

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RAMOR 500 VE RAMOR 550 ZİRH ÇELİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Muhammed Latif BEKÇİ

OCAK 2019
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RAMOR 500 VE RAMOR 550 ZIRH ÇELİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Muhammed Latif BEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 12 / 2018

Tezin Savunma Tarihi : 08 / 01 / 2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer Necati CORA

İkinci Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Sami GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Muhammed Latif BEKÇİ tarafından hazırlanan

**RAMOR 500 VE RAMOR 550 ZİRH ÇELİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, enstitü yönetim kurulunun 25/12/2018 gün ve 1784 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

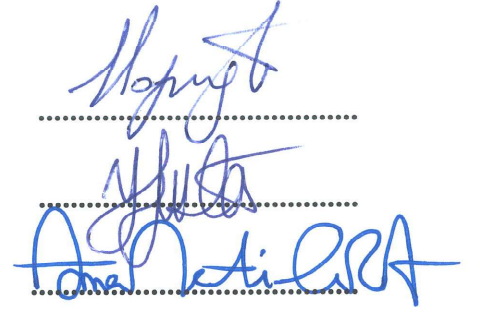
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç. Dr. Yusuf USTA

Üye : Doç. Dr. Ömer Necati CORA



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Türkiye'nin özel jeopolitik konumu ve bölgede üstlendiği önemli rolü nedeniyle savunma sanayindeki gelişmeleri takip etmesi ve ihtiyaçlarını millî teknolojiler ile karşılaması büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışması ile, ülkemizin savunma sanayiinde gösterdiği atılımlara katkıda bulunmak amacıyla balistik koruma amaçlı olarak kullanılan ve yurt dışından ithal edilen zırh çeliklerinin performanslarının belirlenmesini amaçlanmıştır. Bu sayede hem ilgili literatüre katkıda bulunulması hem de bundan sonra yapılacak çalışmalara bir referans ve örnek teşkil etmesi ümit edilmektedir.

Yüksek lisans çalışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, ilmî ve ahlakî değerlerinden istifade ettiğim tez danışmanım Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Sami GÜLER'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmada malzeme desteği sağlayan SSAB Türkiye'den Hasan AYDEMİR'e, test numunelerinin hazırlanması ve nakliyesi için gerekli desteği sağlayan Çolakoğlu Makina'dan Hakan MORADA'ya, balistik deneylerin yürütülmesi için gerekli yardımları sağlayan Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş'den Ercan USTA ve Hakan CANPOLAT'a teşekkür ederim. Çalışmanın başından sonuna kadar hiçbir konuda desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Doğan ACAR'a minnettarım. Beni birçok konuda cesaretlendiren, tecrübe ve tavsiyelerinden yararlandığım Prof. Dr. Mehmet Fikret BALTA ve Arş. Gör. Samet KARAHÜSEYİN'e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemi sağlayan, beni her yönden iyi bir insan olarak yetiştirmem için çabalarını esirgemeyen, destekleyen ve topluma faydalı olma düşüncesini kazandıran değerli annem ve babam, Selma ve Bahri BEKÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca değerli kardeşlerime manevi desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Muhammed Latif BEKÇİ

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Ramor 500 ve Ramor 550 Zırh Çeliklerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ömer Necati CORA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08/01/2019

Muhammed Latif BEKÇİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Balistik Kavramlar.....	1
1.2.1. Balistik Standartlar	2
1.2.2. Balistik Limit.....	5
1.2.3. Hasar Mekanizmaları.....	6
1.2.4. Eğik atış	8
1.2.5. Tabakalı Kompozit Plaka	13
1.3. Mühimmat Tipleri.....	14
1.3.1. Kinetik Enerji Mühimmatları	14
1.3.1.1. Hafif Silah Mühimmatı.....	14
1.3.1.2. Yüksek Kalibre Kinetik Enerji Mühimmatı	17
1.3.2. Kimyasal Mühimmatlar	19
1.3.2.1. Yüksek İnfilaklı (HE) Mühimmat	19
1.3.2.2. Yüksek Patlayıcılı Anti-Tank (HEAT) Mühimmatı.....	20
1.3.2.3. Patlayıcı ile Şekillendirilen Mühimmat (EFP)	21
1.3.2.4. Tahrip Plastik (HESH/HEP) Mühimmatı	21
1.4. Zırh Malzemeleri	22
1.4.1. Metalik Zırhlar.....	23
1.4.1.1. Alüminyum Alaşım Zırh.....	24
1.4.1.2. Titanyum Alaşım Zırh	25
1.4.1.3. Magnezyum Alaşım Zırh.....	27

1.4.1.4.	Çelik Zırh.....	27
1.4.1.4.a.	ARMOX Zırh Çelikleri.....	30
1.4.1.4.b.	Ramor Zırh Çelikleri.....	31
1.5.	Literatür İncelemesi	35
1.6.	Tezin Amacı ve Kapsamı.....	37
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
2.1.	Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	38
2.1.1.	Zırh Malzemeleri için Çekme Testi	38
2.1.2.	Sertlik Ölçümleri	41
2.2.	Balistik Testler	42
2.3.	Sayısal Analizler	59
2.3.1.	Malzeme Modeli	60
2.3.1.1.	Johnson-Cook Malzeme Modeli Sabitlerinin Tanımlanması	61
2.3.2.	Hedef Plaka ve Merminin Modellenmesi	61
2.3.3.	Sayısal Analizlerin Sonuçları	64
3.	SONUÇLAR.....	70
4.	ÖNERİLER.....	72
5.	KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

RAMOR 500 VE RAMOR 550 ZIRH ÇELİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Muhammed Latif BEKÇİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer Necati CORA

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Sami GÜLER

2019, 81 Sayfa

Bu çalışmada Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının 7.62 mm mermiler karşısındaki balistik performansı farklı koşullarda deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmını monolitik plaka, çift tabakalı kompozit plaka ve eğik plaka yapılarının incelenmesi oluşturmaktadır. Toplamda 7 adet balistik test gerçekleştirilmiştir. Monolitik plaka yapısı için 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 kullanıldı. Gerçekleştirilen testlerde plakaların delindiği ve yapraklanma türü hasar mekanizmasına maruz kaldığı gözlenmiştir. Çift tabakalı kompozit plaka testlerinde ise 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 iki farklı sıralama şeklinde katmanlandırılmıştır. Ramor 550'nin önde Ramor 500'ün arkada kullanıldığı yapı, alternatif sıralamalı yapıya nazaran daha yüksek balistik dayanım sergilemiş ve ana hasar mekanizmalarının tıkaç oluşumu ve şişme olarak tespit edilmiştir. Eğik plakalı testler için ise 4.5 mm kalınlığına sahip Ramor 500 zırh çeliği; 0°, 30° ve 60° eğimde teste tabi tutuldu. Plakaların balistik dayanımının artan eğim açısı ile arttığı sonucu elde edilmiştir. Sayısal analiz kısmında ise eğik plaka yapıları incelendi. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinin test sonuçlarını yüksek oranda yansıttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Balistik nüfuz, monolitik plaka, çift tabakalı kompozit plaka,

eğik plaka, 7.62 mermi

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF BALLISTIC PERFORMANCES OF RAMOR 500 AND RAMOR
550 ARMOR STEELS

Muhammed Latif BEKÇI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer Necati CORA
Co-Advisor: Asst.Prof. Mehmet Sami GÜLER
2019, 81 Pages

In this study, the ballistic performance of Ramor 500 and Ramor 550 armour steel plates were experimentally and numerically investigated at various conditions against 7.62 mm bullets. The experimental parts of the study consist of the monolithic plate, double-layered composite plate and oblique plate. In total, seven ballistic impact tests were conducted. For the monolithic plates, 6.7 mm thick Ramor 500 and 6.2 mm thick Ramor 550 were used. Plates were perforated and the failure mechanism of petaling observed. For the double-layered composite plates, 6.7 mm thick Ramor 500 and 6.2 mm thick Ramor 550 were layered at two different ordering structure and they were impacted. It was found that Ramor 550 as a facing plate and Ramor 500 as a backing plate exhibit better resistance than the configuration of the opposite layering order and the main failure modes of the targets were plugging and bulging. For the oblique plates, 4.5 mm thick Ramor 500 armour steels were impacted at 0°, 30° and 60° obliquity. The result showed that ballistic resistance of plates increased as the impact angle was increased. In the numerical analysis, the oblique plates were examined. The results of finite element analyses reflected the experimental results with high accuracy.

Keywords: Ballistic penetration, monolithic plate, double-layered composite plate, oblique impact, 7.62 bullet

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Balistik test düzeneği [5]	4
Şekil 1.2.	Farklı uygulamalar için kısmi ve tam nüfuz durumları [7].....	5
Şekil 1.3.	Balistik limit eğrisi [10]	6
Şekil 1.4.	Farklı balistik çarpma durumlarında yaygın hasar mekanizmaları [12]	7
Şekil 1.5.	Dik çarpma hali.....	8
Şekil 1.6.	Eğik çarpma hali	9
Şekil 1.7.	Dik ve eğik plakaların kesit görünümü.....	9
Şekil 1.8.	Otokar Cobra ZPT [27]	11
Şekil 1.9.	Casspir mayına dayanıklı ZPT [28]	11
Şekil 1.10.	Casspir mayına dayanıklı ZPT V-form taban yapısı [10].....	12
Şekil 1.11.	Patlama sonrası oluşan basınç dalgası yollarını gösteren farklı ZPT taban konseptleri: (a) Düz taban (b) V-form taban (c) Patlama bacası konsepti [10]	12
Şekil 1.12.	Balistik testlerde kullanılan plaka durumları a) Monolitik plaka, b) Çift tabakalı plaka, c) Çift tabakalı kompozit plaka, d) Boşluklu plaka.....	14
Şekil 1.13.	Hafif silah mühimmatları [35]	15
Şekil 1.14.	7.62x51 mm NATO (M80) Ball fişeğinin bölümleri [10]	15
Şekil 1.15.	7.62x51 mm NATO AP (solda) ve 7.62x51 mm NATO Ball (sağda) mermilerinin kesit görüntüleri [37].....	17
Şekil 1.16.	100 mm BM-8 APDS mühimmatının genel yapısı [39]	17
Şekil 1.17.	115 mm BM-6 APFSDS mermisinin genel yapısı [39].....	18
Şekil 1.18.	APFSDS mermisinin namluyu terk edişi ile sabotların ayrılması [40].....	18
Şekil 1.19.	MSM Group 155 mm HE ER-HB tipi Yüksek İnfılaklı Mühimmat [42] ...	19
Şekil 1.20.	Yüksek patlayıcılı anti-tank mühimmat şematik gösterimi [43].....	20
Şekil 1.21.	Patlama sonrası konik metal astarın jete dönüşmesi [45]	20
Şekil 1.22.	Patlayıcı ile şekillendirilen mermi ve oluşum safhası [46]	21
Şekil 1.23.	Tahrip plastik (HESH/HEP) mühimmatının şematik gösterimi [2].....	22
Şekil 1. 24.	HESH/HEP mühimmatının hedefe çarpma sonrası zırh plakasında oluşturduğu hasar durumu [47].....	22
Şekil 1.25.	Zırh uygulamalarında kullanılan metallerin sınıflandırılması [10].....	23
Şekil 1.26.	Chieftain MBT Ana Muharebe Tankı [49]	24

Şekil 1.27.	M113 Zırhlı Personel Taşıyıcı [50].....	25
Şekil 1.28.	M2 Bradley Zırhlı Muharebe Aracı [53]	26
Şekil 1.29.	Monolitik zırh çeliğinin zırh delici mermi arasında ki sertlik-nüfuz direnci ilişkisi [61]	28
Şekil 1.30.	10 mm kalınlığındaki Bisalloy® zırh çeliği plaka sertliğinin balistik limit hızı üzerindeki etkisi [62]	29
Şekil 1.31.	Bir kısım çelik malzemenin çekme dayanımı-balistik limit ilişkisi [64].....	30
Şekil 1.32.	50CrV4 yay çeliğinin (60 HRC) balistik test sonrası görüntüsü [66].....	30
Şekil 1.33.	SSAB’de Armox çelik plakalarının üretim hattı [67]	31
Şekil 1.34.	Ramor zırh çeliklerinin araç üzerinde kullanımı [68].....	33
Şekil 1.35.	Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliğinin balistik koruma kütlesi ile balistik tehdide karşı koruma için tavsiye edilen zırh kütlesi [75]	35
Şekil 2.1.	Çekme test numunesi	38
Şekil 2.2.	Tel erozyon kesim makinası (a) ve çekme testi numunelerinin kesimi (b) .	39
Şekil 2.3.	Instron 3382 çekme cihazı	39
Şekil 2.4.	Çekme testi sonrası kopan numuneler	40
Şekil 2.5.	Ramor 500 ve Ramor 550 için mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	40
Şekil 2.6.	METTEST-HT sertlik ölçüm cihazı	41
Şekil 2.7.	Balistik deneylerde kullanılan zırh çeliği plakaları	44
Şekil 2.8.	Hedef tutucu aparat	45
Şekil 2.9.	Otokar Balistik Test Laboratuvarı [104].....	45
Şekil 2.10.	Otokar Balistik Test Laboratuvarının şematik gösterimi.....	46
Şekil 2.11.	Balistik testlerde kullanılan 7.62x51 mm NATO AP (solda) ve 7.62x51 mm NATO Ball (sağda) fişekleri.....	46
Şekil 2.12.	0° derece testte kullanılan plaka ve hedef tutucu aparatın görünümü	48
Şekil 2.13.	1 no’lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri	48
Şekil 2.14.	60° açıda gerçekleştirilen testte hedef plaka ve tutucu aparatın görünümü. 49	
Şekil 2.15.	2 no’lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri	50
Şekil 2.16.	30° açılı test öncesi lazer ile plaka üzerinde hedef işaretleme.....	50
Şekil 2.17.	3 no’lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri	51
Şekil 2.18.	5 no’lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri	52
Şekil 2.19.	6 no’lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri	53

Şekil 2.20.	7-1 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri.....	54
Şekil 2.21.	7-2 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri.....	55
Şekil 2.22.	8-1 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri.....	57
Şekil 2.23.	8-2 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri.....	58
Şekil 2.24.	Kırılan mermi çekirdekleri: (a)7 no'lu test-ikinci atış, (b) 8 no'lu test-ikinci atış.....	59
Şekil 2.25.	Ankastre girişin sonlu elemanlara bölünmesi	60
Şekil 2.26.	7.62x51 mm NATO Ball mermisinin kesit görüntüsü.....	63
Şekil 2.27.	Modelin ağ örgülü gösterimi.....	63
Şekil 2.28.	1 no'lu plakanın (0° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değiştirme değeri.....	64
Şekil 2.29.	1 no'lu plakanın ön ve arka yüzeylerinde oluşan delik detayının (a) sayısal analiz, (b) test sonucu görüntüleri	65
Şekil 2.30.	2 no'lu plakanın (60° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değiştirme değeri.....	66
Şekil 2.31.	2 no'lu plakanın mermi ile etkileşime girdiği bölgenin ön ve arka yüzeylerinin (a) sayısal analiz, (b) test sonucu görüntüleri	67
Şekil 2.32.	3 no'lu plakanın (30° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değiştirme değeri.....	68
Şekil 2.33.	3 no'lu plakanın ön yüzeyinde çöküntü, arka yüzeyinde ise oluşturduğu şişmenin (a) sayısal analiz ve (b) test sonucu görüntüleri	69

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	EN 1522/1523 koruma seviyelerini test etmekte kullanılan mühimmatlar [3]	3
Tablo 1.2.	FB6 ve FB7 koruma seviyelerine göre balistik test özellikleri [4]	4
Tablo 1.3.	Ramor zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (% max ağırlık) [69-74]..	32
Tablo 1.4.	Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [69-74]	33
Tablo 1.5.	Ramor 500 ve Ramor 550 için bazı balistik standartlara göre plaka kalınlığı önerisi ve koruma seviyeleri [68]	34
Tablo 2.1.	Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin mekanik sonuçları	41
Tablo 2.2.	Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin sertlik ölçümleri	42
Tablo 2.3.	Balistik test planı.....	43
Tablo 2.4.	Balistik test sonuçları	47
Tablo 2.5.	Ramor 500 ve Armox 500T için EN 1522/1523 standardına göre ilgili koruma seviyeleri ve önerilen plaka kalınlıkları.....	62
Tablo 2.6.	Sayısal analizlerde kullanılan malzemeler için Johnson-Cook dayanım ve hasar modeli sabitleri	62
Tablo 2.7.	Modelde kullanılan parçaların ağ örülen eleman sayıları	63

KISALTMALAR DİZİNİ

AP	Armor Piercing (Zırh delici)
APDS	Armor Piercing Discarding Sabot (Sabot Ayırıcı Zırh Delici)
APFSDS	Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot (Sabot Ayırıcı Kuyruk Dengeli Zırh Delici)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
EN	European Norm (Avrupa Normu)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
EFP	Explosively Formed Penetrator (Patlayıcı ile Şekillendirilen Mühimmat)
FB	Fullback (Savunma)
FRA	Federal Railroad Administration (Federal Demiryolları İdaresi)
FSG	For Shotguns (Av Tüfekleri için)
HBW	Hardness of Brinell W (Brinell W Sertliği)
HE	High Explosive (Yüksek İnfilaklı)
HEAT	High Explosive Anti Tank (Yüksek Patlayıcı Anti-Tank)
HEP	High Explosive Plastic (Yüksek Tahrip Plastik Mühimmat)
HESH	High-Explosive Squash Head (Yüksek Patlayıcı Başlıklı Mühimmat)
HRC	Hardness of Rockwell C (Rockwell C Sertliği)
MBT	Main Battle Tank (Ana Muharebe Tankı)
MIL-SAMIT	Military Small Arms Multiple Impact Standard (Askeri Hafif Mühimmat Çoklu Çarpma Standardı)
NATO	North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NIJ	National Institute of Justice (Ulusal Adalet Enstitüsü)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SD	State Department (Dışişleri Bakanlığı)
SSAB	Svenskt Stål Aktiebolag (İsveç Çelik Şirketi)
UL	Underwriters Laboratory (Sigortacılar Laboratuvarı)
ZPT	Zırhlı Personel Taşıyıcı
V ₅₀	Balistik limit hız
ρ	Yoğunluk
σ	Akma gerilmesi

A	Başlangıç akma gerilmesi
B	Pekleşme modülü
n	Pekleşme katsayısı
ϵ_p	Eşdeğer plastik birim şekil değişimi
C	Birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti
m	Isıl yumuşama katsayısı
$\dot{\epsilon}_p$	Eşdeğer plastik birim şekil değiştirme hızı
$\dot{\epsilon}_0$	Referans birim şekil değiştirme hızı
\dot{T}	Homolog sıcaklık
T_m	Ergime sıcaklığı
T_0	Geçiş sıcaklığı
ϵ_f	Kopma birim şekil değiştirmesi
D1, ..., D5	Hasar sabitleri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Savunma sanayinin gelişmişliği, ülke güvenliği için kritik önem arz etmektedir. Diğer teknolojik ürünler gibi savunma sektörü de dinamik bir yapıya sahiptir. Bu sahadaki gelişmeler ne kadar yakından takip edilir ve uygulamada yer bulursa ülkenin savunma gücü o kadar yüksek olur. Ayrıca, savunma sanayinde yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçların günlük yaşantımıza birçok yenilikçi ürün olarak katkısı da olmaktadır. Savunma sanayii alanında yapılan araştırmaların geniş uygulama sahası bulması birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir.

Zaman içinde gelişen silah sistemleri, beraberinde daha iyi korunabilme problemini meydana getirmiştir. Bu problemi aşmak için zırhlanma ihtiyacı doğmuştur. Zırh malzemeleri ise sivil ve askeri sahada savunma seviyesini artırmak için kullanılan en önemli bileşenlerdir. Bu malzemelerin temel maksadı zırhlanan yapıyı dış tehditlerden korumaktır. Zırh malzemesi seçerken bazı unsurlar dikkate alınmaktadır. Bu unsurların en önemlisi dayanıklılıktır. Sonra, sırasıyla kolay şekil verilebilirlik, maliyet ve ağırlık dikkate alınan diğer unsurlardır.

Geçmişten günümüze kadar bu sorumluluğu bahsi geçen özellikleri bünyesinde bulunduran zırh çelikleri yürütmüştür. Üretilen zırh malzemeleri, performanslarının belirlenmesi için bazı standartlara göre testlere tabi tutulmaktadır. Ancak, bilimsel araştırma amacıyla standartlar dışına çıkılarak yapılan çalışmalar da mevcuttur ve konuya farklı bir bakış açısı getirmektedir.

1.2. Balistik Kavramlar

Balistik, merminin yörüngesi, enerjisi, hızı, menzili, nüfuz etmesi ve buna benzer özellikleri ile ilgilenen bilim dalıdır. İç balistik, kapsülün ateşlenmesi ile barutun yanması ve merminin namlu boyunca ilerledikçe oluşan iç basınç ve tork ile ilgilenir. Dış balistik, merminin silah namlusunu terk ettikten sonraki uçuşunu kapsar. Hedef balistiği ise merminin hedef ile etkileşimini konu alır [1].

1.2.1. Balistik Standartlar

Literatürde 13 farklı uluslararası hafif silah balistik standardı vardır. Bu standartların amacı, balistik tehdit karşısında minimum performans gereksinimlerini belirlemektir. Standartların içeriğini test koşulları, kullanılan araçlar ve değerlendirilen sonuçlar oluşturmaktadır. Bu standartlar [2]:

- ASTM Balistik Standardı
- Avustralya Balistik Standardı
- İngiliz Balistik Standardı
- Brunswick Balistik Standardı
- Kanada Balistik Standardı
- Avrupa EN 1063 Standardı
- Avrupa EN 1522/1523 Standardı
- Alman DIN Balistik Standardı
- MIL-SAMIT Balistik Standardı
- Dışişleri Bakanlığı (SD) Balistik Standardı
- Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) Balistik Standardı
- Sigortacılar Laboratuvarı UL 752 Balistik Standardı
- Federal Demiryolları İdaresi (FRA) Balistik Standardı

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen balistik testlerde Avrupa EN 1522/1523 standardı göz önüne alınmıştır. Bu standart pencere, kapı, panjur ve kepenklerin balistik tehditler karşısında sağlaması gereken özellikleri ve sınıflandırılmaları kapsar. Bu kapsamda toplam 8 farklı koruma seviyesi mevcuttur. Bu seviyeler, FB1, FB2, FB3, FB4, FB5, FB6, FB7 ve FSG'dir. FB1-FB4 arası koruma seviyeleri tabanca mühimmatına karşı, FB5-FB7 koruma seviyeleri tüfek mühimmatına ve FSG koruma seviyesinde ise saçma tipi av tüfeği mühimmatına karşı korumada dikkate alınır (Tablo 1.1). Balistik testte kullanılan mühimmatların enerjisi artan koruma seviyesi ile artmaktadır. Dolayısıyla artan koruma seviyesine karşılık, zırh kalınlığının da artması gerekmektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen balistik testlerde değerlendirilen koruma seviyeleri FB6 ve FB7'ye karşılık gelmektedir.

Tablo 1.1. EN 1522/1523 koruma seviyelerini test etmekte kullanılan mühimmatlar [3]

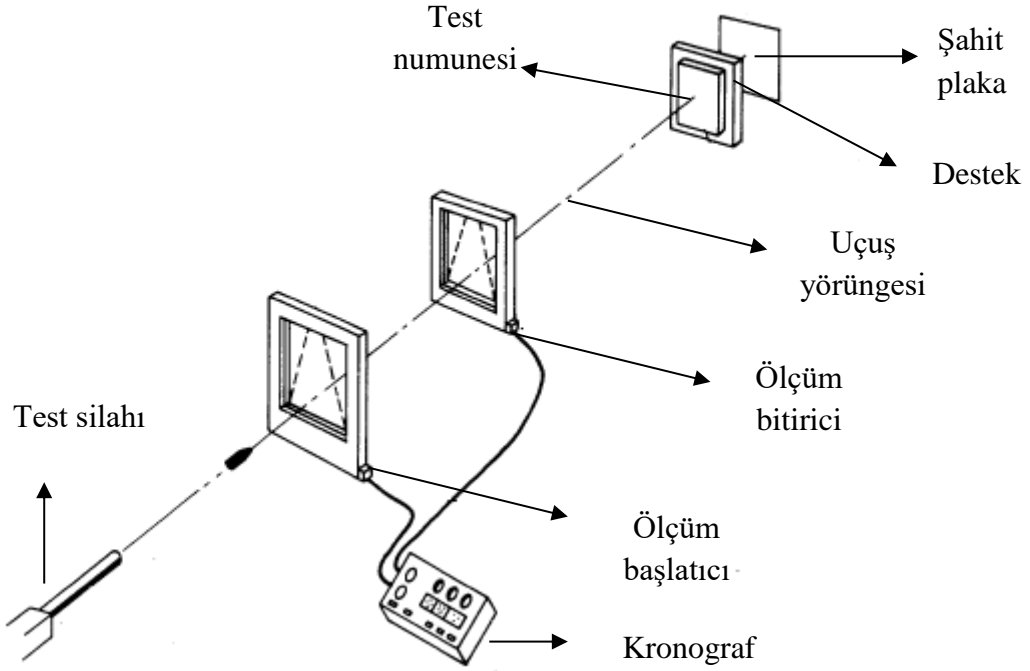
EN 1522/1523 Koruma Seviyesi	FB1	FB2	FB3	FB4	FB5	FB6	FB7	FSG
	.22 LR	9 mm Luger	.357 Magnum	.44 Magnum	5.56x45 NATO AP	7.62x51 NATO Ball	7.62x51 NATO AP	12 kalibre
Mühimmat Tipi								

Tablo 1.2’de FB6 ve FB7 koruma seviyelerine ait test koşulları yer almaktadır. Bu şartlar çerçevesinde teste tâbi tutulan hedef malzemesinin başarılı ya da başarısız olduğu Tablo 1.2’de belirtildiği üzere hedef malzemesinin 500 mm arkasında bulunan 0.020 mm kalınlığındaki alüminyum şahit plakanın durumu ile belirlenir. Eğer atış sonrası şahit plaka üzerinde delinme gerçekleşirse hedef malzeme başarısız, delinme gerçekleşmez ise hedef malzeme başarılı olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 1.1’de örnek balistik test düzeneği yer almaktadır. Bu düzenek, merminin harekete geçirildiği ateşleme sistemi, ateşleme sistemi ile hedef plaka arasında yer alan ve mermi hızını ölçmeye yarayan kronograf, test numunesi ve şahit plakadan oluşmaktadır.

