

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA ELEKTRONİĞİ VE YAZILIMI TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**FARKLI TİP ÇUKUR İMLA TASARIMINA SAHİP HARP BAŞLIĞI
MODELLEMESİ VE BENZETİMİ**

HAZIRLAYAN

KEREM CAN ALBAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA ELEKTRONİĞİ VE YAZILIMI TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**FARKLI TİP ÇUKUR İMLA TASARIMINA SAHİP HARP BAŞLIĞI
MODELLEMESİ VE BENZETİMİ**

HAZIRLAYAN

KEREM CAN ALBAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ MURAT ÜÇÜNCÜ

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Elektronik ve Yazılım Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Kerem Can ALBAYRAK tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 05/04/2023

Tez Adı: Farklı Tip Çukur İmla Tasarımına Sahip Harp Başlığı Modellemesi ve Benzetimi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof.Dr. Ö. Faruk ELALDI, Başkent Üniversitesi

.....

Dr.Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı : Kerem Can ALBAYRAK

Öğrencinin Numarası : 21820273

Anabilim Dalı : Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı

Programı : Savunma Elektronik ve Yazılım Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğretim Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ

Tez Başlığı : Farklı Tip Çukur İmla Tasarımına Sahip Harp Başlığı Modellemesi ve Benzetimi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 65 sayfalık kısmına ilişkin, 16 / 04 / 2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: / 04 / 2023

Dr. Öğretim Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ

TEŞEKKÜR

Çalışmamda bana yön gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, beni motive eden ve öğrencisi olmaktan gurur duyacağım tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ'ye,

Aldığım her kararda yanımda olan ve destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili annem, Sema ALBAYRAK ve babam, Namık Murat ALBAYRAK'a,

Zor günlerimde hep beni destekleyen, moral veren ve varlığıyla beni güçlendiren, bana sabreden ve bir ömür hep yanımda olmasından mesut olacağım sevgili nişanım Duygu KAPLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım...



ÖZET

Kerem Can ALBAYRAK

FARKLI TİP ÇUKUR İMLA TASARIMINA SAHİP HARP BAŞLIĞI MODELLEMESİ VE BENZETİMİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı

2023

Çukur imla, bir fünye yardımı ile içerisinde infilak eden patlayıcı malzemenin oluşturduğu enerjiyi tek bir noktaya yoğunlaştırıp metal malzemeden oluşan çukur imla astarına aktaran harp başlığı türüdür. Çukur imla günümüzde metalleri kesme ve şekil verme, zırh delme ve petrol bulma ile çıkarma gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

Çukur imla zırh delmek amacıyla kullanılan bir füzenin en önemli alt sistemlerinden biridir. Kimyasal reaksiyonlar ile jet oluşturarak füzelerin çarptığı hedefin zırhını delmeyi sağlayan bir teçhizattır. Patlayıcı malzemenin infilak reaksiyonunun başlamasıyla oluşan yüksek basınç ile çukur imla astarını jete dönüştürerek astara kinetik enerji kazandırmaktadır. 8.000 – 12.000 m/sn hız mertebelerine çıkan jet tank ve zırhlı araç zırhlarına çarptığında onları delme kabiliyetine sahip olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, zırh delme yeteneğine sahip füzelerin içerisinde yer alan çukur imla boyutlarını değiştirmeden sadece çukur imla astarı geometrilerini değiştirerek delme derinliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, literatürde yer alan çukur imlaların standart ölçülerine benzer bir dış kabuk içerisinde Konik, Trompet ve Elipsoit geometrilerde 2 boyutta 3 farklı çukur imla tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çukur imla tasarımında AUTODYN yazılım paketi kullanılmıştır. Tasarımı takiben çukur imlanın oluşturduğu jetin zırhı delme derinliğine yönelik çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Literatürde yer alan benzer çalışmalar aynı parametreler kullanılarak AUTODYN yazılım paketi vasıtasıyla benzetimler yapılarak bu tez çalışmasında kullanılan model doğrulanmıştır. Diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile bu tez çalışmasındaki sonuçlar mukayese edilmiştir.

İdeal delme derinliğinin tespit edilmesini sağlayan parametreleri belirlemek amacıyla bir seri benzetim çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen optimal parametreler ile 3 farklı modelin benzetimleri gerçekleştirilmiş, jet oluşumları ve zırh delme etkinlik değerleri incelenmiştir.

AUTODYN Programı çıktılarına göre 3 farklı modelin benzetimi sonucu jet oluşumları ve zırh delme derinliği değerleri incelenmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Trompet geometriye sahip çukur imla astarı tasarımı, HMX patlayıcı malzeme, 1,5 mm çukur imla kalınlığı ve çukur imla çapının 1,5 katı uzaklıkta yer alan hedefin olduğu parametrelerin seçildiği durumda yapılan benzetim çalışmasında Trompet çukur imla ile en yüksek delme derinliğinin elde edildiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Harp başlığı, çukur imla, jet oluşumu, zırh delme derinliği, benzetim

ABSTRACT

Kerem Can ALBAYRAK

WARHEAD MODELING AND SIMULATION WITH DIFFERENT TYPES OF SHAPED CHARGE DESIGN

Başkent University Institute Of Science

Department of Defense Technologies and Systems

2023

Hollow Shaped Charge is a type of warhead that concentrates the energy created by the explosive material inside with the help of a detonator and transfers it to a liner made of metal material. Today, shaped charge is also used in areas such as cutting and shaping metals, armor drilling, and oil discovery and extraction.

Shaped Charge is one of the most important subsystems of a missile used to penetrate armor. It is a device that allows piercing the armor of the target hit by the missiles by forming jets with chemical reactions. With the high pressure created by the initiation of the detonation reaction of the explosive material, the shaped charge liner is transformed into a jet, giving the liner a kinetic energy. The jet, which reaches speeds of 8,000 – 12,000 m/s, has the ability to penetrate tanks and armored vehicles when it hits their armor.

In this thesis, it is aimed to increase the penetration depth by only changing the shaped charge liner geometries without changing the size of the shaped charge in the armor-piercing missiles.

In this context, 3 different orthographic designs in 2 dimensions in Conical, Trumpet and Ellipsoid geometries were carried out in an outer shell similar to the standard dimensions of the shaped charge in the literature. The AUTODYN software package was used in the shaped charge design. Following the design, various simulation studies have been carried out for the armor penetration depth of the jet formed by the shaped charge.

The model used in this thesis study was verified with similar studies in the literature which carried out simulations with the AUTODYN software package using the same parameters. The results obtained in other studies were compared with the results of this thesis study.

A series of simulation studies were carried out to determine the parameters that allow the ideal penetration depth to be determined. With the optimal parameters obtained from these

studies, 3 different models were simulated, jet formations and armor penetration efficiency values were examined.

As a result of the simulation of 3 different models according to the AUTODYN Program outputs, jet formations and armor penetration depth values were examined and compared with each other. In the simulation study, it was observed that the highest penetration depth was obtained with the trumpet geometry liner design, in the case of the parameters with the trumpet geometry shaped liner design, HMX explosive material, 1.5 mm liner thickness, and the target located 1.5 times the shaped charge diameter.

KEYWORDS: Warhead, shaped charge, jet formation, armor penetration depth, simulation



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çukur İmla Konsepti	1
1.2 Çukur İmla.....	4
1.3 Çukur İmlanın Tarihçesi	9
1.4 Literatür Taraması	10
1.5 Mevcut Tez Çalışmasının Ana hatları	11
2. ÇUKUR İMLA ASTARININ (ÇİA) ÇÖKMESİNİN ANALİTİK GÖSTERİMİ... 13	
2.1 Çukur İmla Astarının Jete Dönmesi	13
2.2 Gurney Hızının Hesaplanması	14
2.3 Çökme Hızının Hesaplanması	16
2.4 Delme Derinliğinin Hesaplanması	19
2.5 Jet Kopma Zamanının Hesaplanması	22
2.6 Patlama Dalga Hızının Hesaplanması	23
3. SAYISAL YÖNTEMLER İLE BENZETİM YAPILMASI	25
3.1 Harp Başlığı Modellemesi için Kullanılan Yazılım Paketi	25
3.2 Benzetim Yönteminin Doğrulanması	25
4. İDEAL DELME ETKİNLİĞİNİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ	29
4.1 AUTODYN Programında Gerçekleştirilen Hassasiyet Çalışmaları	29
4.1.1 Sayısal ağ hassaslığını bulma çalışması	29
4.1.2 Erozyon kriteri hassasiyetini bulmaya yönelik çalışma	30
4.2 Delme Derinliğini Etkileyen Faktörler	31
4.2.1 Patlayıcı özellikleri	31
4.2.2 Uzak durma mesafesi	33
4.2.3 Çukur imla tasarımı	36
4.2.4 Çukur imla astarı malzemesi ve kalınlığı	37
4.2.5 Hedef zırhın özellikleri	41
4.3 İdeal Delme Derinliğini Bulmak İçin Yapılan Benzetim Parametre Çalışması	41

5. MODELLEME VE BENZETİM	44
5.1 Farklı Çukur İmle Tasarımlarının Modellenmesi	44
5.2 Çukur İmle Benzetimde Modellenecek Parçalar	47
5.2.1 Dış kabuk.....	47
5.2.2 Patlayıcı	48
5.2.3 Çukur imla astarı	49
5.2.4 Zırh	49
5.3 Modellenecek Çukur İmle Geometrileri	50
5.3.1 Konik çukur imla modeli	50
5.3.2 Trompet çukur imla modeli.....	52
5.3.3 Elipsoit çukur imla modeli.....	54
5.4 Benzetim Sonuçları	56
5.4.1 Jet ucu hızları.....	56
5.4.2 Jet uzunlukları.....	57
5.4.3 Delme derinliği.....	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR.....	62
EKLER	65
EK 1: Numerik Yöntem İçin Kullanılan AUTODYN Yazılım Paketinin İçerisinde	
Yer Alan Denklemler	

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1: Bir Patlama Dalgasında Yer Alan Süreksizlikler [28]	24
Tablo 2: 2 Boyutlu Modellemede kullanılan Parçanın Özellikleri [11]	26
Tablo 3: Literatürdeki Çalışmada Kullanılan Parçaların Özellikleri [3]	27
Tablo 4: Bazı Patlayıcıların Özellikleri [30]	32
Tablo 5: Farklı Uzak Durma Mesafelerine Göre Delme Derinliği Sonuçları Tablosu	35
Tablo 6: Çukur İmla Astarı Malzeme Özelliklerine Göre Kıyaslama [31]	37
Tablo 7: Bazı Materyallerin Akma Mukavemeti Değerleri [1]	38
Tablo 8: Zırh Malzemesi Özellikleri [28]	41
Tablo 9: Parametre Çalışması Değişkenler Matrisi	43
Tablo 10: Dış Kabuk Malzemesi Özellikleri [28]	48
Tablo 11: Patlayıcı Malzemesi Özellikleri [16] [32]	48
Tablo 12: ÇİA Malzemesi Özellikleri [33] [28]	49
Tablo 13: Zırh Malzemesi Özellikleri [32] [28]	50
Tablo 14: Konik Çukur İmla Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri Tablosu	51
Tablo 15: Trompet Çukur İmla Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri Tablosu	53
Tablo 16: Elipsoit Çukur İmla Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri Tablosu	55
Tablo 17: Benzetimlerde Ulaşılan Jet Uzunluğu ve Çap Değerleri	57
Tablo 18: Hedef Zırhta Oluşan Delme Derinliği Değerleri	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1: Konik çukur imlanın çökmesi [1].....	2
Şekil 2: Jet penetrasyonu [1]	3
Şekil 3: Konik çukur imlanın CD cinsinden delme derinliği - uzak durma mesafesi eğimi [1]	4
Şekil 4: Çukur İmlanın Farklı Konfigürasyonları ve Zırha Olan Mesafesine Göre Oluşan Delme Etkinlikleri [2]	5
Şekil 5: Çukur İmla Astarının Çöküşünün Gösterimi [1].....	6
Şekil 6: Çukur İmla Konfigürasyonun Gösterimi [1].....	7
Şekil 7: Farklı Çukur İmla Astarı Tasarımları [4]	8
Şekil 8: Çukur İmla Astarının Başlangıçta Yer Alan Geometrisinden Eksene Çökmesinin Gösterimi [16]	14
Şekil 9: Çukur imla astarının ivmelenme grafikleri [18].....	16
Şekil 10: Değişken Çökme Hızına Göre Astar Şeması [22].....	17
Şekil 11: Çöken konik geometrili astarın hız vektörleri [22]	17
Şekil 12: ÇİA'nın Akış Hızı V, ÇİA'nın Çökme Hızı V0, Çökme Noktasının Hızı V1 Arasındaki İlişkiler [1]	18
Şekil 13: Çukur İmla Geometrisi [11]	26
Şekil 14: Jet Ucu Hızları Karşılaştırma Grafiği	27
Şekil 15: Jet Ucu Hızları Karşılaştırma Grafiği	28
Şekil 16: Farklı Sayısal Ağ Boyutlarına Göre Jet Ucu Hızı - Zaman Grafiği	29
Şekil 17: Patlayıcı Malzemesine Göre Jet Ucu Hız Grafiği	32
Şekil 18: 0,5 CD (45,466 mm) Cinsinden Uzak Durma Mesafesi Uzunluğu İçin Tasarlanan Model Gösterimi.....	33
Şekil 19: CD Cinsinden Uzak Durma Mesafesi Uzaklıklarına Göre Zırha Çarpan Jetin Hızı Grafiği	34
Şekil 20: Delme Derinliği Uzunluğu - Delme Derinliği İçin Geçen Süre Grafiği	35
Şekil 21: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Jet Ucu Hızı - Zaman Grafiği	38
Şekil 22: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Oluşan Maksimum Jet Uzunluğu Karşılaştırması	39

Şekil 23: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Delme Derinliği Uzunlukları	40
Şekil 24: Örnek Çukur İmla Kesiti	45
Şekil 25: Geometriye Sayısal Ağ Atılması.....	46
Şekil 26: Çukur İmla, Zırh ve Vakum Ortamının AUTODYN'de Görünümü	46
Şekil 27: Konik Çukur İmla Geometrisi Ölçüleri.....	51
Şekil 28: Konik ÇİA'lı Çukur İmladan Oluşan Jetin Gösterimi	52
Şekil 29: Trompet Çukur İmla Geometrisi Ölçüleri.....	53
Şekil 30: Trompet ÇİA'lı Çukur İmladan Oluşan Jetin Gösterim.....	54
Şekil 31: Trompet Çukur İmla Geometrisi Ölçüleri.....	55
Şekil 32: Elipsoit ÇİA'lı Çukur İmladan Oluşan Jetin Gösterimi	56
Şekil 33: Konik, Trompet ve Elipsoit Çukur İmlanın Benzetim Çıktıları.....	57
Şekil 34: Benzetimlerde Ulaşılan Konik, Trompet ve Elipsoit Çukur İmlalardan Oluşan Jet Uzunluklarının Gösterimi.....	58
Şekil 35: Yukardan Aşağıya Sırasıyla Elipsoit, Trompet ve Konik Çukur İmlaların Zırhta Oluşturduğu Delme Derinliğinin Gösterimi.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_{\text{ÇAP}}$	Astar çapı
C	Patlayıcı kütlesi
C_0	Ses hızı
CD	Çukur imla çap uzunluğu
cm	Santimetre
D	Astar çökme hızı
dm_j/dm	Jet kütlelerinin çukur imla toplam külesinden değeri
E	Gurney enerji değeri
e	İç enerji değeri
EOS	Hal denklemleri
ERA	Patlayıcılı reaktif zırh
g	Gram
GPa	Gigapascal
$H_{\text{ÇAP}}$	Harp başlığı çapı
HB	Harp başlığı
HE	Patlayıcı
$HEAT$	Yüksek patlayıcılı anti tank
kg	Kilogram
M	Metal (kabuk) kütlesi
mm	Milimetre
P	Basınç
P_{CJ}	Patlayıcının chapman-jouget sabiti
P/CD	Delme derinliği/ çukur imla çap uzunluğu
$P_{\text{ÇAP}}$	Patlayıcı çapı
R_T	Hedef zırhın delinmeye karşı direnci
s	Malzeme sabiti
S/CD	Uzak durma mesafesi / çukur imla çap uzunluğu
t_0	Başlangıç zamanı
t	Geçen süre
U	Delme hızı
U_{det}	Patlama dalgasının hızı
V_j	Jet hızı
V_s	Slug hızı
V_o	Astarın çökme hızı
V_o'	Çökme hızının x mesafesine göre türevi
X	Koordinat sistemindeki uzaklık değeri
Y_j	Çukur imla astarı malzemesinin akma dayanımı
β	Çöküş açısı
β^+	Sabit koşullarda çökme açısı
γ	Geliş açısı
μ	Dış kabuk kütlelerinin patlayıcı külesine oranı
σ	Jet ilerleme açısı
μs	Milisaniye
τ	Chou et al.'in Zaman Sabiti
ρ_L	Çukur imla astarının yoğunluğu
ρ_j	Jet yoğunluğu
ρ_0	Patlayıcının ilk Yoğunluğu
ρ_t	Hedefteki zırhın yoğunluğu

Γ

Gruneisen gamma sabiti

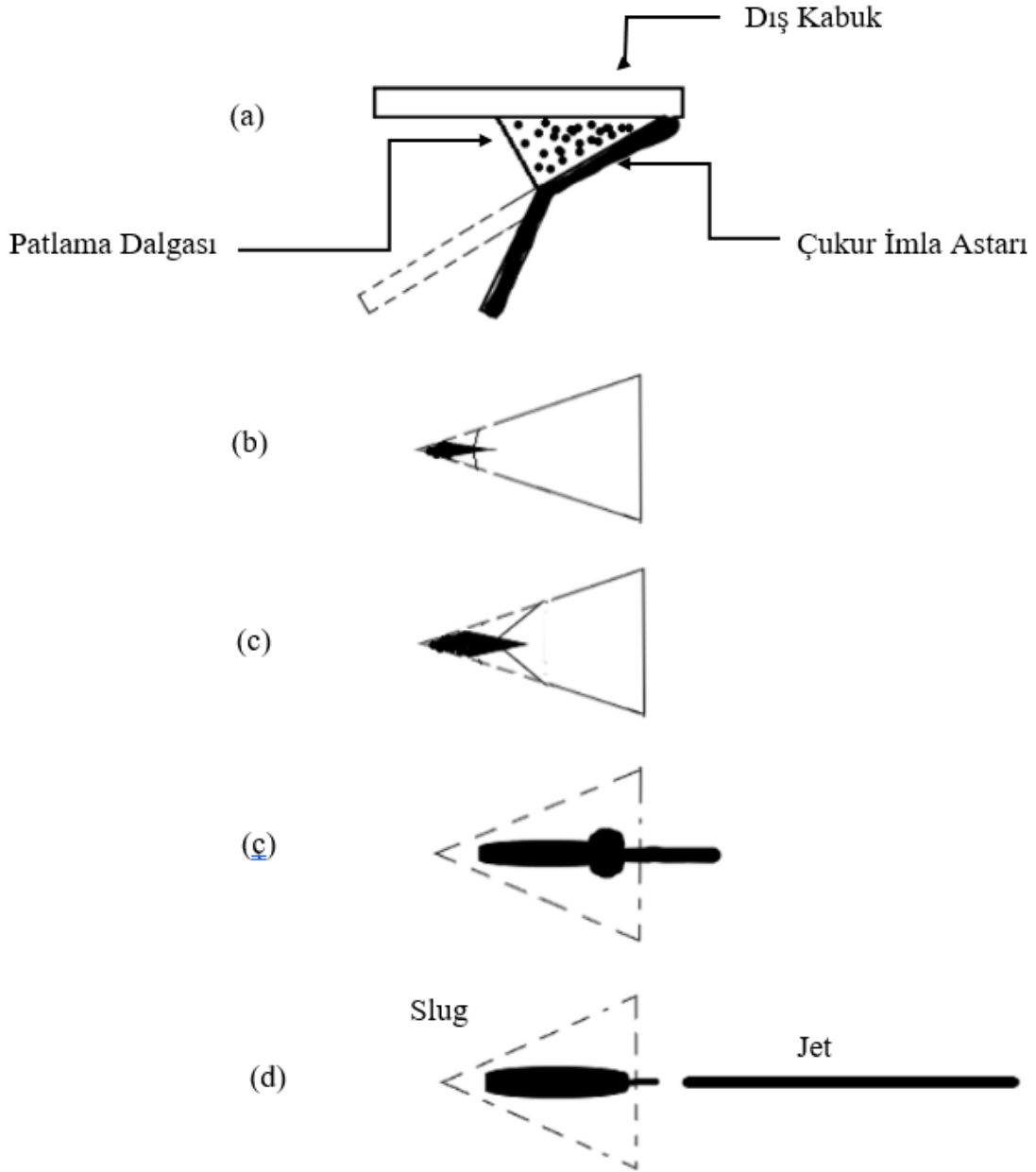


1.GİRİŞ

1.1 Çukur İmla Konsepti

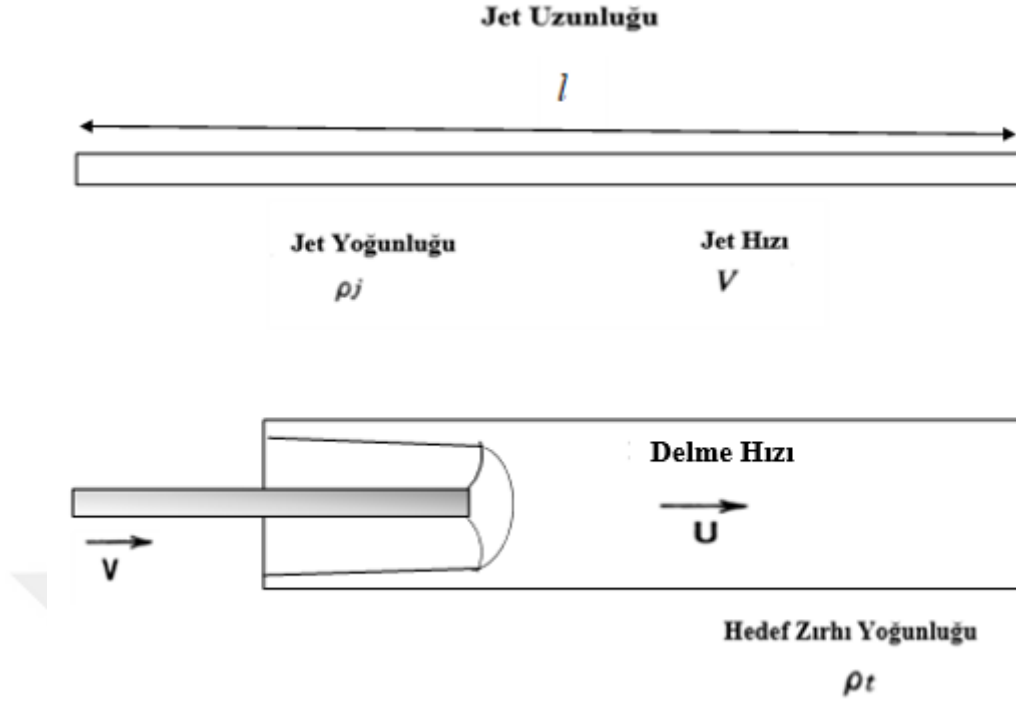
Çukur İmla, infilak enerjisini çok dar bir istikamete hareket ettirecek biçimde imal edilmiş bir patlayıcıdır. Bu patlayıcılar, harp başlıklarında kullanıldığı gibi füzeleri harekete geçirmek, zırh delmek, metalleri kesmek veya şekle sokmak için de kullanılmaktadır. Patlama zincirinin aktif olması için bir tapaya ve çukur imla astarı yerine içi boş bir hacme sahip silindirik geometri şeklinde üretilmiş patlayıcı “boşluklu çukur imla” olarak tanımlanmaktadır. Yarımküre, koni veya benzeri her türlü geometrik şekle uyabilen içi boş bir hacim, bu geometrilerin içinde oluşturulan gazların patlamasıyla oluşan enerjiyi bir noktaya odaklayabilmektedir. Patlayıcı basıncının bir noktaya odaklanması, yoğun bir kuvvet yaratmaktadır. Yoğunlaştırılmış bu kuvvet metal bir plakaya yönlendirildiğinde, içerisinde daha fazla patlayıcı bulunan ve herhangi bir boşluğa sahip olmayan bir patlayıcı silindirinden daha fazla delme derinliği yaratma yeteneğine sahiptir. Burada belirtilen daha fazla delme derinliğinin ortaya çıkması Munroe etkisi olarak da tanımlanmaktadır [1].

