hetherington, J., Blast and ballistic loading of structures, Recherche, 67 02, 1994.
- [9] Brode H.L., Numerical solutions of spherical blast waves, Journal of Applied physics, 26, 766-775, 1955.
- [10] Henrych, J. Major, R., The dynamics of explosion and its use, Elsevier Amsterdam, 1979.
- [11] Smith, P.D., Hetherington, J.G., Blast and ballistic loading of structures, Antony Rowe Ltd, Eastbourne, Great Britain, 2003.

- [12] Baker, W.E., Explosives in air, University of Texas Press, 1973.
- [13] U. Army, U. Navy, U.A. Force, Structures to resist the effects of accidental explosions, TM5-1300, 1400, 1990.
- [14] Kingery, C.N., Bulmash, G., Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, in, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Aberdeen, MD, 1984.
- [15] N.F.E.C. U.S. Army Corps of Engineers, Air Force Civil Engineering Support Agency, Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects, in: Supersedes TM 5-855-1/NAVFAC P- 1080/AFJAM32/DSWA DAHSCWEMAN-97 August 1998., Department of the Army, US Army Corps of Engineers and Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, 2002.
- [16] Hyde, D. CONWEP: Conventional Weapons Effects Program, in, US Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS, USA, 1991.
- [17] Hopkinson, B., British ordnance board minutes 13565, The National Archives, Kew, UK, (1915).
- [18] Cranz, C., Lehrbuch der ballistik, Riol klassik, 1917.
- [19] Zukas, J., Introduction to hydrocodes, Elsevier, The Netherlands, 2004.
- [20] Cooper, P.W., Explosives engineering, Vch Pub, 1996.
- [21] Fiserova, D., Numerical analysis of buried mine explosions with emphasis on effect of soil properties on loading, 2006.
- [22] Hlady, S.L., Effect of soil parameters on landmine blast, in: 18th International symposium on the Military Aspects of Blast and Shock (Bad Reichenhall, Germany, 2004.
- [23] Elliott, C., Mays, G., Smith, P., The protection of buildings against terrorism and disorder, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 94, 287-297, 1992.
- [24] Ogorkiewicz, R.M., Impact of mines on armoured vehicle design, in: Survivability of light armoured vehicles course, Cranfield University, Shrivingam, UK, 2003.

- [25] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J., Blast loading and blast effects on structures—an overview, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7, 76-91, 2007.
- [26] Mays, G.C., Smith, P.D., Blast effects on buildings: Design of buildings to optimize resistance to blast loading, Thomas Telford, London, Great Britain, 2001.
- [27] Hallquist, J.O., LS-DYNA theory manual, in, Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [28] ANSYS, AUTODYN User Manual in, Canonsburg, PA, U.S., 2009.
- [29] Randers-Pehrson, G., Bannister, K.A., Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D, in: ARL-TR-1310, US Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 1997.
- [30] Zukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B., Curran, D.R., Impact dynamics, 1982.
- [31] NATO, Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles, in: AEP- 55 Volume 2 (1st ed.), Allied Engineering Publication, 2006.
- [32] Johnson, G.R., Cook, W.H., A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, in: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, the Netherlands, 1983.
- [33] Zakrisson, B., Wikman, B., Häggblad, H.A., Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air, *International Journal of Impact Engineering*, 38, 597-612, 2011.
- [34] Mullin, M.J., Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures, in: 8th International LS-DYNA Users Conference, 2004.
- [35] Liu, X.R., Tian, X.G., Lu, T.J., Liang, B., Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 84, 61-72, 2014.
- [36] Yuen, S.C.K. , Langdon, G.S., Nurick, G.N., Pickering, E.G., Balden, V.H., Response of V-shape plates to localised blast load: Experiments and numerical simulation, *International Journal of Impact Engineering*, 46, 97-109, 2012.