Tablo 1.2. FB6 ve FB7 koruma seviyelerine göre balistik test özellikleri [4]

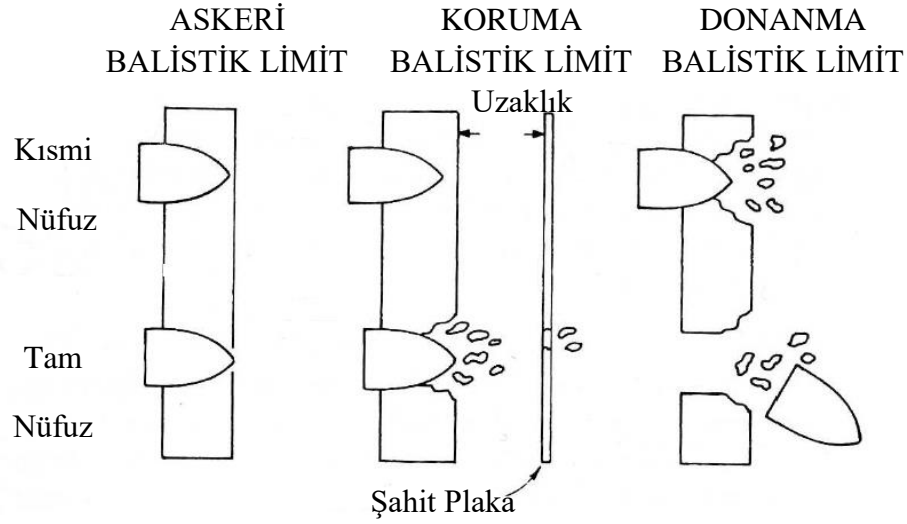
Test koşulları	Koruma seviyesi	
	FB6	FB7
Mermi tipi	7.62x51 mm NATO (M80)	7.62x51 mm NATO AP
Hız aralığı	820-840 m/s	810-830 m/s
Atış sayısı	3 atış	3 atış
Atış aralığı	120 mm üçgeni	120 mm üçgeni
Hız ölçüm mesafesi	Hedefden 2.5 metre	Hedefden 2.5 metre
Hedef mesafesi	10 m	10 m
Numune boyutu	500 mm x 500 mm	500 mm x 500 mm
Şahit plaka	0.020 mm Al folyo	0.020 mm Al folyo
Şahit plaka mesafesi	500 mm	500 mm
Parçacık yakalama kutusu	440 mm x 440 mm	440 mm x 440mm
Test sıcaklığı	12.7-23.8 °C	12.7-23.8 °C



Şekil 1.1. Balistik test düzeneği [5]

1.2.2. Balistik Limit

Nüfuz etme (penetrasyon), merminin hedefi tam olarak geçişini tamamlamadan çarpması ve genelde gömülerek krater oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Diğer yandan delinme (perforasyon), hedefin mermi tarafından delinmesi olarak ifade edilmekte ve tam nüfuz olarak da adlandırılmaktadır [6]. Sekme terimi ise merminin hedeften geri sıçramasını ya da hedef yüzeyine çarparak eğik bir nüfuz yolu izleyerek delmeden ayrılması olarak tanımlanmaktadır [7]. Kısmî ve tam nüfuz durumları Şekil 1.2’de belirtilmiştir.



Şekil 1.2. Farklı uygulamalar için kısmi ve tam nüfuz durumları [7]

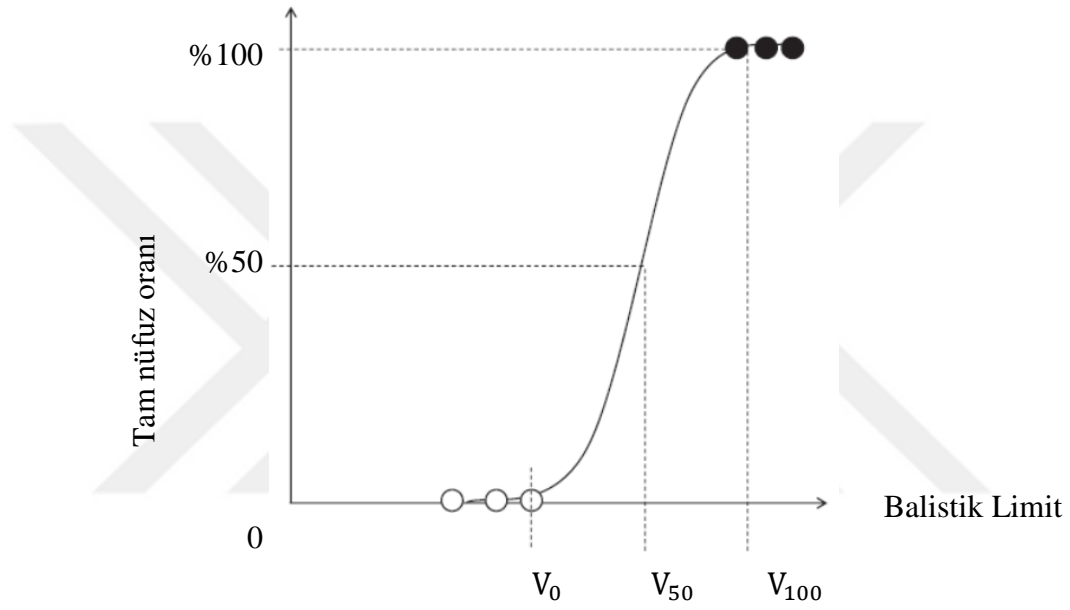
Tam nüfuz;

- Merminin hedeften ışık huzmesi geçecek kadar delik oluşturması;
- Hedefin arkasına belirli bir mesafe ile yerleştirilen şahit plakanın kopan parçacıklar ile delinmesi;
- Merminin hedefi delip geçmesi

olarak üç farklı durum halinde ifade edilmektedir.

Balistik limit hızı V_{BL} , merminin hedefi tam nüfuz edemeyeceği hızdır. Balistik limit hızı, V_{50} ile gösterilir ve merminin zırh malzemesine 0° açı ile çarpmasıyla %50 oranında tam nüfuz edebileceğini ifade eder (Şekil 1.3). Bu hızın bilinmesi için istatistiksel

hesaplama kullanılmaktadır. Tam nüfuz oluşturan en düşük hızlar ile kısmi nüfuz oluşturan en yüksek hızların ortalama değeri hesaplanarak balistik limit hız değeri elde edilir. Tam nüfuz oluşturan en düşük hız ortalaması ile kısmi nüfuz oluşturan en yüksek hız ortalamalarının değerleri ne kadar yakın ise doğruluk payı o derece yüksek olur [8]. Ayrıca bu hız değerinin hesaplanabilmesi için en az iki kısmî ve en az iki tam nüfuz hızları olarak toplamda dört adet hız değerinin elde edilmesi gerekmektedir. En az dört adet hız değeri yeterli olmasına rağmen genelde altılı ve onlu olanları tercih edilmektedir [9].



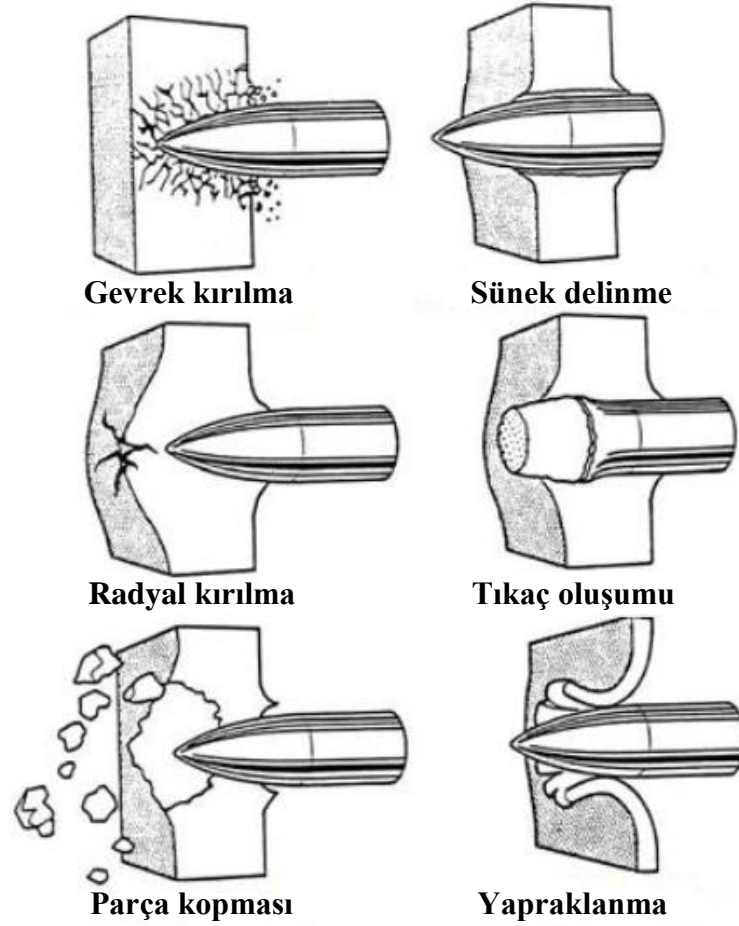
Şekil 1.3. Balistik limit eğrisi [10]

1.2.3. Hasar Mekanizmaları

Balistik literatüründe, hedef malzemeler kalınlıklarına göre yarı sonsuz, orta ve ince olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar. Yarı sonsuz kalınlık, hedefin yan ve arka yüzeylerinin nüfuz sürecinden etkilenmeyecek kadar büyük olduğu kalınlıktır. Orta kalınlık, mermiyi durduracak kadar yeterli fakat hedefin arka yüzeyini hasardan koruyamayan kalınlıktır. İnce kalınlık ise merminin durdurulmadığı ve hedefin delindiği kalınlık olarak tanımlanır [11].

Hedef malzemenin mermi ile etkileşimi sonrası meydana gelen hasarlar, malzeme cinsi, mermi hızı, çarpma açısı, mermi ve hedefin göreceli boyutları gibi farklı değişkenlere göre şekillenir. İnce ya da orta kalınlıktaki hedefler için yaygın olarak rastlanan hasar mekanizmaları Backman [12] tarafından ortaya konmuş olup Şekil 1.4'te

gösterilmiştir. Bu hasar mekanizmalarının meydana gelmesinde bahsi geçen sebeplerden yalnız bir tanesi etkin olabileceği gibi birden fazlası da gerçekleşebilir [13].



Şekil 1.4. Farklı balistik çarpma durumlarında yaygın hasar mekanizmaları [12]

Gevrek kırılma (Brittle fracture): Zayıf ve düşük yoğunluklu hedef malzemelerinde gevrek kırılma meydana gelir [13, 14].

Sünek delinme (Ductile hole growth): Bu tip hasar, çok sünek ve orta kalınlıktaki malzemelerin karakteristiğidir [14]. Çarpma esnasında gerilme, merminin uç kısmında yoğunlaşır ve delinme ekseninde yoğun bir deformasyon meydana gelir. Hedef malzeme radyal ekseninde akar ve mermi ilerledikçe delik büyür [15-19].

Radyal kırılma (Radial fracture): Gevrek malzemelerde meydana gelen bir hasar türü olup, hedef plaka merminin çarptığı noktadan kırılmaya başlar [16-19].

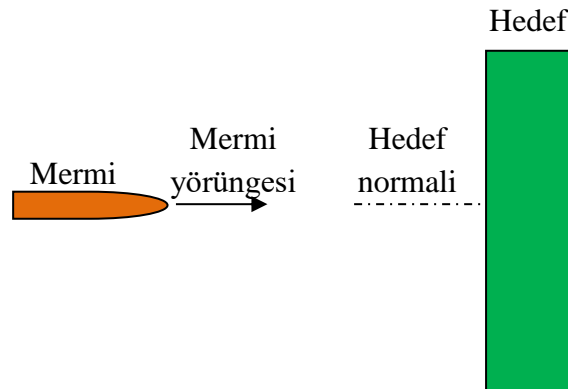
Tıkaç oluşumu (Plugging): Mermi hedefe çarptıktan sonra hedef plakanın bir kısmını tıkaç şeklinde arka yüzeyine doğru iterek tıkaç oluşturur. Bu hasar tipi, adyabatik kayma mekanizması ile gerçekleşir. Mermi burnunun yarı küresel ya da köreltilmiş olduğu durumlarda oluşur. Tıkaç, genelde delik çapına yakın silindirik şekilde oluşmaktadır. Fakat bazı durumlarda kesik koni, fiçı ve ters fiçı şekillerinde de olabilmektedir. Daha çok hedef levhanın orta sertlik, orta kalınlık ve çarpmanın balistik limite yakın hız değerlerinde olduğu durumlarda görülmektedir [21-23].

Parça kopması (Fragmentation): Merminin çarpmasıyla oluşan şok dalgasının geri yansımaları sonucu levhanın arka yüzeyinde çekme gerilmesine sebep olması sonucunda meydana gelir. Yüksek sertlik ve orta kalınlıktaki malzemelerde gözlenir [20-22].

Yapraklanma (Petalling): Çarpma esnasında merminin ucunda oluşan yüksek gerilme bölgeleri plaka üzerinde ileri doğru eğilme momenti ve sonunda yıldız şeklinde bir çatlak oluşturur. Böylece delik çevresi boyunca dışa doğru açılan yapraklanma adı verilen bir hasar türü meydana gelir. İnce kalınlıktaki hedeflerde ve genelde balistik limite yakın hızlarda görülmektedir [21-23].

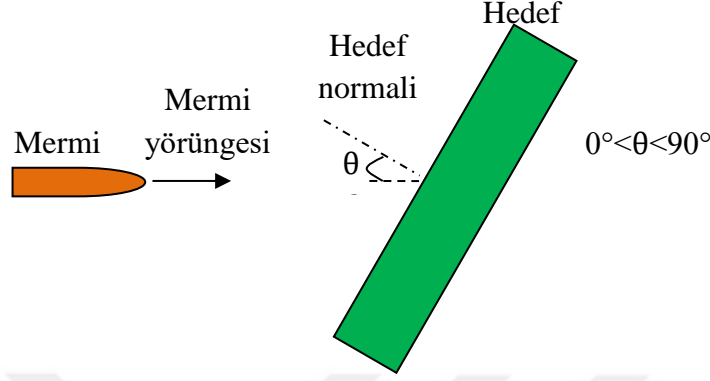
1.2.4. Eğik atış

Eğik çarpmayı tanımlamadan önce dik veya diğer adıyla ideal çarpmayı tanımlamak gerekmektedir. Dik çarpma, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi merminin ilerleme yörüngesi ile hedefin normali arasındaki açının sıfır olması halidir [24-25].



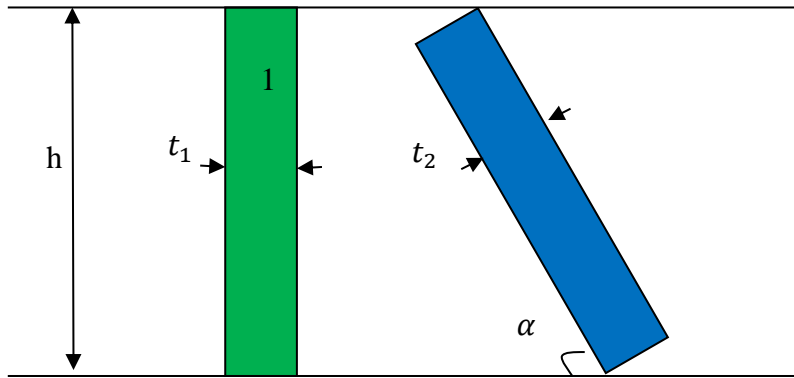
Şekil 1.5. Dik çarpma hali

Eğik çarpma ise mermi yörüngesi ile hedef normali arasındaki açının 0 ilâ 90 derece arasında olması halidir (Şekil 1.6). Bazen eğik hedef plaka olarak da adlandırılır. Ayrıca bu açı, NATO açısı olarak da tanımlanmaktadır [22].



Şekil 1.6. Eğik çarpma hali

Hedef plakasının mermi yörüngesine göre açılı yerleştirilmesi, merminin hedefe dik olarak çarpmasını engeller. Böylece, plaka normali ile mermi yörüngesi arasındaki açı arttıkça çarpma sonrası mermi hedeften sekme eğilimine girecektir ve kritik bir açıdan sonra hedefi sekerek terk edecektir. Bu nedenle, plakasının mermi yörüngesine göre açılı yerleştirilerek merminin hedeften sektirilmesi balistik dayanım açısından önemlidir. Bir diğer husus ise, çarpma açısının kritik sekme açısından düşük olmadığı durumlarda nasıl etki göstereceğidir. Bu durumun ise, kesit alan yoğunluk kavramıyla açıklanması gerekmektedir [26]. Kesit alan yoğunluğu, birim kesit alanın, yoğunluk ile çarpımıdır. Herhangi bir hedef plakasının doğrultusunun değiştirildiği zaman aynı alansal yoğunluğa sahip olmak için plakasının kalınlığının değiştirilmesi gerekir. Örneğin, Şekil 1.7'deki 1 ve 2 numaralı plakaların kesit alan yoğunluğu sırasıyla A_1 ve A_2 olsun. A_1 ve A_2 Eşitlik 1.1 ve 1.2'deki gibi tanımlanabilir.



Şekil 1.7. Dik ve eğik plakaların kesit görünümü

$$A_1 = h \cdot t_1 \cdot \rho_1 \quad (1.1)$$

$$A_2 = \frac{h}{\sin(\alpha)} \cdot t_2 \cdot \rho_2 \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.1 ve 1.2'deki:

t_1 ve t_2 : Plaka kalınlıkları

ρ_1 ve ρ_2 : Plaka malzemelerinin yoğunlukları

h : Kesit yüksekliği

Her iki plakanın aynı malzeme olduğunu varsayarsak ρ_1 ve ρ_2 iptal edilir. Bu plakaların aynı kesit alan yoğunluğuna sahip olmaları için A_1 ve A_2 'nin birbirlerine eşit olmaları gerekmektedir.

$$h \cdot t_1 = \frac{h}{\sin(\alpha)} \cdot t_2 \quad (1.3)$$

Eşitlik 1.3'ten plaka kalınlığı çekilecek olursa Eşitlik 1.4 elde edilir.

$$t_2 = t_1 \cdot \sin(\alpha) \quad (1.4)$$

Eşitlik 1.4'te görüldüğü üzere, her iki plaka için aynı kesit alan yoğunluğu sağlandığı zaman 2 numaralı plakanın kalınlığı daha az olmaktadır. Bu da eğik plaka kalınlığının dik yerleştirilen plaka kalınlığından daha düşük olacağı anlamına gelmektedir. Bir diğer ifadeyle, plaka kalınlıkları sabit tutulduğunda eğik olan plakanın kesit alan yoğunluğu daha fazla olacak ve mermiye karşı daha fazla balistik dayanım gösterecektir.

Eğik plakaların zırhlı araçlara uygulanması iki türde olmaktadır. Bunlar;

- Kinetik enerji mühimmatlarına karşı kabin içi personeli korumak için gövdenin açılı olarak tasarlanması;
- Yerin altında bulunan patlayıcılara karşı araç tabanının açılı olarak tasarlanmasıdır.

Şekil 1.8'de Otocar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. tarafından üretilen Cobra adlı ZPT gösterilmiştir. Bu araç, hem gövdede hem de tabanda eğik plaka uygulamasına güzel bir örnek teşkil etmektedir.

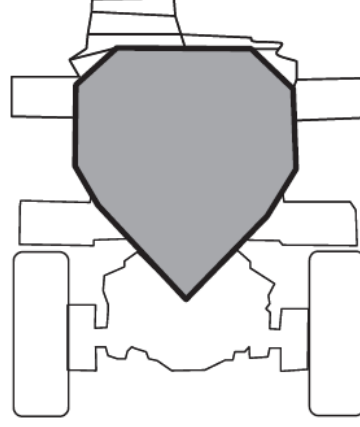


Şekil 1.8. Otokar Cobra ZPT [27]

Bir diğer eğik plaka uygulaması ise Şekil 1.19’da yer alan İngiliz BAE Systems tarafından üretilen Casspir mayına dayanıklı ZPT’dir. Personelin yer aldığı kabinin gövde kısmı küt bir şekilde tasarlanmış olmasına rağmen aracın tabanı gayet açılı bir şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1.10’da görülebileceği üzere bu araç V-form denilen yapıda tasarlanmıştır.

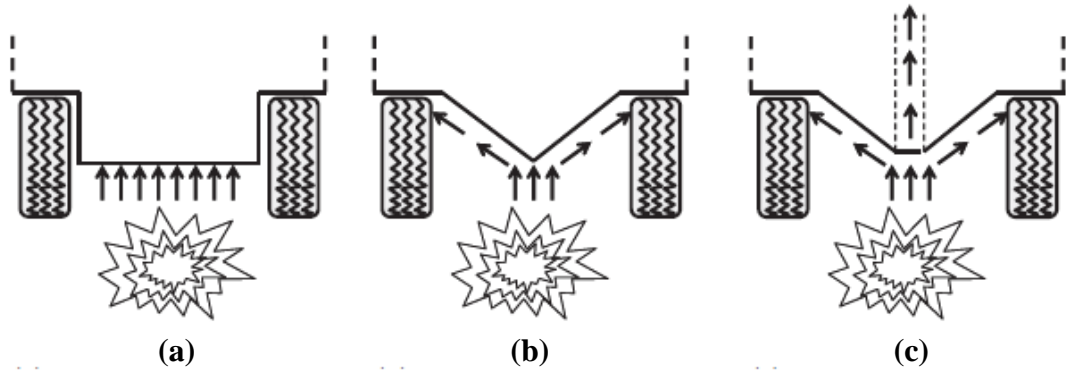


Şekil 1.9. Casspir mayına dayanıklı ZPT [28]



Şekil 1.10. Casspir mayına dayanıklı ZPT V-form taban yapısı [10]

Şekil 1.11-a'da ise düz tabanlı bir aracın altında bulunan patlayıcının patlaması sonrası oluşan basınç dalgasının yönü gösterilmiştir ve belirli bir alana hapsediği anlaşılabilmektedir. Şekil 1.11-b'de ise V-form yapısına sahip bir aracın altında patlayıcının etkisi resmedilmiştir. Görüldüğü üzere oluşan basıncın aracın yan taraflarına doğru yayıldığı ve belirli bir alana hapsediği anlaşılmaktadır. Şekil 1.11-c'de ise araç tabanında V-form yapısına ilaveten aracın orta bölümünde bulunan tabanından tavanına doğru uzanan patlama bacası yer almaktadır. Bu baca sayesinde patlama esnasında oluşan basıncın bir kısmının aracın tavanından dış ortama aktarılması amaçlanmıştır.



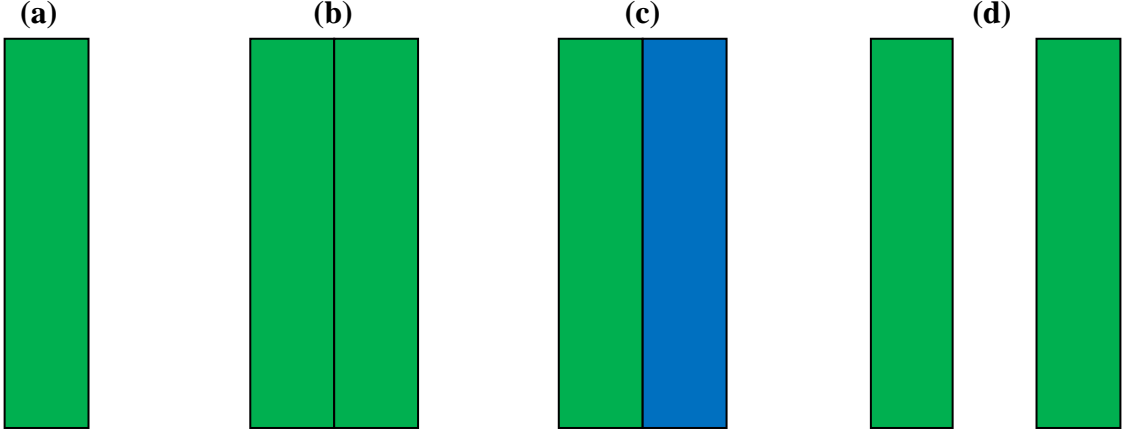
Şekil 1.11. Patlama sonrası oluşan basınç dalgası yollarını gösteren farklı ZPT taban konseptleri: (a) Düz taban (b) V-form taban (c) Patlama bacası konsepti [10]

Eğik plaka yapısının balistik dayanım bakımından birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları vardır. Bunlar:

- Zırhlı aracın iç ve kullanılabilir hacmini azaltır;
- Tasarım ve imalatı zordur;
- Kısıtlanan yaşam alanı mürettebatı daha hızlı yorar;
- Kabindeki yaşam alanı korunmak istenirse uzun ve geniş gövdesi olan bir araç ortaya çıkar.