Bir önceki paragrafta sözü edilen boşluk ince bir metal, cam, seramik veya herhangi bir katı malzemeden oluşan çukur imla astarı ile doldurulduğunda patlayıcının yaratacağı basınç ve çukur imla astarının malzeme özelliklerine göre değişiklik gösteren bir jet oluşturmaktadır [1]. Konik geometriye sahip bir çukur imla astarının çökmesine ilişkin süreç Şekil 1’de gösterilmektedir. Burada, patlamanın başlaması ile küre şeklinde bir basınç dalgası başlangıç noktasından dışa doğru yayılmaktadır. Yüksek basınç dalgasının yüksek bir hızla hareket ettiği, patlama dalgasının astara çarptıktan sonra, astar malzemesini hızlı bir şekilde çökerttiği belirtilmektedir [1]. Şekil 1’de gösterildiği üzere konik çukur imla astarı malzemesinin merkezinde oluşan bu çökme hareketi, çukur imla astarı malzemesinin jet formuna dönüşüp yaklaşık 10 km/s hızında hareket etmesini sağlamak ve hız gradyanının oluşumu ile jet kırılarak "tırtıklı" partiküller bloğuna dönüşene kadar esnemektedir [1].



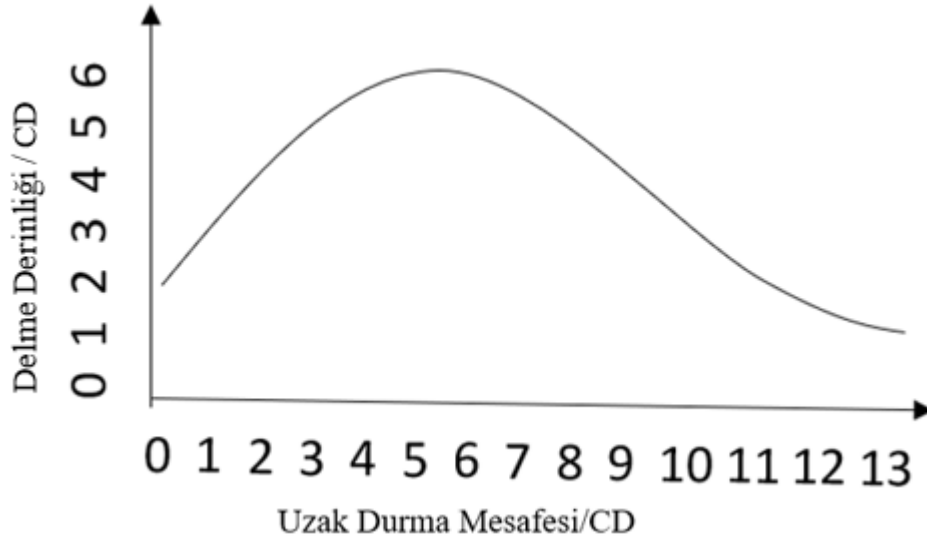
Şekil 1: Konik çukur imlanın çökmesi [1]

Oluşan jet penetrasyonu Şekil-2’de gösterilmektedir. Burada, hızla hareket eden jet, metal bir yüzeye çarptığında bir delme derinliğinin oluştuğu görülmektedir. Metal plakada 100-200 GPa’lık azami basınç değerlerine ulaşıldığı görülürken bu değerler denge durumunda ortalama 10-20 GPa’ya düşer. Bu sebeple, jet-zırh etkileşimi nedeniyle metal plakada üretilen delme derinliğinin, termal bir etkiden oluşmadığı, oluşan yüksek basınçlar sebebiyle zırhın yatay ekseninde yer değiştirmesinden kaynaklandığı belirtilmektedir [1].



Şekil 2: Jet penetrasyonu [1]

Çukur imla astar yüzeyinin malzemesi oluşan patlama basıncı ile sıkıştırılmaktadır. Delme derinliğinin oluşumuna yönelik eşlik eden herhangi bir itme kuvvetinin olmadığı bilinmektedir. Şekil 3'te gösterildiği üzere hedefteki metal yüzey ve çukur imla astarının arasındaki mesafe ile orantılı olarak delme derinliğinin değiştiği ifade edilmektedir [1]. Bu mesafe uzak durma mesafesi (S.O: Standoff Distance) olarak tanımlanmaktadır [1]. Uzak durma mesafesinin çukur imla astarı çapı (CD: Charge Diameter) cinsinden değişimine göre zırhta oluşan delme derinliği P, Şekil 3 ile gösterilmektedir.



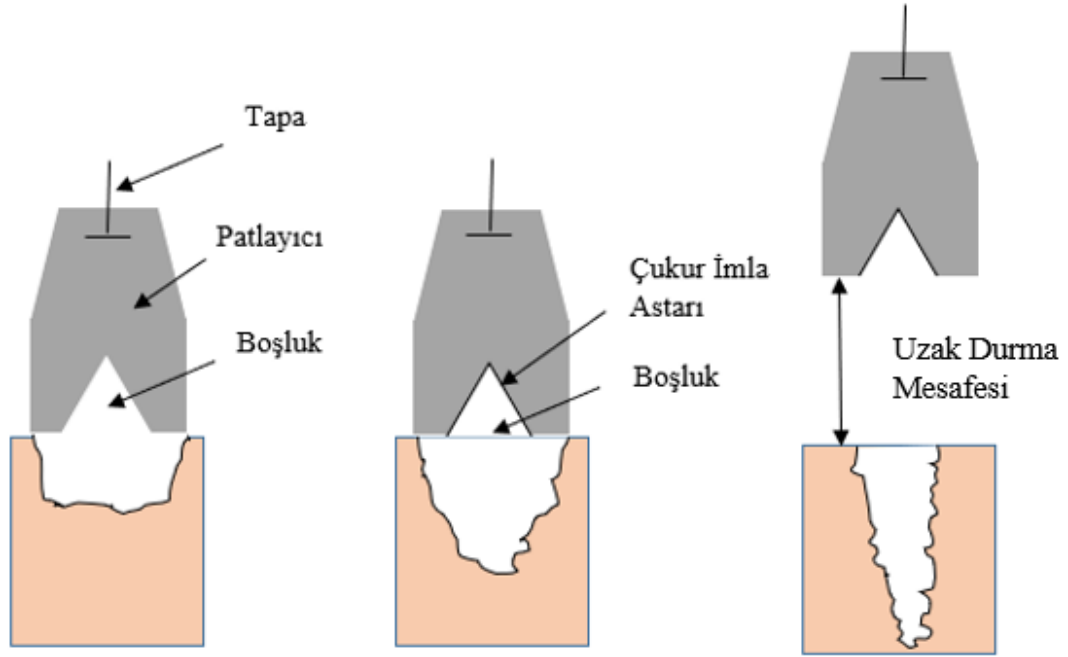
Şekil 3: Konik çukur imlanın CD cinsinden delme derinliği - uzak durma mesafesi eğimi [1]

1.2 Çukur İmla

Çukur imla astarı, patlama enerjisiyle hız kazanan ve hedefteki zırh malzemesine kinetik enerji ile çarpan ağır metal moleküllerinin bir kaynağıdır. Çukur imla astarının hızlandırılmış moleküllerinin kütlesi kinetik enerjiyi artırır. Doğrusal ilerleyen çukur imla astarının oluşturacağı delme derinliğinde maksimum verimliliği elde etmek için, çukur imla astarı için seçilen malzemenin özellikleri önemlidir. En önemli parametreler olarak çukur imla astarı malzemesi ve geometrik tasarım öne çıkmaktadır [2]. Bohanek, Dobrilović ve Škrlec'in [2] gerçekleştirdiği bakır ve alüminyum malzemeli çukur imla patlaması test sonuçları incelendiğinde çukur imla astarının alüminyum malzeme seçildiği testlerde zırh üzerinde daha yüksek delme derinliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

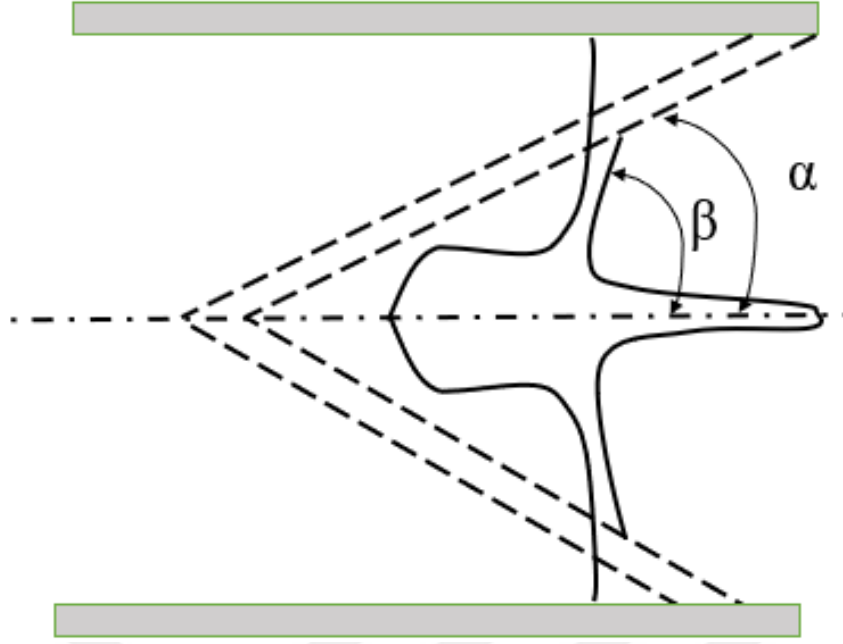
Bir çelik levhaya temas ettiği bir konumda patlatılan boşluklu çukur imlanın delme etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Oluşan kraterdeki derinlik, konik çukur boşluğunun çapının yaklaşık yarısı olarak ifade edilmektedir [2]. Delme derinliğinin, yüksek basınçlı ve yüksek hızlı gaz erozyonuyla oluştuğu bilinmektedir [1]. Konik boşluğun içine ince bir metal veya cam malzemeden oluşan imla astarı koyulduğunda Şekil 4'te gösterildiği gibi çok daha derin bir delme derinliğinin oluştuğu gözlemlenmektedir [1].

Ayrıca, çukur imla hedef zırha uzak bir uzak durma mesafesine yerleştirildiğinde, delme etkisinin daha da arttığı, çukur imla astarının patlama etkisiyle yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalması ile oluşan jetin, delme derinliğini arttırdığı belirlenmiştir [1].



Şekil 4: Çukur İmlanın Farklı Konfigürasyonları ve Zırha Olan Mesafesine Göre Oluşan Delme Etkinlikleri [2]

Tapanın aktive olup patlama zinciri başlatıldığında, patlayıcı malzemenin patlama hızına göre hareket eden bir basınç dalgası oluşturduğu, bahsedilen dalganın konik çukur imla astarına ulaştığında, çukur imla astarının iç basınca maruz kaldığı ve çökmeye başladığı ifade edilmektedir [1]. Çukur İmla Astarının çökmesi (Şekil 5'te) nedeniyle çukur imla astarı konisinin üst (apeks) bölgesinin çöktüğü ve simetri eksenine doğru yönelmeye başladığı, ortaya çıkan oluşumun jet olarak tanımlandığı rapor edilmektedir [1].



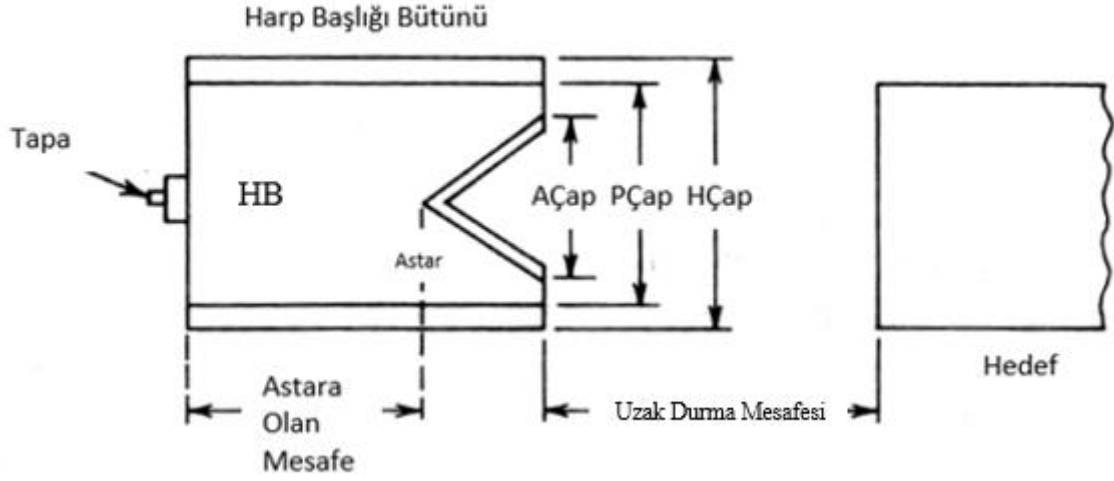
Şekil 5: Çukur İmla Astarının Çöküşünün Gösterimi [1]

Konik şekildeki çukur imla astarı, patlamanın başlamasıyla birlikte tepe noktasından taban noktasına doğru kademeli olarak daralmakta, jet oluştuktan sonra arkada kalan, jetin arkasında biriken malzemelerden oluşan ve hızı yavaş olan astarın geniş hacminin bir kısmı ise slug olarak ifade edilen yapıya dönüşmektedir [1].

Çukur imla astarının tepe noktasından tabanına kadar kalınlığı değişken olduğunda sabit astar kalınlığına sahip çukur imlalara göre daha hızlı jet elde edilebildiği gibi; astar kalınlığının astar tabanından tepe noktasına kadar azaltılması durumunda iyi bir hız dağılımı ile jette iyi bir esneme elde edilmektedir. Ayrıca, çukur imla astarının tepe noktasının başlangıcında kalınlığının az olması, oluşacak jetin daha hızlı olmasına sebep olan enerjinin daha fazla aktarılmasını sağlamaktadır [3].

Çukur imlalarda, jet oluşumunda ortaya çıkan hız ve delme derinliğinin değerleri büyük öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, jet formu ve hedef yüzeyinde oluşacak delme derinliği sayısal benzetim yöntemi AUTODYN yazılım paketi kullanılarak hesaplanmıştır.

Çukur imla astarının performansı koni açısına, astar malzemesine, patlayıcının tipine ve patlatma noktası ile hedef arasındaki uzaklığa bağlıdır (Şekil 6). Bu parametrelere ek olarak, eş merkezlilik, patlayıcının bütün kesitlerde homojen bir yoğunlukta dağılımı da dikkate alınmalıdır.



Şekil 6: Çukur İmla Konfigürasyonunun Gösterimi [1]

Şekil 6’da Çukur İmla (Harp Başlığı) içerisinde yer alan AÇap çukur imla astarı çapını, PÇap patlayıcının çapını ve HÇap da çukur imlanın çapını temsil etmektedir.

Genel olarak 5 farklı geometride çukur imla astarı bulunur (Şekil 7). Bu geometriler aşağıda sıralanmıştır.

- Koni
- Tepesi yuvarlak koni
- Yarıküre
- Elipsoit
- Trompet



(7a) Konik Şekilli Çukur İmla Astarı



(7b) Ucu Yuvarlatılmış Konik Şekilli Çukur İmla Astarı



(7c) Yarı Küre Şekilli Çukur İmla Astarı



(7ç) Elipsoit Şekilli Çukur İmla Astarı



(7d) Trompet Şekilli Çukur İmla Astarı

Şekil 7: Farklı Çukur İmla Astarı Tasarımları [4]

1.3 Çukur İmmanın Tarihçesi

Madencilik mühendisi Franz von Baader'ın (1792), patlayıcının içinde boş çukur bir alan oluşturarak patlamanın enerjisini küçük bir alana odaklayabileceğini iddia etmiştir [5].

1888 yılında Munroe'nun, çelik plakalarla temas halinde olan patlayıcı bloklarını patlattığını, patlayıcının U, S ve N harfleri şeklinde olduğu ve patlama ile bu harflerin çelik plakada olduğu gözlemlenmiştir. Munroe ayrıca, bir patlayıcı bloğunda, patlama başlangıç noktasına göre en uzak kısımda bir boşluk olduğunda, hedefte üretilen kraterin delme derinliği veya derinliğinin arttığını gözlemlediği, başka bir deyişle, daha küçük bir patlayıcı kütlesi kullanılarak çelik bir blokta daha derin bir boşluk oluşturulabileceğini rapor etmiştir. Delme derinliğindeki artışın, patlayıcı gazların boşluk ile bir noktaya odaklanmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [6].

Boşluklu immanın hedeften ideal bir mesafeye kaydırılması, özellikle astarlı bir çukur imla için uzak durma mesafesinin uzatılması ile hedefte oluşan delme derinliği derinliğinin, daha da artırılabilmesi gösterilmiştir [1].

Bununla birlikte, boşluklu çukur imla hakkı etkisinin test edilmesinin ilk olarak 1883'te von Foerster [7] tarafından yüksek patlayıcılar ile denendiği belirtilmektedir. Mohaupt 1941 yılında 2,36 inç çapında yüksek patlayıcı anti tank mermilerini ve 75 mm ile 105 mm kalınlığında makineli tüfek mermilerini üretmiştir. Daha sonra bu ürünleri makineli tüfek bombası, roket motoru ile uçacak ve omuzdan atılacak şekilde modifiye etmiştir. Modifiye edilen bu ürünlerin roketatar (bazooka) ismini aldığı belirtilmektedir [8].

Lenz 1965'te bir patlayıcıda çöküntüler veya şekiller kesilirse ve bir çelik plaka üzerine yüzü aşağı gelecek şekilde yerleştirilirse, patlamanın plaka üzerinde aynı şekillerin oluşmasına neden olacağını gözlemlemiştir [9].

1950'lerden 1960'lı yıllara kadar yüksek hızlı fotoğraflama ve flaş radyografi gibi deneysel tekniklerin kullanılarak çukur imla tasarımında geliştirmelerin devam ettiği, bir diğer iyileştirmenin ise daha enerjik bir patlayıcı olan TNT (Trinitrotoluen) ile başladığı. Daha sonra, TNT'den Comp B'ye (RDX ve TNT karışımı patlayıcı), Octol'e (HMX ve TNT karışımı patlayıcı) ve ardından preslenmiş patlayıcılara, özellikle LX-14'e (yüzde 95,5'i HMX olan PBX) geçildiği; ayrıca, alternatif tapan patlatma modelleri harp başlığı tasarımında

iyileştirmeler sağlandığı, bilgisayar yazılımlarının gelişmesi ile çukur imladan çıkan jetin oluşumunun modellenmeye başlandığı belirtilmektedir [1].

1.4 Literatür Taraması

Harp Başlığı modellenmesi üzerine analitik ve sayısal olarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. İlerleyen bölümlerde söz konusu çalışmalara ait bu tezde kullanılan bilgiler yer almaktadır.

Birkhoff, MacDougal, Pugh and Taylor'un [10] çalışmasında ince metalden oluşan çukur imla astarlı harp başlığının delme derinliğini, formüller ve testler ile desteklenmiş deneysel verilerini matematiksel teori olarak sunmuştur. Zırhta 2 inch uzunluğu kadar delme gerçekleştikten sonra alüminyum malzemeden oluşan örnekteki jet hızının diğer metal malzemeden oluşan örneklerdeki jet hızından daha hızlı olduğunu deney sonuçlarında göstermiştir. İlave olarak, uzak durma mesafesi uzunluklarına göre jet hızlarının değiştiği gösterilmektedir.

Bolstad ve Mandell [11], MESA-2D ve MESA-3D sayısal kodlarını kullanarak jet oluşumu ve delme derinliğine ilişkin sayısal benzetimler üzerinde çalışmıştır. Kullandıkları 3.3 inch genişliğine çapa sahip çukur imla tasarımında, Octol patlayıcı kullanarak benzetim ortamında delme derinliğini hesaplamışlardır. Steinberg-Cochran-Guinan (SCG), Johnson-Cook ve mukavemet modeli olmadan çukur imla astarını ayrı ayrı modelleyip benzetim gerçekleştirdiklerinde gerçeğe en yakın değerin SCG modelinde çıktığını değerlendirmişlerdir.

Hedef ile harp başlığının patlatıldığı nokta arasındaki uzak durma mesafesi üzerine çalışan Clippi [12], düşük kalibreli mermilerde çukur imlanın çap değerinin 4-5 katı kadar uzunlukta uzak durma mesafesi seçmiştir. AUTODYN yazılım paketi kullanılarak yapılan benzetim çalışması ile delinen zırh miktarı üzerinde ideal uzak durma mesafesinin çok önemli etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada seçilen ideal uzak durma mesafesi uzunluğunun artması ile delme derinliğinin azaldığı gösterilmektedir.

Kulsirikasem ve arkadaşları [13], bakır, tantal ve tungsten malzemeden çukur imla astarları için bir dizi sayısal analizi, AUTODYN yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, her farklı malzemedeki çukur imla astarları için oluşturduğu uzak durma mesafesi-delme derinliği eğrisini ortaya koymuştur. Bu çalışmada,

bakır ve tungsten malzeme ile tasarlanan çukur imla geometrileri ile 3.63 CD ve 3.89 CD uzak durma mesafesi uzaklıklarında en yüksek delme derinliğine ulaşıldığı belirtilmektedir.

Vigil, sunduğu analitik ve deneysel verilerde [14], alüminyum hedeflere karşı uzak durma mesafesinin bir fonksiyonu olarak çukur imlanın jet penetrasyonu, jet ucu hızları ve jetin çarpışma açılarını ortaya koymaktadır.

Harp başlığı bir yığın çelik hedef bloğuna ateşlendiğinde ve jet oluştuğunda, jet içerisinde delik derinliğini arttırmaya katkıda bulunan son partikülün hızı, kesme hızı olarak adlandırılır. Hancock çalışmasında [15] kesme hızını 3 boyutlu benzetimler yaparak farklı uzak durma mesafelerine göre delme etkinliklerini karşılaştırmıştır. Çukur imla çapı cinsinden 5 ve 8 CD uzunluğunda uzak durma mesafeleri için delme derinliğinin en iyi değerlerine ulaşılmıştır.

Liu, Zhai ve Su [4], 5 farklı çukur imla astarı tasarımını LS-DYNA yazılım paketi ile modellemiştir. Patlayıcı için TNT malzemesini kullanmalarının yanı sıra her harp başlığı için sabit 20 cm uzak durma mesafesi uzunluğu seçmişlerdir. Çalışmalarında 5 adet farklı geometriye sahip harp başlığının delme derinliği çıktılarını tartışmışlardır. Ucu yuvarlatılmış konik çukur imla astarlı tasarımda en fazla delme derinliğine ulaşıldığı paylaşılmıştır.

Tamer çalışmasında [16] petrol kuyusu delicileri için analizler yürütmüştür. Bu analizlerde en iyi delme derinliğini bulmak için farklı çukur imla malzemeleri, farklı patlayıcı malzemeleri ve farklı çukur imla geometrileri kullanarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çukur imla astarının kalınlığı 1,5 mm, tepe açısı 56° derece iken ve RDX patlayıcı kullanarak beton hedef üzerinde 100 cm delme derinliğine ulaşıldığı belirtilmiştir.

1.5 Mevcut Tez Çalışmasının Ana hatları

Bu tez çalışmasında; literatürde yer alan standart harp başlığı ölçülerine benzer bir dış kabuk içerisinde Konik, Trompet ve Elipsoit geometrilerde 2 boyutta 3 farklı çukur imla tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çukur imla tasarımında AUTODYN yazılım paketi kullanılmıştır. Tasarımı takiben çukur imlanın oluşturduğu jetin zırhlı delme derinliğine yönelik çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Tez çalışmasında harp başlığına yönelik bir önceki alt maddede özetlenen çalışmalar incelenmiş ve modellenen farklı tasarımlar ile elde edilen sonuçlar literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Söz konusu karşılaştırmalar yapılırken bu tez çalışmasında benzetimlerin koşturulması için kullanılan AUTODYN yazılım paketi ile literatürde yer alan ve başka yazılım paketleri kullanılarak yapılan diğer benzetimler de incelenmiştir. Aynı şekilde bu tez çalışmasında harp başlığı modellerinde kullanılan geometriler ve malzeme özellikleri ile ulaşılan delme derinliğinin çıktıları literatürde yer alan başka geometri ve malzeme özelliklerine sahip harp başlığı modellerinin delme derinliği sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 1’de harp başlığının konseptinden, tarihçesinden ve jet oluşumuna yönelik giriş bilgileri verilmiştir.

Bölüm 2’de çukur imlanın astarının jete dönüşmesi ve jeti etkileyen faktörler detaylı şekilde anlatılmıştır.

Bölüm 3’te çukur imla için kullanılan AUTODYN yazılım paketinin işleyişi ve doğrulanmasına yönelik bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 4’te delme derinliğini belirleyen parametreler paylaşılmış, bu parametrelerin değişimi ile elde edilen en iyi delme derinliğini oluşturan sonuçlar, analiz çıktıları ile birlikte verilmiştir.

Bölüm 5’te Konik, Trompet ve Elipsoit çukur imla parçaların modellendiği malzemeler ve malzeme özellikleri hakkında bilgi paylaşılmıştır. Parçalara ait geometriler bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca, bu bölümde 3 farklı çukur imla benzetiminin çıktıları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 6’da bu tez çalışmasında yürütülen analizler özetlenmiş, çalışmanın sonucu, değerlendirmeler ve potansiyel çalışma konuları ortaya konmuştur.