- [37] Micallef, K., Fallah, A.S., Pope, D.J., Louca, L.A., The dynamic performance of simply-supported rigid-plastic circular steel plates subjected to localised blast loading International Journal of Mechanical Sciences, 65, 177-191, 2012.
- [38] Williams, K., McClennan, S., D. R, V.Q. D Canada-Valcartier, V.B. British Columbia Univ, A Numerical Analysis of Mine Blast Effects on Simplified Target Geometries: Validation of Loading Models, 2003.
- [39] Westine, P.S., Development of computer program for floor plate response from a land mine explosions, in, MI, USA, 1985.
- [40] Dumas, S., Williams, K., Mine blast loading pre-processor for LS-DYNA, in, Defence R&D, Valcartier, QC, Canada, 2002.
- [41] Fairlie, G., Bergeron, D., Numerical simulation of mine blast loading on structures, in: Proceedings of the 17th Military Aspects of Blast Symposium, 2002.
- [42] Fairlie, G., Numerical simulation of combined blast and fragment loading on structures, in: 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, 2003.
- [43] Vulitsky, M.Z., Karni, Z., Ship Structures subject to high explosive detonation, in: 7th International LS-DYNA Users Conference, 2002.
- [44] Grujicic, M., Pandurangan, B., Haque, I., Cheeseman, B.A., Roy, W.N., Skaggs, R.R., Computational Analysis of mine blast on a commercial vehicle structure, Multidiscipline Modeling in Mat. and Str., 3, 431-460, 2007.
- [45] Larsen, M.B., Demex, N., Jorgensen, K.C., Landmine protection of armoured personnel carrier M113, in: 6th European LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 2007.
- [46] Erdik, A., Kilic, N., Guden, M., Tasdemirci, A., Numerical approach to design process of armored vehicles, in: Proceedings of the ASME: 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ASME, Istanbul, Turkey, 231-237, 2010.
- [47] Williams, W., Fillion-Gourdeau, F., Numerical simulation of light armoured vehicle occupant vulnerability to anti-vehicle mine blast, in: 7th International LS-DYNA Users Conference, 2002.

- [48] Gupta, A.D., Effect of hull bottom shapes on mine-blast loading from detonation of an explosive on a rigid surface, in, Aberdeen Proving Ground, MD, U.S.A., 2003.
- [49] Boyd, S.D., Acceleration of a plate subject to explosive blast loading-trial results, in, DTIC Document, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Australia, 2000.
- [50] Tabatabaei, Z.S., Volz, J.S., Baird, J., Gliha, B.P., Keener, D.I., Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 57, 70-80, 2013.
- [51] Zukas, J.A., W.P. Walters, Explosive effects and applications, Springer Verlag, New York, 2003.
- [52] Hallquist, J.O., LS-DYNA keyword user's manual, in, Livermore Software Technology Corporation, California, U.S.A., 2007.
- [53] Dobratz, B.M., Crawford, P.C., LLNL Explosive Handbook "Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants", in, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 94550, 1985.
- [54] Slavik, T.P., A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA, in: 7th European LS-DYNA Conference, Livermore Software Technology Corporation, Salzburg, Austria, 2009.
- [55] Vulitsky, M., Karni, Z., Ship structures subject to high explosive detonation, in: 7th International LS-DYNA Users Conference, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Michigan, USA, 2002.
- [56] N.A.T. O., Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles, in: AEP- 55 Volume 2 (1st ed.), Allied Engineering Publication, 2006.
- [57] NATO, Procedures for evaluating the protection levels of logistic and light armoured vehicles for KE and artillery threats, in: Standardization Agreement (STANAG 4569), 2004.
- [58] Nsiampa, N., Coghe, F., Dyckmans, G., Numerical investigation of the bodywork effect (K-effect), in: 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials Under Dynamic Loading, EDP Sciences, Brussels, Belgium, 1561-1569, 2009.