1.2.5. Tabakalı Kompozit Plaka

Pasif zırh sistemlerinde, zırh plakaları uygulamaya göre farklı şekillerde sisteme entegre edilebilmektedir. Hangi yapının daha elverişli olduğu yapılan testler sonrasında anlaşılmaktadır. Bu yapılar genel olarak, monolitik (yekpare), tabakalı, tabakalı kompozit ve boşluklu plaka yapıları olarak sıralanabilir. Şekil 1.12’te bu dört yapı gösterilmektedir. Öncelikli olarak monolitik plaka yapısından bahsedilirse, bu yapı homojen tek bir malzemedir. Üretici tarafından teslim edilen belirli bir kalınlığa sahip zırh plakasıdır (Şekil 1.12-a). İkinci yapı, Şekil 1.12-b’de görülebileceği üzere tabakalı plaka yapısıdır. Bu yapı, zırh plakasını tek bir plaka olarak kullanmak yerine kalınlığı sabit tutarak iki veya ikiden fazla tabakalar halinde bitişik olarak bir plaka yapısı elde etmektir. Yapılan testler sonrasında plakaları tabakalandırmanın olumlu ya da olumsuz etkisi olup olmadığı sonucuna göre hareket edilir [29-31]. Üçüncü yapı, iki veya daha fazla farklı zırh plakalarının sabit kalınlıkta sıralanması ile oluşan tabakalı kompozit plaka yapısıdır (Şekil 1.12-c). Bu yapı içerisinde yer alan plakalara yapının balistik dayanıma etkisi göz önüne alınarak sıralama düzeni verilir. Son yapı ise boşluklu plaka yapısıdır (Şekil 1.12-d). Bu yapı tabakalı ve tabakalı kompozit yapılarına benzerdir. Temek fark plakalar arasında belirli mesafede boşluk olmasıdır. Bu boşluklar bazı uygulamalarda avantaj iken bazen dezavantaj olabilmektedir [32-34].



Şekil 1.12. Balistik testlerde kullanılan plaka durumları a) Monolitik plaka, b) Çift tabakalı plaka, c) Çift tabakalı kompozit plaka, d) Boşluklu plaka

1.3. Mühimmat Tipleri

Mühimmat, bir mermi ve ona hız veren bileşenler olarak tanımlanır. Askeri ve sivil sahada çok farklı türde mühimmat tipleri yer almaktadır. Bu tez kapsamında yaygın olarak kullanılanlar hakkında bilgi verilecektir.

1.3.1. Kinetik Enerji Mühimmatları

Kinetik enerji mühimmatları;

- Hafif Silah Mühimmatları
- Yüksek Kalibre Kinetik Enerji Mühimmatları (APDS, APFSDS)

olarak iki sınıfa ayrılır.

1.3.1.1. Hafif Silah Mühimmatı

Hafif silah mühimmatı tipik olarak merminin küçük kalibrede olduğu ve kullanılacak silah sisteminin bireyin fiziksel gücüyle taşınabilecek yapıda bulunması olarak karakterize edilmektedir. Mühimmatın kıyası yapılırken merminin çapı ve uzunluğu göz önüne alınır. Şekil 1.13'te farklı kalibrelerde hafif mühimmat tipleri gösterilmiştir.

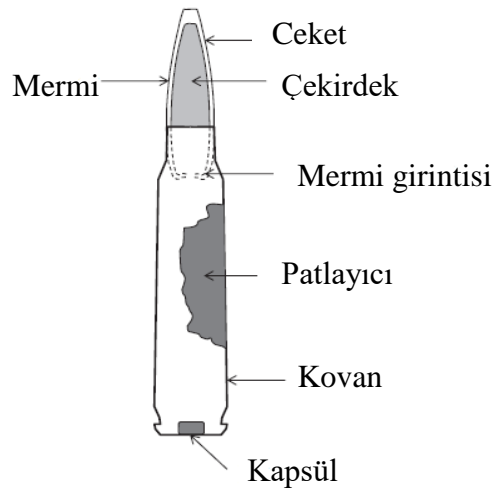


Şekil 1.13. Hafif silah mühimmatları [35]

Genel olarak hafif silah mühimmatları beş kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Kapsül
- Kovan
- Patlayıcı
- Herhangi bir yardımcı parça (örn. barut ambalajı)
- Mermi

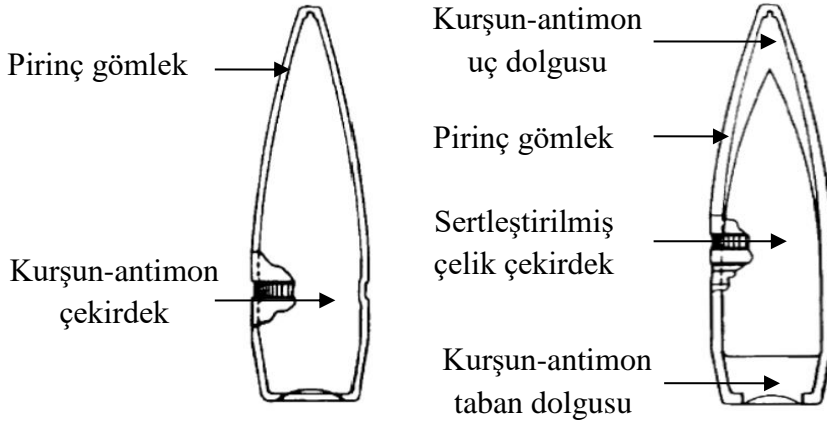
Hafif silah mühimmatlarında bu beş parçanın bir bütün halinde bulunmasıyla oluşan yapıya fişek denir. Şekil 1.14'te 7.62x51 mm NATO (M80) Ball tipi fişegin bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.14. 7.62x51 mm NATO (M80) Ball fişeginin bölümleri [10]

Kapsül, silah içerisinde yer alan iğnenin çarpması sonucu kovan içerisinde bulunan barutun ateşlenmesini sağlayan kısımdır. Kapsül; kapsül kupası, patlayıcı, örs ve alev kanallarından oluşur. İğne kapsüle vurduktan sonra örs kupaya çarpar ve patlayıcıyı ateşler. Oluşan ateşleme alev kanalı vasıtasıyla kovan içerisindeki barutu ateşler. Kapsül kupası ve örs; bakır, nikel kaplı bakır veya pirinç, bakır alaşım, cupronikel ve çinko kaplı çelik gibi malzemelerden yapılabilir olması rağmen genelde pirinçten yapılırlar. Kovan; kapsül, patlayıcı ve mermiyi bir arada tutan silindire benzer şekildeki parçadır. Kovanların büyük çoğunluğu pirinç malzemedен imal edilir fakat çelik, bakır, nikel kaplı pirinç, cupronikel, alüminyum ve plastik gibi malzemelerden de imal edilebilmektedirler. Patlayıcı olarak uzun yıllar kara barut kullanılmıştır. Fakat 1870-1890 yılları arasında dumansız barutun bulunmasıyla o yıllardan sonra kara barutun kullanımı epeyce azaldı. Dumansız barut, kara baruta göre daha az kalıntı bırakır ve adından anlaşılacağı üzere daha az duman üretir [1]. Mermi, ateşleme sonrası kovan içerisindeki patlayıcının ateşlenmesi sonrası hedefe fırlatılan parçanın adıdır. Farklı yerlerde mermiye, çekirdek ya da ilk yıllarda kurşundan yapıldığı için kurşun gibi isimler de verilmektedir [36]. Ateşli silahlar tarafından atılan ilk mermi tipleri taş, demir ok ve demir toplar idi. Kurşunun mermi olarak kullanılması 1340 yıllarına dayanmaktadır ve ilk şekli küreseldi. İlerleyen yıllarda daha verimli mermi geometri yapısı olan silindirik kemer burunlu mermiler kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte kurşun merminin namlu içine sıvanması ve mermi deformasyonu gömlek kullanılarak elimine edilmiştir. Gömlek malzemesi olarak tombak, nikel, çelik, bakır, bronz, pirinç ve alüminyum malzemeleri kullanılmaktadır [1].

Şekil 1.15’de ise bu tez kapsamında kullanılan 7.62 mermilerinin iç yapıları şematik olarak gösterilmiştir. 7.62x51 mm NATO Ball, kurşun-antimon çekirdek yapısı ve pirinç ceketten oluşmaktadır. Bu mühimmat sahip olduğu kurşun çekirdekten dolayı daha çok canlı dokuya zarar vermek için kullanılmaktadır. Diğeri ise 7.62x51 mm NATO AP fişegidir. Bu fişek pirinç gömlek, kurşun-antimon uç dolgusu, kurşun-antimon taban dolgusu ve sertleştirilmiş çelik çekirdekten oluşmaktadır. Bu mühimmat sert çekirdeğinden dolayı zırh delme gayesi gütmektedir. Farklı tip zırh delici mermilerde çekirdek olarak sertleştirilmiş çelikten başka tungsten-karbon, manganez-molibden, krom-vanadyum ve krom-molibden bulunmaktadır. Taban dolgusu ağırlık dengesi, uç dolgusu ise merminin hedefe çarpma anında sert ve gevrek olan çekirdeğin kırılmasını engellemek amacıyla tampon görevi yapmaktadır.



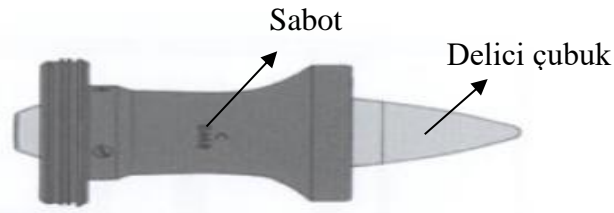
Şekil 1.15. 7.62x51 mm NATO AP (solda) ve 7.62x51 mm NATO Ball (sağda) mermilerinin kesit görüntüleri [37]

Bahsi geçen mermi tipleri haricinde farklı uygulamalara yönelik birçok mermi tipi bulunmaktadır.

1.3.1.2.Yüksek Kalibre Kinetik Enerji Mühimmatı

Yüksek kalibre kinetik enerji mühimmatı adından da anlaşılacağı üzere sahip oldukları kütlelerin ilk hızından elde edilen kinetik enerjiden yararlanan mühimmat tipidir. Hafif mühimmattan farkı daha yüksek kalibreye sahip olması ve daha gelişmiş bir yapısının bulunmasıdır. Günümüzde askeri sahada genel olarak iki tip yüksek kalibre kinetik enerji mühimmatları yer almaktadır. Bunlar APDS (Armor Piercing Discarding Sabot) ve APFSDS (Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot)'dir.

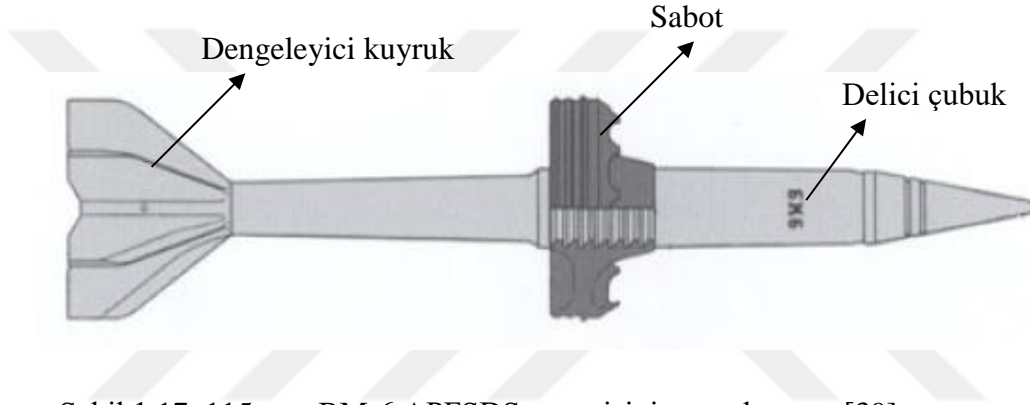
APDS mermileri boy/çap (L/D) oranı 6-7 arasında olan yoğun bir çekirdekten (genelde tungsten-karbür) oluşurlar (Şekil 1.16). Bu mermiler II. Dünya Savaşı'nın ikinci kısmında anti-tank silahlarında kullanılmıştır [38].



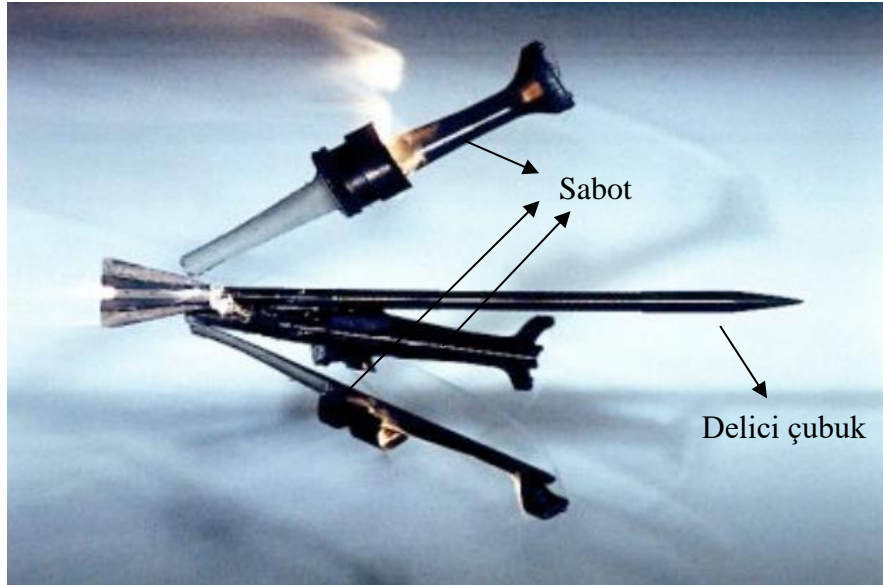
Şekil 1.16. 100 mm BM-8 APDS mühimmatının genel yapısı [39]

Fakat 1970 yılından sonra APFSDS mühimmatı, APDS mühimmatının yerini almaya başlamıştır (Şekil 1.17). Boy/çap (L/D) oranı 15-25 arasındadır. Sovyet APFSDS mermileri maraging çeliğinden imal edilmesine rağmen bu mermiler çoğunlukla tungsten ağırlıklı alaşımdan veya seyreltilmiş uranyum alaşımdan imal edilmektedir.

APFSDS mühimmatının ateşlenme sonrası davranışı Şekil 1.18’de yer almaktadır. Büyük silah namlusuna nazaran küçük çaplı dart oku şeklindeki delici çubuk, sabot ile çevrelenir ve mermi namluyu terk ettikten sonra delici çubuktan ayrılır. Böylece sabotlar sayesinde büyük çapta mermiye aktarılan enerji daha küçük çapta bir mermiye aktarılmış olur ve ağır bir mermi kullanarak hız kaybı yaşanmamış olunur.



Şekil 1.17. 115 mm BM-6 APFSDS mermisinin genel yapısı [39]



Şekil 1.18. APFSDS mermisinin namluyu terk edişi ile sabotların ayrılması [40]

APDS mermiler yiv-setli namlulardan ateşlenir ve dönü dengelidir. Fakat APFSDS mermileri ise, yiv-setsiz namlulardan fırlatılır ve kanat dengelidir. APFSDS mermileri, APDS mermilerine nazaran daha kalın hedef delme kabiliyetine sahiptirler.

1.3.2. Kimyasal Mühimmatlar

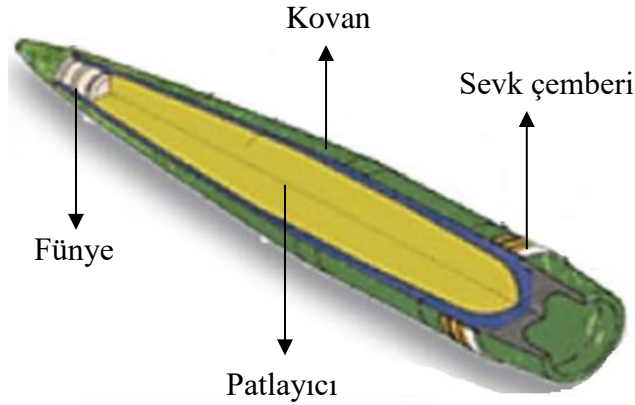
Kimyasal bir reaksiyon sonucu patlama veya yanma ile hedefte etki gösteren mühimmatlardır.

- Yüksek İnfilaklı (HE) Mühimmat
- Yüksek Patlayıcı Anti-Tank (HEAT) Mühimmatı
- Patlayıcı ile Şekillendirilen Mühimmat (EFP)
- Tahrip Plastik (HESH/HEP) Mühimmatı

olmak üzere dört sınıfa ayrılır.

1.3.2.1. Yüksek İnfilaklı (HE) Mühimmat

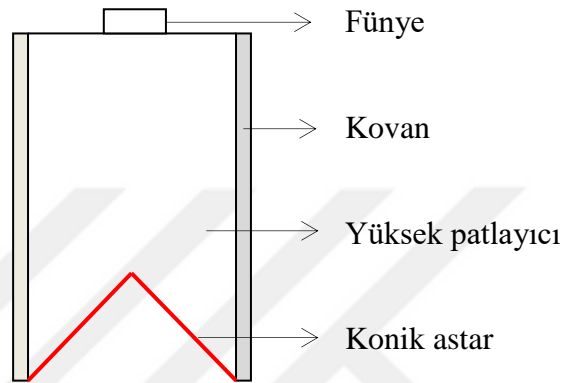
HE (High Explosive) mühimmatında, standart tipte barut ile patlayıcı bileşik bulunur (Şekil 1.19). Bu mühimmat deliş gücüne sahip değildir, atış sonrası hedefle teması sonrası yüksek patlama basıncı tesiri oluşturur ve etrafa şarapnel yayar. Genellikle sığınak, bina, tabya ve piyadelere karşı kullanılırlar [41].



Şekil 1.19. MSM Group 155 mm HE ER-HB tipi Yüksek İnfilaklı Mühimmat [42]

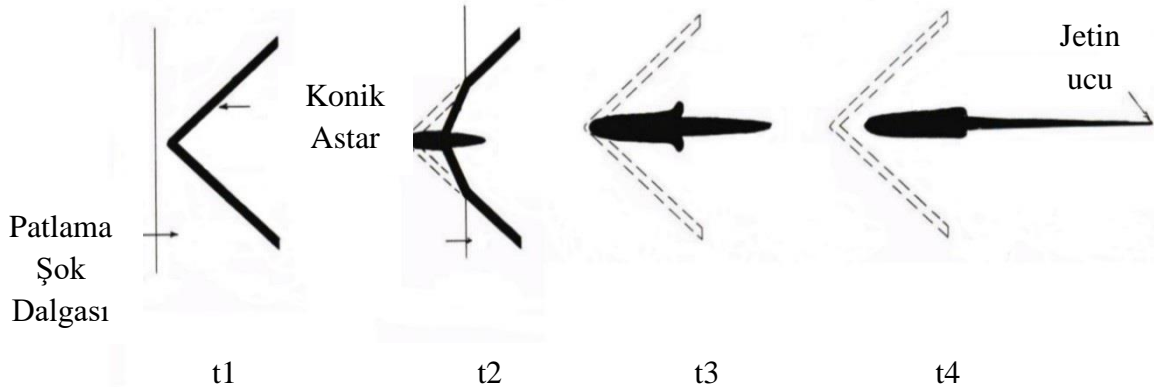
1.3.2.2.Yüksek Patlayıcı Anti-Tank (HEAT) Mühimmatı

Yüksek patlayıcı anti-tank mühimmatı 1950 yılında geliştirilmiştir [38]. Tipik bir HEAT (High Explosive Anti Tank) mühimmatı, konik şekle sahip bir metal astarı çevreleyen patlayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 1.20). Metal astar, konik şeklin dışında trompet, bi-konik ve çan şeklinde de olabilir [1].



Şekil 1.20. Yüksek patlayıcı anti-tank mühimmat şematik gösterimi [43]

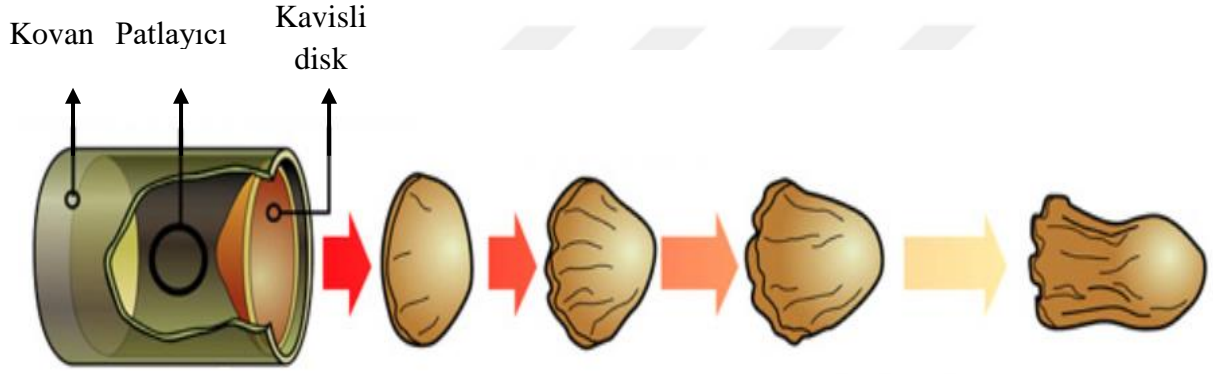
Mühimmat içerisindeki yüksek patlayıcı fünye ile infilak ettirildiğinde oluşan patlama şok dalgaları konik astar üzerinde yüksek basınç ve sıcaklık oluşturmaktadır. Bunun sonucunda konik astar, koninin merkez eksenine doğru çökerek yüksek hızlı bir jet halini almaktadır [44]. Patlama sonrası konik astarın jete dönüşmesi Şekil 1.21'de gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Patlama sonrası konik metal astarın jete dönüşmesi [45]

1.3.2.3. Patlayıcı ile Şekillendirilen Mühimmat (EFP)

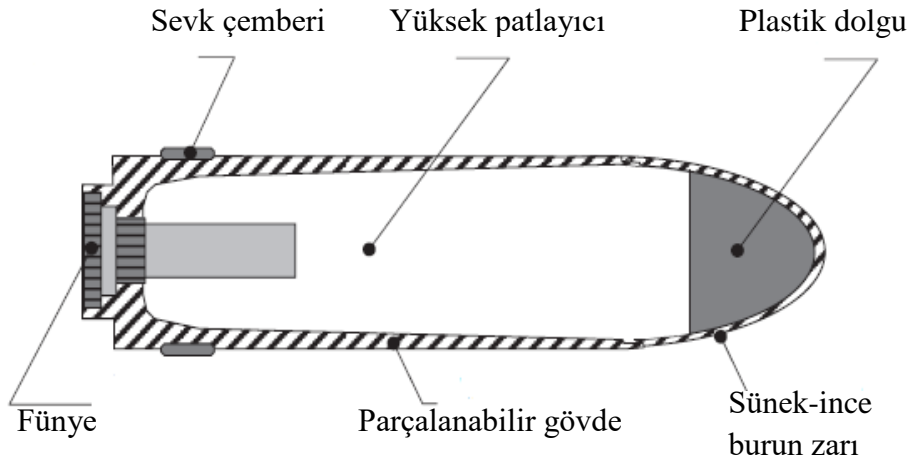
EFP (Explosively Formed Penetrator) mühimmatı, kavisli metal diskin arka kısmında bulunan patlayıcının ateşlenmesi sonucu metal diskin merkez eksene doğru çökmesi ile oluşan ve bu mermi yapısının hedefe doğru yol alması esasına dayanan bir mühimmat tipidir (Şekil 1.22). Şekillenme mekanizması yüksek patlayıcılı anti-tank mühimmat ile çok benzerdir. İkisi arasındaki temel fark, HEAT mühimmatındaki konik astarın jete dönüşmesi yerine EFP mühimmatındaki kavisli diskin şekillendirilmiş bir mermiye dönüşmesidir.



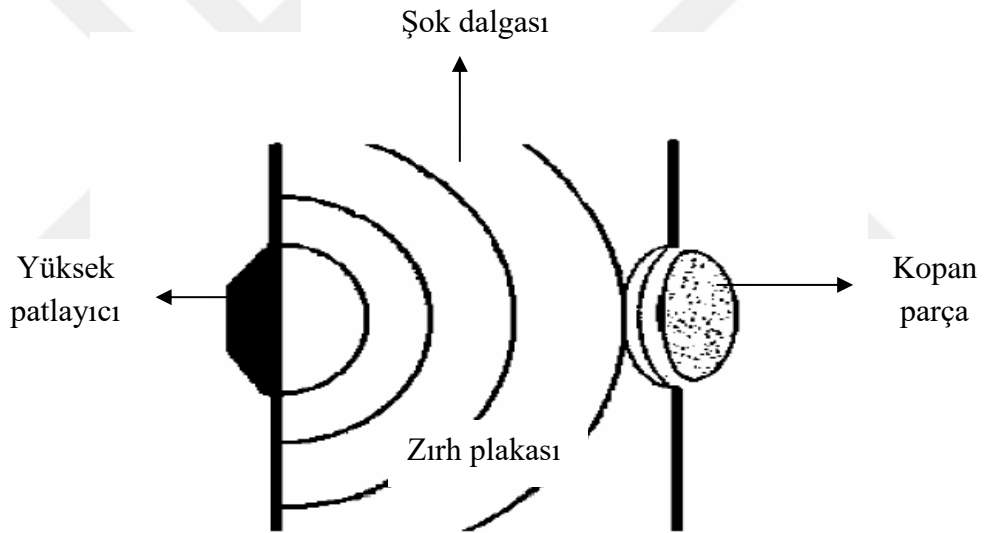
Şekil 1.22. Patlayıcı ile şekillendirilen mermi ve oluşum safhası [46]

1.3.2.4. Tahrip Plastik (HESH/HEP) Mühimmatı

HESH/HEP (High-Explosive Squash Head/High Explosive Plastic) mühimmatının kovani içerisinde geç patlamaya ayarlanmış plastik patlayıcı bulunmaktadır. HESH/HEP mühimmatının şematik yapısı Şekil 1.23'te gösterilmiştir. Bu mühimmat, hedefe çarptığı esnada içerisinde bulunan plastik patlayıcının infilak etmesi sonucunda hedef malzeme üzerinde gerilme dalgaları meydana getirir. Hedef üzerinde ilerleyen ve geriye yansıyan gerilme dalgalarının karşılaşması sonucu oluşan genlik farkı malzemenin kopma dayanımını aştığı takdirde hedef malzemedен parça kopmasına neden olmaktadır (Şekil 1.24). Kopan parçalar ise hedef malzeme arkasındaki personeli etkisiz hale getirmektedir.