2. ÇUKUR İMLA ASTARININ (ÇİA) ÇÖKMESİNİN ANALİTİK GÖSTERİMİ

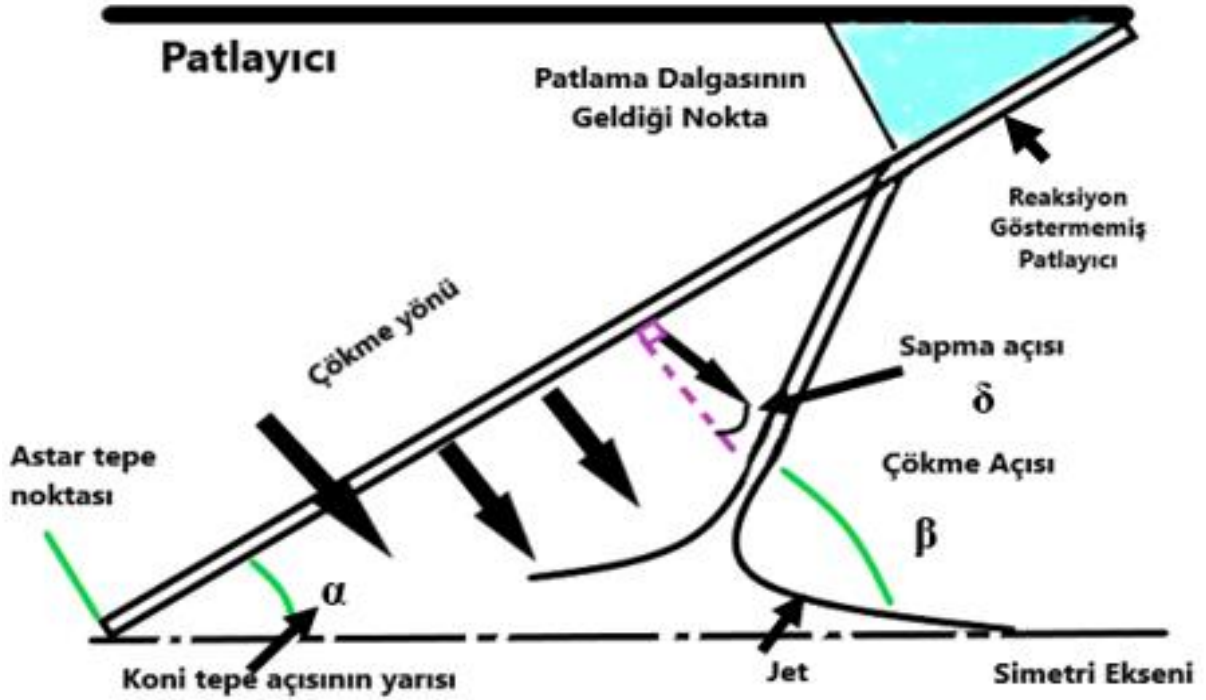
2.1 Çukur İmla Astarının Jete Dönmesi

Bu bölüm analitik formüller kullanılarak yapılan hesaplamalardan oluşmaktadır. Kullanılan formüller analitik analizlerin oluşmasında önemli rol oynamaktadır.

Çukur imla astarının çökmesi ve jet oluşumunun ideal tanımı; patlayıcı zincirinin başlaması, astarın çöküşü, çöküşün bittiği yerde jet oluşumu ve jetin uzaması olarak ayrı ayrı süreçler olarak ifade edilebilir [17]. Söz konusu süreçler takip eden paragraflarda özetlenmektedir. Süreçlerin her biri şematik olarak Şekil 8’de gösterilmektedir:

1. Patlama zincirinin başlaması ile çukur imla patlatma sürecinin ilk bölümü başlamaktadır. Çukur imlanın en ucunda yer alan patlayıcı malzeme tapa tarafından aktif edilerek patlayıcı reaksiyonu başlar ve U hızı ile patlama yayılır. Patlama dalgası çukur imla astarı yüzeyinden U hızından büyük olmak şartı ile γ geliş açısına göre U_D hızı ile geçer.
2. Patlama dalgası ilerlemeye devam ederken çukur imla astarıyla etkileşime girer. İkinci bölümde, oluşan yüksek basınç V_0 hızı ve δ açısıyla astarın dış yüzeyinden başlayarak astarı simetri eksenine doğru çökertir.
3. Astarın dış yüzeyi çökmeye devam ederken simetri eksenine geldiği noktada jet alanı oluşmaktadır. Bu alan, merkezi çökme noktası olarak ifade edilmektedir. Çökme noktası, jet formasyonu boyunca değişen bir V_c hızında eksen boyunca hareket eder. Daralan astar yüzeyi, simetri eksenine β açısı olacak şekilde jet oluşum bölgesine girer. Astar kütlesi iki parçaya ayrılır ve her biri çökme noktasından uzağa doğru eksen boyunca ters yönde hareket eder. Oluşan iki kütleden, V_j hızla ileriye doğru hareket eden kütle “jet” olarak, geriye doğru V_s hızı ile hareket eden kütle ise “slug” olarak tanımlanmaktadır. Belirli tasarımlarda sabit bir koordinat sistemine göre slug negatif hıza da sahip olabilmektedir.
4. Değişen çökme hızları ve açıları nedeniyle, tüm çökme işlemi boyunca hem jet hızı V_j hem de slug V_s hızı değişmektedir. Jet üzerinde pozitif hız gradyanı jetin esnemesine neden olurken, negatif hız gradyanı geride kütle birikimine yol açmaktadır. Kütle birikimi genellikle jetlerin arka ucunda meydana gelirken, jetin geri kalanı yüksek oranda esner. Jet, orijinal uzunluğunun birkaç katına kadar esneyebilmekte ve sonunda küçük parçacıklara

bölünmektedir. Jet'in parçalanması, jet parçacıklarının uçuş ekseninde sapmasına neden olabileceği gibi zırh yüzeyinde oluşacak toplam delme derinliğinin azalmasına da neden olabilmektedir.



Şekil 8: Çukur İmla Astarının Başlangıçta Yer Alan Geometrisinden Eksene Çökmesinin Gösterimi [16]

2.2 Gurney Hızının Hesaplanması

Bir patlayıcının temas ettiği bir metalde yarattığı patlama dalgası hızı Gurney modeli olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu yaklaşım momentum ve enerjinin korunumuna dayanmaktadır [1].

Silindirik patlayıcılar için patlama dalgası hızı denklem (1.10) ile verilmektedir;

$$D = \sqrt{2E} \left[\frac{M}{C} + \frac{1}{3} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.10)$$

Burada D patlama dalgası hızı M patlayıcıyı muhafaza eden dış kabuğun kütlesi, C patlayıcı kütlesi ve E Gurney sabitidir [1].

Walters ve arkadaşları [1] tarafından yapılan bir diğer çalışmada düz plakalar ve patlayıcı ürünlere ilişkin Gurney benzeri diğer bazı formüllerin geliştirildiği paylaşılmıştır. Bu formüllerden biri Chou ve Fliz [18]'e ait olup denklem (1.11) ile verilmektedir.

$$V_0 = \sqrt{2E} \left[\frac{3}{(4\mu^2 + 5\mu + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Burada $\mu = M/C$ ve V_0 çökme hızını tanımlamaktadır.

Chou ve arkadaşları [19] tarafından yapılan çalışmada patlayıcı-çukur imla astarı etkileşimi için astarın anlık ivme ile hızlanacağı varsayılmaktadır. İlk olarak Eichelberger [20] tarafından, çukur imla astarının ivmelenmesinin bir süre boyunca sabit olduğu öne sürülmüştür. Böylece hızın, son hızına ulaşana veya simetri eksenine çökene kadar kısa bir süre boyunca doğrusal olarak arttığı değerlendirilmektedir. Bu durumda oluşan ivme denklem (1.12) ile ifade edilmektedir.

$$a = C \frac{P_{CJ}}{\rho_L \varepsilon} \quad (1.12)$$

Burada, P_{CJ} patlayıcının malzemenin Chapman Jouget basınç sabitini, ρ_L ve ε çukur imla astarının sırasıyla yoğunluğu ve kalınlığını, C ise ampirik sabitini ifade etmektedir.

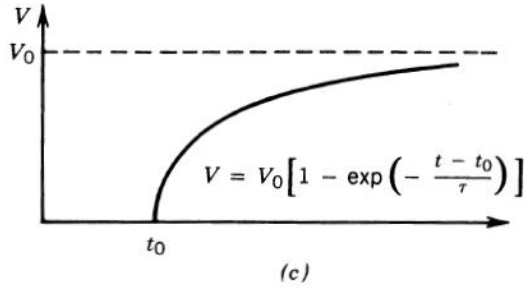
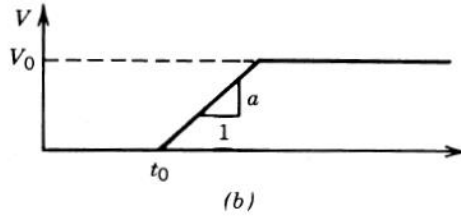
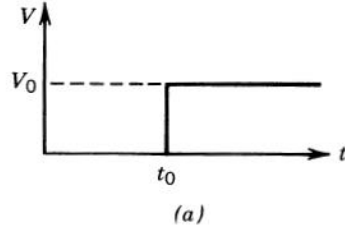
Randers-Pehrson [21] tarafından daha genel bir son hız formülü denklem (1.13) ile verilmektedir.

$$V(t) = V_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{t-t_0}{\tau} \right) \right], \quad (1.13)$$

Denklem (1.13)'te verilen zaman sabitini bulmak için denklem (1.14)'ün kullanılması önerilmektedir [19].

$$\tau = C_1 \frac{M V_0}{P_{CJ}} + C_2, \quad (1.14)$$

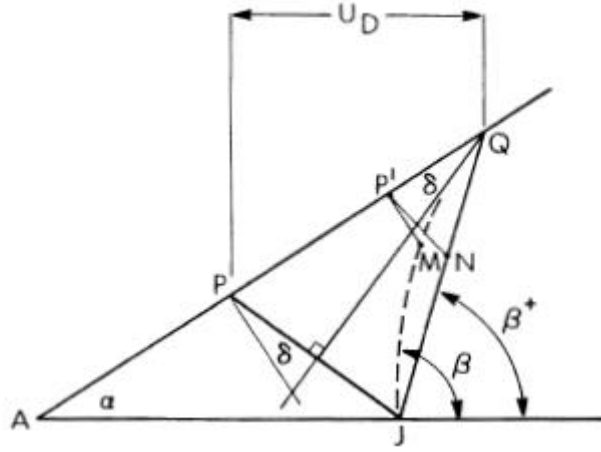
Burada M çukur imla astarının birim alandaki kütlesi, C_1 ve C_2 ampirik sabitlerdir. Şekil 9'da anlık ivmelenme, sabit ivmelenme ve artan ivmelenmenin farkları gösterilmektedir. Şekil 9. (a) grafiğinde t_0 anında anlık artış olduğu, bu sebeple anlık V_0 hızında da anlık artış meydana geldiği, (b) grafiğinde sabit bir ivme ile V_0 hız değerinin arttığı ve (c) grafiğinde ise zamana bağlı olarak artan bir ivmenin etkilediği V_0 hız grafiği yer almaktadır.



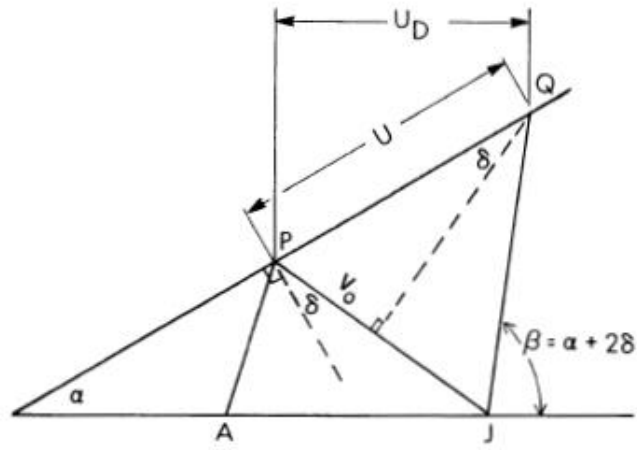
Şekil 9: Çukur imla astarının ivmelenme grafikleri [18]

2.3 Çökme Hızının Hesaplanması

Pugh-Eichelberger-Rostoker (PER) [22] teorisi, konik çukur imla astarın duvarları için sabit bir çökme hızı yerine değişken bir hız olduğu varsayımına dayanmaktadır. Çökme hızı koninin tepesinden tabana doğru azalmakta ve Şekil 10'da görüldüğü gibi β çökme açısı arttıkça oluşan jet hızının azaldığı ancak astarın jete giren kısmının arttığı görülmektedir.



Şekil 10: Değişken Çökme Hızına Göre Astar Şeması [22]



Şekil 11: Çöken konik geometrili astarın hız vektörleri [22]

Şekil 10'da P' noktası P noktasından daha yavaş bir çökme hızına sahip olduğu için çöken astarın konik olmayan $\overline{QM}$ noktalarından oluşan bir kenara sahip olduğu varsayılmaktadır. Çökme açısı β , β^+ (kararlı hal β olarak ifade edilir) açısından daha büyüktür [1]. Bu durum, hidrodinamik varsayımla tutarlı olarak, her astar elemanının ince olduğu ve komşularından etkilenmediği varsayımına dayanmaktadır. Gürel'e [23] göre böyle bir durumda, tüm astar elemanları aynı zaman diliminde aynı miktarda hareket edeceğinden, çökme yüzeyi konik kalır. Böylece, çökme süreci kararlı bir durum süreci olarak kabul edilebilir ve "kararlı durum" çökme açısı ilk yaklaşım olarak denklem (1.15) ile hesaplanmaktadır [23].

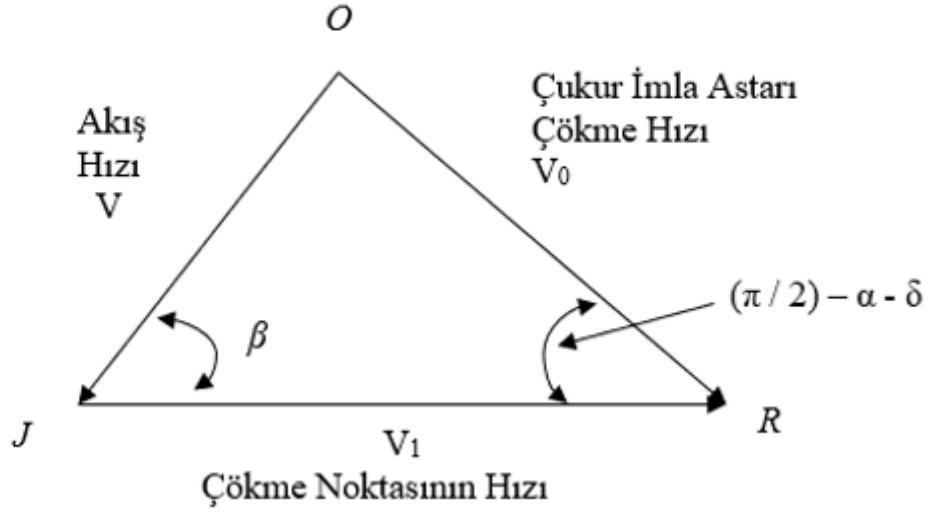
$$\beta^+ = \alpha + 2\delta . \quad (1.15)$$

Sapma açısı δ , denklem (1.16) ile hesaplanmaktadır.

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{V_0}{2U} \right). \quad (1.16)$$

$$U = \frac{U_D}{\cos \alpha}. \quad (1.17)$$

Şekil 11’de gösterilen U patlama dalgasının hızı, U_D patlama dalgası hızının eksene paralel olan vektörü denklem (1.17) ile verilmektedir.



Şekil 12: ÇIA'nın Akış Hızı V, ÇIA'nın Çökme Hızı V0, Çökme Noktasının Hızı V1 Arasındaki İlişkiler [1]

Şekil 12’de yer alan hızların dinamiği denklem (1.18) ile verilmektedir [1]:

$$V = \frac{V_0 \cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta}, \quad (1.18)$$

$$V_1 = \frac{V_0 \cos(\beta - (\alpha + \delta))}{\sin \beta}. \quad (1.19)$$

Bu denklemlerde $V_j = V_1 + V$ ve $V_s = V_1 - V$ ilişkilerinden Jet hızı V_j ve Slug hızı V_s bulunmaktadır [1]:

$$V_j = V_0 \csc \frac{\beta}{2} \cos \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right). \quad (1.20)$$

$$V_s = V_0 \sec \frac{\beta}{2} \sin \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right) \quad (1.21)$$

Şekil 12'ye göre jet hızı, çökme hızının V_0 artışı ile artarken; tepe açısı α ve çökme açısı β 'nin artışı ile jet hızı azalmaktadır.

Bu denklemlerden kütle ve momentumun korunması ile ÇİA kütesinden jet kütlesi m_j ve slug m_s kütleleri çıkarabilmektedir:

$$dm = dm_j + dm_s, \quad (1.21a)$$

$$\frac{dm_j}{dm} = \sin^2 \frac{\beta}{2}, \quad (1.21b)$$

$$\frac{dm_s}{dm} = \cos^2 \frac{\beta}{2}. \quad (1.21c)$$

Çökme açısı β için $2\delta = \beta^+ - \alpha$ ve $A = \alpha + \delta$ eşitliklerinden denklem (1.22) elde edilebilmektedir.

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta^+ - X \sin \alpha \left(1 - \tan A \tan \delta \right) \frac{V'_0}{V_0}}{\cos \beta^+ - X \sin \alpha \left(\tan A + \tan \delta \right) \frac{V'_0}{V_0}}. \quad (1.22)$$

V'_0 terimi V_0 hızının X 'e bağlı türevine eşittir.

2.4 Delme Derinliğinin Hesaplanması

Çukur imla jetinin sahip olduğu yüksek hız nedeniyle, jetin hedefe çarpma anında üretilen basınç miktarı çoğu malzemenin akma dayanımını çok aştığı belirtilmiştir. Bu nedenle bir varsayım olarak, jet ile zırhı oluşturan malzemelerin mukavemetinin ve viskozitelerinin ihmal edilebildiği, bu varsayım ise, sıkıştırılamaz, viskoz olmayan sıvı akışının olduğunu kabul etmek anlamına gelmektedir [1].

Çukur imla jetine l , yoğunluğuna ρ_j ve V hızı ile zırhın delindiği varsayılır ise; delme hızı U olarak tanımlanmaktadır. Delme derinliğini U hızına sahip hareket eden bir koordinat sistemi olarak tanımlarsak zırh malzemesinin jetin geldiği yöne doğru U hızında hareket

ettiğini ve jetin V-U hızı ile hareket ettiği varsayılır. Bu durumda, jet ile zırhın etkileşiminin her iki yanında basıncın aynı olması beklenmektedir. Bu noktada, koordinat sisteminde kararlı durum olduğu değerlendirilmekte ve Bernoulli denklemi uygulanabilmektedir [1].

$$\frac{1}{2}\rho_j (V - U)^2 = \frac{1}{2}\rho_T U^2 . \quad (1.23)$$

Burada ρ_T zırh malzemesinin yoğunluğudur ve jet zırhı delerken aşınmaktadır. Kararlı duruma hızlı bir şekilde ulaşıldığı ve jetin arka kısmının hedefe çarptığında delmenin durduğunu varsayarsak, oluşan toplam delme derinliği P, delme hızı ile delme süresinin çarpımına eşittir [1].

$$P = U \frac{l}{V-U} \text{ veya } P = l \left(\frac{\rho_j}{\rho_T} \right)^{1/2} . \quad (1.24)$$

Bu basit denklem delme derinliğinin jet hızından bağımsız olduğunu göstermektedir. Ancak, jetin aşınma hızı ve jetin esnediğinde oluşan nihai uzunluğu, jet hızına bağlıdır. Bu durumda l terimi jet uzunluğunu temsil etmektedir.

Jet ve zırh malzemelerinin mukavemetinin etkisinin de hesaplamalara dahil edilmesi değerlendirilmektedir. Eichelberger ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [22], düşük hızlarda jet ve zırh malzemesinin mukavemetinin özellikle jetin koptuğu durumlarda delme derinliğine önemli bir etkisi olduğunu gözlemiştir. Bu nedenle, denklem (1.24) kullanılarak jetin akma mukavemetinin ve hedefin direncinin etkisi hesaba katıldığında bu değişkenleri temsil edecek birer terim eklenerek denklem (1.25) kullanılabilir.

$$Y_j + \frac{1}{2}\rho_j (V - U)^2 = \frac{1}{2}\rho_T U^2 + R_T . \quad (1.25)$$

Burada, Y_j jet malzemesinin akma dayanımı ve R_T hedefin delinmeye karşı direnci olarak tanımlanmaktadır.

$\rho_j \neq \rho_T$ eşitsizliği için denklem (1.26) elde edilmektedir.

$$U = \frac{1}{1 - \frac{\rho_T}{\rho_j}} \left[V - \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_j} \left[v^2 + \frac{2(R_T + Y_j)}{\rho_T} \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_j} \right) \right]} \right] . \quad (1.26)$$

Pack ve Evans'ın çalışmasında [24] zırh malzemesinin mukavemetinin jetin delme yeteneğine etkisine vurgu yapılmıştır. Bu mukavemeti hesaplamak için denklem (1.27) ile verilen düzeltme faktörü ile yeni bir delme derinliği modeli denklem (1.28) ile verilmektedir.

$$\left(1 - \frac{\alpha Y}{\rho_j V^2}\right). \quad (1.27)$$

$$P = l \left(\frac{\rho_j}{\rho_T}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{\alpha Y}{\rho_j V^2}\right). \quad (1.28)$$

Burada α sabit terimi, Y dinamik akma dayanımını ve V jet hızını tanımlamaktadır.

Zırhta oluşan delme derinliği r_c için Held [25] tarafından bir teori geliştirilmiştir. Bu teoriye ilişkin sistem dinamiği denklem (1.29) – (1.32) ile verilmektedir. Burada, r_j jet çapını, v_j jet hızını, P_0 zırha yüksek hız ile çarpan jetin oluşturduğu başlangıç basıncını ve R_T zırh malzemesinin mukavemetini, A ve B ise formülleri basitleştirmek için konulan terimleri tanımlamaktadır [25].

$$\frac{dr_c}{dt} = \left(\frac{r_j^2 \cdot v_j^2}{r_c^2 \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}}\right)^{1/2}} - \frac{2 R_t}{\rho_t} \right)^{1/2}. \quad (1.29)$$

$$A = \frac{2 r_j^2 P_0}{\rho_t} = \frac{r_j^2 \cdot v_j^2}{\left(1 + \frac{\rho_t}{\rho_j}\right)^{2/3}} = r_j^2 \cdot U_j^2. \quad (1.30)$$

$$B = \frac{2 R_t}{\rho_t}. \quad (1.31)$$

$$P_0 = \frac{\rho_j (V_j - U)^2}{2}. \quad (1.32)$$

Yukarıdaki formüller kullanılarak zamana bağlı delik çapı denklem (1.33) türetilmiştir [25]:

$$r_c = \sqrt{\frac{A}{B} - \left(\sqrt{\frac{A}{B}} - r_j^2 - t \sqrt{B} \right)^2}. \quad (1.33)$$

2.5 Jet Kopma Zamanının Hesaplanması

Çukur imla jetinde, uç noktasının hızı yüksek, kuyruk hızı ise düşük olmaktadır. Bu hız değişimi, jetin zırh ile çukur imla arasındaki yeterince uzun uzak durma mesafelerinde büyük jet uzunluklarına ulaşılmasına neden olmaktadır.

Jetin delme derinliğinin artması/azalması ile doğru orantılı olan bu uzunluk, jetin nihai durumda aksenal olarak parçalara veya parçacıklara ayrılması ile sınırlıdır [1]. Bir başka anlatımla, jet uzamasının bir limiti vardır, bu limit aşılsa aynı ekseninde ilerleyen jet parçaları oluşur. Bu ayrılma durumunda delme derinliğinin sürekliliği ve delme derinliği önemli ölçüde azalır [1].