- [59] Li, S., Li, X., Wang, Z., Wu, G., Lu, G., Zhao, L., Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading, *Composite Structures*, 173, 242-254, 2017.
- [60] Wang, T., Qin, Q., Wang, M., Yu, W., Wang, J., Zhang, J., Wang, T. J., Blast response of geometrically asymmetric metal honeycomb sandwich plate: Experimental and theoretical investigations, *International Journal of Impact Engineering*, 105, 24-38, 2017.
- [61] Jin, X., Wang Z., Ning, J., Xiao, G., Liu, E., Shu, X., Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading, *Composites Part B: Engineering*, 106, 206-217, 2016.
- [62] Zhang, P., Cheng, Y., Liu, J., Li J., Zhang C., Hou, H., Wang, C., Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading, *Composites Part B: Engineering*, 105, 67-81, 2016.
- [63] Ousji, H., Belkassam, B., Louar, M. A., Reymen, B., Martino, J., Lecompte, D., Pyl, L., Vantomme, J., Air-blast response of sacrificial cladding using low density foams: Experimental and analytical approach, *International Journal of Mechanical Sciences*, 128, 459-474, 2017.
- [64] Theobald, M. D., Langdon, G. S., Nurick, G.N., Pillay, S., Heyns, A., Merrett, R.P., Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading, *Composite Structures*, 92(10), 2465-2475, 2010.
- [65] Antali A. A., Umer, R., Zhou, J., Cantwell, W.J., The energy-absorbing properties of composite tube-reinforced aluminum honeycomb, *Composite Structures*, 176, 630-639, 2017.
- [66] Ahmed, S., Galal, K., Effectiveness of FRP sandwich panels for blast resistance, *Composite Structures*, 163, 454-464, 2017.
- [67] Yahaya, M. A., Ruan, D., Lu, G., Dargusch, M. S., Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact – An experimental study, *International Journal of Impact Engineering*, 75, 100-109, 2015.
- [68] Li, X., Zhang, P., Wang, Z., Wu, G., Zhao, L., Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis, *Composite Structures*, 108, 1001-1008, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Atıl Erdik 1979 yılında Geyve’de doğdu. Liseyi Adapazarı Atatürk Süper Lisesi’nde tamamladıktan sonra, sırasıyla Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2003 yılında lisans ve İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2006 yılında yüksek lisans derecesiyle mezun oldu. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde doktora çalışmasına başladı. Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayii A.Ş.’de 2005 yılında Analiz Mühendisi olarak başladığı iş hayatında, 2009 yılında Balistik ve Patlama Analiz Birim Yöneticisi pozisyonuna getirildi. 2016 yılından itibaren aynı firmada Patlama, Balistik ve Çarpışma Güvenliği Grup Yöneticisi olarak görevine devam etmektedir. Yazar ayrıca 2016 yılında kurulan ve 2019 yılına kadar faaliyet gösterecek olan NATO’nun Bilim ve Teknoloji Organizasyonu (STO)’ndaki, HFM-270 “Framework for Modeling and Simulation of Human Lethality, Injury, and Impairment from Blast-Related Threats” isimli patlama yaralanmaları, biyomedikal araştırma, hesaplamalı modelleme konularında çalışmalar yapan mühendisler, askeri tabipler ve tıp doktorlarından oluşan uluslararası teknik grupta Türkiye’yi temsil etmektedir. Yazarın güncel araştırma konuları arasında darbe mekaniği, orta ve yüksek deformasyon hızlarında metal ve alaşımlarının davranışları, sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri, elastisite ve plastisite teorileri, balistik ve patlama dayanımı olan kompozitler, insan mankenlerinin araç çarpışmalarında ve mayın patlamalarında davranışlarının incelenmesi, enerji sönümleyici malzemeler, mayın patlama, önden çarpışma ve devrilme simülasyonları ile metallerin malzeme davranışlarının matematiksel modellenmesi vardır.