Şekil 1.23. Tahrir plastik (HESH/HEP) mühimmatının şematik gösterimi [2]



Şekil 1.24. HESH/HEP mühimmatının hedefe çarpma sonrası zırh plakasında oluşturduğu hasar durumu [47]

1.4. Zırh Malzemeleri

Zırh; insanları, araçları ve binaları çeşitli silahlara karşı korumak için kullanılan yapıyı tarif etmek için kullanılır. Kullanım alanlarına göre üç farklı başlık altında değerlendirilmektedir. Bunlar:

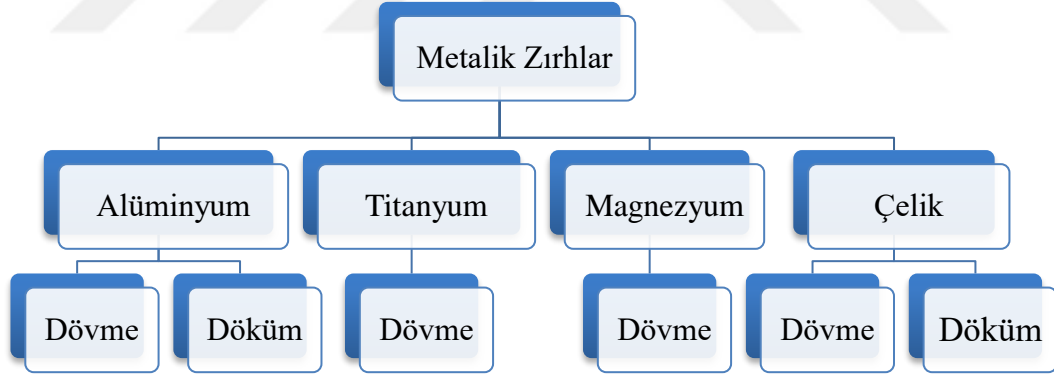
1. Askeri araçların korunması (tank, helikopter, gemi vs.)
2. Önemli teçhizat, barınak ve yapıların korunması (sığınaklar, nükleer santral vs.)

3. Personelin korunması (kurşun geçirmez yelek, miğfer vs.) [48].

Balistik koruma amacıyla kullanılan zırh malzemeleri metalik, seramik esaslı ve polimer esaslı olmak üzere üç sınıfa ayrılır [23]. Bu malzemeler arasından ilk kullanım zamanından günümüze kadar birçok avantajı beraberinde getirmesi nedeniyle metalik zırhlar en fazla rağbet göreni olmuştur. Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin metalik olması nedeniyle bir sonraki bölümde metalik zırhlar üzerinde bilgi verilmiştir.

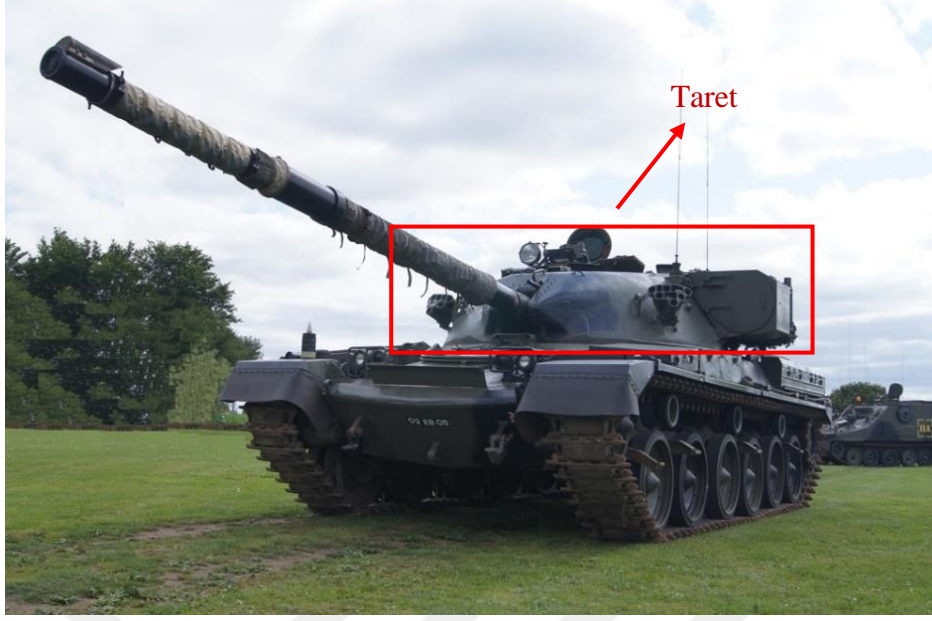
1.4.1. Metalik Zırhlar

Zırh uygulamalarında genel olarak metal malzemeler kullanılmaktadır. Bu metal malzemeler alüminyum, titanyum, magnezyum ve çeliktir (Şekil 1.25). Günümüzde fiyat ve şekil verme özellikleri göz önüne alındığında çelik ve alüminyum en yaygın kullanılanlarıdır. Bunun yanında titanyum ve magnezyum malzemelerinin pahalı olmasına rağmen ilerleyen bölümlerde neden zırh uygulamalarında kullanıldığı sorusuna detaylıca cevap verilmiştir.



Şekil 1.25. Zırh uygulamalarında kullanılan metallerin sınıflandırılması [10]

Zırh uygulamalarında kullanılan metal malzemelerin çoğu dövme levhalardır ve çoğunlukla haddeleme ve presleme ile üretilirler. Her ne kadar dövme yöntemi kadar dayanıklı malzeme üretilmesine olanak sağlamasa da, döküm yöntemi de zor geometrilerin imalatında avantajlıdır. II. Dünya Savaşı yıllarında önemli miktarda döküm zırh üretilmiştir. Şekil 1.26'da görülen Birleşik Krallık yapımı Chieftain Ana Muharebe Tankının taret kısmı döküm yöntemi ile imal edilmiştir.



Şekil 1.26. Chieftain MBT Ana Muharebe Tankı [49]

Döküm yapılar, gözenek ihtiva ettiği için düşük tokluk ve düşük balistik dayanım değerine sahiptirler. Dökme metal yapıları son yıllarda dövme sonucu üretilen metal yapıların sunduğu üstün kabiliyetler nedeniyle zırh uygulamalarında daha az tercih edilmektedir.

1.4.1.1. Alüminyum Alaşım Zırh

Alüminyum alaşımları, 60 yıldan fazla zırh uygulamalarında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımını zırh olarak kullanan ilk araç Şekil 1.27'de görülen M113 zırhlı personel taşıyıcıdır. Alüminyum alaşımından imal edilen M113 aracının gövdesi, araç içerisindeki personeli koruyabilecek kadar kalın, hava ile nakliye edilmesi için yeteri kadar hafif olması özelliğiyle bu malzemenin önemli ölçüde tanınmasına olanak sağlamıştır.

Çoğu alüminyum alaşım zırhı, 5xxx ya da 7xxx serisinden az da olsa 2xxx serisinden üretilmektedir. Örneğin, M113 zırhlı personel taşıyıcı, soğuk haddelenmiş 5083 alüminyum alaşımından imal edilmiştir [10].



Şekil 1.27. M113 Zırhlı Personel Taşıyıcı [50]

Alüminyumun zırh olarak seçilmesinin en önemli nedeni sahip olduğu düşük yoğunluk değeridir (2.7 g/cm^3) ve alaşım elementine bağlı olarak $\pm 7\%$ değişmektedir. Çeliğin yoğunluğu ise, alaşım elementine bağlı olarak 7.75 ile 8.5 g/cm^3 arasında bir değer almaktadır. Düşük yoğunluklu malzeme ile zırhlanma, zırhlı taşıyıcının hareket kabiliyeti artırmaktadır. Daha iyi hareket kabiliyeti, yüksek hız, hızlı ivmelenme ve kısa fren mesafesi özelliklerini beraberinde getirmektedir. Bu özellikler, zırhlı araca savaş alanında daha esnek hareket, kentsel mecrada ise daha iyi manevra kabiliyeti sağlamaktadır. Ayrıca düşük ağırlık, dik yamaçların araç tarafından daha kolay bir şekilde tırmanılmasını sağlamaktadır. Bahsi geçen bütün bu özellikler, aracın saldırıya karşı açık hedef olma ihtimalini düşürmektedir. Bunlara ek olarak, bu araçların çoğu hava ulaşımıyla savaş bölgesine aktarılmaktadır. Daha az uçakla daha fazla hafif araç intikal ettirilebilmektedir. Ayrıca daha düşük ağırlık, yakıt ikmali ihtiyacını azaltır ve daha uzun menzil sağlar [50].

1.4.1.2. Titanyum Alaşım Zırh

Titanyum alaşımları, ağırlık azaltmak için uçak gövdesi ve jet motor bileşenlerinde uzun süredir kullanılmaktadır. Fakat titanyumun yüksek maliyeti tarih boyunca askeri kara taşıtlarında kullanılmasına engel teşkil etmiştir. Son yıllarda titanyumun maliyetinin

seramik ve kompozit zırhlara nazaran düşüş göstermesi, bu malzemeyi bazı zırh uygulamalarında kullanmak için uygun seçenek haline gelmiştir [51].

Titanyumun yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve iyi korozyon direnci, üstün balistik koruma yeteneği ile birleştiğinde çelik ve alüminyum alaşımlarına kıyasla kayda değer ağırlık kazancı sağlamaktadır. Bu nedenle düşük maliyetli titanyum zamanla savunma sektörünün dikkatini çekecek konuma gelmiştir. Şekil 1.28’de görülen M2 Bradley zırhlı muharebe aracının dövme alüminyum olan komutan kapağı dövme titanyum ile değiştirilmiş ve artan balistik korumanın yanında %35 ağırlık tasarrufu sağlanmıştır [52].



Şekil 1.28. M2 Bradley Zırhlı Muharebe Aracı [53]

Titanyumun zırh uygulamalarında kullanılmasının birçok avantajı vardır. Homojen haddelenmiş çelik ve alüminyum zırhlara göre daha yüksek kütle etkinliğine sahiptir. Çoklu atışlara karşı balistik dirençleri iyidir. Yüksek dayanım/ağırlık oranına ve iyi korozyon direncine sahip olması başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Dezavantajları ise, balistik darbe sonrası zırhtan parçacıklar kopması nedeniyle ekstra muhafaza gerektirmesi ve imalat maliyetinin yüksek olmasıdır [23].

1.4.1.3.Magnezyum Alaşım Zırh

Her ne kadar savaş meydanında yer bulamasa bile, son yıllarda magnezyum esaslı alaşımlar, en hafif metal alaşımı özelliği sunduğu için savunma sektörünün ilgisini çekmektedir. Magnezyumunun yoğunluğu alüminyumdan %35, çelikten %77 daha düşüktür. Magnezyum saf halde iken oldukça zayıf ve kırılımandır. Dolayısıyla mühendislik uygulamalarında hiçbir zaman alaşımsız olarak kullanılmamıştır. Alüminyum, çinko veya bazı nadir toprak metalleri gibi alaşım elementlerinin ilavesi, çöktürme ve ısıl işlemlere tâbi tutularak güçlendirilmektedir [10].

Magnezyum esaslı zırhın kökeni, ikinci dünya savaşında bir magnezyum alaşımı ile makul bir uçak zırhı yapılabilirliğini incelemek için yapılan çalışmaya dayanmaktadır [54]. Bu çalışmada test edilen magnezyum alaşımının parçacık koparma hasarına çok duyarlı olduğu sonucu elde edilmiş ve uygun görülmemiştir. Fakat son yıllarda, üretim teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle zırh uygulamaları için magnezyum alaşımlarına olan ilgi artmıştır [55, 56].

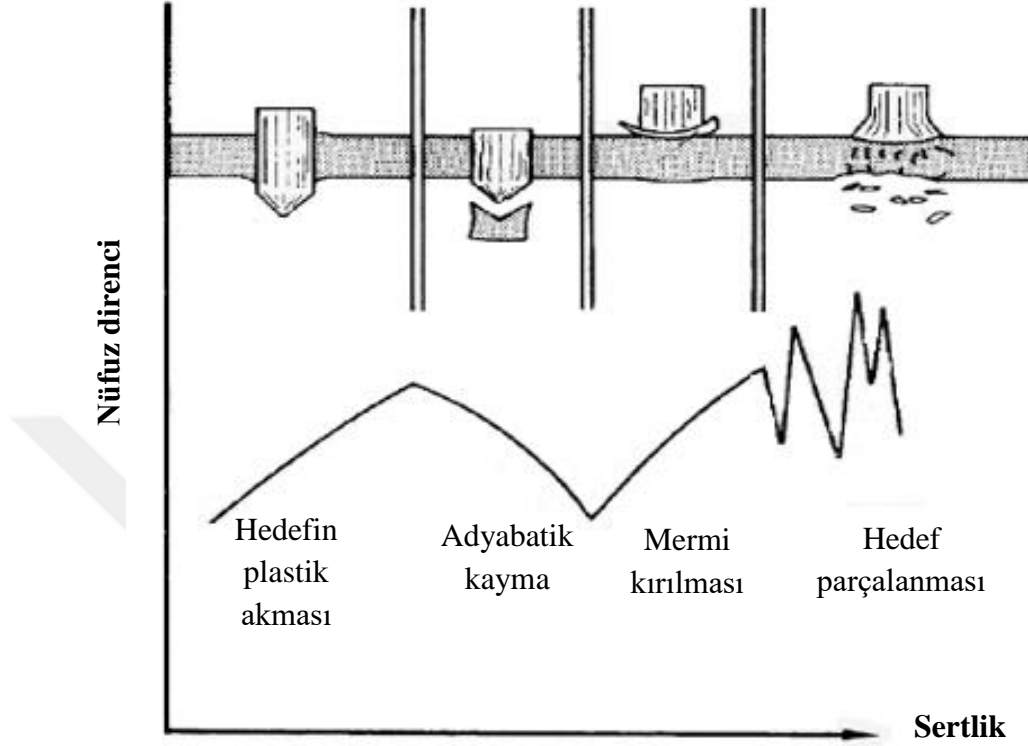
Dahası, magnezyumun düşük yoğunluğu sebebiyle iyi titreşim sönümleme yeteneğine [57] ve düşük akustik empedans karakteristiğine [58] sahip olması nedeniyle araç uygulamaları için ilave fayda sağlamaktadır.

1.4.1.4.Çelik Zırh

Çelik, çok yönlü bir malzeme olmasından dolayı bugüne kadar zırhlı araçlarda en fazla kullanılan malzeme olmuştur. Bu özellikler kolay bulunabilmeleri, kolay üretilebilmeleri, ucuz olmaları ve uygun malzeme özellikleri sunmasıdır [10]. Zırh çeliklerini değerlendirirken göz önüne alınması gereken üç önemli özellik bulunmaktadır. Bunlar sertlik, mukavemet ve tokluktur [59].

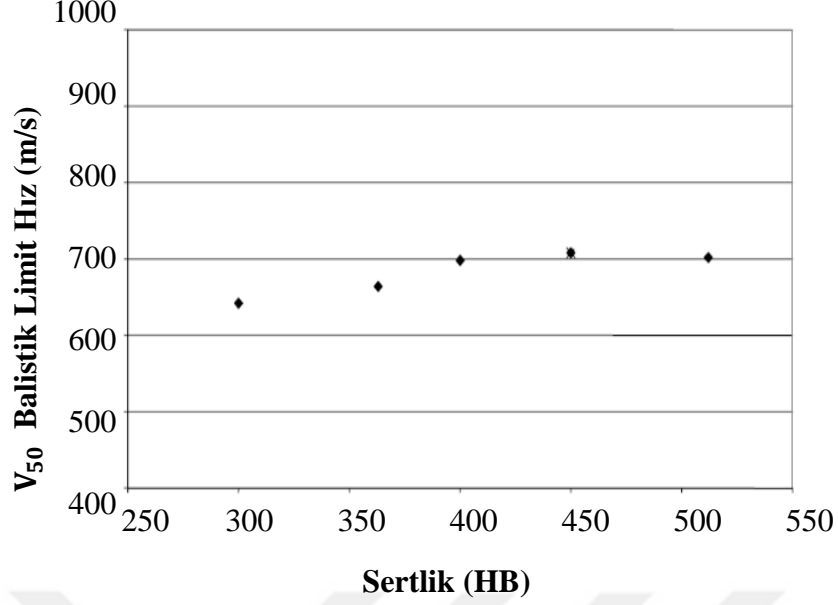
İlk olarak sertlikten bahsetmek gerekirse, sertlik ile balistik dayanım arasında kompleks bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 1.29'da görüldüğü gibi başlangıçta sertliğinin artması malzemenin plastik akmasına artan direncin sonucu olarak balistik dayanımda ilerleme kaydedilmektedir. Fakat belirli bir noktadan sonra artan plaka sertliği, adyabatik kayma hasarı ihtimalini artırdığı için korunma seviyesinde düşüşle sonuçlanmaktadır. Malzeme sertliğinde bir miktar daha artış ise mermide kırılmaya yol açacak ve balistik dayanımı artıracaktır. En yüksek sertlik değerlerinde ise test edilen zırh malzemesine bağlı

olarak tokluk seviyesindeki düşüklük plakanın kararsız davranış göstermesine ve gevrek kırılmasına sebep olabilmektedir [60].



Şekil 1.29. Monolitik zırh çeliğinin zırh delici mermi arasında ki sertlik-nüfuz direnci ilişkisi [61]

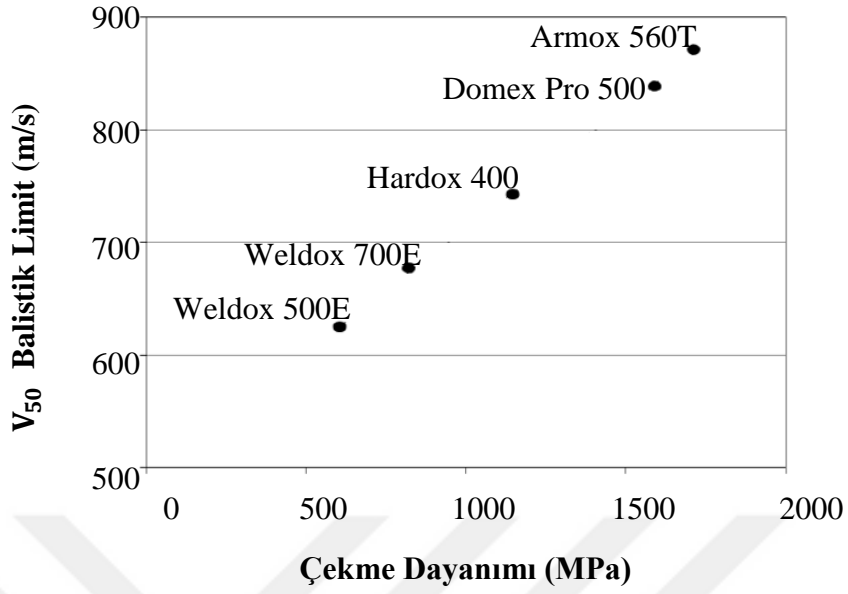
Şekil 1.30'da, 7.62 mm'lik mermiye karşı farklı sertliklerdeki Bisalloy® zırh çeliğinin balistik limit hız değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere artan sertlikle balistik limit hızının arttığı sonucu elde edilmiştir [62]. Balistik sanayiinde, balistik dayanımın artan sertlikle doğru orantılı olduğu kabul görmektedir. Bundan dolayı, tasarımcılar zırh uygulamalarında sıklıkla yüksek sertlik değerine sahip çeliklere yönelmektedir. Yüksek sertlik değerine sahip malzemeler balistik nüfuz direncini artırırken ağırlık azaltmanın istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir [63].



Şekil 1.30. 10 mm kalınlığındaki Bisalloy® zırh çeliği plaka sertliğinin balistik limit hızı üzerindeki etkisi [62]

Göz önüne alınması gereken ikinci özellik ise, malzemenin mukavemetidir. Tahmin edileceği gibi malzemenin mukavemeti arttıkça balistik dayanımı artmaktadır. Şekil 1.31’de çekme dayanımları 600-1700 MPa arasında değişen çeliklerin çekme dayanımlarının balistik limit değerleriyle oldukça lineer bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir [64].

Son özellik ise, tokluktur. Tokluk, bir malzemenin kırılmadan önce enerji absorbe etmesi ya da plastik şekil değiştirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [65]. Bu nedenle, zırh malzemesinin kırılmadan önce belirli bir enerji absorbe etmesi gerekmekte yani tokluğunun istenen seviyede olması gerekmektedir. Zırh plakasının mermi ile etkileşimi sonrası kırılması ya da parçalanması, zırh plakasının sünekliğinin darbe sonrası meydana gelen hasar mekanizmasına bağlı birim şekil değişimine karşı koyamaması olarak tanımlanmaktadır [66]. Düşük tokluk seviyesine sahip bir zırh plakasının balistik test sonrası görüntüsü Şekil 1.32’de gösterilmiştir. Bu hasar, yıkıcı etkili olduğundan zırh uygulamalarında istenmeyen bir durumdur.



Şekil 1.31. Bir kısım çelik malzemenin çekme dayanımı-balistik limit ilişkisi [64]

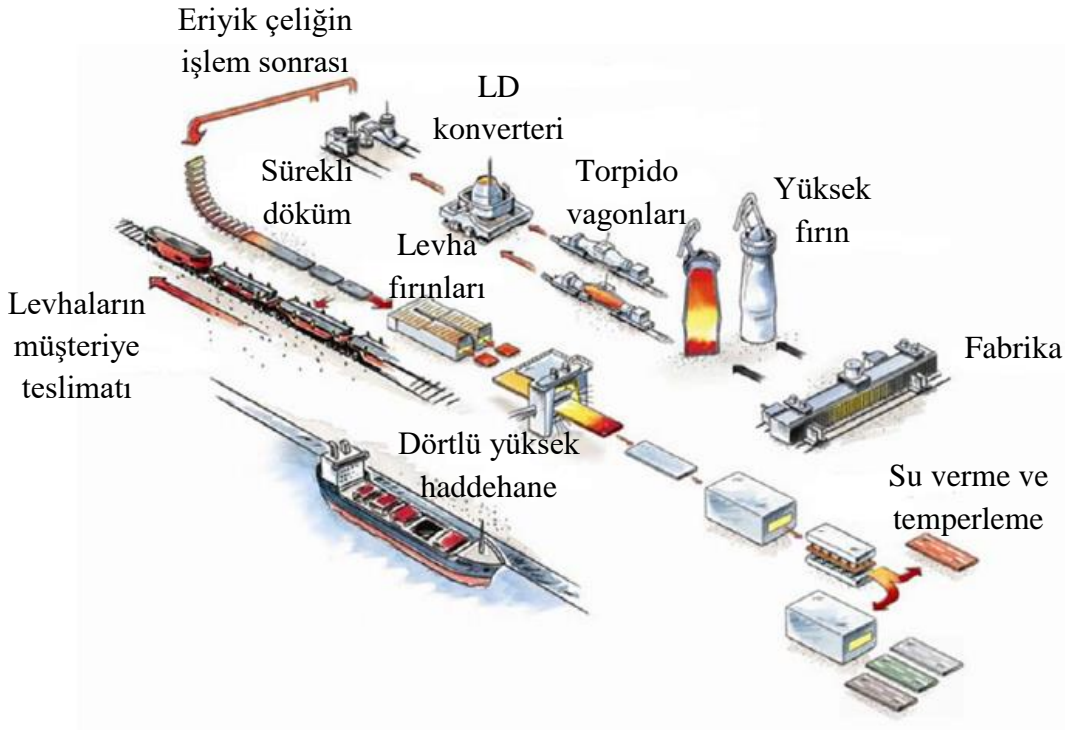


Şekil 1.32. 50CrV4 yay çeliğinin (60 HRC) balistik test sonrası görüntüsü [66]

1.4.1.4.a. ARMOX Zırh Çelikleri

Bu tez çalışması kapsamında İsveç merkezli çelik üreticisi SSAB firmasının ArmoX zırh çeliği ürünleri grubundan Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakaları kullanılmıştır.

Askeri ve sivil sahada sıklıkla kullanılan bu zırh çelikleri, 300 HBW- 600 HBW'ye (ultra sert) kadar sertlik değerlerine sahiptir. ArmoX zırh çelikleri, yüksek fırın, LD (Linz-Donawitz) konverterde çelik deoksidasyonu ve vakum işlemi vasıtalarıyla demir cevheri bazlı metalürji yöntemleri ile üretilmektedir (Şekil 1.33). Modern dörtlü yüksek haddehane ile plaka kalınlığında yüksek oranda azaltma sağlanarak ince taneli içyapı elde edilir. Çeliğe son özelliklerini kazandırmak için sertlik/tokluk gereksinimlerine göre çeşitli ısı işlemler uygulanır.



Şekil 1.33. SSAB'de ArmoX çelik plakalarının üretim hattı [67]

1.4.1.4.b. Ramor Zırh Çelikleri

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Ramor zırh çelikleri ArmoX ürün grubu altında sınıflandırılmaktadır. Bu sınıf, Ramor 300, Ramor 400, Ramor 450, Ramor 500, Ramor 550 ve Ramor 600 türlerinden oluşmaktadır. Zırh çeliklerinin isimlerinde yer alan rakamlar HBW cinsinden sertlik değerlerini belirtir. Ramor zırh çelikleri yaygın olarak;

- Kapılar, pencere çerçeveleri, duvarlar
- Banka sayaçları ve kasalar

- Döviz büroları
- Otomobiller, güvenlik kamyonetleri
- Güvenlik konteynerleri
- Atış poligonu cihazları
- Askeri araç ve ekipmanlar
- Sivil araçlar
- Gemiler

uygulamalarında kullanılmaktadır [68].