Jetlerin parçalanma durumu bu tez çalışmasında jet kopması olarak tanımlanmaktadır. Jetin kopma zamanına kadar geçen süre jet kopma süresi t_B olarak ifade edilmektedir. Jetin zırha çarpmasından önce jet kopmasının olmaması gerektiği değerlendirilmiştir. Jet kopması denklem (1.34) ile tanımlanmaktadır [26].

$$\frac{1}{V_{pl}} = 13.886 - 101.149 \left(\frac{T_L}{CD} \right). \quad (1.34)$$

Burada T_L ve CD sırasıyla denklem (1.35)'te çukur imla astarı kalınlığını ve çapını ifade etmektedir. Denklem (2)'den görüleceği gibi, V_{pl} parametresinin, çukur imla astarı kalınlığının yük patlayıcı çapına oranına bağlı olduğu görülmektedir.

$$t_B = \left(\frac{r_{j0}}{V_{pl}} \right). \quad (1.35)$$

Çukur imla jeti kopma süresi t_B , jetin oluştuğu andaki ilk çapın (r_{j0}), çukur imla astarı malzemesini temsil eden (V_{pl}) hız parametresine oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem (1.34) ve denklem (1.35) kullanılarak jet kopma süresi ve r_{j0} çukur imla astarı çapı sırasıyla denklem (1.36) ve denklem (1.37) ile tanımlanabilmektedir.

$$t_B = r_{j0} 13.886 - 101.149 \left(\frac{T_L}{CD} \right), \quad (1.36)$$

$$r_{j0} = (8 R_L T_L)^{1/2} \sin \frac{\beta}{2}. \quad (1.37)$$

Denklem 1.37’de r_{j0} çukur imla astarı çapı ve çökme açısı β cinsinden tanımlanmaktadır. Jet kopma süresi de denklem (1.38) ile de ifade edilebilmektedir [26]:

$$t_B = 13.886 - 101.149 \left(\frac{T_L}{C_D} \right) (8 R_L T_L)^{1/2} \sin \frac{\beta}{2}. \quad (1.38)$$

Chou ve arkadaşları [18] kopma zamanını tahmin eden bir formül geliştirmiştir. Formülün, deneysel ölçümler ile doğrulandığı belirtilmiştir ve denklem (1.39) verilmiştir.

$$t_B = \frac{r_0}{c_0} \left[3.75 - 0.125 \frac{r_0 \eta_0}{c_0} + \frac{c_0}{\eta_0 r_0} \right]. \quad (1.39)$$

Burada $c_0 = \sqrt{(\sigma_y/\rho)}$ eşitliğinde σ_y jet malzemesinin akma mukavemeti, η_0 jet malzemesinin deformasyon oranını, r_0 jetin esnemesi başladığında oluşan jet çapı uzunluğunu tanımlamaktadır.

Walsh çalışmasında [27] çukur imlaların imalat toleranslarını azaltarak ve/veya çukur imla bileşenlerinin homojenliğini artırarak parçalanmanın geciktirilebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, jet malzemesinin akma dayanımı azaltılarak parçalanma süresi gecikmeleri sağlanabilmektedir.

2.6 Patlama Dalga Hızının Hesaplanması

Yüksek patlayıcılar, patlama zincirinin başlatılması ile mikro saniyeler seviyesinde çok hızlı enerji ortaya çıkaran kimyasal maddelerdir. Hidrodinamik patlama teorisinde, bir patlama dalgası; reaksiyona girmemiş malzeme boyunca yayılan, anında enerjiyi serbest bırakan ve patlayıcıyı enerjiye dönüştüren bir süreksizlik elemanı olarak tanımlanmaktadır. Süreksizlik boyunca kütle, momentum ve enerjinin korunumunu ifade eden Rankine-Hugoniot bağıntıları, reaksiyon bölgesi boyunca hidrodinamik değişkenlerin dinamiğini tanımlamaktadır [28]. Süreksizlik boyunca kütle, momentum ve enerjinin korunumunu ifade eden normal Rankine-Hugoniot ilişkileri, reaksiyon bölgesi boyunca hidrodinamik değişkenleri ilişkilendirmek için kullanılabilmektedir.

Kimyasal olarak etkinlik göstermeyen bir malzeme üzerinde bir şok dalgası için Rankine Hugoniot denklemleri ile bir patlama dalgasına ilişkin denklemler arasındaki tek

fark, enerji korunumu denkleminde bir kimyasal enerji teriminin dahil edilmesi olarak açıklanmaktadır [28]. Tablo 1’de patlama hızına etki eden değişkenler yer almaktadır.

Tablo 1: Bir Patlama Dalgasında Yer Alan Süreksizlikler [28]

Değişken	Patlayıcı Ürünler	Reaksiyon Bölgesi	Reaksiyon Göstermemiş Patlayıcı
Basınç	p		p ₀
Özgül Hacim	v		V ₀
Özgül İç Enerji	e		e ₀
Özgül Kimyasal Enerji	0		Q
Partikül Hızı	u _p		0
Patlama Hızı		→	D

Tablo 1’e göre Rankine- Hugoniot denklemleri (1.40), (1.41) ve (1.42) ile verilmiştir.

$$D^2 = V_0^2 \frac{(p-p_0)}{(v_0-v)}. \quad (1.40)$$

$$u_p^2 = (p - p_0)(v_0 - v). \quad (1.41)$$

$$(e - e_0) = Q + \frac{1}{2} (p + p_0) (v_0 - v). \quad (1.42)$$

Burada başlangıç basıncı p₀, başlangıç yoğunluğu p₀ = 1/v₀, u_p partikül hızı ve D patlama hızı olarak tanımlanmaktadır. Q ekzotermik enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır.

3. SAYISAL YÖNTEMLER İLE BENZETİM YAPILMASI

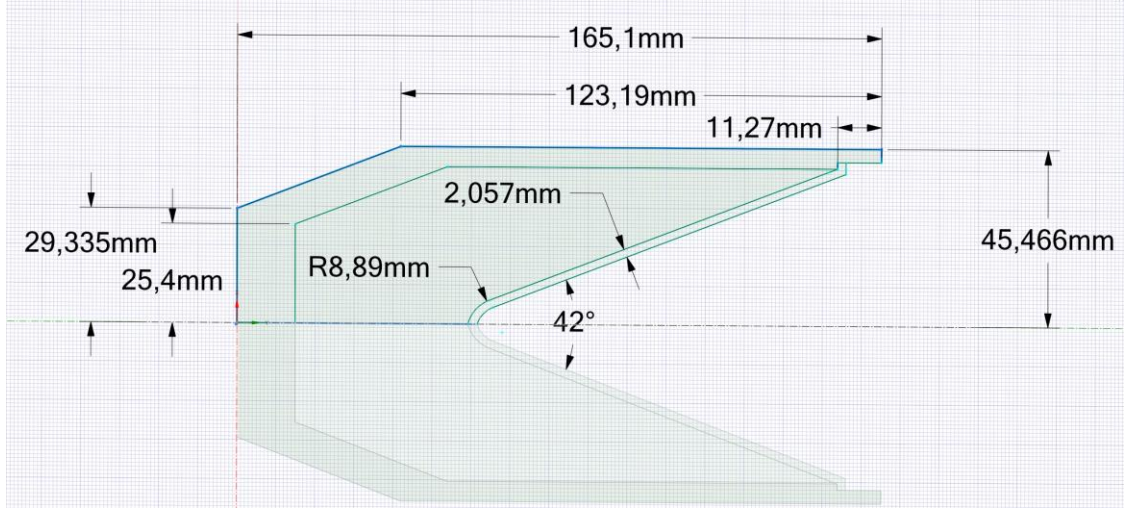
3.1 Harp Başlığı Modellemesi için Kullanılan Yazılım Paketi

Bu tez çalışmasında; Konik, Trompet ve Elipsoit geometrilerde 2 boyutta 3 farklı çukur imla tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çukur imla tasarımı AUTODYN yazılım paketi kullanılmıştır. AUTODYN yazılım paketinin sağladığı imkânlar, sistem modellemesi, kullandığı işlemciler ve sistem dinamiğini belirleyen diferansiyel denklemleri ne şekilde ele aldığına ilişkin detay açıklamalar Ek bölümde yer almaktadır.

3.2 Benzetim Yönteminin Doğrulanması

Kullanılan yazılım paketi AUTODYN ile bu tez çalışmasında yer alan benzetimler gerçekleştirileceği için literatürde bulunan çukur imla benzetimi çalışmaları aynı şekilde AUTODYN’de yürütülmüştür.

İlk olarak Bolstad ve arkadaşlarının [11] yaptığı çalışma incelenmiştir. Çalışmada MESA-3D, hidrodinamik, yüksek patlayıcılar ve malzeme mukavemeti modellerine sahip üç boyutlu, kartezyen, açık, sonlu fark analizi yapmayı sağlayan bir koddur. Bolstad ve arkadaşlarının çalışmasında gerinim sertleştirme özellikleri için Steinberg-Cochran-Guinan modeli ve gerinim oranı sertleştirme için Johnson-Cook modeli kullanılmıştır. Yüksek patlayıcı için standart JWL hal denklemini kullanılmıştır. Sayısal ağ için 0.5 mm (0,05 cm) hücre uzunluğunu seçilmiştir. X ekseninde 840 ve Y ekseninde 120 adet hücre seçip yaklaşık 100.500 adet hücre ile benzetim gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çukur imla geometrisi bu bölümden sonra “Şahit Çukur İmla” olarak tanımlanmakta ve Şekil 13’te yer almaktadır:



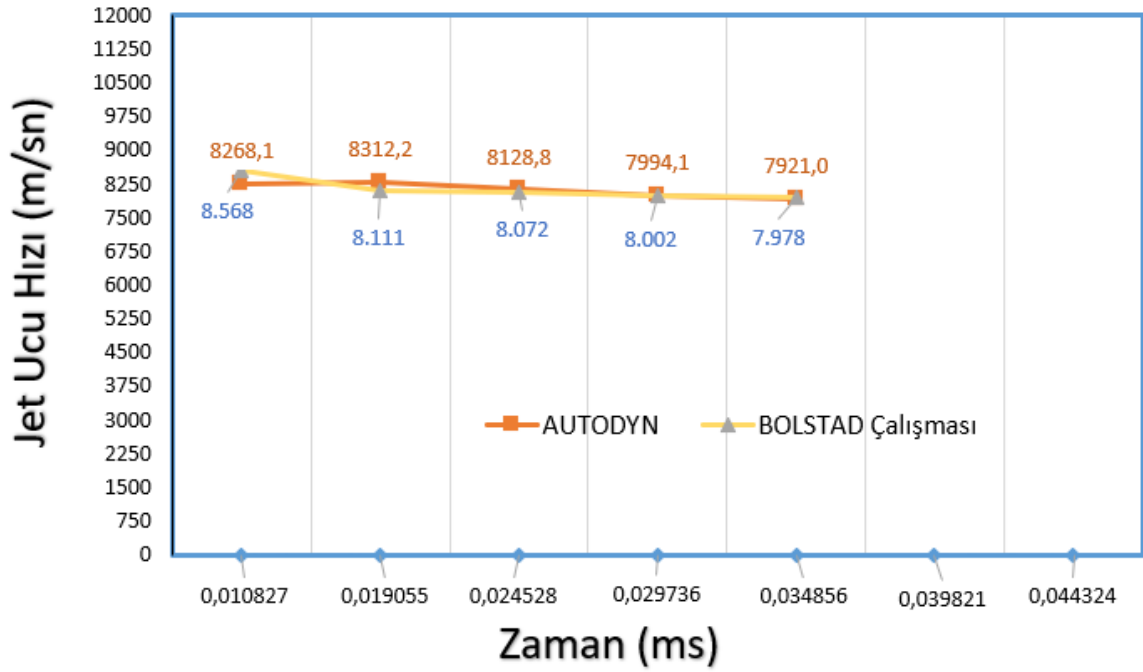
Şekil 13: Çukur İmla Geometrisi [11]

Tablo 2: 2 Boyutlu Modellemede kullanılan Parçanın Özellikleri [11]

Parça	Malzeme	Hal Denklemi	Malzeme Modeli
Çukur İmla Astarı	Bakır (Cu OFHC)	Sesame Table Lookup	Steinberg-Guinan
Dış Kabuk	Aluminium	Gruinesen	-
Patlayıcı	Octol	JWL	-
Arka Plan	Vakum Ortamı	Vakum Ortamı	-

Tablo 2’de Bolstad ve arkadaşlarının çalışmasında [11] yer alan çukur imla parçalarında kullanılan malzemeler ve seçilen modeller yer almaktadır.

Bolstad ve arkadaşlarının çalışması [11] AUTODYN yazılım paketinde aynı özelliklere sahip malzemeler ile modellenmiş ve benzetim çalışması yapılmıştır. Bu benzetimde simetri eksenine 15 mm aralıklar ile veri ölçerler eklenmiş, jet ucu hızı değerleri çıktı olarak AUTODYN’den alınmıştır. Şekil 14’te Bolstad ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada elde edilen jet ucu hızı değerleri ile AUTODYN’de yapılan çalışmanın karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 14: Jet Ucu Hızları Karşılaştırma Grafiği

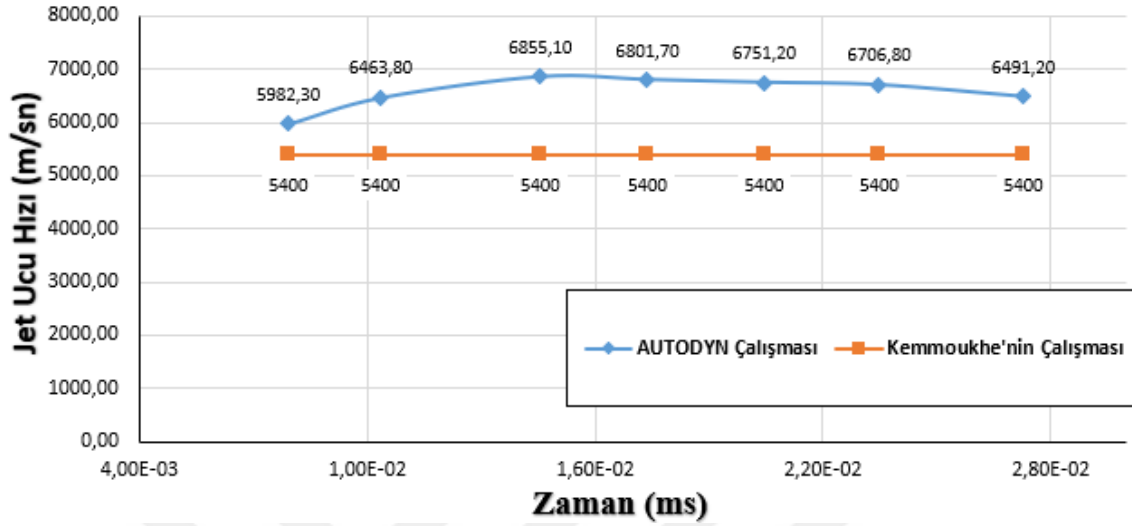
Bolstad ve arkadaşlarının [11] çalışmasında yer alan çıktılar ve bu tez çalışmasında yöntemi doğrulamaya yönelik yapılan bu tez çalışmasında gerçekleştirilen AUTODYN benzetim çıktıları değerlendirirken jet ucu hızlarına yönelik bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Başlangıçta oluşan hız farklarının, hız ölçerlerin çukur imla astarının başlangıcına olan uzaklığıyla ilgili olduğu değerlendirilmektedir. İki çalışmanın jet ucu hız ortalamaları sırasıyla 8146,4 m/sn ile 8086,9 m/sn'dir. Burada ortalama hız farkının yüzde 0,73 olduğu görülmektedir. Bu fark yüzde %1'in altında olduğu için ihmal edilmiştir.

Kemmoukhe ve arkadaşları [3] tarafından 60 mm çapında ve 74 mm uzunluğunda çukur imla geometrisi kullanarak bir model tasarlanmıştır. Geometri, patlayıcı ve çukur imla astarından oluşmaktadır. Bu parçalara ait malzeme özellikleri Tablo 3'te yer almaktadır

Tablo 3: Literatürdeki Çalışmada Kullanılan Parçaların Özellikleri [3]

Parça	Malzeme	Hal Denklemi
Çukur İmla Astarı	Bakır (Cu OFHC)	Şok
Patlayıcı	Comp B	JWL
Arka Plan	Hava	İdeal Gaz

Şekil 15'te 2 milimetre kalınlığında çukur imla astarı ile yapılmış çalışmaların çıktıları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 15: Jet Ucu Hızları Karşılaştırma Grafiği

AUTODYN çalışmasında 6578,87 m/sn ortalama hız hesaplanmıştır. KEMMUKHE ve arkadaşlarının [3] yaptığı çalışmada ortalama hız 5400 m/sn'dir. İki çalışma arasında yüzde 20 oranında jet ucu ortalama hız farkı vardır.

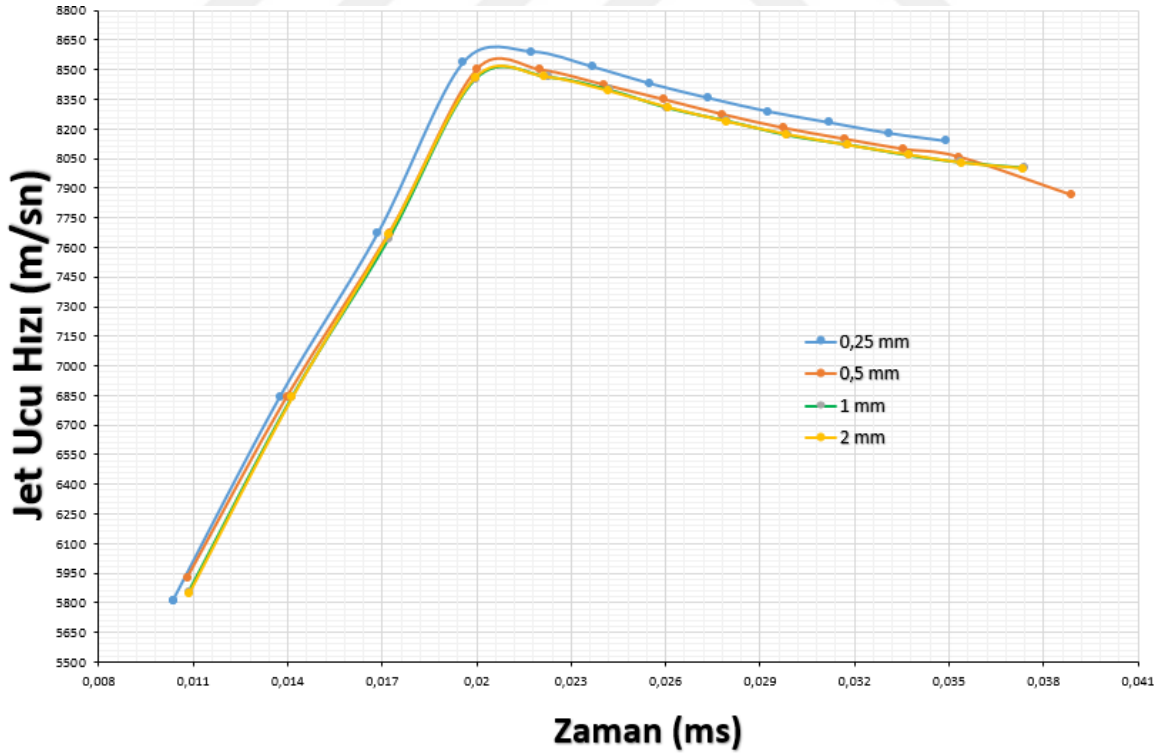
Sonuç olarak, literatürden alınan iki benzetim çalışması ile bu tez çalışmasında kullanılan benzetim yönteminden alınan sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. KEMMUKHE ve arkadaşlarının çalışması ile yapılan benzetim çıktıları arasında oluşan yüzde 20'lik farkın, programa girdi yapılırken kullanılan malzeme özelliklerinin değerlerindeki farklılıktan kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

4. İDEAL DELME ETKİNLİĞİNİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

4.1 AUTODYN Programında Gerçekleştirilen Hassasiyet Çalışmaları

4.1.1 Sayısal ağ hassaslığını bulma çalışması

Sayısal ağın boyutunun ve yoğunluğunun, sayısal benzetimlerin doğruluğunu ve benzetimleri tamamlamak için gereken süreyi etkilediği değerlendirilmektedir. Küçük boyutlu sayısal ağlar daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Diğer yandan, benzetimlerin gerçekleştirilmesi için gereken süre ve kaynak kullanımında doğal olarak artış olmaktadır. Bu kısıtlara göre sayısal ağ çalışmaları 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm dörtgen hücre boyutları için Şahit Çukur İmla modeli ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16: Farklı Sayısal Ağ Boyutlarına Göre Jet Ucu Hızı - Zaman Grafiği

Birim alan başına daha çok sayısal ağ düşmesi nedeniyle 0,25 mm boyutlarında atılan sayısal ağ ile yapılan benzetimlerin süresi diğer boyutlarda gerçekleştirilen benzetimlere göre daha fazla zaman almaktadır. 2 mm, 1 mm ve 0,5 mm boyutlarında sayısal ağlar ile yapılan benzetimlerde jet ucu ortalama hız farkları ihmal edilebilir düzeyde iken 0,25 mm ile yapılan benzetimde elde edilen jet ucu hızı ortalaması (7799,92 m/sn) ile 0,5 mm sayısal ağ boyutunda elde edilen benzetim sonucuna (7912,07 m/sn) göre ortalama hızlarda %1,42’lik fark oluşmuştur. Böylece bu noktadan sonra 0,25 mm sayısal ağ boyutu benzetimlerde genel kabul olarak uygulanmıştır.

4.1.2 Erozyon kriteri hassasiyetini bulmaya yönelik çalışma

Lagrange çözücünün en büyük dezavantajı, eğer aşırı malzeme hareketi meydana gelirse, sayısal ağ büyük ölçüde bozulabilmekte ve bu da yanlış ve verimsiz bir çözüme yol açabilmektedir. Ayrıca, bu aynı zamanda çözümün uygunsuz şekilde sonlandırılmasına da yol açmaktadır.

Lagrange çözücündeki ağ bozulma sorununun üstesinden gelmek için, jete ve zırh malzemelerine bir sayısal ağ atma seçeneği veya "erozyon gerilimi" uygulanmaktadır. Erozyon gerilimi fiziksel bir olay olarak değerlendirilmemekte, ağ bozulmalarını önlemek için kullanılan sayısal bir algoritmayı tanımlamaktadır [28].

AUTODYN’de, önceden tanımlanmış bir gerinim belirli bir limiti aştığında, yüksek oranda bozulmuş hücreleri hesaplamadan çıkartmaktadır. Hesaplama sürecinden bir hücre çıkarıldıktan sonra, o hücrenin içindeki kütle ya atılabilir ya da hücrenin köşe düğümlerine dağıtılabilir. Kütle korunursa, eylemsizliğin korunumu ve eylemsizliğin sürekliliği korunmaktadır [23] .

Çukur imla astarı ve zırh malzemeleri için erozyon gerinimi “anlık geometrik gerinimi” olarak uygulanmıştır.

Erozyon, anlık bir geometrik gerinim sınırına ulaşıldığında başlamaktadır. Anlık geometrik gerinim, kuvvet yükünün binmesi ve kuvvet yükünün kaldırılması ile artabilir veya azalabilir, ancak bir eleman aşıldığında artık geri alınamaz [29].

Bu anlamda, metal malzemelerin modellenmesinde uygun olduğu kabul edilmektedir.

4.2 Delme Derinliğini Etkileyen Faktörler

Çukur imla tasarımı yapılırken hedef zırhta mümkün olduğu kadar en uzun derinliğe ulaşmak amaçlanmalıdır. Bu durumda, çukur imlanın delme derinliği performansını etkileyen tüm parametrelerin birleştirilmesi gerekmektedir.

Anılan parametrelerden bazıları aşağıda verilmiştir.

1. Patlayıcı
2. Uzak Durma Mesafesi
3. Çukur İmla Tasarımı
4. Çukur İmla Astarı Malzemesi ve Kalınlığı
5. Hedef Zırhın Malzeme Özellikleri

Bu tez çalışmasında, bu parametreler dikkate alınarak AUTODYN yazılım paketi kullanılmış, farklı birleştirmelerde modeller tasarlanmak suretiyle AUTODYN yazılım paketi ile Şekil 13'te yer alan çukur imla geometrisine göre en iyi delme derinliğinin elde edilmesine çalışılmıştır.

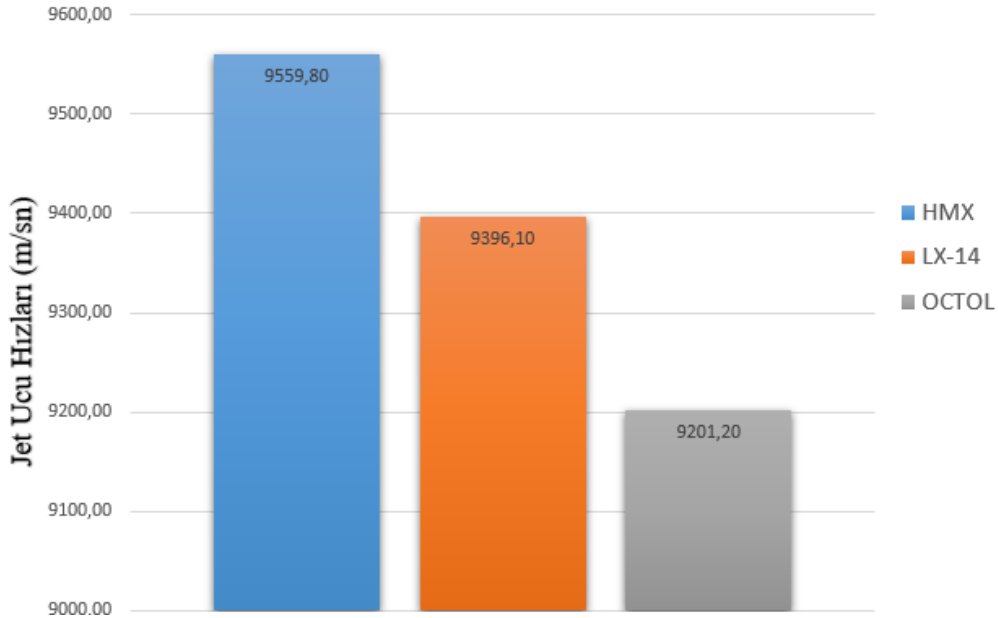
4.2.1 Patlayıcı özellikleri

Enerjisi yüksek olan patlayıcının daha hızlı jet, daha çok jet kinetik enerji ve daha derin delme derinliği ürettiği belirtilmektedir [1]. Patlayıcıdan elde edilen yüksek enerji, patlayıcının Gurney hızıyla ilişkili olmaktadır ve patlayıcıdan serbest bırakılan ve çukur imla astarına aktarılan enerjiyi (mekanik) tanımlamaktadır. Gurney hızı, patlayıcının patlama hızı ve/veya patlama basıncı ile artmaktadır, bu ise jet ucu hızının artmasına neden olmaktadır. Böylece jetin kinetik enerjisinin ve delme derinliği potansiyelinin artmasına sebep olduğu belirtilmektedir [16]. Tablo 4'te bazı patlayıcılara ait malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 4: Bazı Patlayıcıların Özellikleri [30]

	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Patlama Hızı (m/sn)	Gurney Hızı (m/s)	Patlama Sıcaklığı (kJ/kg)	Patlama Basıncı (GPa)
HMX	1891	9100	2960	5553	420
LX-14	1.835	8800	2800	5559	370
RDX	1.730	8489	2870	4118	330
Octol	1.754	8250	2790	5245	320
PETN	1720	8142	2920	5770	220
TNT	1.600	6913	2390	3681	210

Tablo 4 dikkate alındığında en yüksek Gurney hızına sahip, dolayısıyla en yüksek delme derinliği oluşturabilecek patlayıcı malzemenin; 1891 g/cm³ yoğunluğu ve 9100 m/sn ile en yüksek yoğunluk ve hıza sahip olan HMX olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında delme derinliğinin en ideal uzunluğunu bulmak için HMX, LX-14 ve Octol ile analizler yapılmış ve bu patlayıcılar ile ulaşılan jet ucu hızları Şekil 17’de gösterilmiştir.



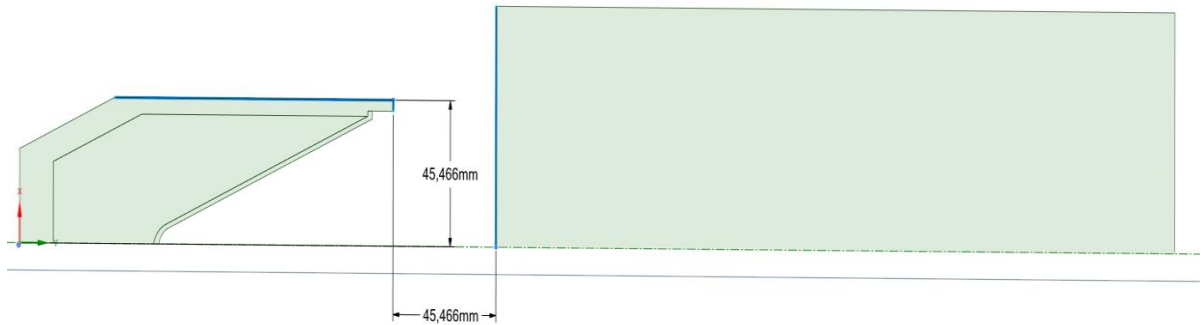
Şekil 17: Patlayıcı Malzemesine Göre Jet Ucu Hız Grafiği

Şekil 17’de belirtildiği üzere HMX patlayıcı malzemesi kullanılarak en iyi jet ucu hızına ulaşılmıştır. Patlayıcı malzeme için HMX malzemesi Jones-Wilkins-Lee Modeli ile birlikte seçilmiştir.

4.2.2 Uzak durma mesafesi

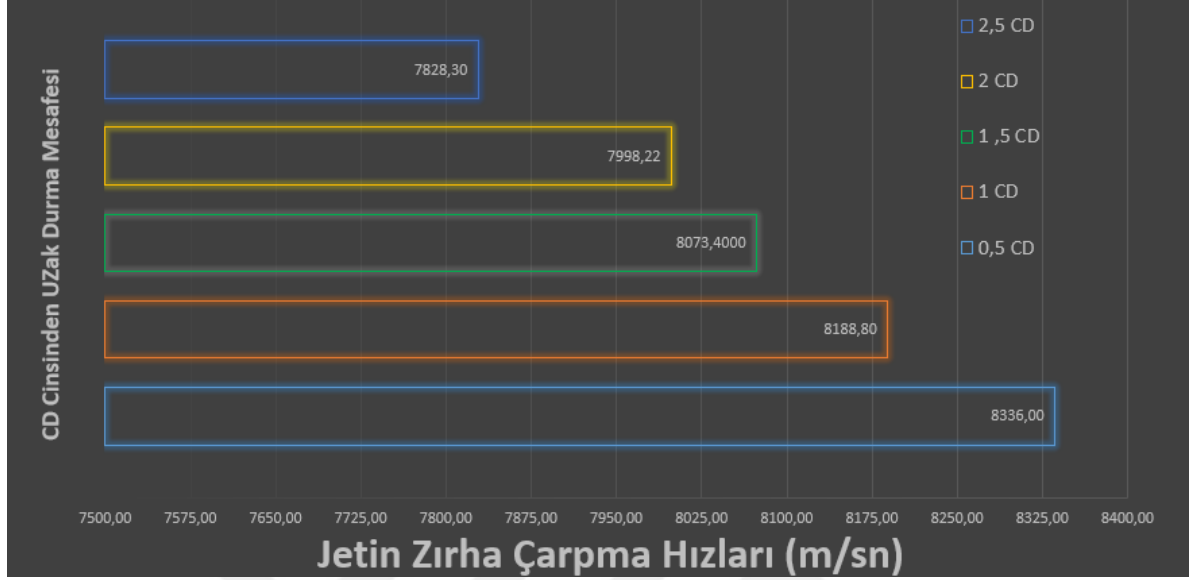
Birkhoff ve arkadaşlarının [10] çalışmasında belirtildiği üzere ortalama delme derinliği çukur imla ile zırh arasındaki uzak durma mesafesi uzunluğu ile değişmektedir. Patlama gerçekleştikten sonra, ani ivmelenme ile hızlanan jetin esnemesi için zamana ihtiyaç olduğundan, çukur imla ile hedef arasındaki mesafe arttıkça esneme için gerekli zaman karşılanmakta ve delme derinliği artmaktadır. Ancak, uzak durma mesafesi uzadıkça jetin kopması ve arasında mesafe olan jet partiküllerine dönüşmesi gerçekleşmektedir. Bu durumda, jet üzerinde bulunan her parçacık delme derinliği ekseninden sapabilmekte ve delmenin olduğu zırh üzerindeki bölgeye bu parçacıklar düşmeyebilmektedir. Böylece delme derinliği azalmaktadır. Sonuç olarak, bu kriterlere göre ideal bir uzak durma mesafesi uzunluğunun seçilmesi delme derinliğini etkilediği için önemlidir.

Bu tez çalışmasında; ideal bir uzak durma mesafesi uzunluğu seçebilmek için farklı uzak durma mesafesi uzunluklarına göre analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Şahit Çukur İmlanın çapı (CD) 90,932 mm uzunluğundadır. Uzak durma mesafesi analizleri 0,5 CD, 1 CD, 1,5 CD, 2 CD ve 2,5 CD uzunlukları kullanılarak yapılmıştır. Şekil 18’de zırh ile çukur imla arasında CD cinsinden 0,5 uzaklık (uzak durma mesafesi) olan model verilmiştir.



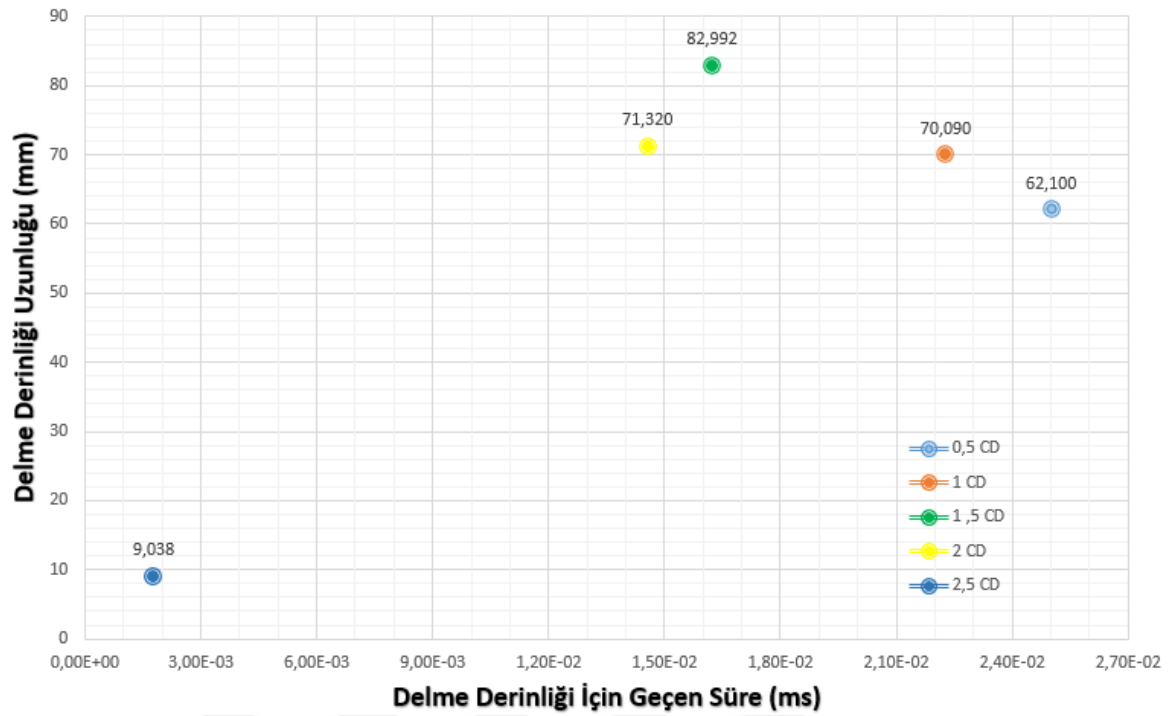
Şekil 18: 0,5 CD (45,466 mm) Cinsinden Uzak Durma Mesafesi Uzunluğu İçin Tasarlanan Model Gösterimi

İdeal uzak durma mesafesini bulmak için yapılan çalışmada CD cinsinden uzak durma mesafelerine göre jetin zırha çarpma hızı çıktıları Şekil 19’da yer almaktadır.



Şekil 19: CD Cinsinden Uzak Durma Mesafesi Uzaklıklarına Göre Zırha Çarpan Jetin Hızı Grafiği

Bu çıktıya göre zırha en hızlı çarpan jet uzak durma mesafesi en kısa olan (0,5 CD) jetidir. İlave olarak, CD cinsinden farklı uzak durma mesafelerine göre benzetimin tamamlandığı süreye kadar oluşan delme derinliği uzunlukları Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20: Delme Derinliği Uzunluğu - Delme Derinliği İçin Geçen Süre Grafiği

Uzak durma mesafelerinin artış oranına göre delme etkinlikleri uzunluğunda doğrusal bir artış oluşmadığı değerlendirilmiştir. Uzak durma mesafelerine göre delme derinliği sonuçları Tablo 5 ile verilmektedir.

Tablo 5: Farklı Uzak Durma Mesafelerine Göre Delme Derinliği Sonuçları Tablosu

Uzak Durma Mesafesi Uzunlukları (CD)	0,5 CD	1 CD	1,5 CD	2 CD	2,5 CD
Delme Derinliği (mm)	65,3	70,1	83	71,3	9,1
Delme Derinliği İçin Geçen Süre (ms)	0,02501	0,02228	0,01623	0,01456	0,00178

Tablo 5'e göre uzak durma mesafesi uzaklığı 1,5 CD (136,4 mm) seçildiğinde en uzun delme derinliğine ulaşıldığı görülmektedir.

Bolstad ve arkadaşları çalışmalarında yer alan [11] benzetimlerde arka planda kullandıkları ortam malzemesine yönelik analiz gerçekleştirmişlerdir. Hava yerine boşluk (vakum ortamı) olarak modelleme yapıldığında sayısal hesapların daha basit ve hızlı

olduğunu değerlendirmişlerdir. Ancak hava ortamında oluşabilecek etkilerin jet oluşumunu değiştirilebileceğini de çalışmalarında tartışmışlardır. Yaptıkları benzetimler sonucunda iki farklı ortam arasındaki jet ucu hızı farklarının yaklaşık %0,1'den daha küçük olduğu belirtilmiştir.

Bununla birlikte, Gürel'in yaptığı çalışmada [23] hava ortamının etkilerinin (rüzgâr direnci) 3 CD (çukur imla çapı) uzaklıktan daha fazla uzunluğu sahip uzak durma mesafeli benzetimlerde jet ucu hızını etkilediğı belirtilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında yapılan analizlerde 1.5 CD uzunluğunda uzak durma mesafesi seçildiğı için hava ortamının oluşturduğu etkilerden jet oluşumunun etkilenmeyeceğı değerlendirilmiş, dış ortam boşluk (vakum ortamı) olarak seçilmiştir.

İlave olarak, ideal uzak durma mesafesinin bulunması için yapılan modellerin hiçbirinde jet kopması görülmemiştir.

4.2.3 Çukur imla tasarımı

Çukur imla tasarımı için literatürde yer alan çalışmalarda [7] [11] kullanılan ve Şekil 13'te verilen aynı geometriye sahip (Şahit Çukur İmla) tasarım modellenerek en iyi delme derinliğinin bulunması amaçlanmıştır. Yapılan her analizde çukur imla astarı kalınlıklarında değişiklikler gerçekleştirilmiştir.

Çukur imla astarın çökme işlemi için yeterli miktarda patlayıcıyı muhafaza edecek kadar çukur imla geometrisinin uzun olması gereklidir. Çukur imla astarının tepe noktası ile tapa arasındaki yükseklik baş yüksekliğı olarak tanımlanmaktadır. Baş yüksekliğinin, çukur imla astarına mümkün olduğunca yakın bir düzlemsel (uniform) patlama dalgasının oluşmasına izin verecek kadar uzun olması gerekmektedir. Baş yüksekliğinin çok kısa olması, oldukça küresel bir dalganın çukur imla astarını etkilemesine neden olmakta ve çökme düzlemsel olmayabilmektedir. Jet uç hızı, jetin kinetik enerjisi ve delme derinliğı, bir noktaya kadar baş yüksekliğinin artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır ve yaklaşık 1,5 CD'lik bir baş yüksekliğı, delme derinliğı açısından en uygun değerdir [1].

Düzgün üretilmiş çukur imla astarları için, koni açısı genişledikçe oluşan jet kısalmakta, kalınlaşmakta ve daha az delme derinliğı oluşturacak hale gelmektedir [16]. En küçük tepe açısına sahip ÇİA, en hızlı jet ucu hızını vermektedir, ancak jet kütlesi en az olmaktadır. Bununla birlikte, çukur imla delme performansı, patlayıcı ve ÇİA'nın aynı kütle

oranına sahip olduğu durumlarda, tepe açılarının küçük olduğu ÇİA'lara göre geniş açılı ÇİA'ların daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir [16].

4.2.4 Çukur imla astarı malzemesi ve kalınlığı

Held [31] tarafından yapılan çalışmada astar yoğunluğu ve jet hızı açısından tahmin edilen delme derinliği performansına göre çukur imla astarı olarak kullanılabilecek farklı malzemeleri Tablo 6 'da verildiği şekilde mukayese etmiştir.

Tablo 6: Çukur İmla Astarı Malzeme Özelliklerine Göre Kıyaslama [31]

Malzeme Adı	Alüminyum	Nikel	Bakır	Molibden	Uranyum	Tungsten
Yoğunluk (g/cm ³)	2.7	8.8	8.9	10.0	18.5	19
Jet Ucu Hızı (km/s)	12.3	10.1	9.8	11.3	22.0	40.5
Derecelendirme	6	3	4	2	5	1

Tablo 6'ya göre yapılan derecelendirmede Tungsten malzemesi 1. sırada değerlendirilmiştir. Tungsten en yüksek patlama/ basınç dalgası hızına sahip olduğu için en yüksek jet ucu hızına ulaşılabilir. Tam tersi olarak, alüminyum ile en yavaş jet ucu hızına ulaşılacağı için alüminyum 6'ncı sırada derecelendirilmiştir.

Tablo 6'da yer alan malzemeler aşağıdaki özelliklere göre belirlenmiştir [1]:

- Yüksek yoğunluk
- Yüksek erime sıcaklığı
- Malzemenin ince tanecik ve uygun tane oryantasyonu
- Malzemenin bulunma oranı ve maliyeti
- İmalat Kolaylığı
- Yüksek Dinamik Mukavemeti ve Sünekliği (Esneme Kabiliyeti)

Tungsten, 19 g/cm³'ü aşan büyük yoğunluğa, 3410 °C'lik yüksek erime noktasına, yüksek ses hızına ve mükemmel sünekliğe sahip olduğundan, en ideal malzeme olarak değerlendirilse de genellikle bakır malzeme çukur imla astarı malzemesi olarak kullanılmaktadır [16]. Bakır malzemenin daha kolay bulunabilirliği ve maliyeti açısından tungstene göre daha ucuz olduğu için daha çok tercih edildiği değerlendirilmektedir.

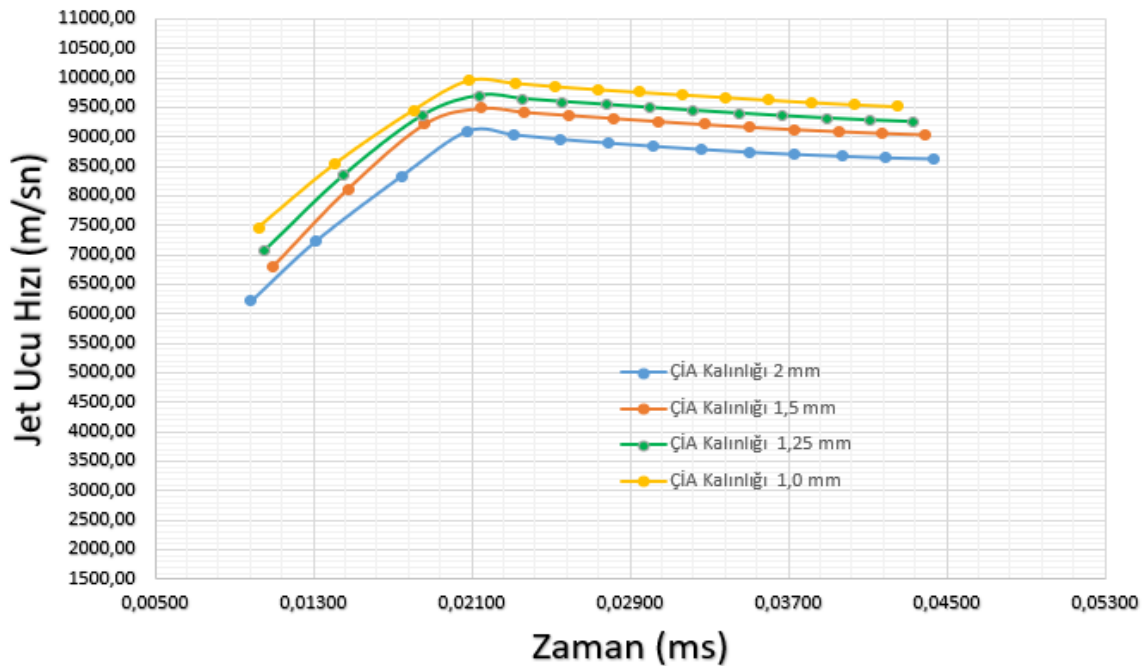
Jet kopma süresi denklemi (1.39) dikkate alındığında, akma mukavemeti yüksek bir malzeme olan Bakır OFHC analizlerde kullanılmak üzere jet malzemesi olarak seçilmiştir. Akma mukavemeti farklı olan malzemeler Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7: Bazı Materyallerin Akma Mukavemeti Değerleri [1]

Malzeme	Akma Mukavemeti, σ_y (MPa)
Bakır	200
Bakır OFHC	270
Alüminyum	100

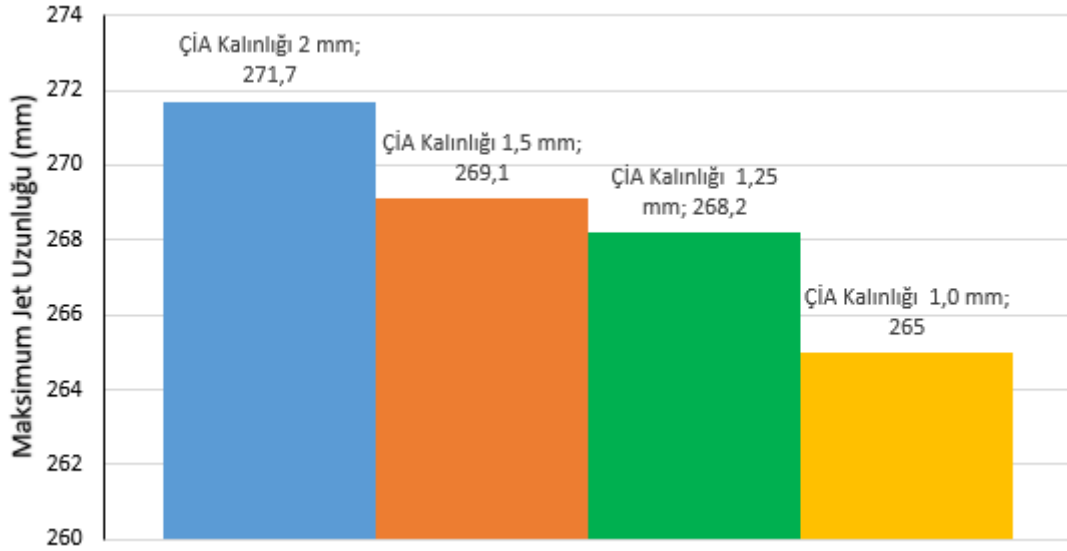
Bu tez çalışmasında; Jet malzemesi modellemesi için Johnson-Cook, Zerilli-Armstrong ve Steinbeck Guinan Mukavemet Modellerinden Bakır OFHC için gerçekte yapılan testlere daha yakın sonuçlar vermesi sebebiyle Zerilli-Armstrong Malzeme Mukavemet Modeli seçilmiştir.

Bu model kullanılarak Çukur imla astarı kalınlığının jet ucu hızına etkisi incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada, Şahit Çukur İmla geometrisi kullanılmış; 2mm, 1,5 mm, 1,25 mm ve 1 mm çukur imla astarı (ÇİA) kalınlıklarına göre ayrı ayrı benzetimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 21-23 ile gösterilmektedir.



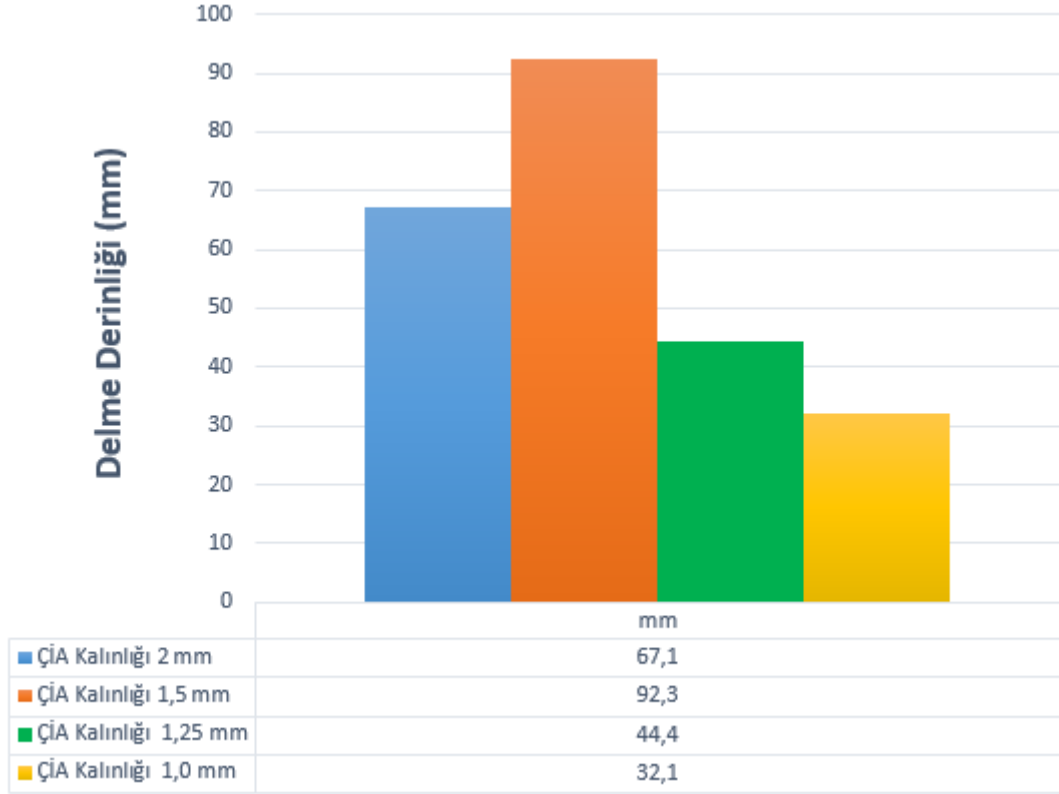
Şekil 21: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Jet Ucu Hızı - Zaman Grafiği

Şekil 21’de ÇİA kalınlığı 1 mm olan modelin en yüksek Jet Ucu Hızına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 21’de görüldüğü üzere jet hızları 0,02 ms mertebelerinde en yüksek hıza ulaşmaktadır. Daha sonra jet ucu hızları azalarak sabit bir denge hızına ulaşılmaktadır. Çukur imla astarı kalınlıkları arttıkça ulaşılan maksimum jet ucu hızlarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 22: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Oluşan Maksimum Jet Uzunluğu Karşılaştırması

Çukur imla astarı kalınlığının değişimine göre oluşan jet uzunlukları Şekil 22’de verilmiştir. Şekil 22’ten anlaşılabacağı üzere jet kalınlığı arttıkça jet uzunluğu artmaktadır. Şekil 23’te ÇİA kalınlıklarının değişimine göre zırhta oluşan delme derinliği uzunlukları verilmiştir.