Tablo 1.3'te Ramor zırh çeliklerinin ağırlıkça maksimum kimyasal yüzde bileşimleri gösterilmiştir. Tablo 1.4'te ise Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri yer almaktadır

Tablo 1.3. Ramor zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (% max ağırlık) [69-74]

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ramor 300	0.20	0.50	2.00	0.030	0.010	0.80	-	0.30	0.005
Ramor 400	0.20	0.70	1.50	0.020	0.010	1.00	0.50	0.50	0.005
Ramor 450	0.25	0.70	1.50	0.015	0.010	1.00	2.0	0.70	0.005
Ramor 500	0.35	0.70	1.50	0.015	0.010	1.00	2.00	0.70	0.005
Ramor 550	0.36	0.70	1.50	0.015	0.010	1.50	2.50	0.80	0.005
Ramor 600	0.40	0.70	1.50	0.015	0.010	1.00	2.50	0.80	0.005

Tablo 1.4. Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [69-74]

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HBW)	Charpy-V Çentik Darbe Enerjisi (ISO EN 148)
Ramor 300	820	940	8	290	60 J/-40°C
Ramor 400	1100	1300	8	410	20 J/-40°C
Ramor 450	1200	1400	10	440	35 J/-40°C
Ramor 500	1450	1700	7	520	20 J/-40°C
Ramor 550	1550	1850	7	570	16 J/-40°C
Ramor 600	1650	2000	7	600	12 J/-40°C

Şekil 1.34'te gösterilen araç zırhlama uygulamasında, araç tabanında Ramor 300, Ramor 400 ve Ramor 450 zırh çelikleri kullanılmıştır. Bu zırh çelikleri, yüksek toklukları nedeniyle patlama sonrası oluşan yüksek basınca dayanım gösterebilmektedir. Yolcu bölümünde ise, Ramor 500, Ramor 550 ve Ramor 600 zırh çelikleri tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise, bu zırh çeliği çeşitlerinin yüksek dayanım ve sertliklerinden ötürü kinetik enerji mermilerine karşı daha yüksek direnç gösterebilmeleridir.



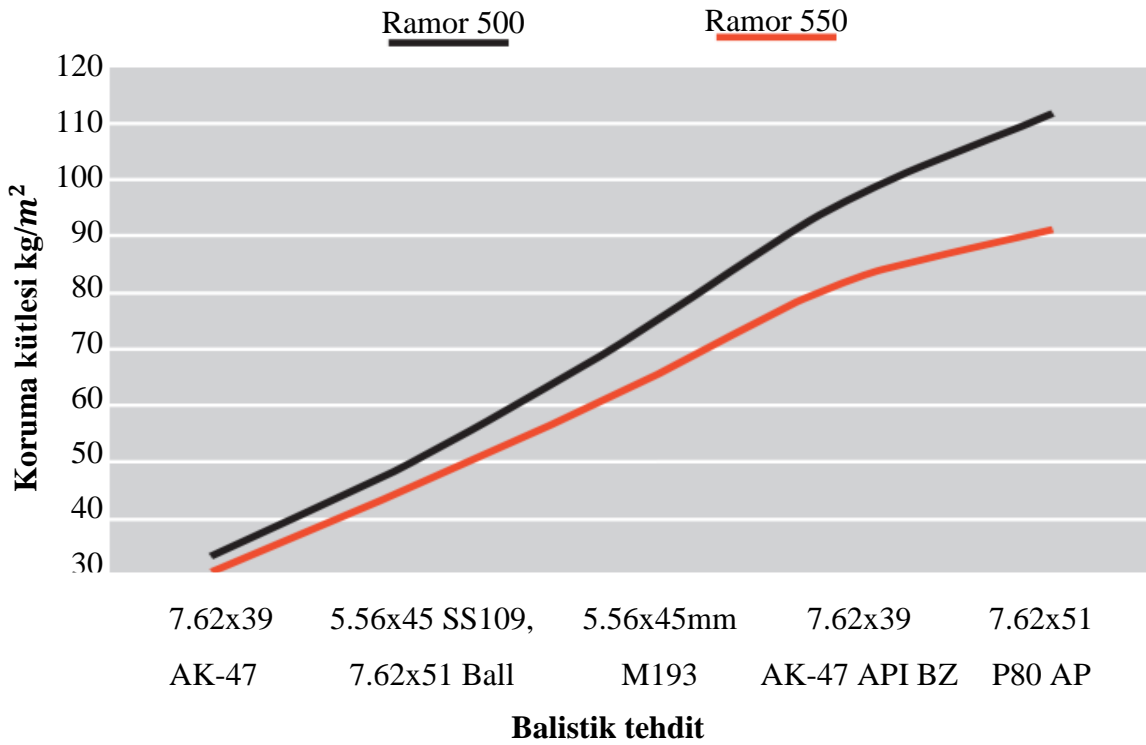
Şekil 1.34. Ramor zırh çeliklerinin araç üzerinde kullanımı [68]

Tablo 1.5'te, bu çalışmada kullanılan Ramor 500 ve 550'nin farklı balistik standartları için farklı koruma seviyelerine göre önerilen plaka kalınlıklarına yer verilmiştir. Görülebileceği üzere, Ramor 550 zırh çeliği, Ramor 500 zırh çeliğine nazaran daha düşük levha kalınlığında aynı koruma seviyesini sağlamaktadır.

Tablo 1.5. Ramor 500 ve Ramor 550 için bazı balistik standartlara göre plaka kalınlığı önerisi ve koruma seviyeleri [68]

EN 1522/1523					
Koruma Seviyesi	Tehdit	Hız (m/s)	Mesafe (m)	Ramor 500 (mm)	Ramor 550 (mm)
FB2	9 mm Luger FJ/CB/SC	415±10	5	2.0	
FB3	357 Magnum	430±10	5	2.3	
FB4	.44 Mag FJ/FN/SC	440±10	5	2.5	
FB4+	7.62x39 AK47 (M43)	700±10	10	4.0	3.7
FB6	5.56x45 SS109	950±10	10	6.5	5.9
	7.62x51 NATO Ball	830±10			
FB7	7.62x51 NATO AP	820±10	10	14.5	13.0
NIJ 0108.01					
II	9 mm FMJ	358±12			
	.357 Magnum JSP	425±15	5	2.2	
IIIA	9mm FMJ	426±15			
	.44 Magnum SWC	436±15	5	2.5	
III	7.62x51 FMJ	838±15	15	6.0	5.0
VPAM PM 2007					
VPAM6	7.62x39 Ball	720±10	10	4.25	3.7
VPAM7	5.56x45 SS109	950±10	10	6.5	5.9
	7.62x51 NATO Ball	830±10			
VPAM8	7.62x39 API BZ	740±10	10	12.2	10.1
VPAM9	7.62x51 NATO AP	820±10	10	14.5	13

Ramor 500 zırh çeliği, işleme kolaylığı ve maliyet açısından Ramor 550'ye tercih edilebilmektedir. Fakat Ramor 550 ise, aynı seviyede balistik korumayı daha düşük levha kalınlığı ile sağlayacağı için ağırlık kazancı sağlamaktadır [75]. Şekil 1.35'de her iki zırh çeliği için farklı balistik tehditlere karşı koruma için gerekli zırh kütlesi deneysel verilere bağlı olarak verilmiştir. Bir aracın yolcu bölümünde Ramor 500 zırh çeliği yerine Ramor 550 zırh çeliği kullanılırsa %10 ilâ %20 arasında hafifletme sağlanabilmektedir [76]. Böylece sağlanan ağırlık kazancı ile aracın yük kapasitesi, manevra kabiliyeti, kullanım ömrü ve yakıt ekonomisi artırılmaktadır.



Şekil 1.35. Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliğinin balistik koruma kütlesi ile balistik tehdide karşı koruma için tavsiye edilen zırh kütlesi [75]

1.5. Literatür İncelemesi

Literatür incelendiğinde, metalik malzemelerde farklı değişken şartların göz önüne alındığı balistik testler sonrası meydana gelen hasarı incelemek için birçok çalışma olduğu görülmüştür [77-86]. Durmuş ve arkadaşları, 1 ve 2 mm tek, 1+1 mm çift katmanlı soğuk haddelenmiş sac çelik plakalarını 9 mm tabanca mermisi ile deneysel olarak balistik testlere tâbi tutmuşlardır. Testler sonrasında hasar mekanizması olarak tıkaç oluşumu

gözlemlenmişlerdir [87]. Yunfei ve arkadaşları, toplam kalınlıkları 6 mm olan tek, çift ve üç katmanlı orta karbonlu çelik plakaların gaz tabancaları ile fırlatılan 12.7 mm çapındaki kemer ve kör burunlu mermiler karşısında balistik davranışlarını deneysel olarak incelenmişlerdir. Plakalar üzerinde başlıca hasar mekanizmaları olarak, sünek delinme, yapraklanma ve tıkaç oluşumu meydana gelmiştir [88]. Iqbal ve arkadaşları, 1 mm kalınlıklarındaki dairesel 1100-H12 Al plakalarının 19 mm çap değerine sahip kemer ve kör burunlu mermiler karşısındaki balistik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, mermi çap değeri sabit tutularak hedef çapının mermi çapına oranının 3.6 ilâ 40 arasındaki değerlerdeki durumunun balistik dayanıma etkisi çalışılmıştır. Hasar mekanizmaları olarak sünek delinme, yapraklanma ve tıkaç oluşumu meydana gelmiştir [89]. Bernetič ve arkadaşları, PROTAC 500 zırh çeliğini 7.62 mm zırh delici mermi ile deneysel olarak balistik testlere tâbi tutmuşlardır. Başlıca tıkaç oluşumu hasar mekanizması gözlemlenmişlerdir [90]. Holmen ve arkadaşları, 12 mm kalınlığındaki sıcak haddelenmiş yapı çeliğinin monolitik ve çok tabakalı yapılarının 7.62 mm zırh delici mermi karşısındaki balistik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Hedef plakalarda sünek delinme ve yapraklanma tipi hasar mekanizmaları meydana gelmiştir [91]. Senthil ve arkadaşları, 1.27 mm kalınlığındaki 2024 Al plakalarının 12.7 mm çapındaki küresel top, yarı-küresel ve kör burunlu silindirik mermiler karşısındaki balistik dayanımını sayısal olarak incelenmişlerdir. Testler sonrasında plakalar üzerinde başlıca yapraklanma ve tıkaç oluşumu tipi hasar mekanizmaları meydana gelmiştir [92].

Zırh plakalarının balistik dayanımı artan çarpma açısı ile artış birlikte göstermekte ve belirli bir açıdan sonra mermi hedeften sekmektedir. Çarpma açısının hedef malzeme üzerindeki balistik dayanımı ve meydana gelen hasar mekanizması üzerindeki etkisi birçok çalışmaya konu olmuştur [93-97]. Iqbal ve arkadaşları Weldom ve 1100-H12 alüminyum alaşım plakaları üzerinde yaptıkları sayısal analizler sonrası balistik limitin artan çarpma açısı ile arttığını tespit ettiler [98]. Børvik ve arkadaşları ise, AA6082-T4 alüminyum plakalarının 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° çarpma açılarında balistik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Çalışmada 7.62x63 mm NATO Ball ve 7.62x63 mm APM2 olan iki tip hafif mühimmat mermisi kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, 7.62x63 mm APM2 mermisi için 30°'ye kadar kalıntı hızda kayda değer bir değişme olmadığı, fakat 7.62x63 mm NATO Ball için kalıntı hızda düşüş gözlenmiştir. Ayrıca, her iki mermi tipi için de kritik sekme açısı 60° dereceden düşük olduğu sonucu elde edilmiştir [99].

Tabakalı kompozit plakaların sıralanma biçiminin balistik dayanıma etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Teng ve arkadaşları, çift tabakalı kompozit zırh plakaları ile gerçekleştirdikleri nümerik balistik testler sonrasında en sağlam yapının, ön plakanın yüksek süneklik ve düşük dayanıma, arka plakanın ise düşük süneklik ve yüksek dayanıma sahip olduğu durumda elde edileceğini göstermişlerdir [100]. Babaei ve arkadaşları, alüminyum ve çelik plakalar kullanarak oluşturulan çift tabakalı kompozit plaka yapılarının balistik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Testler sonucunda ön yüzde çelik, arka yüzde alüminyum yapısının diğer plaka dizilimine nazaran daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir [101]. Bir başka çalışma ise, Yunfei ve arkadaşları tarafından çift tabakalı çelik plaka üzerinde balistik testler ile gerçekleştirilmiştir. En iyi tabakalı kompozit yapının, ön yüzeyde yüksek dayanım ve düşük süneklikte, arka yüzeyde ise düşük dayanım ve yüksek süneklikte olan yapı olduğu sonucu elde edilmiştir [102]. Özşahin ve Tolun, yüksek molekül ağırlıklı polietilen levhalar kullanılarak desteklenmiş AA 7075 T651 levhaların balistik dayanımlarına üç farklı tabaka sıralamasının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, bu üç yapının toplam tabaka kalınlıkları eşit olduğu halde, destek tabakası olarak kullanılan polietilenin, alüminyum levhaların arkalarına yerleştirildiği durumun, balistik dayanımı en yüksek tasarım olduğu sonucu elde edilmiştir [103].

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin amacı, SSAB firması tarafından üretilen Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin 7.62x51 mm NATO Ball ve 7.62x51 mm NATO AP mühimmatlar karşısında ve farklı plaka yapılarında balistik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemektir.

Deneysel çalışmada eğik plaka, monolitik plaka ve çift tabakalı kompozit plaka yapıları incelenmiştir. Bu yapılarda meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiş ve kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Sayısal analizlerde ise, eğik plaka testleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrası edilen sonuçlar, deneysel veriler ile kıyaslanarak kurulan sayısal modelin doğruluğu tartışılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

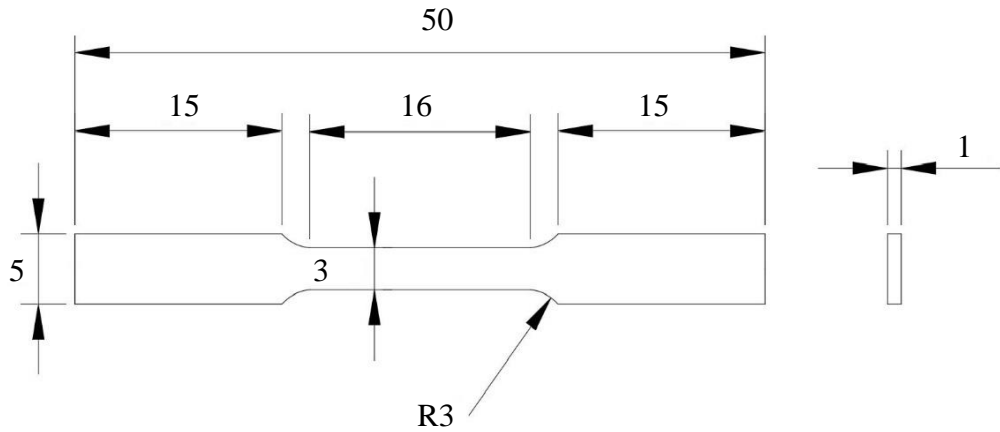
Tezin bu bölümü, Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (2.1), Malzemelerin Balistik Deneyleri ve Sonuçları (2.2) ve Sayısal Analizler (2.3) olmak üzere üç alt ana başlıkta incelenecektir.

2.1. Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

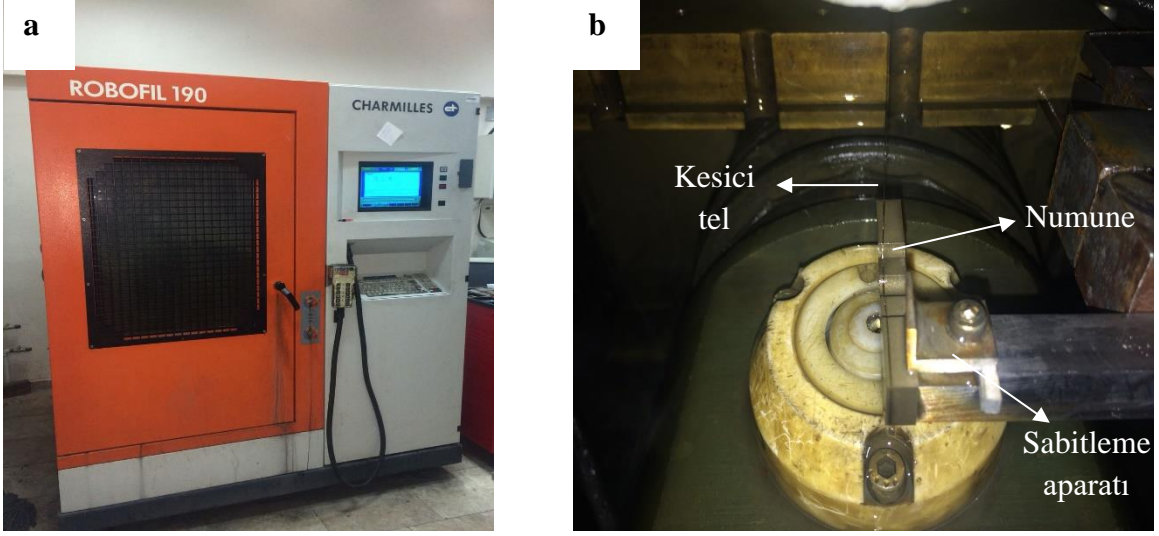
Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlenmesi için gerçekleştirilen işlemler KTÜ Makina Mühendisliği'nde yer alan Malzeme Bilimleri ve İmal Usulleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Zırh Malzemeleri için Çekme Testi

Çekme deneyi test numuneleri, ASTM E8/E8M-09 standardı dikkate alınarak Şekil 2.1'de gösterilen mm cinsinden boyutlarda, Şekil 2.2'de yer alan tel erozyon kesim makinesi ile kesilmiştir [104].

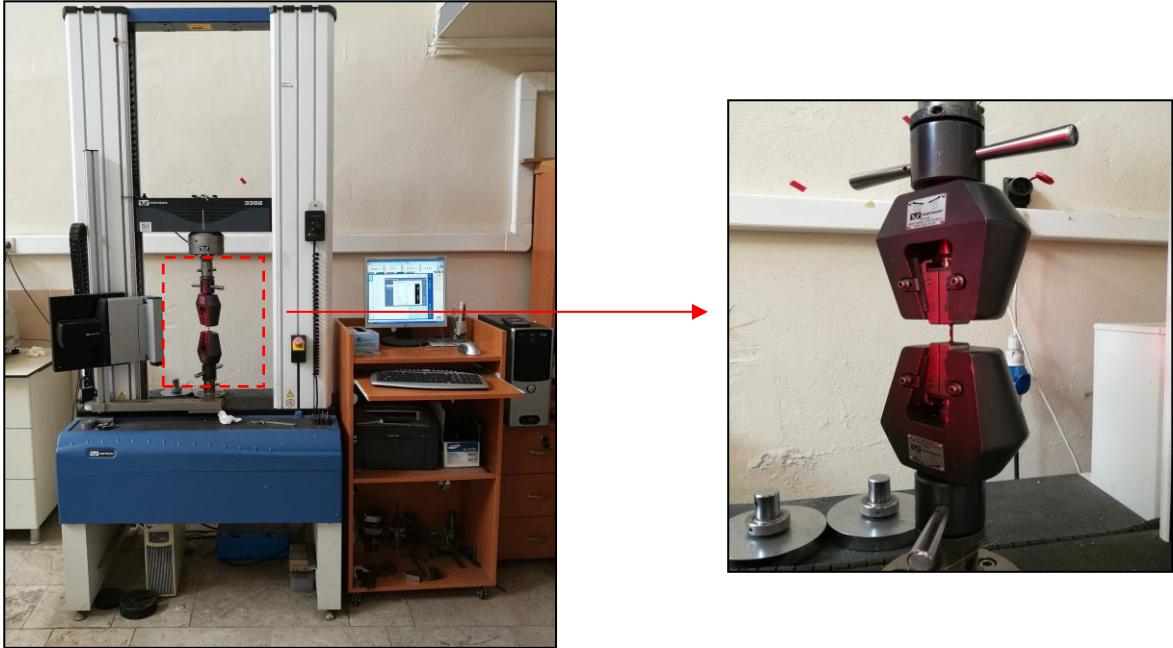


Şekil 2.1. Çekme test numunesi

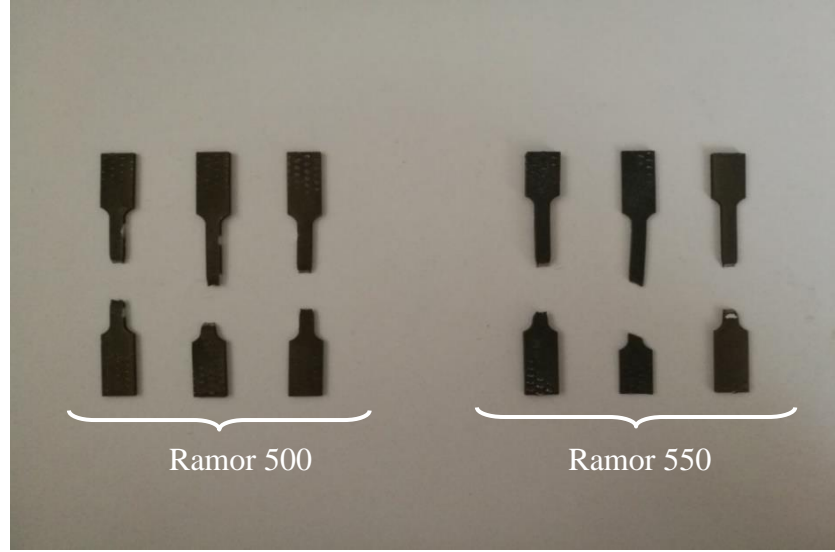


Şekil 2.2. Tel erozyon kesim makinası (a) ve çekme testi numunelerinin kesimi (b)

Hazırlanan numunelerin çekme testleri INSTRON 3382 test cihazı ile $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.3). Her bir malzeme için üç adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrası kopan numuneler ise Şekil 2.4'te yer almaktadır.

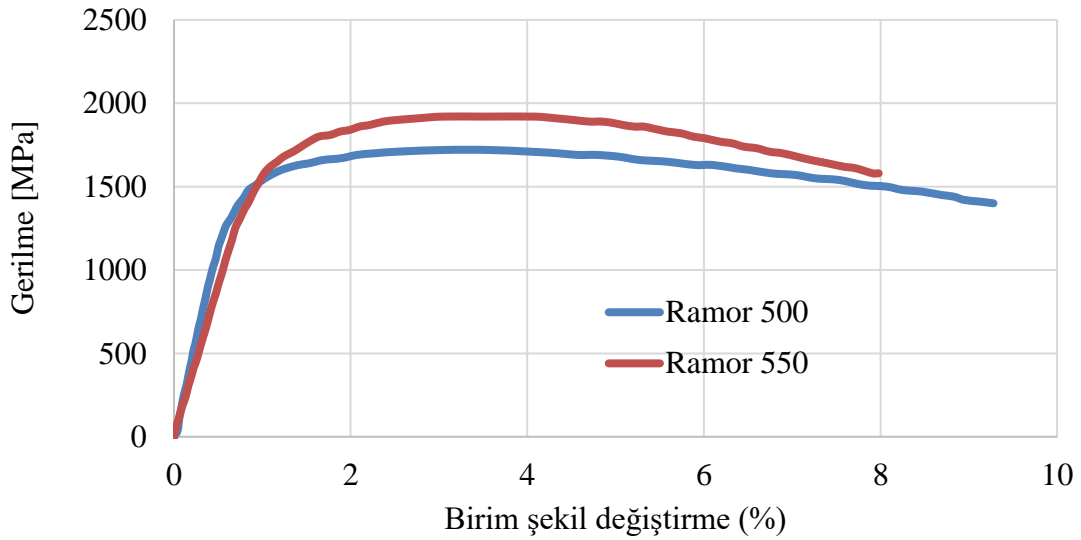


Şekil 2.3. Instron 3382 çekme cihazı



Şekil 2.4. Çekme testi sonrası kopan numuneler

Şekil 2.5'te Ramor 500 ve Ramor 550'nin ortalama gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Tablo 2.1'de ise elde edilen değerler belirtilmiştir. Ramor 500 için sırasıyla ortalama akma dayanımı, ortalama çekme dayanımı ve ortalama kopma uzaması sırasıyla 1481 MPa, 1722 MPa ve %9.3 olarak elde edilmiştir. Ramor 550 için ise ortalama akma dayanımı, ortalama çekme dayanımı ve ortalama kopma uzaması sırasıyla 1636 MPa, 1928 ve %8 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar kıyaslandığında Ramor 550 zırh çeliği, Ramor 500'e nazaran daha mukavemetli ve daha az sünek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



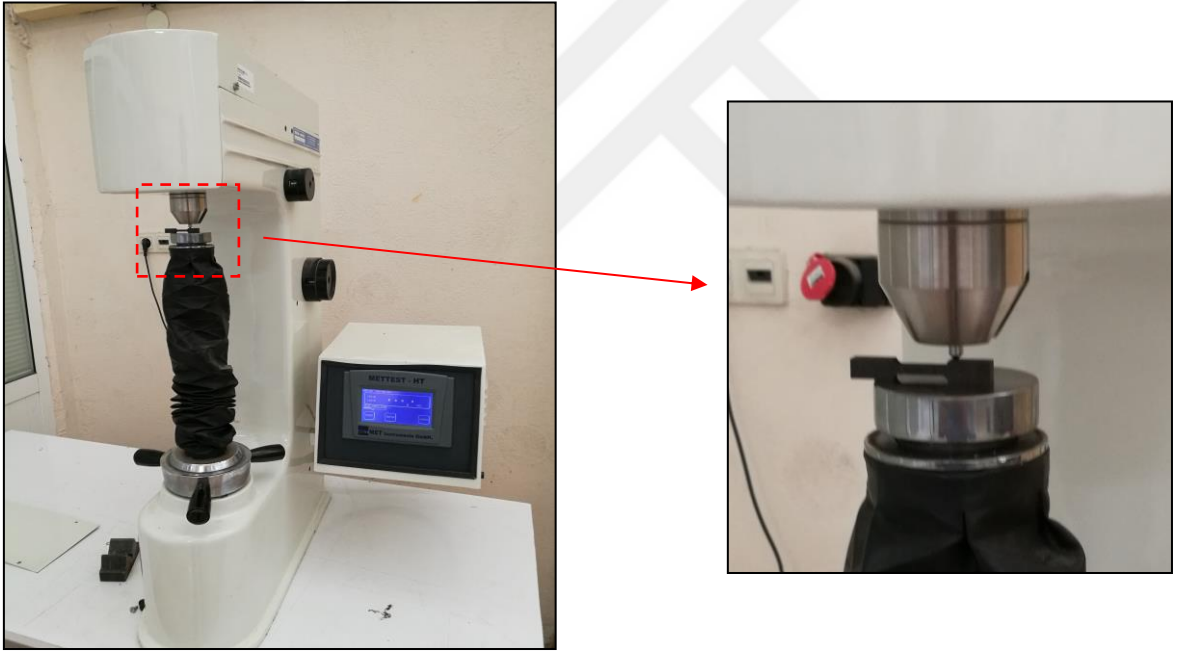
Şekil 2.5. Ramor 500 ve Ramor 550 için mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Tablo 2.1. Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin mekanik sonuçları

	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
Ramor 500	1481	1722	9.3
Ramor 550	1636	1928	8

2.1.2. Sertlik Ölçümleri

Her iki malzemenin Rockwell (HRC) sertlik değerleri Şekil 2.6'da gösterilen METTEST-HT sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Her bir malzeme üzerinde beş adet ölçüm yapılmıştır.