Şekil 23: Farklı ÇİA Kalınlıklarına Göre Delme Derinliği Uzunlukları

Netice olarak, yapılan benzetim çalışmasında;

- en yüksek maksimum jet ucu hızı 1 mm ÇİA kalınlığında,
- en çok esneyen jet/ maksimum jet uzunluğu 2 mm ÇİA kalınlığında,
- delme derinliği en yüksek 1,5 mm ÇİA kalınlığında

hesaplanmıştır.

Analizler sonucunda, 1 mm ÇİA kalınlığı ile en yüksek jet ucu hızına ulaşılmıştır, ancak en ince kalınlığa sahip olması jetin toplam kütlelerinin ($m = v \times \rho$) hafif olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, delme derinliğinin jet momentumuna bağlı olduğu düşünülürse jetin ince olmasının en iyi delme derinliğini sağlamadığı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, Tamer'in çalışması [16] ve Kemmoukhe ve arkadaşlarının [3] çalışmasının içerisinde yer alan analizler ile de doğrulanmaktadır.

Bu nedenle, müteakip benzetim çalışmasında en iyi delme derinliği sağlaması nedeniyle ÇİA kalınlığı 1,5 mm olarak seçilmiştir.

4.2.5 Hedef zırhın özellikleri

Çukur imlanın bazı çelik malzemelerine olan delme etkinlikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, AUTODYN kütüphanesinde yer alan 3 çelik malzeme için verilen çukur imla delme etkinlikleri Tablo 8’de verilmektedir. Özellikle tank ve zırhlı araçlarda kullanılan RHA çeliği bu tez kapsamında yapılan çalışmada hedef zırh malzemesi olarak kabul edilmiştir.

Tablo 8: Zırh Malzemesi Özellikleri [28]

Kullanılan Çelik	Yoğunluk (kg / m ³)	Oluşan Delme Derinliği (mm)
RHA	7860	35,3
4340	7830	36,2
V250	8129	92,9

4.3 İdeal Delme Derinliğini Bulmak İçin Yapılan Benzetim Parametre Çalışması

Tablo 9’da ideal delme derinliğinin bulunması için yapılan parametre değişikliklerine göre yürütülen benzetimlerin içeriği ve sonuçları yer almaktadır. 6 adet Tasarım Parametresi (TP) için analizler yürütülmüştür.

Bu analizlerin hepsinde ÇİA malzemesi olarak Bakır OFHC ve zırh malzemesi olarak RHA seçilmiştir. Yapılan 6 adet tasarım parametresine (TP) göre benzetim çalışması aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

TP1 Benzetim Çalışması: Sayısal ağ hassasiyetini bulma çalışmasında 0,25 mm boyutları ile yapılan benzetimde en yüksek jet ucu hızına ulaşılmıştır.

TP2 Benzetim Çalışması: AUTODYN Seçeneklerinde yer alan Küresel Erozyon Gerinimi 1, 1,5, 2, 3 ve 4 değerleri için denenmiş, delme etkinliklerinde önemli düzeyde herhangi bir fark gözlenmemiştir.

TP3 Benzetim Çalışması: Jet kopmasının geç oluşması için akma mukavemeti yüksek olan Çukur İmla Astarı malzemesi Bakır OFHC seçilmiştir. Zerilli-Armstrong ve Steinberg-Guinan malzeme modelleri ve herhangi bir model kullanmadan sadece hidro kodlar kullanılarak benzetimler yapılmış Zerilli-Armstrong Modelinin Bakır OFHC için daha gerçeğe yakın sonuçlar verdiği hem analiz hem de literatür çalışmaları ile doğrulanmıştır.

TP4 Benzetim Çalışması: Çukur İmla Astarı kalınlığı 2 mm, 1,5 mm, 1 mm ve 0,5 mm alınarak analizler yapılmıştır. Maksimum jet ucu hızı, jet uzunluğu ve delme derinliği değerlendirildiğinde 1.5 mm kalınlığının en ideal olduğu kabul edilmiştir.

TP5 Benzetim Çalışması: Hedef zırh ile çukur imlanın arasındaki uzaklık (uzak durma mesafesi) değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Çukur imla çapı cinsinden (CD) 0,5 CD, 1 CD, 1,5 CD, 2 CD ve 2,5 CD uzaklıklardan “delme derinliği /delme için geçen süre” oranı en fazla olan 1,5 CD uzak durma mesafesi uzaklığı seçilmiştir.

TP6 Benzetim Çalışması: Patlama Malzemesi değiştirilerek en yüksek jet ucu hızının bulunması hedeflenmiştir. HMX malzemesi kullanılarak jet ucu hızında 9559,90 m/sn mertebesine ulaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında tasarım parametresi paragraflarında açıklanan ve delme derinliğini en iyileyen parametreler kullanılmıştır. Özetle, modellenecek Konik, Trampet ve Elipsoit geometriye sahip Çukur İmlalar için Tablo 9’da verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 9: Parametre Çalışması Değişkenler Matrisi

Benzetim	Açıklamalar
TÇ1	Sayısal Ağ Boyutu: 0,25 mm
TÇ2	Küresel Erozyon Gerinimi: 1,5 Çukur İmla Astarı ve Zırh Erozyon Kriteri: Anlık Geometrik Gerinim
TÇ3	Çukur İmla Astarı Malzemesi: Bakır OFHC Malzeme Modeli: Zerilli-Armstrong
TÇ4	Çukur İmla Astarı Kalınlığı: 1,5 mm
TÇ5	Zırh ile Çukur İmlanın arasındaki uzaklık (Uzak durma mesafesi): 1,5 CD
TÇ6	Patlayıcı Malzeme: HMX

5. MODELLEME VE BENZETİM

5.1 Farklı Çukur İmla Tasarımlarının Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, 2 Boyutta numerik benzetim AUTODYN yazılım paketi ile gerçekleştirilmiştir. AUTODYN yazılım paketinde bulunan hidro kodu; malzemelerin durum denklemi ve mukavemet modeli ile tanımlanmakta; kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini çözümlenmektedir [28]. Hedef Zırh ve Çukur İmlayı oluşturan Dış Kabuk, Çukur İmla Astarı, Patlayıcı Lagrange metotluyla modellenmiştir. Jet oluşumu, farklı zaman aşamalarında jet profillerini elde etmek için süreklilik mekaniğine dayalı Euler çözücü ile modellenmiş ve benzetim bu yöntem kullanılarak yapılmıştır. Patlayıcı, dış kabuk ve çukur imla astarı malzemeleri, Euler çözücündeki malzeme parçasıyla doldurulmuştur. Son derece yüksek gerinim oranının neden olacağı büyük bozulmaların olduğu erken jet oluşumu aşamaları için Euler çözücünün daha uygun olduğu belirtilmektedir [31]. Jet oluşumu için bir Lagrange çözücü seçildiği takdirde, bu bozulmaların Lagrange çözücünün durmasına neden olacağı belirtilmektedir [16].

Euler çoklu malzeme işlemcisi, çukur imla içindeki patlama dalgası yayılımını tanımlamakta ve zamana bağlı gelişen jet profilini göstermektedir. Jetin, hedefe çarptığı ana kadar Euler ağ dizgileri üzerinde hareket etmesine izin verilmektedir. Bu anda oluşan jet, düzgün olmayan hız dağılımına sahip bir Lagrangian kütlesi olarak yeniden sayısal ağ dizgilerine yerleştirilmektedir [16].

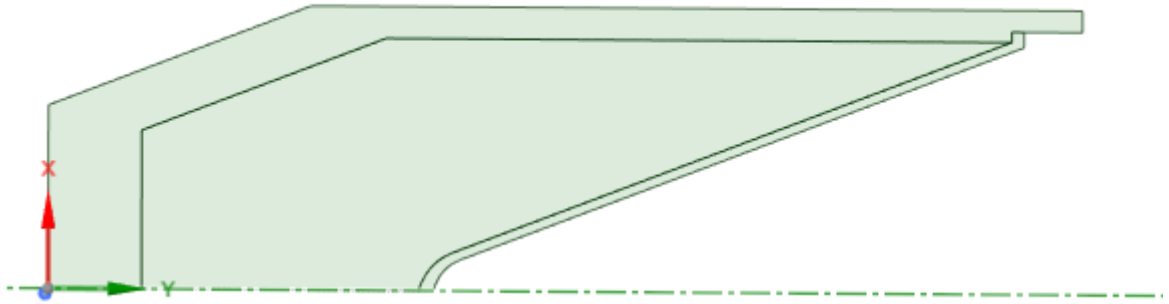
Euler ağ dizgileri, içinden söz konusu malzemenin aktığı sabit ağ dizgisi nedeniyle gazlarda, sıvılarda ve katılarda büyük bozulmaların olduğu yerlerde büyük ve hızlı deformasyon yeteneğine sahip iken Lagrange işlemci, ağ dizgilerinin malzemenin davranışları ile bozulduğu katı sürekliliğini modellemek için uygundur.

Hedef zırh ile jetin etkileşimi (delme derinliği) Lagrange çözücü kullanılarak modellenmiş ve bu modele dayalı benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetimi yürütmek için kullanılan bilgisayar; Ryzen 5 5600 X işlemciye, 16 GB RAM bellek kapasitesine sahiptir.

İdeal delme derinliğini bulmak için, AUTODYN yazılım paketi doğrulaması benzetimleri de dahil olmak üzere 34 adet benzetim gerçekleştirilmiştir. Söz konusu benzetimler, yazılım paketine benzetimin yapılması için ihtiyaç duyulan geometri ve malzeme özellikleri, sınır koşulları girdileri yapıldıktan sonra hazır hale gelmiştir.

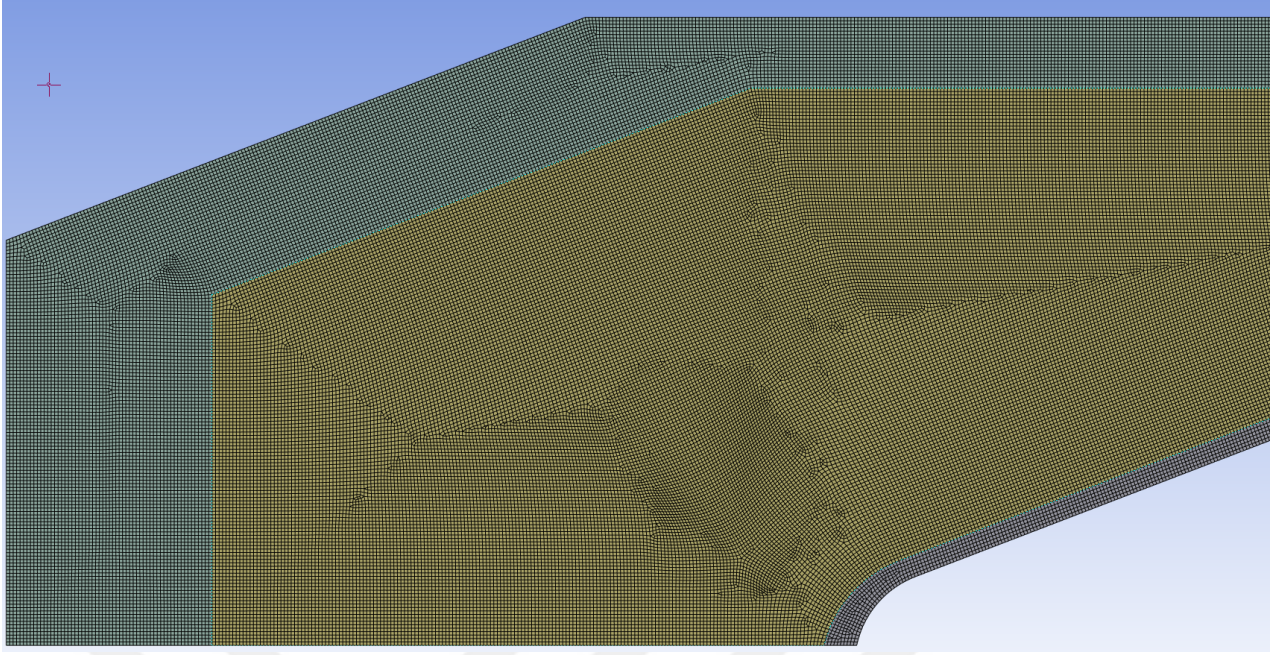
Yatay ekseninde 1600 adet, dikey ekseninde 240 adet hücre olacak şekilde bir benzetim alanı tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen her benzetimde 384.000 adet hücre kullanılmıştır. Benzetimlerin karmaşıklığına ve malzeme özelliği detaylarının artmasına bağlı olarak her bir benzetim 60 ila 150 dakika arasında gerçekleştirilmiştir.

Sayısal çözünürlüğü basitleştirmek için yatay eksen boyunca eksenel simetri kabul edilmiştir. Şekil 24'te gösterildiği üzere modellemelerde çukur imla kesitinin yarısı çizilerek, aynalama seçeneği ile benzetimler için tam bir kesit hazırlanmıştır.



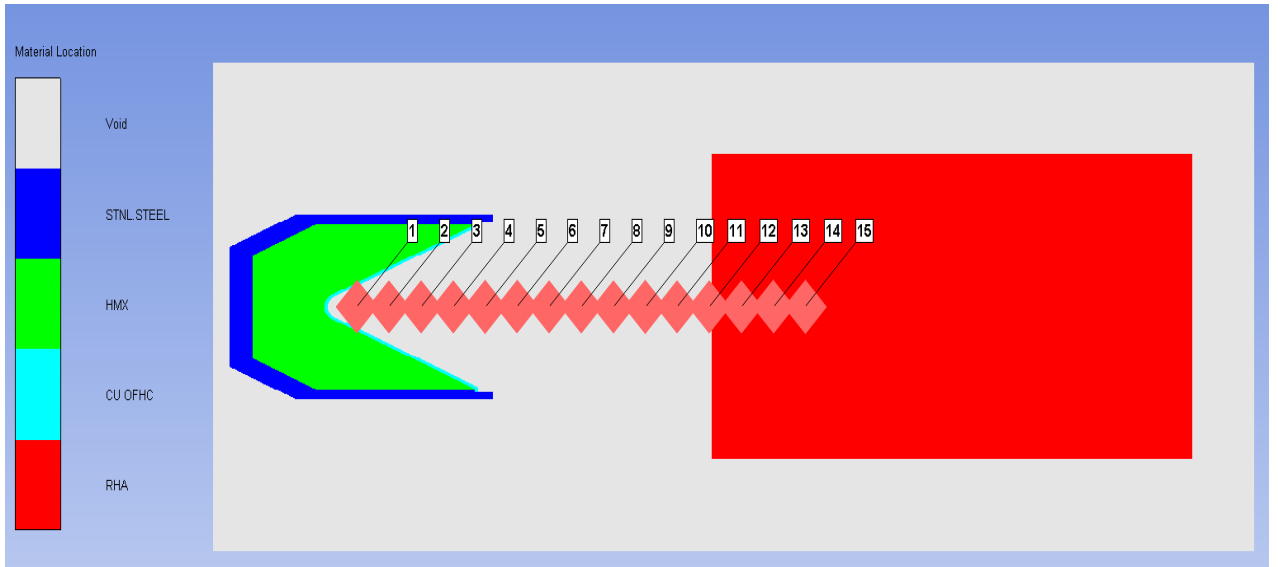
Şekil 24: Örnek Çukur İmla Kesiti

Sayısal ağ için Bölüm 4'te gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda 0,25 mm x 0,25 mm boyutları seçilmiştir. Şekil 25'te konik çukur imla astarının dış kabuk, patlayıcı ve çukur imla astarına atılan sayısal ağın bir bölümü yer almaktadır.



Şekil 25: Geometriye Sayısal Ağ Atılması

Parçaların etrafındaki vakum ortamını modellemek için Euler çözücüye dayanan modelleme kullanılmıştır. Dış akış sınır koşulu, simetri dışındaki çözüm alanındaki tüm sınırlara uygulanmıştır. Böylece, patlama ile genişleyen parçaların çözüm alanındaki sınırlar ile etkileşime girmeden alandan ayrılması sağlanmaktadır [23]. Şekil 26’da çukur imla, zırh ve vakum ortamındaki görünüm gösterilmektedir.



Şekil 26: Çukur İmla, Zırh ve Vakum Ortamının AUTODYN'de Görünümü

İlave olarak, Şekil 26’da 15 adet ölçüm noktası yer almaktadır. Benzetimde kullanılan bu ölçüm noktalarından jet ucu hızı değerleri çekilebilmektedir. Ölçüm noktaları 80 mm ile 360 mm arasında, 20 mm mesafe ile dizilmiştir.

5.2 Çukur İmla Benzetimde Modellenecek Parçalar

Bu tez çalışmasında zırh dahil aşağıda sıralanan 4 temel parça ele alınmış ve modellenmiştir.

- Dış Kabuk
- Patlayıcı
- Çukur İmla Astarı
- Zırh

5.2.1 Dış kabuk

Dış kabuk olarak isimlendiren parça, patlamadan sonra ortaya çıkan yüksek basıncı muhafaza etmekte ve çukur imla astarına doğru yönlendirmektedir. Yönlendirmenin basınç ve enerji kaybı olmadan ve yüksek sıcaklıkta yapılabilmesi için dış kabuğun sıcaklığa, yüksek basınca dayanıklı bir malzemeden seçilmesi uygun olmaktadır.

Bilgisayar programları ile benzetimi gerçekleştirilen harp başlığı modellerinde dış kabuğun harp başlığının patlamasına, jet oluşumuna ve delme derinliğine etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmektedir.

Bu nedenle dış kabuk malzemesine yönelik en ideal delme derinliği analizi gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan dış kabuk için seçilen Paslanmaz Çelik malzemesi, hal denklemi ve özellikleri Tablo 10’da yer almaktadır.

Tablo 10: Dış Kabuk Malzemesi Özellikleri [28]

Yoğunluk (kg/m^3)	7860
Kayma Modülü (Pa)	$7,3\text{E}+10$
Hal Denklemi Modeli	Şok
Gruinesen Katsayısı	1,67
C_1 Parametresi (m/s)	4610
S_1 Parametresi	1,73

5.2.2 Patlayıcı

Gurney enerjisi veya Gurney hızı, patlayıcı gücünün ve verimliliğinin bir ölçüsüdür. Gurney enerjisi ne kadar yüksek olursa, üretilen jetin hızı o kadar yüksek, dolayısıyla çukur imlanın delme derinliği kapasitesi de o kadar yüksek olmaktadır. Bölüm 4'te yürütülen analizlerde en yüksek jet ucu hızı HMX patlayıcı malzemesi kullanarak olduğu için modellenecek 3 farklı çukur imla için HMX patlayıcı kullanılmıştır. Bu tez çalışmasındaki benzetimlerde kullanılan HMX patlayıcı malzemesine ait özellikler Tablo 11'de yer almaktadır.

Tablo 11: Patlayıcı Malzemesi Özellikleri [16] [32]

Yoğunluk (kg/m^3)	1891
Gurney Hızı $(2E)^{0.5}$	2960
Malzeme Mukavemet Modeli	JWL
A Parametresi (Pa)	$7,7828\text{E}+11$
B Parametresi (Pa)	$7,0714\text{E}+9$
R_1 Parametresi	4,2
R_2 Parametresi	1
W Parametresi	0,3
C-J Patlama Hızı (m/s)	9110
C-J Enerjisi / Birim Kütlesi (J/kg)	$5,553\text{E}+6$
C-J Basıncı (Pa)	$4,2\text{E}+10$

5.2.3 Çukur imla astarı

Bölüm 4'te yapılan çalışmalara göre 1,5 mm kalınlıkta ideal delme derinliği performansına ulaşılmıştır. Konik, Trampet ve Elipsoit ÇİA'ların kalınlıkları 1,5 mm seçilmiş ve Bölüm 4'te yer aldığı üzere ÇİA malzemesi olarak Bakır OFHC seçilmiştir.

Benzetim çalışmasında kullanılan Bakır OFHC malzemesine ait özellikler Tablo 12'de yer almaktadır.

Tablo 12: ÇİA Malzemesi Özellikleri [33] [28]

Yoğunluk (kg/m ³)	8960
Malzeme Mukavemet Modeli	Zerilli-Armstrong
Akma Gerilimi Y (Pa)	6,5E+7
C ₁ Sertlik Sabiti (Pa)	0
C ₂ Sertlik Sabiti (MPa)	0,00089
C ₃ Sertlik Sabiti	0,0028
C ₄ Sertlik Sabiti	0,000115
C ₅ Sertlik Sabiti (Pa)	0
n Sertlik Sabiti	0
Hal Denklemi Modeli	Şok
Gruinesen Katsayısı	2,02
C ₁ Parametresi (m/s)	3940
S ₁ Parametresi	1,489
Geometrik Gerinim Türü	Anlık

5.2.4 Zırh

Günümüzde tanksavar mühimmata karşı zırhlı araçlar ve tanklarda kullanılan zırh malzemesi RHA olarak seçilmektedir. Bu tez çalışmasında yer alan zırh modelinde malzeme olarak RHA çeliği seçilmiştir. Bilindiği üzere; Johnson Cook malzeme mukavemet modeli, bir malzemenin büyük gerinimlere, yüksek gerinim oranlarına ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığındaki mukavemet davranışını tanımlamaktadır. RHA zırh malzemesi için Johnson Cook malzeme mukavemet modeli seçilmiştir. Bu model, oluşan gerinim ve gerilim arasındaki ilişkiyi, gerinim oranı ve gerilim arasındaki ilişkileri belirlemektedir [32]. Benzetim çalışmalarında kullanılan hedef zırh için RHA çeliği malzemesine ilişkin bilgiler

Tablo 13'te verilmektedir [32]. Benzetim çalışmalarında kullanılan hedef zırh için RHA çeliği malzemesine ilişkin bilgiler Tablo 13'te verilmektedir.

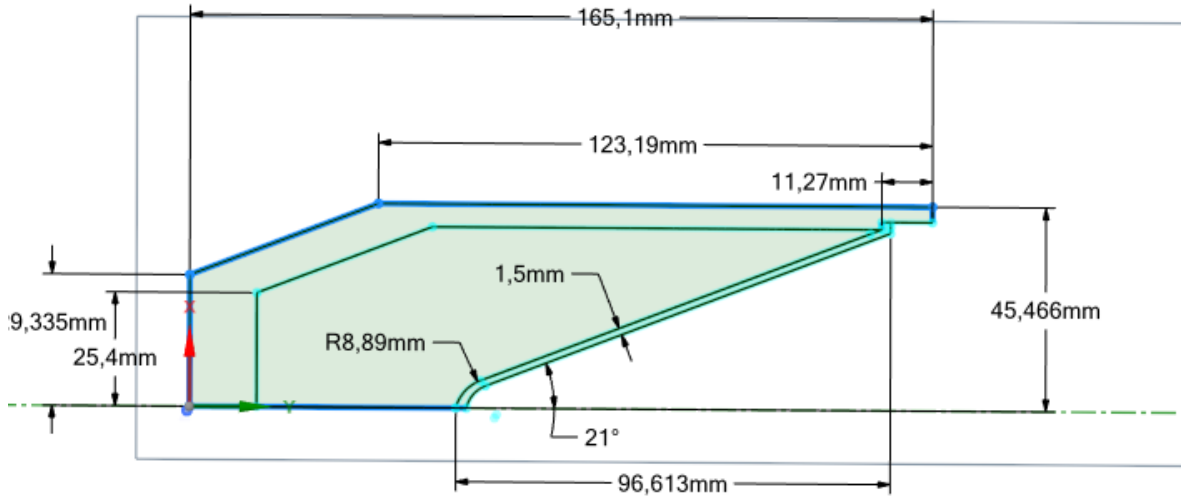
Tablo 13: Zırh Malzemesi Özellikleri [32] [28]

Yoğunluk (kg/m^3)	8960
Malzeme Mukavemet Modeli	Johnson-Cook
Akma Gerilimi Y (GPa)	1,832
Sertlik Sabiti (GPa)	1,685
Sertlik Üssü Sabiti	0,754
Gerinim Oranı Sabiti	0,00435
Termal Yumuşatma Üssü Sabiti	0,8
Erime Sıcaklığı (K)	284,93
Hal Denklemi Modeli	Şok
Gruinesen Katsayısı	1,67
C_1 Parametresi (m/s)	4610
S_1 Parametresi	1,73
Geometrik Gerinim Türü	Anlık

5.3 Modellenecek Çukur İmla Geometrileri

5.3.1 Konik çukur imla modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan Konik Çukur İmla Modeli Şekil 27'de gösterilmektedir. Burada modelin kesitinin yarısına ait ölçüler gösterilmektedir. Tasarımı yapılan bu çukur imla modelinde kullanılan parçalar, parça boyutları, malzeme özellikleri vb. diğer bilgiler Tablo 14'te verilmektedir.