Şekil 2.6. METTEST-HT sertlik ölçüm cihazı

Tablo 2.2'de Rockwell (HRC) cinsinden yapılan sertlik ölçümleri sonrası ortalama sertlik değerleri Ramor 500 için 48.1 HRC, Ramor 550 için ise 52.2 HRC olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre Ramor 550'nin Ramor 500'e göre %8-10 daha sert bir malzeme olduğu söylenebilir.

Tablo 2.2. Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin sertlik ölçümleri

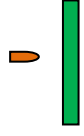
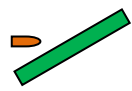


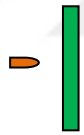
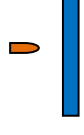
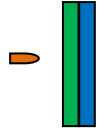
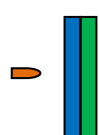
	Ramor 500					Ramor 550				
Test No	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Sertlik Değeri	47.3	47.3	48.7	49.2	48.2	52.3	51.8	52.5	52.6	51.7
Ortalama										
Sertlik Değeri (HRC)	48.1					52.2				

2.2. Balistik Testler

Tez kapsamında sekiz adet balistik test gerçekleştirilmiştir. Bu testler, monolitik plaka ve çift tabakalı kompozit plaka ve eğik plakalar olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlere ait detaylar Tablo 2.3'te yer almaktadır.

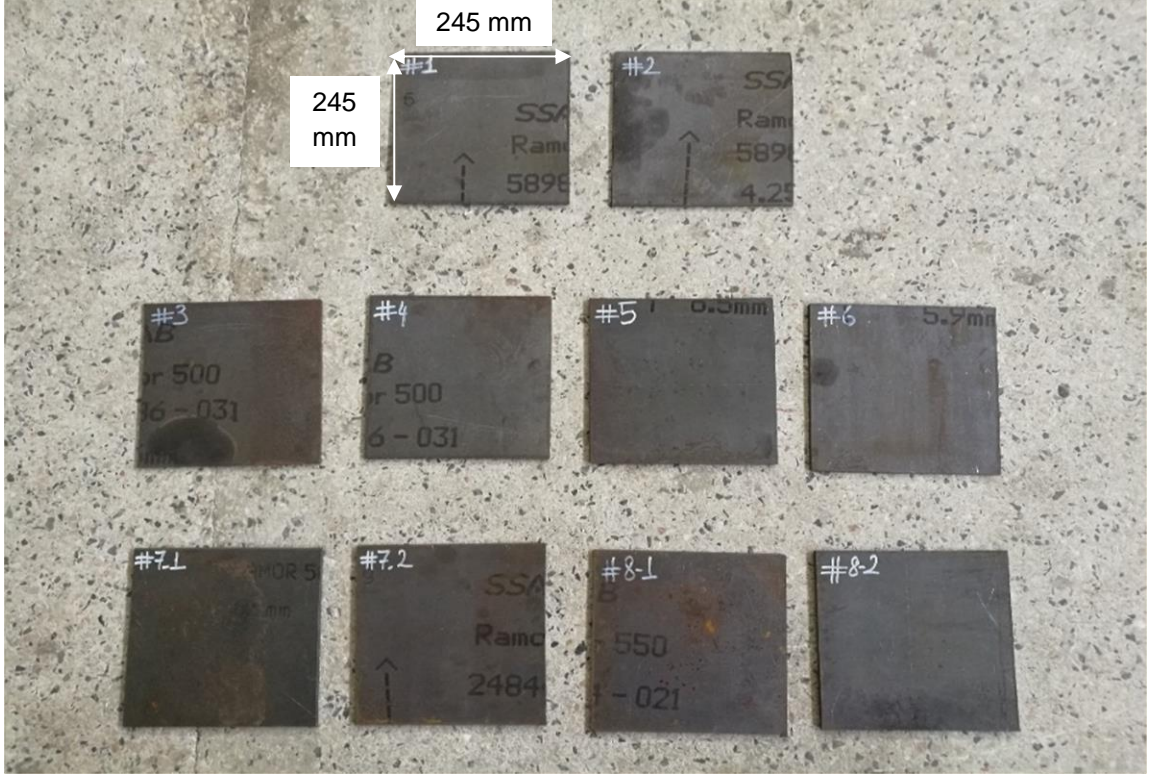
Balistik testlere Tablo 2.3'te görüldüğü gibi 4.5 mm kalınlığında olan Ramor 500 eğik plakalar ile başlandı. Plakalar sırasıyla 0°, 60°, 30° ve 45° açılarda konumlandırılması ve mühimmat olarak 7.62 Ball kullanılması planlanmıştır. İkinci test grubuna 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 monolitik plakalar ile devam edildi. Çarpma açısı 0° olarak ayarlandı, mühimmat olarak 7.62 AP kullanıldı. Son olarak, çift tabakalı kompozit plaka testleri gerçekleştirildi. Bu test tipinde ilk olarak 6.7 mm kalınlığında olan Ramor 500 ön plaka, 6.2 mm kalınlığında olan Ramor 550 arka plaka olarak kullanılmıştır. Diğer çift tabakalı kompozit plaka testinde ise birinci testte uygulanan plaka sıralamasının tersi uygulanmıştır. Bu test grubunda da çarpma açısı 0° olarak ayarlanmış ve mühimmat olarak 7.62 AP kullanılmıştır.

Tablo 2.3. Balistik test planı

Test	Plaka No	Geometri	Test Tipi	Malzeme	Plaka Kalınlığı (mm)	Çarpma Açısı	Mühimmat
1	1		Eğik Plaka	Ramor 500	4.5	0°	7.62 Ball
2	2		Eğik Plaka	Ramor 500	4.5	60°	7.62 Ball
3	3		Eğik Plaka	Ramor 500	4.5	30°	7.62 Ball
4	4		Eğik Plaka	Ramor 500	4.5	45°	7.62 Ball
5	5		Monolitik Plaka	Ramor 500	6.7	0°	7.62 AP
6	6		Monolitik Plaka	Ramor 550	6.2	0°	7.62 AP
7	7-1 7-2		Çift Tabakalı Kompozit Plaka	Ramor 500 + Ramor 550	6.7 + 6.2	0°	7.62 AP
8	8-1 8-2		Çift Tabakalı Kompozit Plaka	Ramor 550 + Ramor 500	6.2 + 6.7	0°	7.62 AP

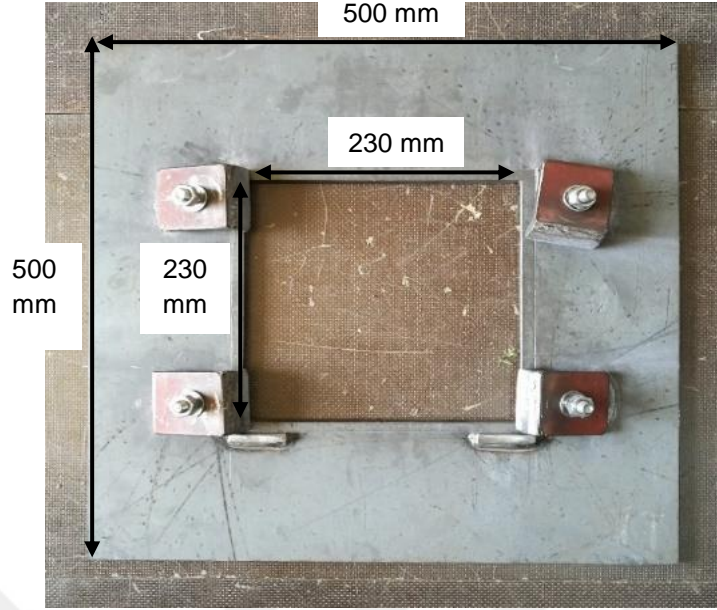
Ramor zırh çeliği plakaları başlangıçta 500 mm x 500 mm boyutlarında SSAB Türkiye temsilciliğinden temin edilmiştir. Plakaların kısıtlı miktarda bulunması sebebiyle

arzu edilen sayıda testi gerçekleştirmek amacıyla plakalar Çolakoğlu Makine’de (Trabzon) bulunan CNC Lazer ile eşdeğer dört adet kare formunda kesilmiş ve test tipine uygun olarak sınıflandırılmıştır. Kesim sonrası plakaların net boyutları 245 mm x 245 mm olarak elde edilmiştir. Plakaların kesim ve sınıflandırılma sonrası fotoğrafları Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Balistik deneylerde kullanılan zırh çeliği plakaları

Zırh malzemelerinin balistik özelliklerinin tayini için kullanılan plaka numune boyutu 500 mm x 500 mm’dir. Bu nedenle balistik laboratuvarlarda plakaların bağlandığı bölüm bu boyutlara uygun olarak tasarlanmıştır. Dolayısıyla ek olarak hedef tutucu yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere 10 mm kalınlığına sahip Armox Advance zırh çeliği plakası kullanılarak merkez kısmında 230 x 230 mm² kare formatına sahip boşluk bulunan bir hedef tutucu aparat imal edilmiştir.



Şekil 2.8. Hedef tutucu aparat

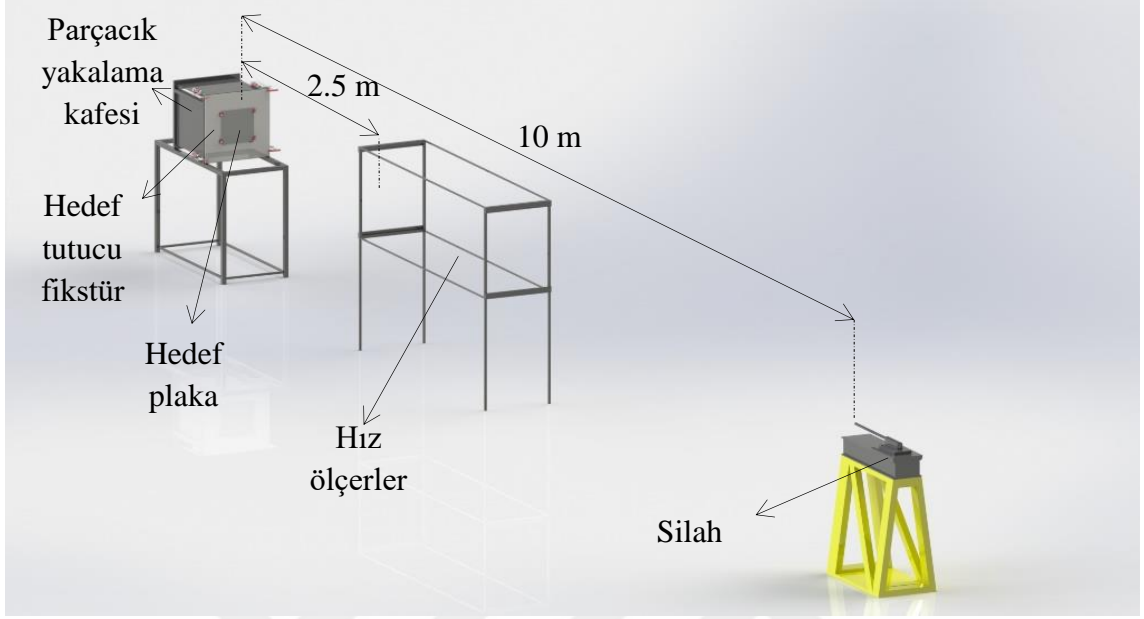
Balistik testler Sakarya'da Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş.'nin Balistik Test Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Otokar Balistik Test Laboratuvarı [104]

Laboratuvar düzeni, şematik olarak Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Silah, farklı kalibrelerde hafif mühimmat ateşleme yeteneğine sahiptir. Bu işlem namlu ve mermi yuvası değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Silah, merminin yuvaya yerleştirilmesinden sonra uzaktan kumanda ile balistik test laboratuvarı dışından ateşlenmektedir. Test

düzeneğinde hedeften 2.5 m geride bulunan hız ölçerle mermimin hedefe çarpma hızı ölçülmektedir.



Şekil 2.10. Otokar Balistik Test Laboratuvarının şematik gösterimi

Hedef plaka, hız ölçerler ve silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı için Avrupa EN 1522/1523 standardı göz önüne alınmıştır. Bu nedenle testler öncesinde mermi hızı, kovan içindeki barut miktarı ile ayarlanarak 7.62 Ball tipi mermi için 820 ± 10 m/s, 7.62 AP tipi mermi için ise 830 ± 10 m/s hız aralığında tutulmaya çalışılmıştır. Şekil 2.11’de testlerde kullanılan mühimmatlar gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Balistik testlerde kullanılan 7.62x51 mm NATO AP (solda) ve 7.62x51 mm NATO Ball (sağda) fişekleri

Balistik testlerin sonuçları Tablo 2.4'te verilmiştir. Tam nüfuz hali olarak, Bölüm 1.2.2'de belirtildiği üzere merminin hedefte ışık geçecek kadar delik oluşturması durumu göz önüne alınmıştır. Ayrıca, tüm plakalar Bölüm 1.2.3'te tanımlanan hedef malzeme kalınlık sınıflandırılmasında belirtilen koşullara göre sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.4. Balistik test sonuçları

Test No	Plaka No	Atış No	Mermi hızı (m/s)		Sonuç	Malzeme Kalınlık Tipi
			Çıkış Hızı	Çarpma hızı		
1	1	1	827	820	Tam nüfuz	İnce
2	2	1	842	834	Sekme	Yarı sonsuz
3	3	1	843	835	Kısmi nüfuz	Orta
5	5	1	826	817	Tam nüfuz	İnce
6	6	1	831	823	Tam nüfuz	İnce
7	7-1	1	828	820	Tam nüfuz	İnce
		2	831	823	Kısmi nüfuz	Orta
	7-2	1	828	820	Tam nüfuz	İnce
		2	831	823	Kısmi nüfuz	Orta
8	8-1	1	836	828	Tam nüfuz	İnce
		2	832	824	Kısmi nüfuz	Orta
	8-2	1	836	828	Tam nüfuz	İnce
		2	832	824	Kısmi nüfuz	Orta

Eğik plaka testlerine 1 no'lu plaka ile başlanmıştır ve çarpma açısı 0° olarak ayarlanmıştır (Şekil 2.12). Eğik plaka testlerine 0° açı ile başlanmasının nedeni peşi sıra yapılacak olan 0°'den büyük açılı testlere referans teşkil etmesidir. 1 no'lu plakaya yapılan atış sonrası yapılan incelemede, merminin hedefi delerek geçtiği ve yapraklanma tipi hasar mekanizması oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 2.13). Bölüm 1.4.1.4.b'de yer alan Tablo 1.5'te EN 1522/1523 balistik standardına göre üretici firma tarafından FB6 koruma seviyesine göre, Ramor 500'ün 6.5 mm kalınlığında olması önerilmektedir. Plaka numune boyutu haricinde standarda uygun olarak gerçekleştirilen bu testte, 4.5 mm kalınlığındaki Ramor 500 ile önerilen plaka kalınlığının altında kalınması nedeniyle balistik koruma elde edilemediği doğrulanmıştır.

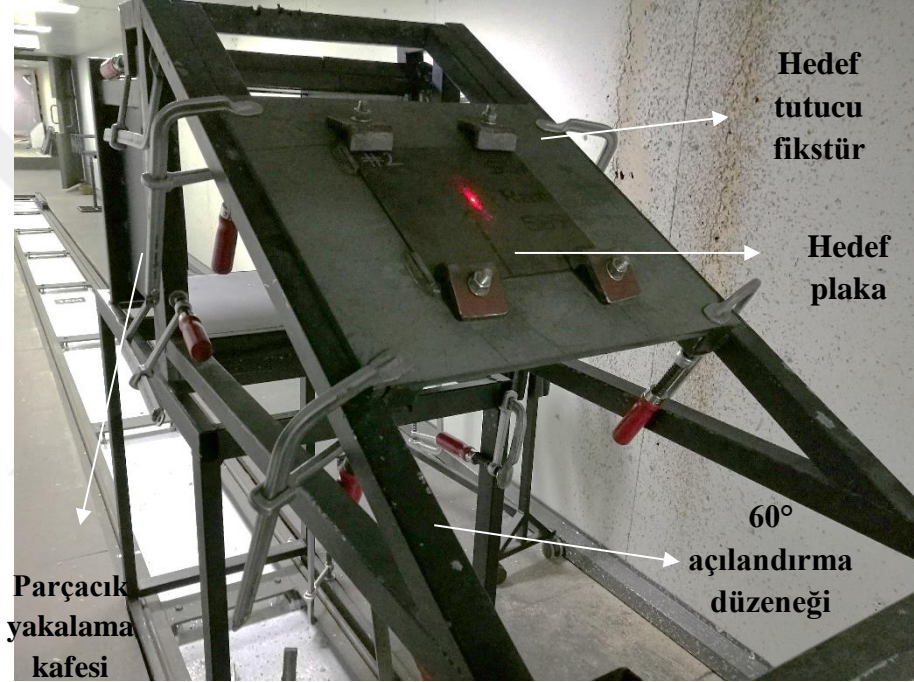


Şekil 2.12. 0° derece testte kullanılan plaka ve hedef tutucu aparatın görünümü



Şekil 2.13. 1 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

Eğik plakaların testine 2 no'lu plaka ile devam edilmiş ve 60° çarpma açısını elde etmek için hedef tutucu fikstür ile parçacık yakalama kafesi arasında 60° açılı düzenek kullanılmıştır (Şekil 2.14). Atış sonrası yapılan incelemeler sonrası merminin hedefte herhangi bir hasar oluşturmadan sektiği gözlemlenmiştir. Yalnızca ön yüzeyde yer alan merminin çarptığı bölgede, mermi gömleğinin teması nedeniyle sıyırma izi oluşmuştur (Şekil 2.15). Bölüm 1.2.4'te tanımlanan kesit alan yoğunluğuna göre 60° çarpma açısında plakanın kalınlığı 9 mm olmaktadır. FB6 koruma seviyesine göre 6.5 mm ve üzeri olarak tavsiye edilen kalınlık değeri, 60° açılandırma ile elde edilmiştir.

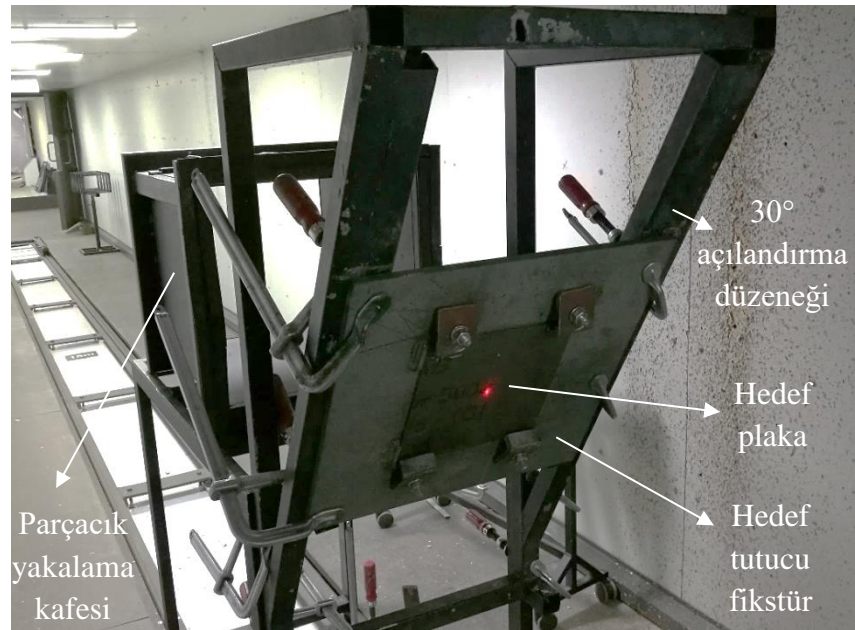


Şekil 2.14. 60° açıda gerçekleştirilen testte hedef plaka ve tutucu aparatın görünümü

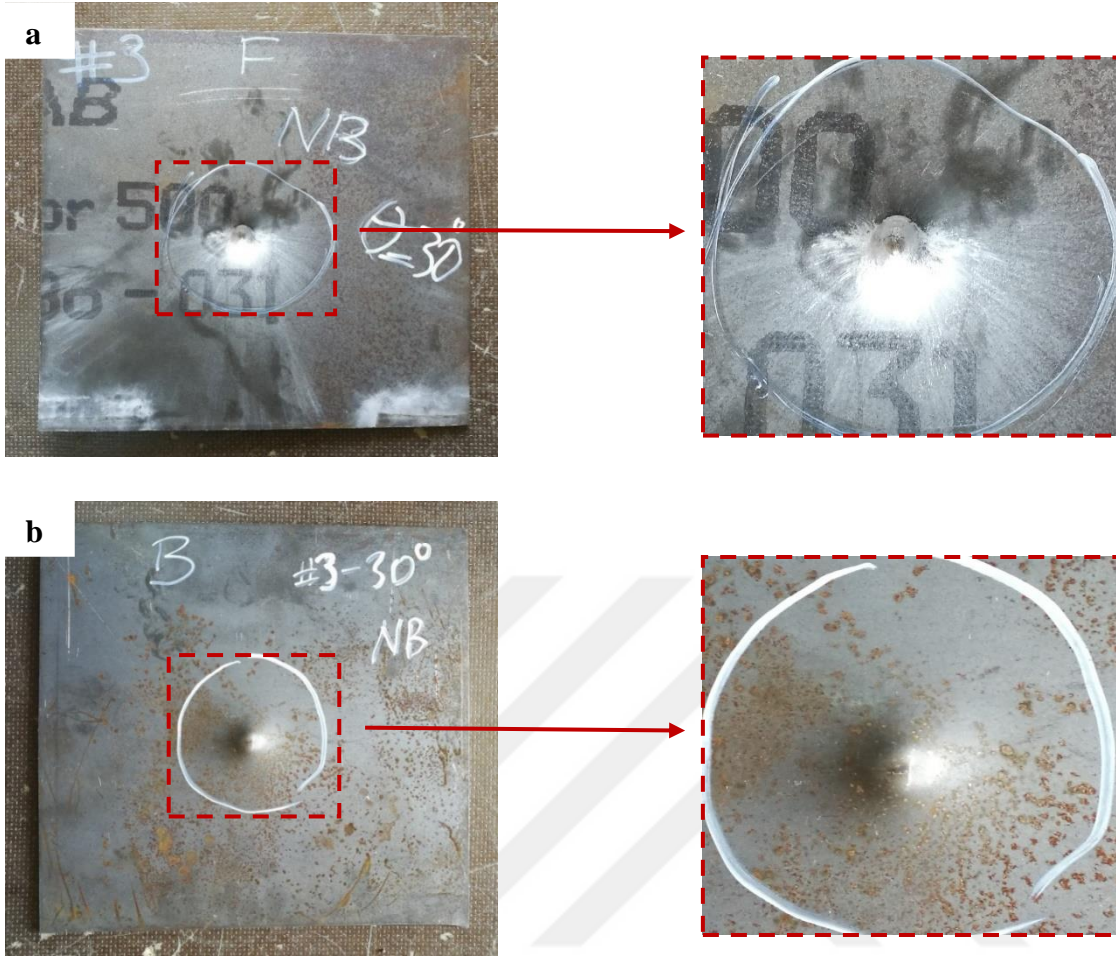
Üçüncü eğik plaka testine 3 no'lu plaka ile devam edilmiştir (Şekil 2.16). Atış sonrası mermi hedefin ön yüzeyinde çöküntü, arka yüzeyinde ise şişme oluşturarak hedefi delememiştir (Şekil 2.17). Hedefin arka yüzeyinde meydana gelen şişme yüksekliği 8 mm olarak ölçülmüştür. Bu test sonucunda, 4.5 mm kalınlığındaki Ramor 500 zırh çeliğinde 7.62x51 mm NATO Ball mermisine karşı 30° çarpma açısı için delinme oluşmadığı için güvenli açı değeri olduğu görülmüştür. Fakat, Bölüm 1.2.4'te tanımlanan kesit alan yoğunluğu kavramına göre 30° çarpma açısında plakanın kalınlığı 5.2 mm olmaktadır. FB6 koruma seviyesine göre 6.5 mm'nin üzerinde olması gereken kalınlık değeri, 30° açılandırma ile elde edilememiştir.



Şekil 2.15. 2 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri



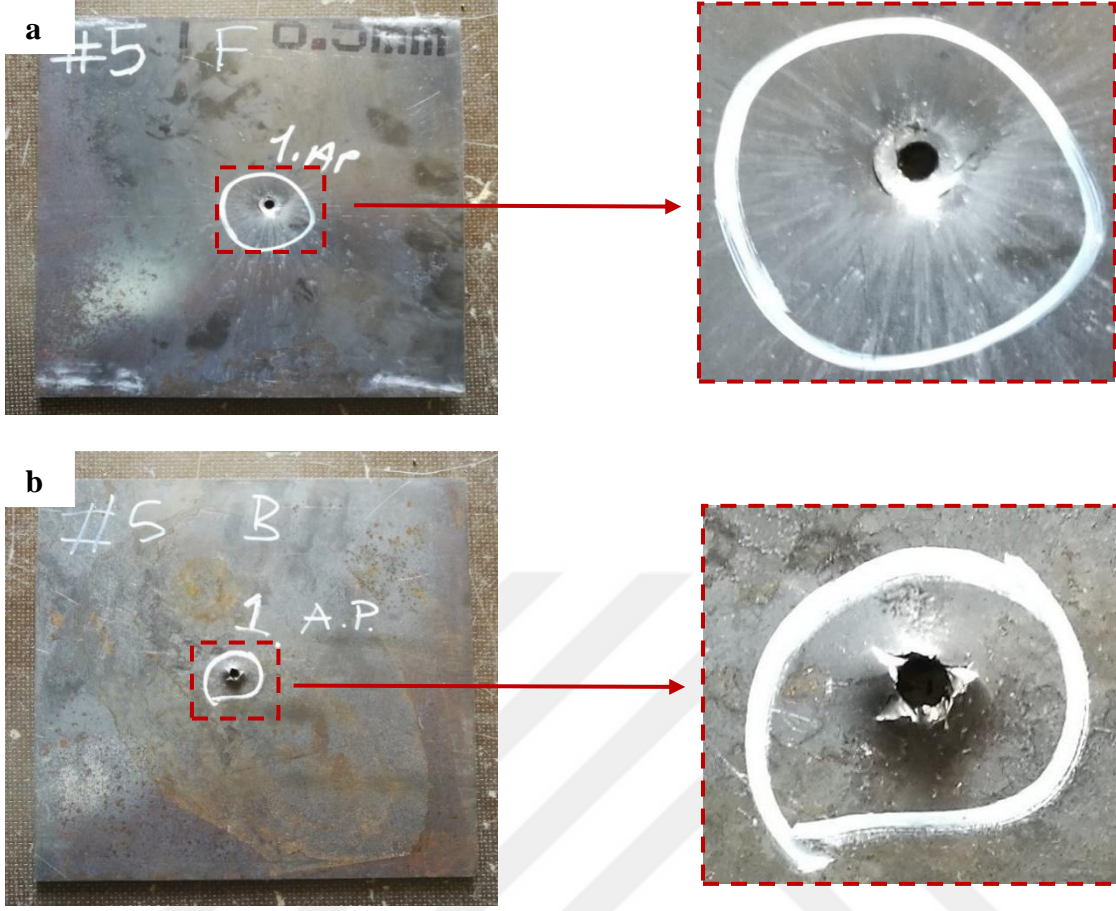
Şekil 2.16. 30° açılı test öncesi lazer ile plaka üzerinde hedef işaretleme



Şekil 2.17. 3 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

Eğik plaka testlerinin sonucusu olan 45° açılı çarpma testi (4 no'lu plaka), 30° çarpma testi sonrası merminin hedefe kısmî nüfuz etmesi ve 8 mm'den düşük şişme yüksekliği oluşacağı öngörüldüğünden dolayı iptal edilmiştir.

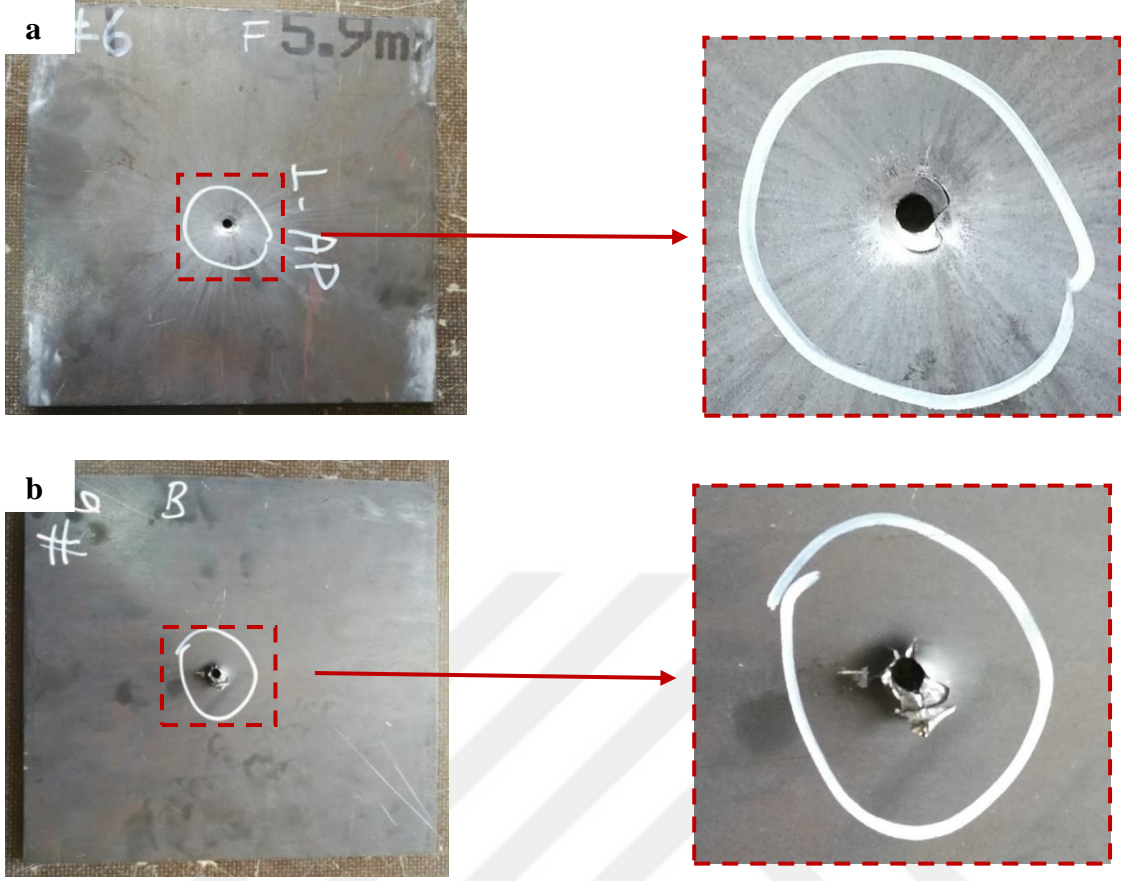
Monolitik plaka testlerine 6.7 mm kalınlığında 5 no'lu plaka olan Ramor 500 ile başlanmıştır. Atış sonrası mermi hedefi delmiş ve yapraklanma tipi hasar mekanizması oluşmuştur (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. 5 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

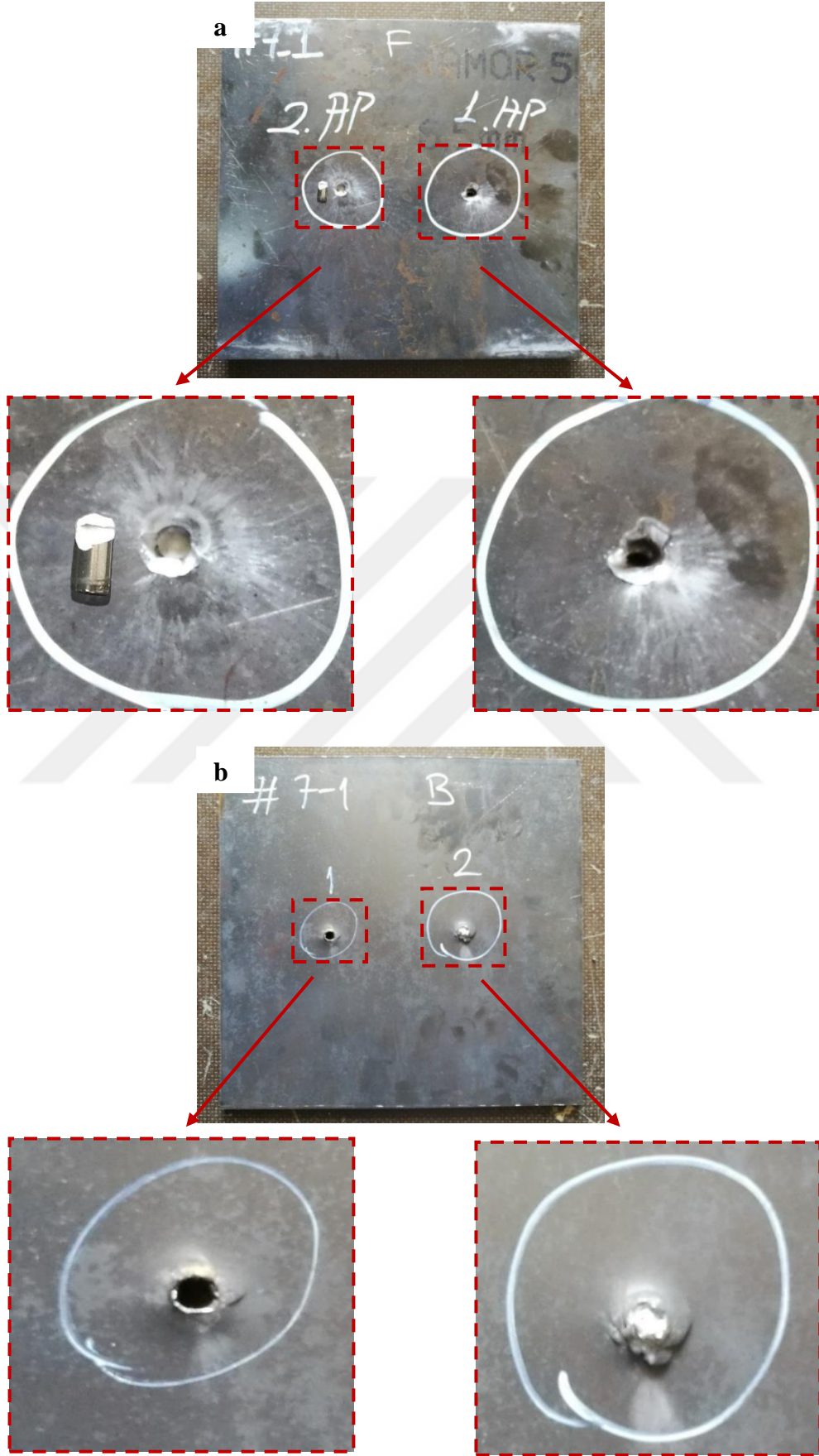
İkinci monolitik plaka testi, 6.2 kalınlığında 6 no'lu Ramor 550 ile gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası mermi hedefi delmiş ve yapraklanma tipi hasar mekanizması oluşmuştur (Şekil 2.19).

FB7 koruma seviyesine göre, Ramor 500'ün 14.5 mm, Ramor 550'nin 13 mm kalınlığında olması önerilmektedir (Tablo 1.5). Monolitik plaka testlerinde kullanılan 6.7 mm kalınlığındaki Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığındaki Ramor 550'nin FB7 koruma seviyesine göre önerilen plaka kalınlığı değerlerinden düşük kalınlıkta olmaları nedeniyle kabul edilemez seviyede hasara/delinmeye maruz kaldıkları gözlenmiştir.

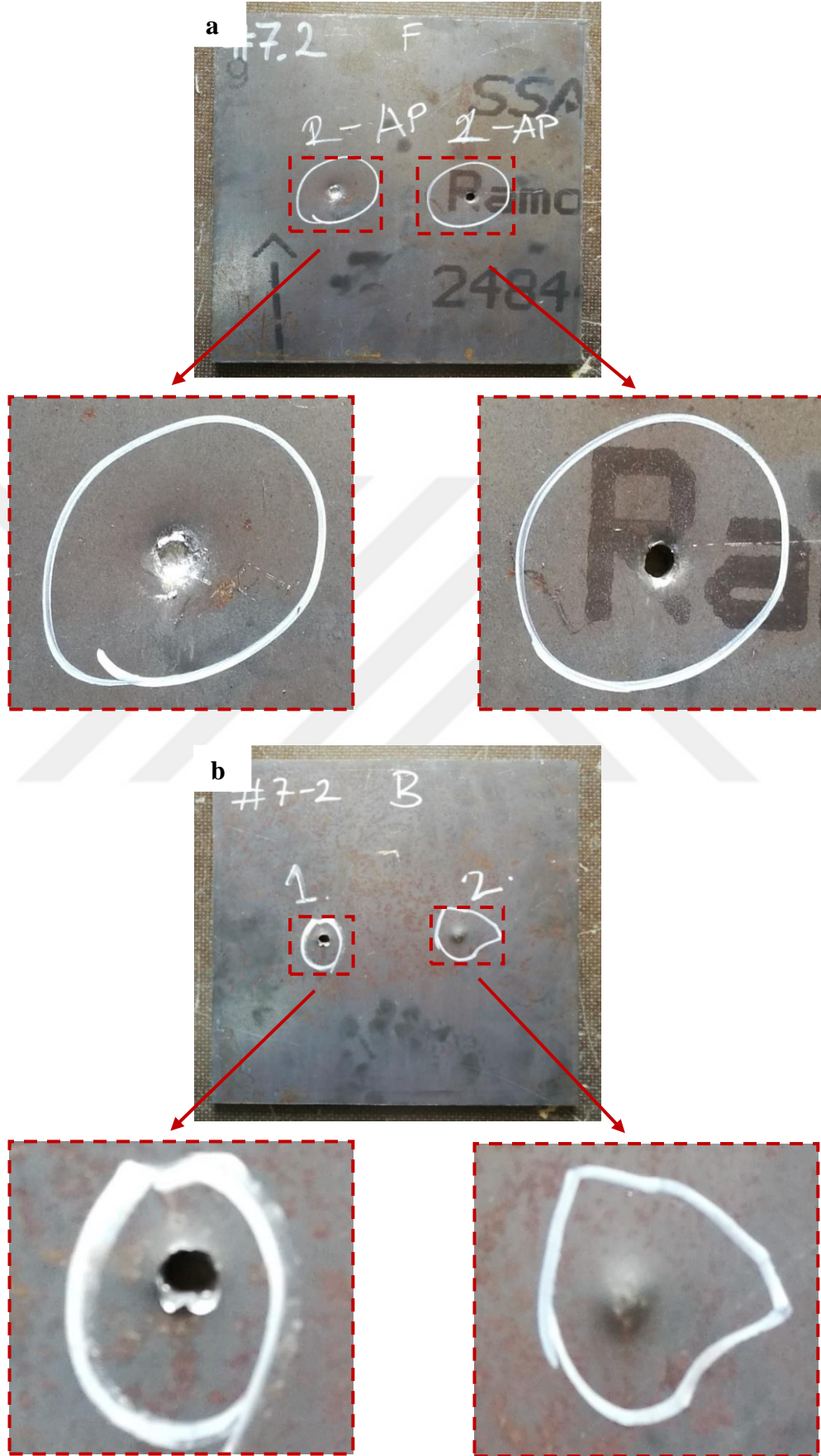


Şekil 2.19. 6 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

Çift tabakalı kompozit plaka testlerine 7 no'lu test olan 6.7 mm kalınlığındaki Ramor 500 plakasının önde 6.2 mm kalınlığındaki Ramor 550 plakasının arkada olduğu yapı ile başlanmıştır. Sonuçların daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla iki adet atış gerçekleştirilmiştir. Birinci mermi her iki plakayı da delmiştir. 7-1 ve 7-2 no'lu plakaların arka yüzeylerinde tıkaç oluşumu hasar mekanizması meydana gelmiştir. 7-2 no'lu plakanın arka yüzeyinde birinci atış sonrası meydana gelen delik çapı 4.2 mm ölçülmüştür. İkinci atışta ise merminin bir kısmı 7-1 no'lu plaka içerisinde gömülmüş ve 7-2 no'lu plaka ön yüzeyinde bir miktar çöküntü meydana gelmiştir. Ayrıca 7-2 no'lu plakanın arka yüzeyindeki ikinci atış sonrası meydana gelen şişme miktarı 2.3 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 2.20 ve Şekil 2.21).



Şekil 2.20. 7-1 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

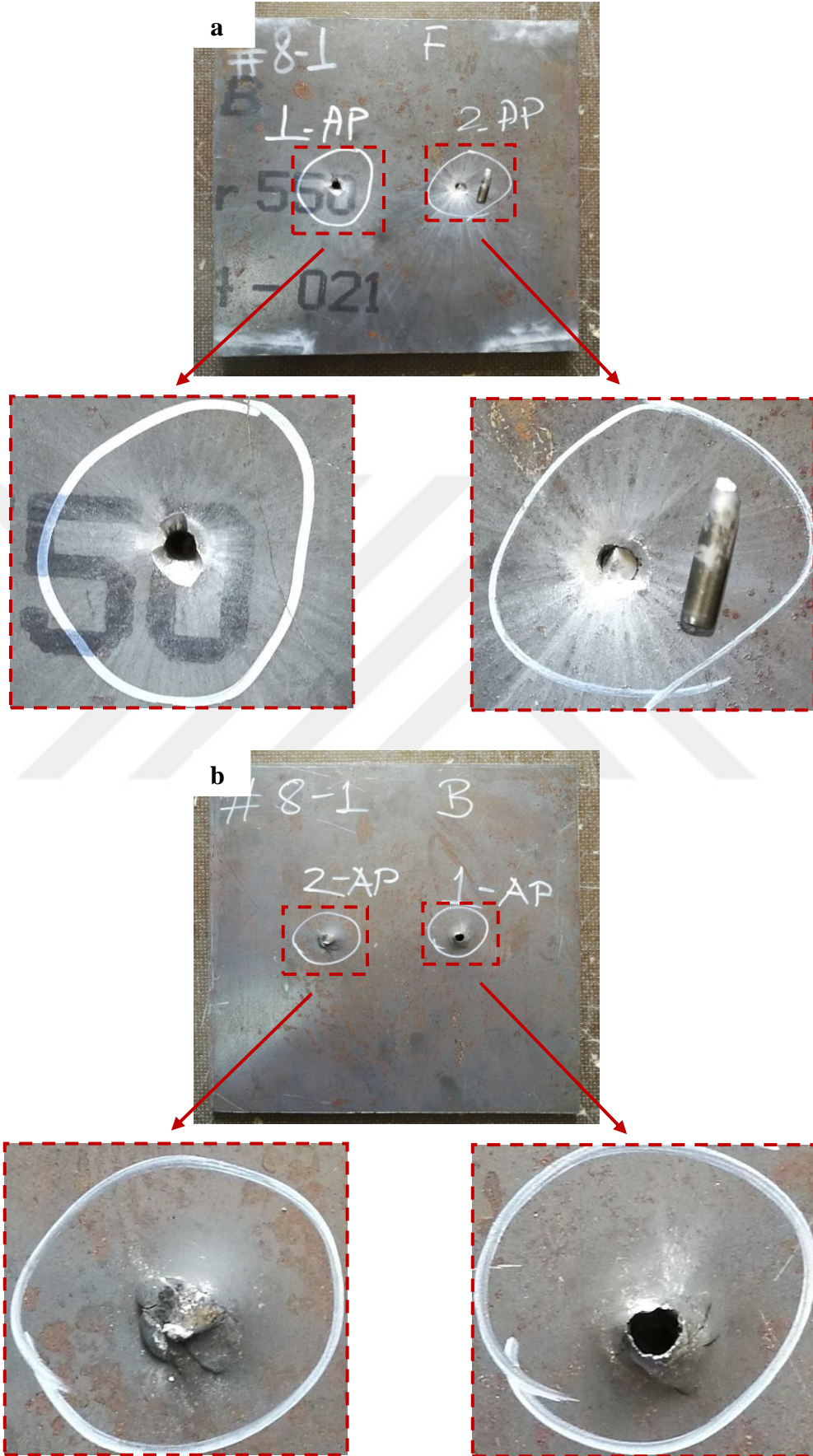


Tıkaç oluşumu hasar mekanizması, sünek delinme hasar mekanizması ile benzerlik göstermektedir. Fakat sünek delinmede plaka yüzeyinde oluşan delik çapı, mermi çapından daha büyük olur [106, 107]. Malzeme sertliği kıyas edilemez ve plakadan ayrılan tıkaç görülemediği sürece plaka yüzeyinde oluşan delik çapı ölçülerek oluşan hasar mekanizması belirlenir.

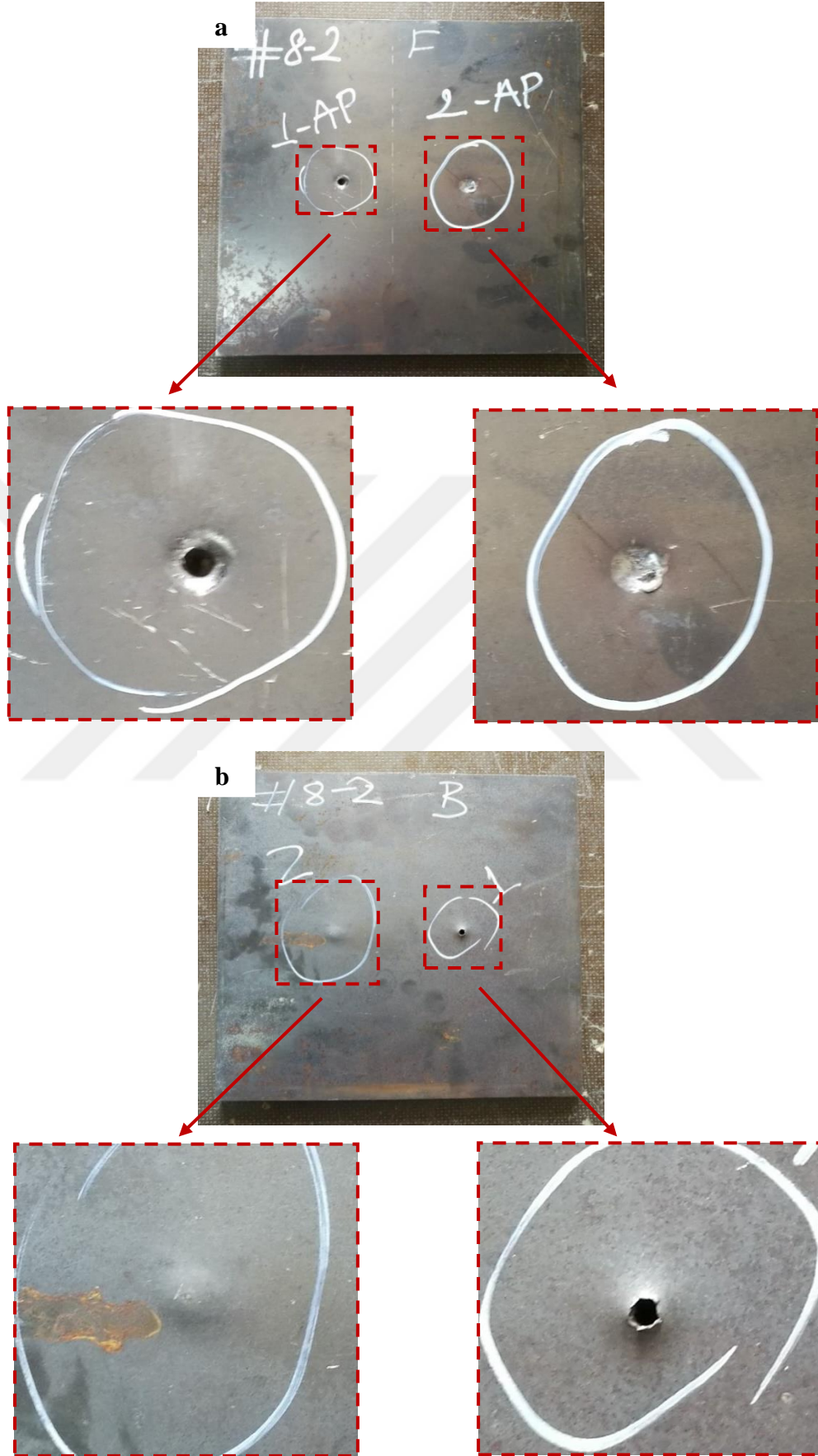
Diğer çift tabakalı kompozit plaka testinde ise bir önceki yapının tersi olan 6.2 mm kalınlığındaki Ramor 550 plakasının önde, 6.7 mm kalınlığındaki Ramor 500 plakasının arkada olduğu sıralama denenmiştir. Birinci atışta mermi bir önceki testte olduğu gibi her iki levhayı da delmiştir. 8-1 ve 8-2 no'lu plaka arka yüzeylerinde tıkaç oluşumu hasar mekanizması meydana gelmiştir. 8-2 no'lu plakanın arka yüzeyinde birinci atış sonrası meydana gelen delik çapı değeri 3.5 mm'dir. İkinci atışta ise, bir önceki teste benzer şekilde mermi 8-1 no'lu plaka içerisine gömülmüş ve 8-2 no'lu plaka ön yüzeyinde bir miktar çöküntü oluşturmuştur. 8-2 no'lu plaka arka yüzeyindeki ikinci atış sonrası meydana gelen şişme miktarı 1.9 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 2.22 ve Şekil 2.23).

Şekil 2.24'te ise 7 no'lu ve 8 no'lu testlerin ikinci atışı sonrası bir kısmı hedefe gömülen bir kısmı ise kırılıp dışarıda kalan mermi çekirdekleri yer almaktadır. 7 no'lu testin ikinci atışında mermi çekirdeğinin neredeyse yarısı plakaya gömülmüş, diğer yarısı ise kırılıp plakayı delemeyen yere düşmüştür. 8 no'lu testin ikinci atışında ise kullanılan mermi çekirdeğinin küçük bir kısmı plakaya gömülmüş ve büyük bir kısmı ise kırılarak parçalanmıştır. Bu sonuçlardan hareketle, Ramor 550'nin önde yer aldığı çift tabakalı kompozit plaka yapısının mermiyi büyük oranda etkisiz hâle getirdiği düşünülebilir.