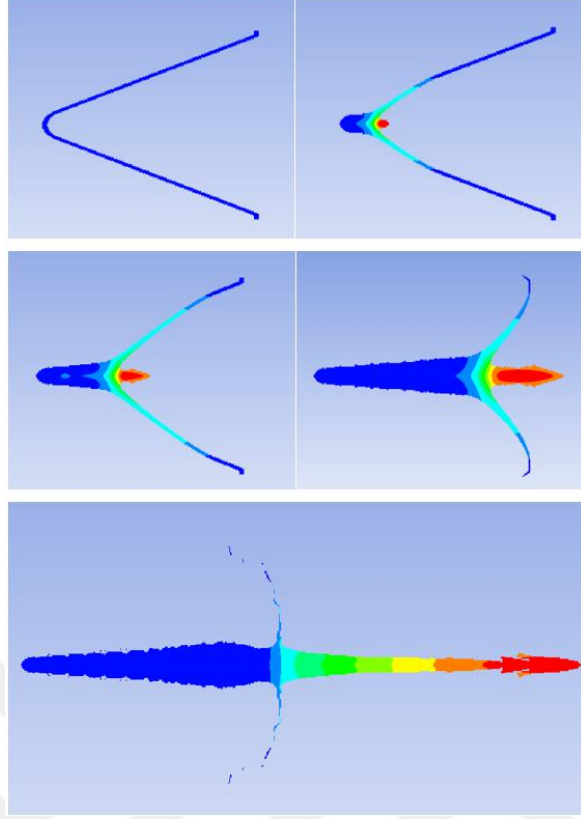


Şekil 27: Konik Çukur İmle Geometrisi Ölçüleri

Tablo 14: Konik Çukur İmle Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri
Tablosu

Parça	Uzunluk (mm)	Genişlik /Yarıçap (mm)	Malzeme Özelliği	Hal Denklemi (EOS)	Malzeme Mukavemet Modeli	Erozyon Kriteri
Dış Kabuk	165.1	45.466	Paslanmaz Çelik	Şok	-	
Patlayıcı	138.9	40.349	HMX	JWL	-	
Konik Çukur İmle	96.61	42	Bakır OFHC	Şok	Zerilli-Armstrong	Anlık Geometrik Gerinim
Zırh	300	75 (yarım kesit)	Rolled Homogenous Armor	Şok	Johnson Cook	Anlık Geometrik Gerinim

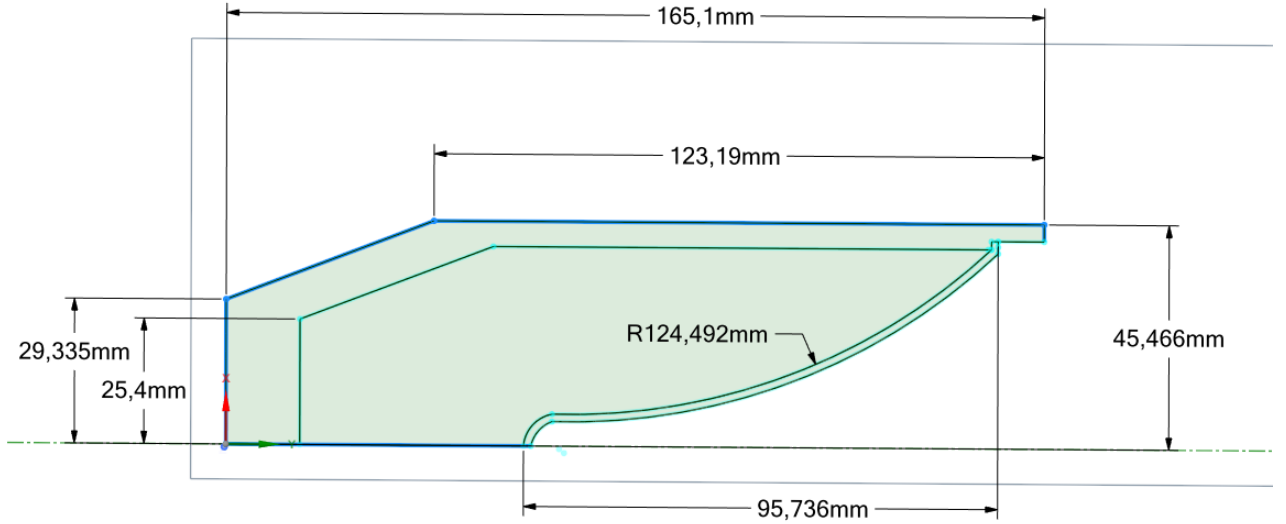
Konik ÇİA'lı çukur imle ile Zırh arasındaki uzak durma mesafesi, Bölüm 4.2.2'de belirtildiği üzere 136,4 mm olan Konik Çukur İmle çap değerinin (CD) 1,5 katı olarak modellenmiştir. Çukur imlanın patlamasından hedef zırhı delmesine kadar olan süreç benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Oluşan jetin farklı zamanlardaki geometrisi Şekil 28'de verilmiştir. Kırmızı renkli alanlar en hızlı ilerleyen bölgeyi (jet ucunu) belirtmektedir. Mavi bölgeler ise jetin en yavaş kısmı olan "Slug" kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 28: Konik ÇİA'lı Çukur İmladan Oluşan Jetin Gösterimi

5.3.2 Trompet çukur imla modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan Trompet Çukur İmla Modeli Şekil 29'da gösterilmektedir. Burada modelin kesitinin yarısına ait ölçüler gösterilmektedir. Tasarımı yapılan bu çukur imla modelinde kullanılan parçalar, parça boyutları, malzeme özellikleri ve diğer bilgiler Tablo 15'te verilmektedir.

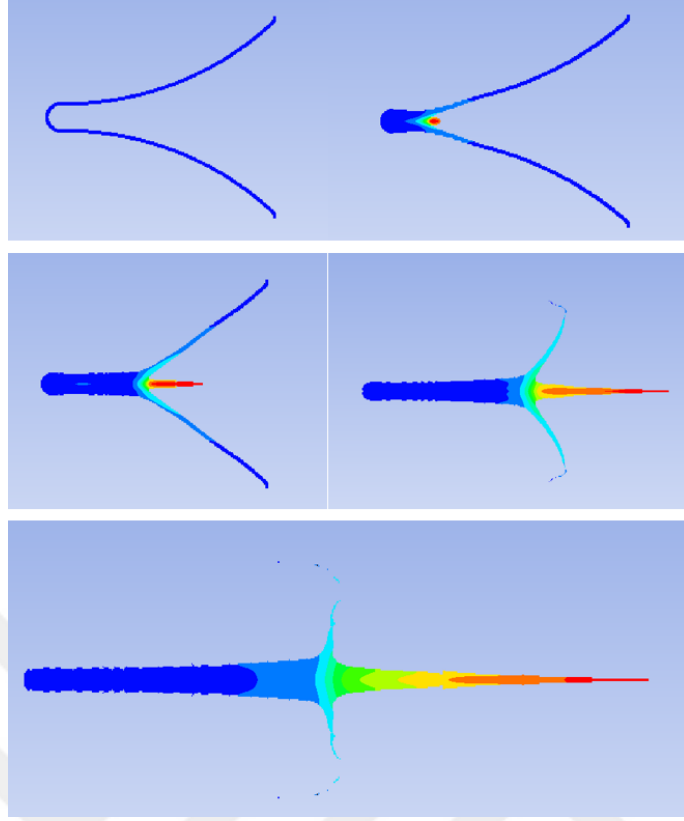


Şekil 29: Trompet Çukur İmla Geometrisi Ölçüleri

Tablo 15: Trompet Çukur İmla Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri
Tablosu

Parça	Uzunluk (mm)	Genişlik /Yarıçap (mm)	Malzeme Özelliği	Hal Denklemi (EOS)	Malzeme Mukavemet Modeli	Erozyon Kriteri
Dış Kabuk	165.1	45.466	Paslanmaz Çelik	Şok	-	
Patlayıcı	139.6	40.349	HMX	JWL	-	
Konik Çukur İmla	95.7	42	Bakır OFHC	Şok	Zerilli-Armstrong	Anlık Geometrik Gerinim
Zırh	300	75 (yarım kesit)	Rolled Homogenous Armor	Şok	Johnson Cook	Anlık Geometrik Gerinim

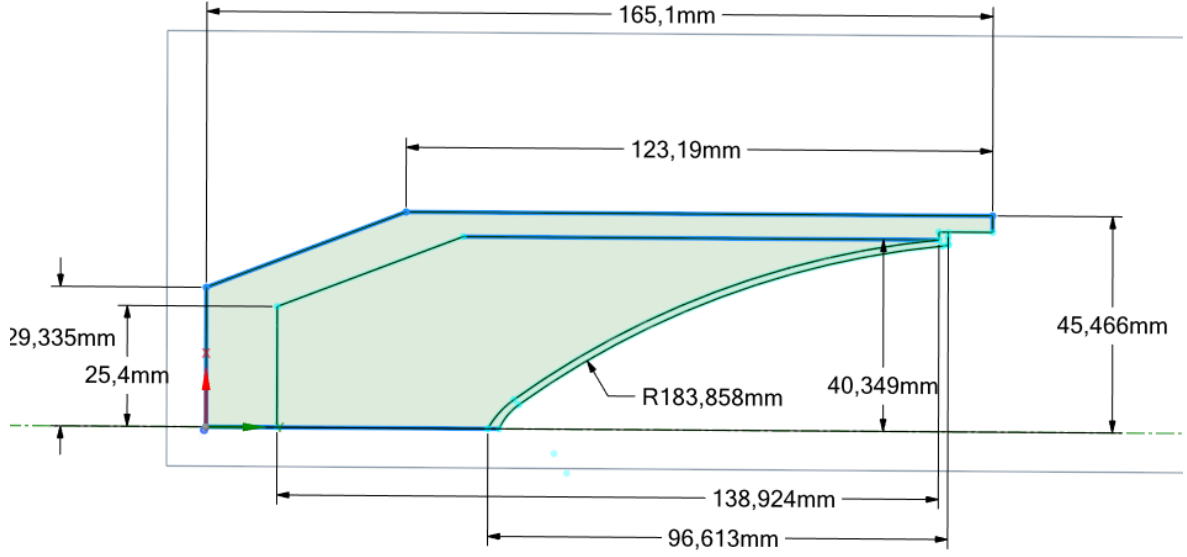
Tramper ÇİA'lı çukur imla ile Zırh arasındaki uzak durma mesafesi, Bölüm 4.2.2'de belirlendiği üzere 136,4 mm olan Konik Çukur İmla çap değerinin (CD) 1,5 katı olarak modellenmiştir. Çukur imlanın patlamasından hedef zırhı delmesine kadar olan süreç benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Trompet çukur imla astarının ilk halinden jet oluşuncaya kadar geçen sürede değişen geometrisi Şekil 30'da gösterilmektedir. Kırmızı renkli alanlar en hızlı ilerleyen bölgeyi (jet ucunu) belirtmektedir. Mavi bölgeler ise jetin en yavaş kısmı olan "Slug" kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 30: Trompet ÇİA'lı Çukur İmleden Oluşan Jetin Gösterim

5.3.3 Elipsoit çukur imla modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan Trompet Çukur İmle Modeli Şekil 31'de gösterilmektedir. Burada modelin kesitinin yarısına ait ölçüler gösterilmektedir. Tasarımı yapılan bu çukur imla modelinde kullanılan parçalar, parça boyutları, malzeme özellikleri vb. diğer bilgiler Tablo 16'da verilmektedir.

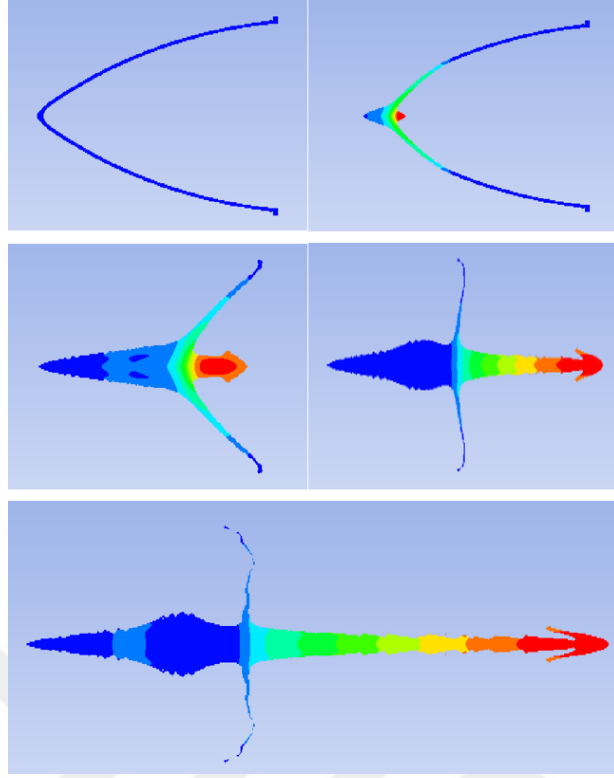


Şekil 31: Elipsoit Çukur İmle Geometrisi Ölçüleri

Tablo 16: Elipsoit Çukur İmle Astarlı Harp Başlığı Geometri Ölçüleri ve Malzemeleri
Tablosu

Parça	Uzunluk (mm)	Genişlik /Yarıçap (mm)	Malzeme Özelliği	Hal Denklemi (EOS)	Malzeme Mukavemet Modeli	Erozyon Kriteri
Dış Kabuk	165.1	45.466	Paslanmaz Çelik	Şok	-	
Patlayıcı	138.9	40.349	HMX	JWL	-	
Konik Çukur İmle	96.6	42	Bakır OFHC	Şok	Zerilli-Armstrong	Anlık Geometrik Gerinim
Zırh	300	75 (yarım kesit)	Rolled Homogenous Armor	Şok	Johnson Cook	Anlık Geometrik Gerinim

Elipsoit ÇİA'lı çukur imla ile Zırh Arasındaki uzak durma mesafesi, Bölüm 4.2.2'de belirlendiği üzere 136,4 mm olan Konik Çukur İmle çap değerinin (CD) 1,5 katı olarak modellenmiştir. Çukur imlanın patlamasından hedef zırhı delmesine kadar olan süreç benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Elipsoit çukur imla astarının ilk halinden jet oluşuncaya kadar geçen sürede değişen geometrisi Şekil 32'te gösterilmektedir Kırmızı renkli alanlar en hızlı ilerleyen bölgeyi (jet ucunu) belirtmektedir. Mavi bölgeler ise jetin en yavaş kısmı olan "Slug" kısmını oluşturmaktadır.

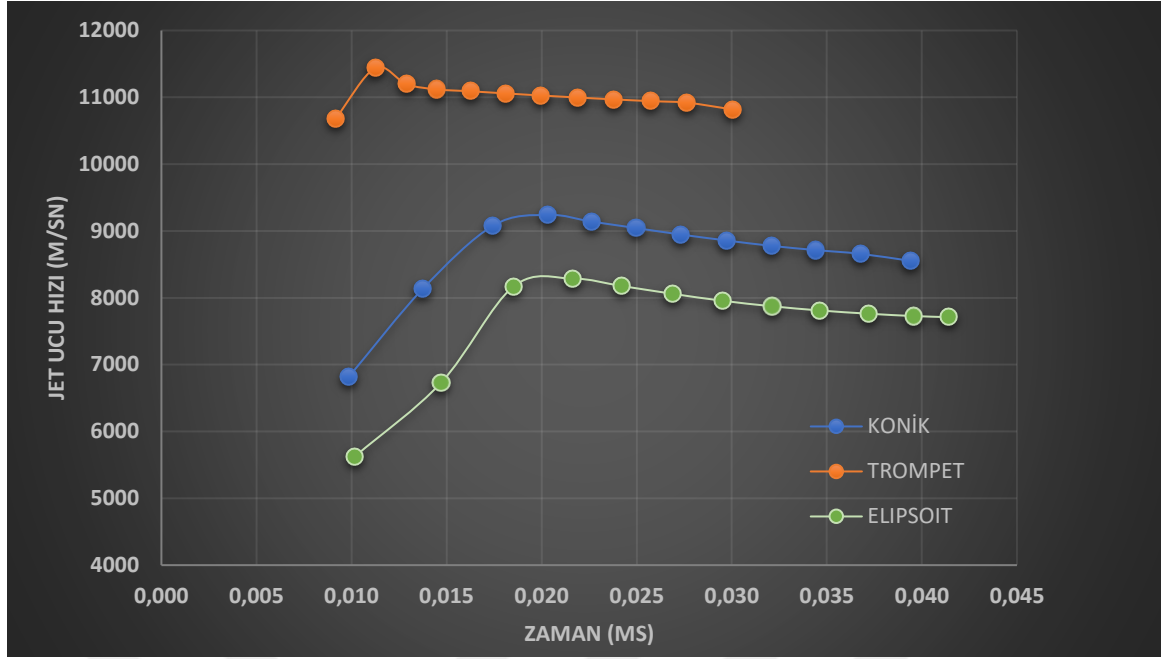


Şekil 32: Elipsoit ÇİA'lı Çukur İmladan Oluşan Jetin Gösterimi

5.4 Benzetim Sonuçları

5.4.1 Jet ucu hızları

Konik. Trompet ve Elipsoit çukur imlaların patlama başlangıcı ile zırha çarpma öncesine kadar olan zaman dilimindeki ölçüm noktalarında (80 mm – 300 mm arasında) alınan jet ucu hızlarının zamana göre grafiği Şekil 33'te yer almaktadır. Trompet geometrili ÇİA'nın yüzey alanı, konik geometrili ÇİA'dan daha küçüktür. Bu durum, her iki geometride de yaklaşık aynı toplam kütleyle sahip olmalarına rağmen, trompet çukur imla astarının patlayıcıdan daha fazla enerji emme yeteneğine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Aynı ölçülerde çukur imla uzunluğu ve genişliği içerisinde trompet çukur imla astarının konik çukur imla astarı yüzey alanından küçük olması sebebiyle, çukur imla içerisinde patlayıcı malzeme miktarı daha fazla olmaktadır. Bunun sonucunda, trompet çukur imla astarı ile daha yüksek jet ucu hızlarına ulaşılmıştır.



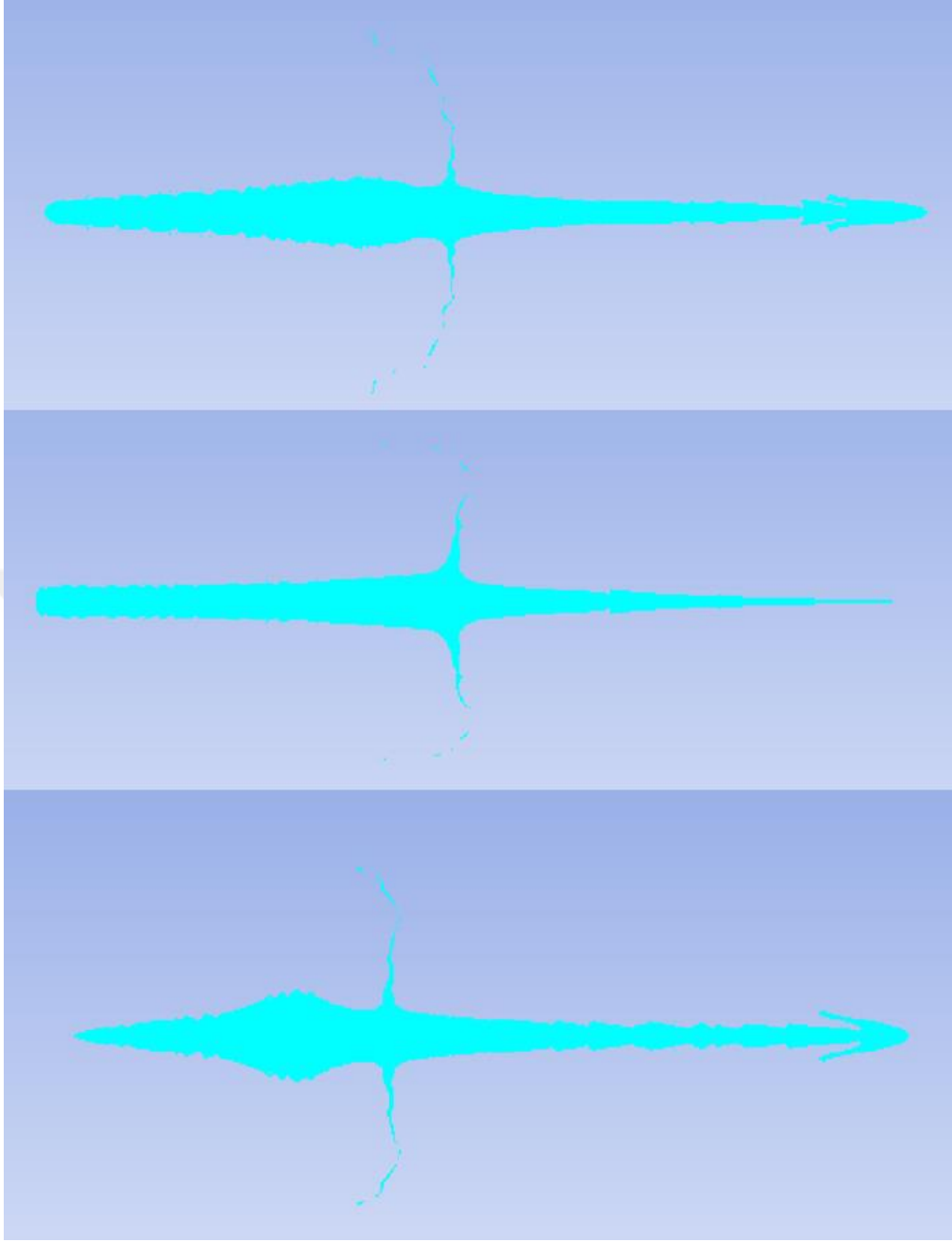
Şekil 33: Konik, Trompet ve Elipsoit Çukur İmlanın Benzetim Çıktıları

5.4.2 Jet uzunlukları

3 farklı çukur imla tasarımı ile gerçekleştirilen benzetimlerde zırha çarpmadan önce oluşan jetlerin ulaşabildiği Jet Ucu ve Slug'a ait en yüksek hız değerleri, en uzun jet uzunluk değerleri ve en geniş çap değerleri Tablo 17'de verilmiş olup Şekil 34'te jetlerin son hali gösterilmiştir.

Tablo 17: Benzetimlerde Ulaşılan Jet Uzunluğu ve Çap Değerleri

Çukur İmla Tasarımları	En Yüksek Jet Ucu Hızları (m/sn)	Slug Hızları (m/sn)	Jet Uzunlukları (mm)	En geniş Çap (mm)
Konik	9240,7	214	229,5	25,9
Trompet	11437,1	147	232,0	17,9
Elipsoid	8286,8	168	223,9	34,9



Şekil 34: Benzetimlerde Ulaşılan Konik, Trompet ve Elipsoit Çukur İmlalardan Oluşan Jet Uzunluklarının Gösterimi

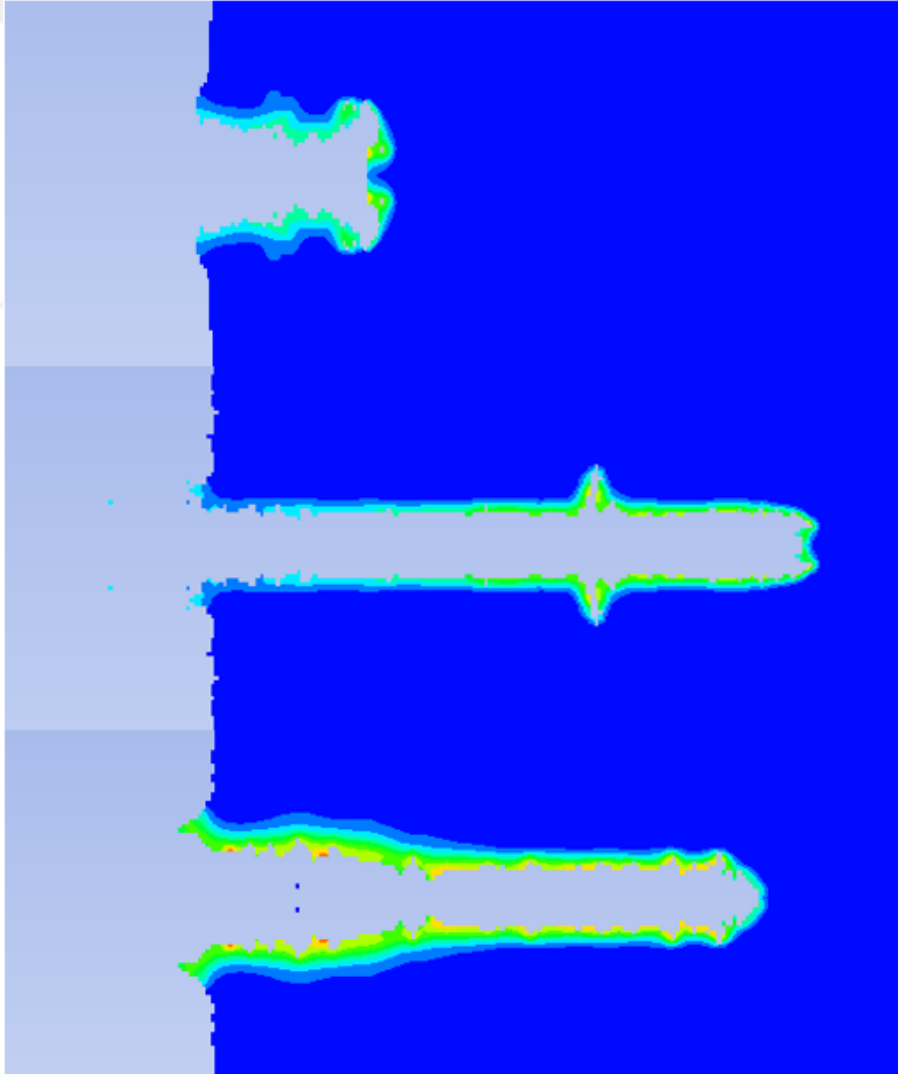
Şekil 34’te görüldüğü üzere jetin arka kısmında yer alan kütle “Slug” en geniş Elipsoit ÇİA’da oluşurken en az genişlikte Trompet ÇİA’da oluşmuştur. Böylece Trompet ÇİA’da oluşan jette iyi bir esneme olduğu ve jeti oluşturan kütlenin çoğunluğunun yüksek hızlarda hareket ettiği değerlendirilmektedir.

5.4.3 Delme derinliği

3 farklı çukur imla ile yapılan benzetimler sonucunda RHA zırhında oluşan delme derinliğine ait veriler Tablo 18’de ve şekil 35’te gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar, trompet geometrili İA’nın delme derinliğini konik geometrili İA’ya göre %43,98 artırdığını göstermiştir.

Tablo 18: Hedef Zırhta Oluşan Delme Derinliği Değerleri

Çukur İmla Tasarımı	Delme Derinliği (mm)	Delik apı (mm)	Delme Derinliğinin Tamamlandığı Süre (ms)
Konik	48,5	14,2	0,0601
Trompet	69,8	12,2	0,0601
Elipsoit	19,8	16,4	0,0601



şekil 35: Yukardan Aşağıya Sıra sıyla Elipsoit, Trompet ve Konik ukur İmlaların Zırhta Oluşturduğu Delme Derinliğinin Gösterimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, konik çukur imlaya sahip harp başlıklarının farklı çukur imla geometrisine sahip tasarımlar ile modellenerek delme derinliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Delme derinliğinin en idealinin bulunması için literatürde yer alan benzer çalışmalar incelenmiş, sistem dinamiklerine ilişkin temel teoriler özetlenmiş, delme derinliğinin en iyilemesi için hangi parametrelerin ne şekilde seçilmesi gerektiği ve çukur imlayı oluşturulan temel malzemelerin seçilmesine ilişkin benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda, Konik, Trompet ve Elipsoit geometrilerde çukur imla tasarımları yapılmıştır. Tasarımlarda ve benzetim çalışmalarında AUTODYN yazılım paketinde yer alan çözücüler kullanılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile tez kapsamında kullanılan model AUTODYN yazılım paketi kullanılarak doğrulanmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar kabul edilebilir yakınlıkta olduğu için AUTODYN yazılım paketi jet analizinde kullanılmıştır.

Kullanılacak en etkili patlayıcı malzemeyi bulmak için yapılan benzetimde HMX patlayıcı malzeme kullanıldığında 9559,80 m/sn ile en iyi jet ucu hızına ulaşıldığı görülmüştür. Çukur imla astarı tasarımının ideal kalınlığı 1,5 mm ve trompet geometri ve HMX patlayıcı ile benzetim gerçekleştirildiğinde 11437,1 m/sn jet ucu hızına, 0,0601 milisaniyede 69,8 milimetre delme derinliğine ulaşılmıştır. Hedef zırh ile çukur imla arasındaki ideal uzak durma mesafesi uzunluğu çukur imla çapı cinsinden 1,5 CD (136,4 mm) olarak seçilmiştir. Daha uzun uzak durma mesafelerinde delme derinliği azalmaktadır.

En iyi delme derinliği analizlerine göre elde edilen parametreler kullanılarak Konik, Trompet ve Elipsoit ÇİA'lı çukur imlaların modellenmesi yapılmıştır. Bu parametreler kullanılarak AUTODYN vasıtasıyla yapılan benzetimlerde; en yüksek jet ucu hızı, en uzun delme derinliği ve jet uzunluğuna Trompet Çukur İmle tasarımı ile, en geniş delik çapına ise Elipsoit Çukur İmle tasarımı ile ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Elde edilen bu sonuçlar dikkate alındığında zırhta yüksek delme derinliği istendiği takdirde Trompet ÇİA geometrisine sahip çukur imla tasarlanması, zırhta geniş bir delik açılması isteniyorsa Elipsoit ÇİA geometrisine sahip çukur imla tasarlanmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, modelleme, sayısal ağ atma ve benzetim çalışmalarında 2 boyutta geometriler kullanılmış, harp başlığı kesitlerinin orta kısımdan itibaren yarısı için modelleme yapılmış ve orta düzeyde bir işlemcisi olan bilgisayar ortamında benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Modelleme ve benzetim daha güçlü işlemcilerle yapılabildiği takdirde sayısal ağın daha küçük ölçeklerde atılmasına imkân sağlanabileceği için daha hassas neticeler alınabilecektir. Ayrıca, tez çalışmasında çukur imla astarının tepe noktasının açısı ve çukur imla astarının uzunluğu değiştirilerek analizler gerçekleştirilmemiştir. Bu parametreler değiştirildiğinde delme etkisinin etkilerinin incelenmesi hususu da ayrı bir çalışma olarak değerlendirilebilir. İlave olarak 2 boyu yerine 3 boyutta modelleme ve benzetim çalışmasının yapılması gelecek için iyi bir çalışma alanı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] W. P. Walters and J. A. Zukas, *Fundamentals of Shaped Charges*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- [2] V. Bohanek, M. Dobrilovic, and V. Skrlec, "The efficiency of linear shaped charges/ Ucinkovitost linijskih kumulativnih rezaca," *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, vol. 21, no. 3, p. 525, May 2014, [Online]. Available: search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsgao&AN=edsgcl.461445521&site=eds-live&authtype=ip,uid
- [3] H. Kemmoukhe, S. Savić, S. Terzić, M. Lisov, N. Rezgui, and H. Sedra, "Improvement of the shaped charge jet penetration capability by modifying the liner form using AUTODYN-2D," *Scientific Technical Review*, vol. 69, pp. 10–15, Dec. 2019, doi: 10.5937/str1901010K.
- [4] Z. Liu, J. Zhai, and S. Su, "Numerical Simulation on Conical Shaped Charge with Copper Liner in Several Typical Shapes," *International Journal of Multiphysics*, vol. 13, no. 3, Sep. 2019, doi: 10.21152/1750-9548.13.3.231.
- [5] F. von Baader, "Bergmannische Journal von Kohler and Hoffman," *Bergmannische*, 1792.
- [6] C. E. Munroe, "Modern Explosives," *Scribner's Magazine, Vol.3 (January-June)*, pp. 563–576, 1888.
- [7] M. von Foerster, "Experiments with Compressed Gun Cotton," *Van Nostrand's Engineering Magazine*, pp. 113–119, 1884.
- [8] F. B. Pollard and J. H. Arnold, "Aerospace ordnance handbook," 1966.
- [9] R. R. Lenz, *Explosives and Bomb Disposal Guide*. C.C. Thomas, 1965. [Online]. Available: books.google.com.tr/books?id=r9EHAAAACAAJ
- [10] D. P. MacDougall, G. Birkhoff, E. M. Pugh, and S. G. Taylor, "Explosives with Lined Cavities," *Journal of Applied Physics*, vol. 19. AIP Publishing, pp. 563–582, Jun. 01, 1948.[Online].Available:search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.doi.07d9aec1cd275bfd39eee385b5e9a08e&site=eds-live&authtype=ip,uid

- [11] J. H. Bolstad and D. A. Mandell, "Calculation of a Shaped Charge Jet Using MESA-2D and MESA-3D Hydrodynamic Computer Codes," 1996.
- [12] T. Clipii, "On mathematical modeling of shaped charge penetration," Linköping University, Department of Management and Engineering, 2008.
- [13] W. Kulsirikasem, A. Julniphitwong, and G. Tanapornraweevit, *Investigation of materials for liner of shaped charge warhead and their optimum standoff distances*. 2011.
- [14] M. G. Vigil, "Precision Linear Shaped Charge Designs for Severance of Aluminum Materials," 1992.
- [15] S. L. Hancock, "An extension of the umin model for cutoff of high precision jets," *Int J Impact Eng*, vol. 26, no. 1, pp. 289–298, 2001, doi: doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00095-1.
- [16] A. E. E. Tamer, "Criteria Of Design Improvement Of Shaped Charges Used As Oil Well Perforators," School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester, 2012.
- [17] E. Baker, "Modeling and Optimization of Shaped Charge Liner Collapse and Jet Formation," p. 178, Jan. 1993.
- [18] P. C. Chou and W. J. Flis, "Recent Developments in Shaped Charge Technology," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 11, no. 4, pp. 99–114, 1986, doi: doi.org/10.1002/prop.19860110402.
- [19] P. C. Chou, J. Carleone, W. J. Flis, R. D. Ciccarelli, and E. Hirsch, "Improved formulas for velocity, acceleration, and projection angle of explosively driven liners," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 8, no. 6, pp. 175–183, Dec. 1983, doi: doi.org/10.1002/prop.830080602.
- [20] R. J. Eichelberger, "Experimental Test of the Theory of Penetration by Metallic Jets," *J Appl Phys*, vol. 27, no. 1, pp. 63–68, Jan. 1956, doi: 10.1063/1.1722198.
- [21] G. Randers-Pehrson, "An Improved Equation for Calculating Fragment Projection Angle," in *2nd Int. Symp. on Ballistics*, Daytona Beach, Mar. 1976.

- [22] E. M. Pugh, R. J. Eichelberger, and N. Rostoker, "Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities," *J Appl Phys*, vol. 23, no. 5, pp. 532–536, 1952, doi: 10.1063/1.1702246.
- [23] E. Gürel, "Modeling and simulation of shaped charges," Middle East Technical University, 2009.
- [24] D C Pack and W M Evans, "Penetration by High-Velocity ('Munroe') Jets: I," *Proceedings of the Physical Society. Section B*, vol. 64, no. 4, p. 298, 1951, doi: 10.1088/0370-1301/64/4/302.
- [25] M. Held, "Verification of the equation for radial crater growth by shaped charge jet penetration," *Int J Impact Eng*, vol. 17, no. 1, pp. 387–398, 1995, doi: doi.org/10.1016/0734-743X(95)99864-N.
- [26] E. Hirsch, "Scaling of the Shaped Charge Jet Break-Up Time," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 31, no. 3, pp. 230–233, Jun. 2006, doi: doi.org/10.1002/prop.200600031.
- [27] J. M. Walsh, "Plastic instability and particulation in stretching metal jets," *J Appl Phys*, vol. 56, pp. 1997–2006, 1984.
- [28] Century Dynamics, "Autodyn Theory Manual: Explicit Software for Nonlinear Dynamics," 2005.
- [29] B. M. Luccioni and G. F. Aráoz, "Erosion Criteria for Frictional Materials Under Blast Load," 2011.
- [30] A. E. E. Tamer and Q. M. Li, "Parametric analysis of the penetration performance of shaped charges used as oil well perforators," in *41st International. ICT-Conference*, Karlsruhe, Germany, 2010.
- [31] M. Held, "Liners For Shaped Charges," 2001.
- [32] H. W. Meyer and D. S. Kleponis, "An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor," 2001.
- [33] F. J. Zerilli and R. W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations," *J Appl Phys*, vol. 61, pp. 1816–1825, 1987.

EKLER

EK 1: Numerik Yöntem İçin Kullanılan AUTODYN Yazılım Paketinin İçerisinde Yer Alan Denklemler

AUTODYN yazılım paketi, kütle, momentum ve enerjinin korunumu olarak ifade edilen kararsız malzeme dinamik hareketini yöneten diferansiyel denklemleri kullanarak modellemeleri çözmektedir.

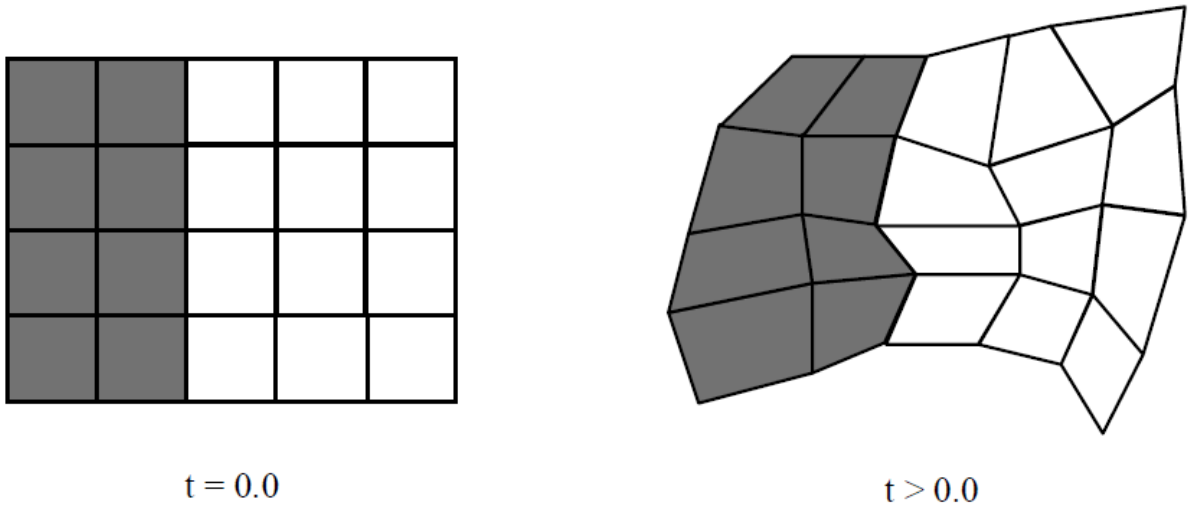
AUTODYN yazılım paketi kullanan çeşitli sayısal işlemciler genellikle birleştirilmiş bir sonlu fark/sonlu hacim yaklaşımı kullanmaktadır[28].

AUTODYN aşağıdaki sayısal işlemcileri içerir:

- Katı sürekliliği ve yapıları modellemek için Lagrange işlemci.
- Akışkanları, gazları ve geniş distorsiyonu modellemek için Euler işlemcisi (bu işlemci, birinci dereceden ve ikinci dereceden doğru şemaları içermektedir).

Programda Kullanılan Korunum Denklemleri

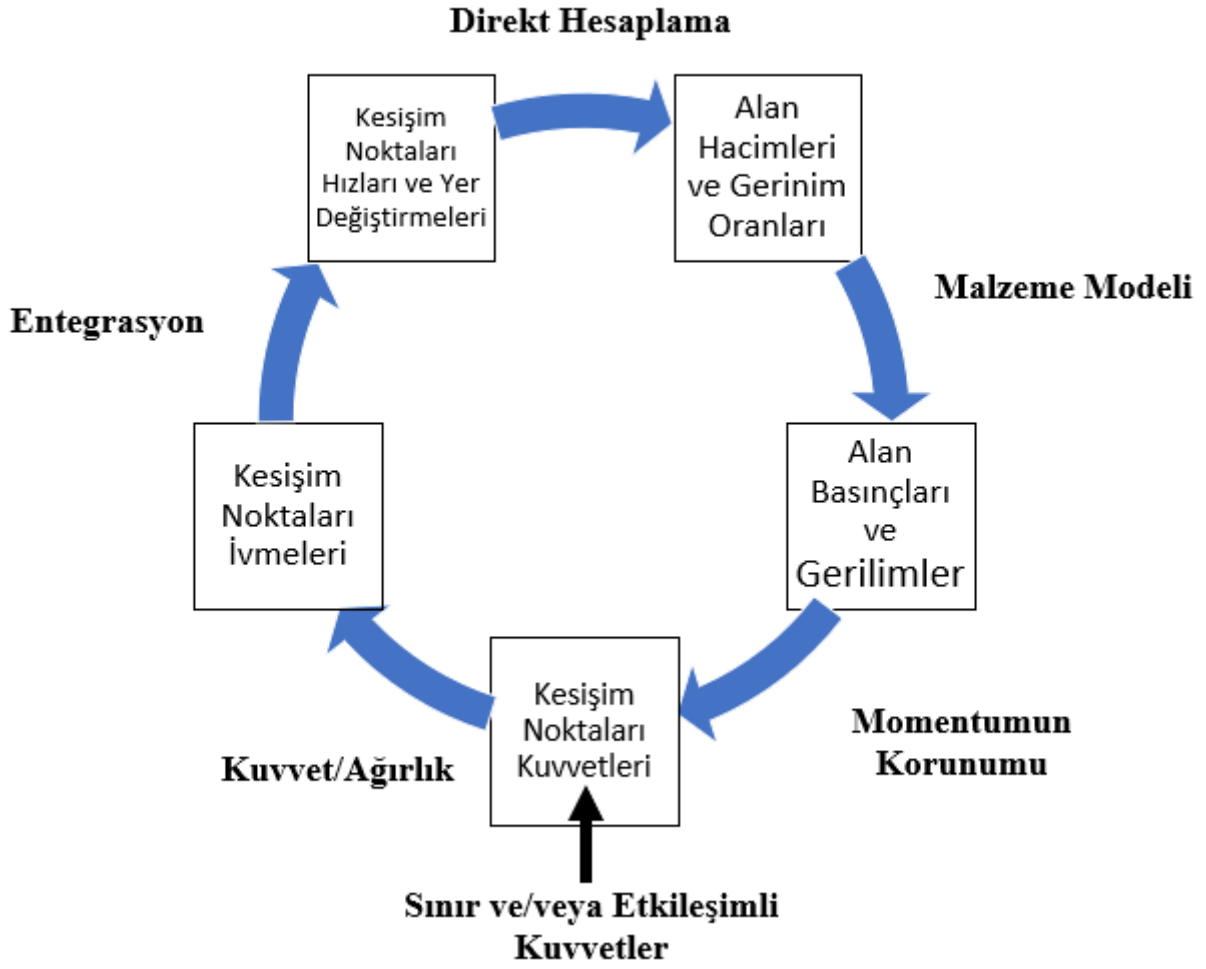
Lagrangian koordinat sistemi, koordinatlar malzeme ile birlikte hareket ederken, bir etki ile oluşan düşük distorsiyonun, geniş yer değiştirmelerin ve sayısal ağların geometrisinde değişiklik olduğu bölgelerde malzeme akışını takip etmek için ideal olduğu ifade edilmektedir. Bir Lagrangian koordinat sistemi, malzemeyle birlikte deforme olur ve bu durumda örnek malzeme görünümü Şekil 36'da gösterilmektedir.



Şekil 36: Lagrangian Koordinat Sisteminde Bir Etki ile Oluşan Sayısal Ağ Distorsiyonunun Gösterimi [28]

Kısmi diferansiyel denklemlerin Lagrange koordinatlarında çözümü **kütle, momentum ve enerjinin** korunumunu ifade etmektedir. Bu denklemler, bir malzeme modeli, bir dizi başlangıç ve sınır koşulu ile birlikte, problemlerin tam çözümünü tanımlamaktadır [28]. Eksenel simetride x ekseni simetri eksenidir ve tüm denklemlerde nokta ile gösterilen terimler zamana karşı türevlerini ifade etmektedir.

Bir Lagrange alt ağ dizisinde her artan zaman adımı (veya döngüde) gerçekleştirilen hesaplamalar dizisi, aşağıdaki Şekil 37’de gösterilmektedir.



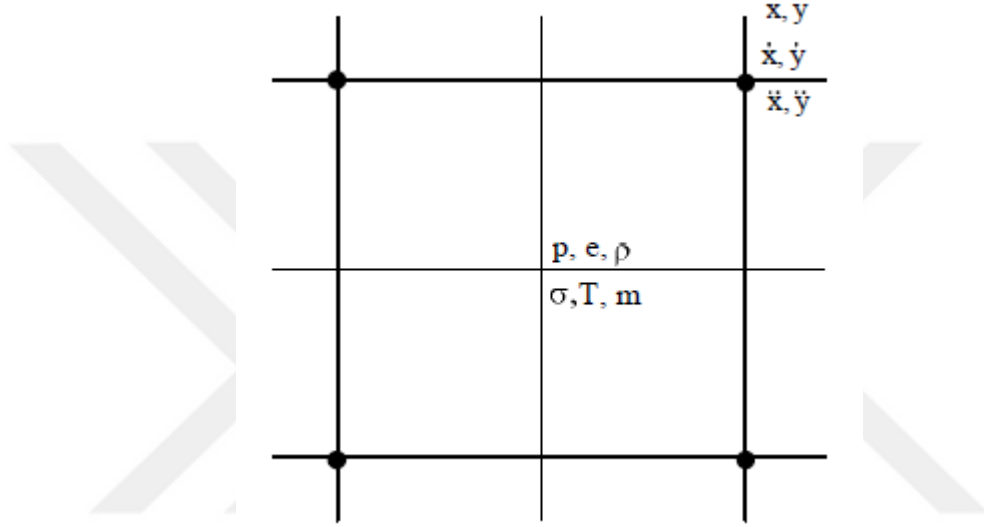
Şekil 37: Lagrange Hesaplama Döngüsü [28]

Şeklin altından başlayarak, sınır kuvvetleri ve/veya etkileşimli kuvvetler güncellenir ve önceki zaman döngüsü sırasında iç bölgelerde hesaplanan kuvvetlerle birleştirilmektedir. Ardından birbiri ile etkileşimli olmayan tüm Lagrange düğümleri için ivmeler, hızlar ve konumlar momentum denkleminde ve başka bir entegrasyondan hesaplanmaktadır. Bu hesaplama değerlerden, oluşan yeni bölgesel hacimler ve gerilme oranları hesaplanabilmektedir.

Bir malzeme modelinin enerji denklemiyle birlikte kullanılmasıyla bölgesel basınçlar, gerilimler ve enerjiler hesaplanabilmektedir ve bir sonraki entegrasyon döngüsünün başlangıcında kullanılmak üzere kuvvet değeri girdileri sağlanmaktadır.

Değişkenlerin Merkezlenmesi

Lagrange dörtgen ağ dizgisinde, konumlar (x,y) , malzeme hızları $(\dot{x}, \dot{y})$ ve malzeme ivmeleri $(\ddot{x}, \ddot{y})$ aynı zamanda ızgara noktaları veya düğümler olarak da adlandırılan bölge köşelerinde tanımlanmaktadır. Basınç, yoğunluk, iç enerji, gerilim saptırıcılar, gerinim saptırıcılar ve sıcaklık gibi malzemenin durumunu tanımlayan malzeme miktarları, Şekil 41'de gösterildiği gibi bölge merkezlerinde tanımlanmaktadır.



Şekil 38: Değişkenlerin Konumunu Gösteren Şema [28]

Ağ dizgileri noktaları, bu noktalarda tanımlanan hızlarla hareket etmektedir ve bölgeler, düğümlerin hareketine göre yeniden oluşmaktadır. Bölgenin kütlesi de bölge merkezinde tanımlanmaktadır. Her bölgenin kütlesinin dörtte biri, bölgenin her bir düğümü ile ilişkilendirilebilmektedir. Böylece bir düğümle ilişkili kütle, düğümü çevreleyen dört bölgenin kütlelerinin toplamının dörtte biri kadar olmaktadır.

Lagrangian alt ağ dizgilerindeki gerçekleşen ağ deformasyonu genelde şok etkisi, büyük gerilim alanları vb. nedenler ile oluşmamaktadır. Örneğin, eksenel simetrideki geometrik etkiler çok büyük ağ deformasyonlarına yol açabilmektedir. Bunun nedeni, malzemenin simetri eksenine doğru hareket etmesi şeklindeyse, eksene dik olan mesafeler, kütlenin korunumu nedeniyle, ağın eksenden uzaklığının karesiyle ters orantılı olarak değişirken, eksene paralel mesafeler değişmeden kalmaktadır. Bu şekilde, başlangıçta kare olan Lagrange ağları oldukça genişleyebilmektedir.