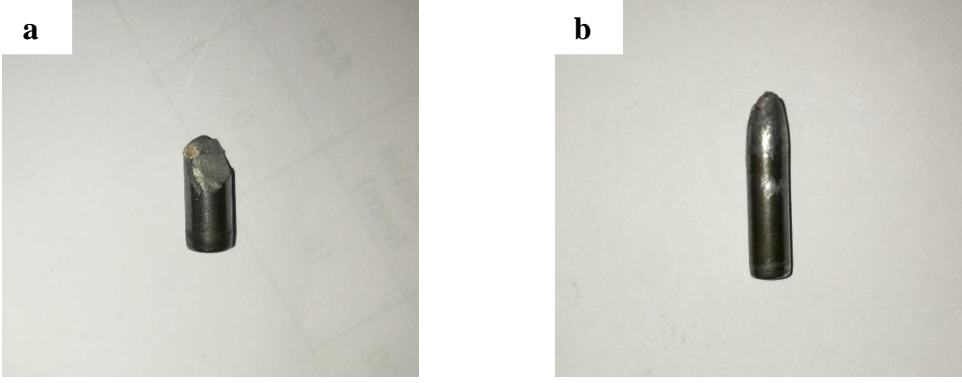
Çift tabakalı kompozit plaka testlerinde toplam kalınlıkları 12.9 mm olan bu yapılarda her iki plaka birinci atışta delinmiştir. İkinci atışta ise plakalar tamamen delinmemiş ancak kısmî nüfuz gerçekleşmiştir. Bu husus, FB7 koruma seviyesi için önerilen monolitik Ramor 500 için 14.5 mm ve Ramor 550 için 13 mm kalınlık değerleri ile uyumludur (Tablo 1.5).



Şekil 2.22. 8-1 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri



Şekil 2.23. 8-2 no'lu plakanın atış sonrası (a) ön, (b) arka yüzey görüntüleri

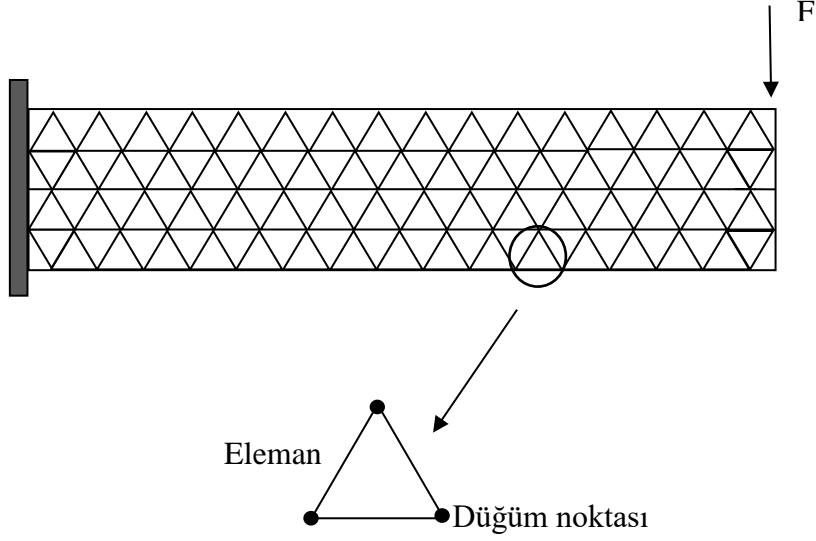


Şekil 2.24. Kırılan mermi çekirdekleri: (a)7 no'lu test-ikinci atış, (b) 8 no'lu test-ikinci atış

2.3. Sayısal Analizler

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde sunduğu kolaylık ve ürün imalat süreçlerinde deneme-yanılma ve ön tasarım sürecini kısaltması nedeniyle günümüzde sıklıkla tercih edilen sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminin esası, karmaşık bir problemi sadeleştirerek çözüm elde etmeye dayanır. SEY, çözüm bölgesini çok sayıda birbirleri ile bağlantılı küçük parçalara ayrılıp bu parçaların her birinin kendi içinde çözülmesiyle bölgenin tamamı için sonuçların elde edildiği bir yöntemdir [108, 109].

Şekil 2.25'te görülebileceği üzere ankastre kiriş, küçük parçalara bölünerek sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Bu işleme, ağ örme (meshing) adı verilmektedir. Bölünen her bir parçaya eleman (element), bu elemanların birleşme noktalarına ise düğüm noktası (node) adı verilmektedir. Ağ örmenin hassasiyeti arttıkça problem için elde edilecek sonucun doğruluk oranı artmaktadır. Öte yandan ağ örmenin hassasiyetini artırmak problemin çözüm süresini artıracığı için optimum ağ örgüsü koşullarının sağlanması gerekmektedir [110].



Şekil 2.25. Ankastre kirişin sonlu elemanlara bölünmesi

SEY' in genel işlem basamakları ise aşağıdaki gibidir:

1. Uygun analiz tipi belirlenir;
2. Model oluşturulur;
3. Modele gerekli malzeme bilgisi aktarılır;
4. Örgü (mesh) yapısı uygulanır;
5. Problemin sınır şartları tanımlanır;
6. Problem çözülür ve sonuçlar değerlendirilir.

2.3.1. Malzeme Modeli

Balistik testlerin sayısal analizinde en önemli parametre, mermi malzemesi ve hedef malzemesi için dayanım ve hasar modelinin tanımlanmasıdır. Literatürde genel yükleme durumu altındaki malzemeler ve yapılarda hasar tahmini için birleşik bir model geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, birçok sünek malzeme modeli önerilmiştir. Johnson ve Cook tarafından ortaya koyulan Johnson-Cook dayanım ve hasar modeli, yapılan çalışmalarda verdiği yüksek doğruluk nedeniyle balistik problemlerin modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [84, 92, 93, 111-121]. Bu yüzden sonlu elemanlar analizinde hedef plakayı ve mermiyi tanımlamak için Johnson-Cook dayanım ve hasar modellerinin kullanılması uygun görülmüştür.

2.3.1.1. Johnson-Cook Malzeme Modeli Sabitlerinin Tanımlanması

Johnson-Cook dayanım modeli akma gerilmesini açık bir formda birim şekil değişimi, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık cinsinden ifade eder [122].

$$\sigma = [A+B \varepsilon_p^n] [1+C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right)] [1-\check{T}^m]$$

Burada A, akmaya başlama gerilmesi, B pekleşme modülü, n pekleşme katsayısı, ε_p eşdeğer plastik birim şekil değişimi, C birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti, m ısı yumuşama katsayısı, $\dot{\varepsilon}_p$ eşdeğer plastik birim şekil değişimi hızı, $\dot{\varepsilon}_0$ referans birim şekil değiştirme hızı ve \check{T} ise homolog sıcaklıktır. Denklem içerisindeki ilk parantez birim şekil değişim sertleşmesini, ikinci parantez birim şekil değişim hızına bağlı sertleşmeyi ve son parantez de sıcaklık etkilerini belirtir.

Johnson-Cook hasar modeli ise, kopma birim şekil değişimini; birim şekil değiştirme üç-eksenlilik oranı, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık cinsinden ifade eder [123].

$$\varepsilon_f = [D1+D2 \exp(-D3 \sigma)] [1+D4 \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}] [1+D5 \check{T}]$$

Burada D1, ..., D5 testlerden elde edilen malzeme hasar sabitleridir. Denklem içerisindeki ilk parantez birim şekil değişimini gerilme üç eksenlilik oranının bir fonksiyonu olarak ifade ederken, ikinci parantez birim şekil değiştirme hızı etkilerini ve son parantez ise sıcaklık etkilerini belirtir.

2.3.2. Hedef Plaka ve Merminin Modellenmesi

Gerçekleştirilen balistik testlerden 4.5 mm kalınlığındaki Ramor 500 plaka ile gerçekleştirilen eğik çarpma testlerinin (0° , 30° , 60°) sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde gerekli olan Johnson-Cook dayanım ve hasar sabitleri deneysel olarak elde edilemediğinden, SSAB tarafından üretilen eşdeğer bir zırh çeliği olan Armox 500T'ye ait literatürdeki veriler kullanılmıştır [84]. Tablo 2.5'te gösterildiği gibi, EN 1522/1523 balistik standardına göre FB6 ve FB7 koruma seviyelerine göre Ramor 500 için 6.5 ve 14.5 mm'lik plaka kalınlıkları önerilmektedir. Aynı koruma seviyelerinde Armox 500 T için önerilen plaka kalınlıkları ise sırasıyla 6 ve 14.5 mm olup Ramor 500

için önerilen değerlere çok yakın olması nedeniyle benzer balistik performans sağlayacağı öngörülmüştür. Tablo 2.6’da ise sayısal analizlerde kullanılan Johnson-Cook dayanım ve hasar sabitleri verilmiştir.

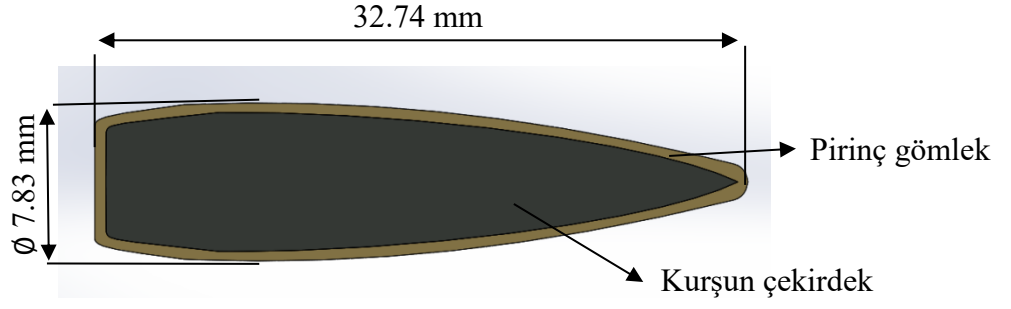
Tablo 2.5. Ramor 500 ve ArmoX 500T için EN 1522/1523 standardına göre ilgili koruma seviyeleri ve önerilen plaka kalınlıkları

EN 1522/1523					
Koruma Seviyesi	Tehdit	Hız (m/s)	Mesafe (m)	Ramor 500 (mm) [72]	ArmoX 500T (mm) [124]
FB6	5.56x45 SS109	950±10	10	6.5	6
	7.62x51 NATO Ball	830±10			
FB7	7.62x51 NATO AP	820±10	10	14.5	14.5

Tablo 2.6. Sayısal analizlerde kullanılan malzemeler için Johnson-Cook dayanım ve hasar modeli sabitleri

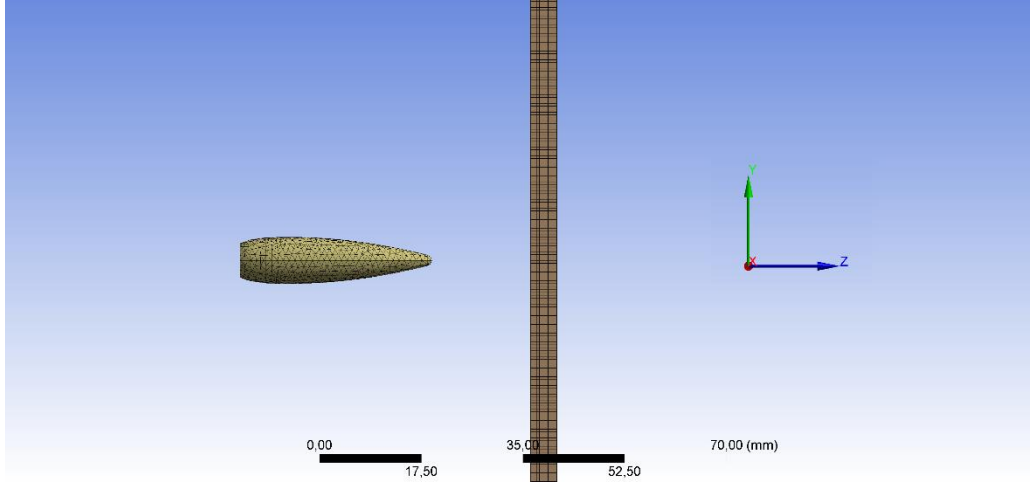
Malzeme Özellikleri	Zırh Çeliği [84]	Kurşun çekirdek [125]	Pirinç ceket [125]
T_m (K)	1800	760	1189
T_θ (K)	293	293	293
A (MPa)	1372	24	206
B (MPa)	835	300	505
N	0.2467	1.0	0.42
C	0.0617	0.1	0.01
M	0.84	1.0	1.68
D1	0.04289	-	-
D2	2.1521	-	-
D3	-2.7575	-	-
D4	-0.0066	-	-
D5	0.86	-	-
ε₀ (1/s)	1	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴

Plaka ve merminin katı modelleri, Solidworks 17 programında oluşturulmuş ve Ansys Workbench 16.2 ticari sonlu eleman analiz yazılımı ortamına aktarılmıştır. Şekil 2.26’da modellenen 7.62x51 mm NATO Ball mermisinin kesit görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.26. 7.62x51 mm NATO Ball mermisinin kesit görüntüsü

Şekil 2.27' de mermi ve hedef plaka modelinin ağ örgülü durumu, Tablo 2.7'de her bir parça için eleman sayısı verilmiştir. Hedef plaka için 2 milyondan fazla eleman kullanılarak yüksek doğrulukta çözüm amaçlanmıştır. Sayısal analizlerde Lagrange çözüm metodu kullanılmıştır. Sayısal analizler, 4 çekirdekli Intel Core Xeon E3-1505M v6 işlemcili ve 32 GB RAM kapasiteli bir iş istasyonu ile 6-8 saat arasında değişen sürelerde tamamlanmıştır.



Şekil 2.27. Modelin ağ örgülü gösterimi

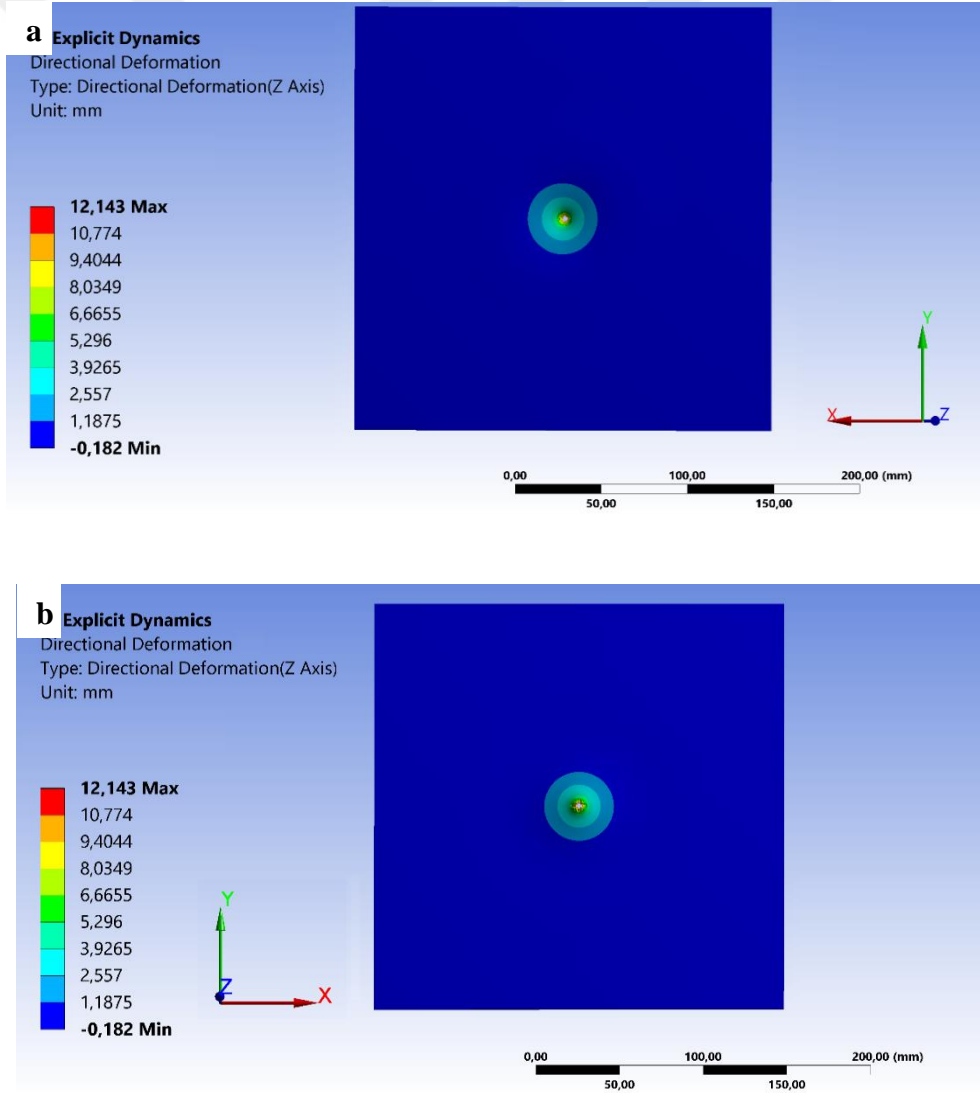
Tablo 2.7. Modelde kullanılan parçaların ağ örülen eleman sayıları

Parça adı	Hedef plaka	Mermi çekirdeği	Mermi gömleği
Eleman sayısı	2,162,846	9,036	6,888

Sınır koşulu olarak hedef plaka dört bir yanından düzlemde (X ve Y doğrultuları) sabitlenmiş ve mermiye çarpma hızı tanımlanmıştır. Bu hız değerleri Tablo 2.4'te yer almakta olan deney esnasında ölçülen çarpma hızlarıdır.

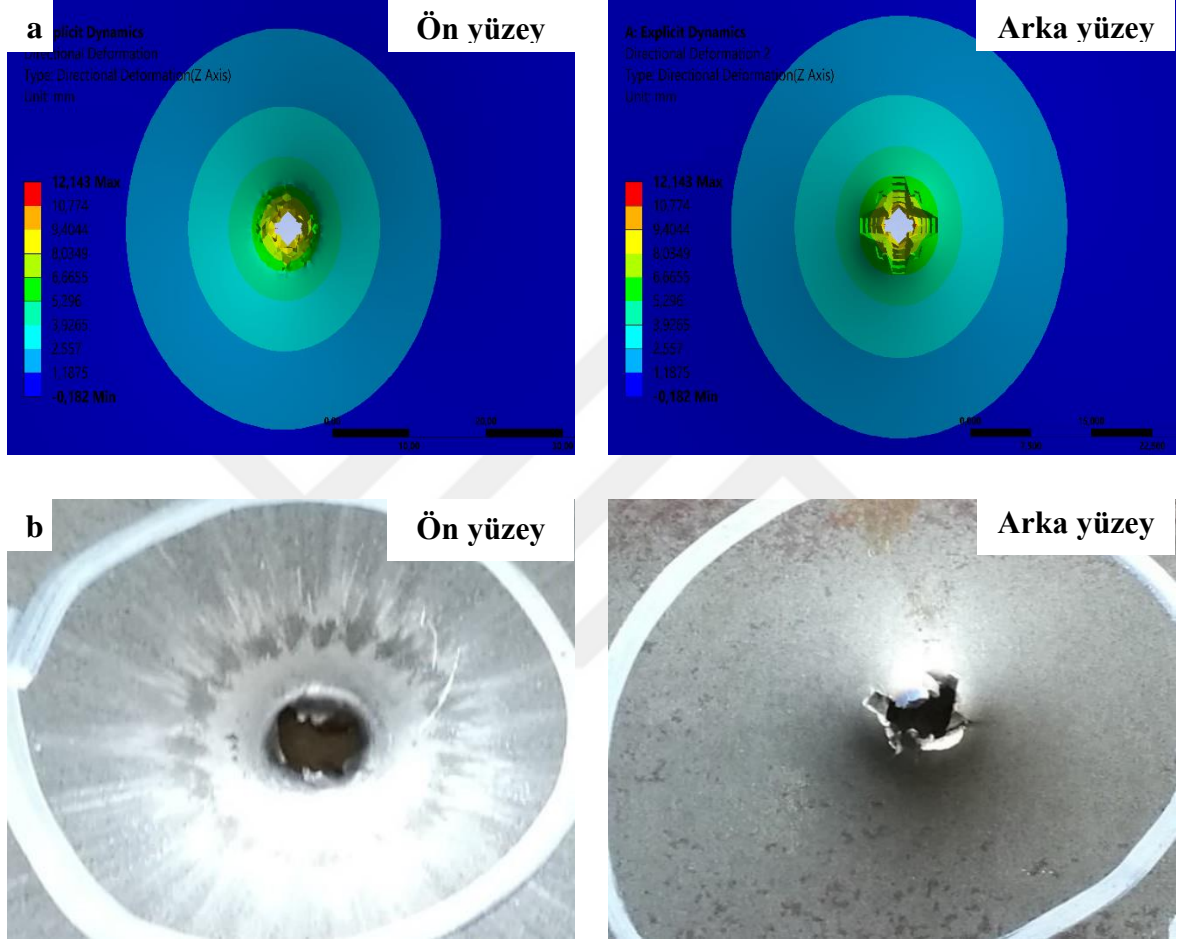
2.3.3. Sayısal Analizlerin Sonuçları

1. plaka için gerçekleştiren 0° çarpma açılı testin sayısal analizinde, plaka testte olduğu gibi mermi tarafından delinmiştir. Plaka üzerinde meydana gelen Z doğrultusundaki maksimum yer değiştirme değeri 12 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 2.28).



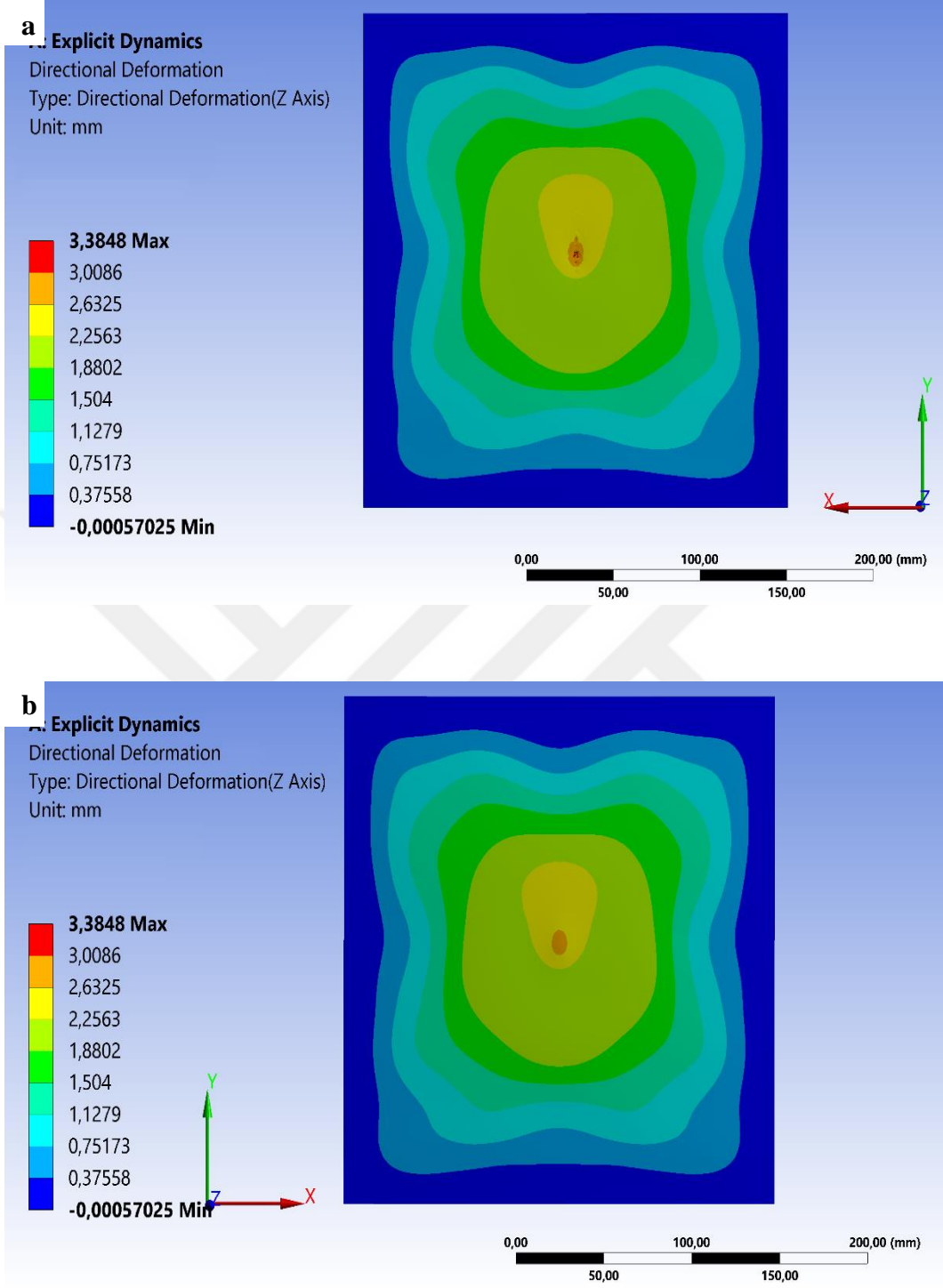
Şekil 2.28. 1 no'lu plakanın (0° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değiştirme değeri

Şekil 2.29'da 1 no'lu plakada merminin oluşturduğu delik bölgesinin test sonrası ve sayısal analiz sonuç görüntüleri yer almaktadır. Plaka arka yüzeyinde oluşan taç yaprağına benzer bir hasar yapısının başarılı bir şekilde modellenenebilmesi analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.



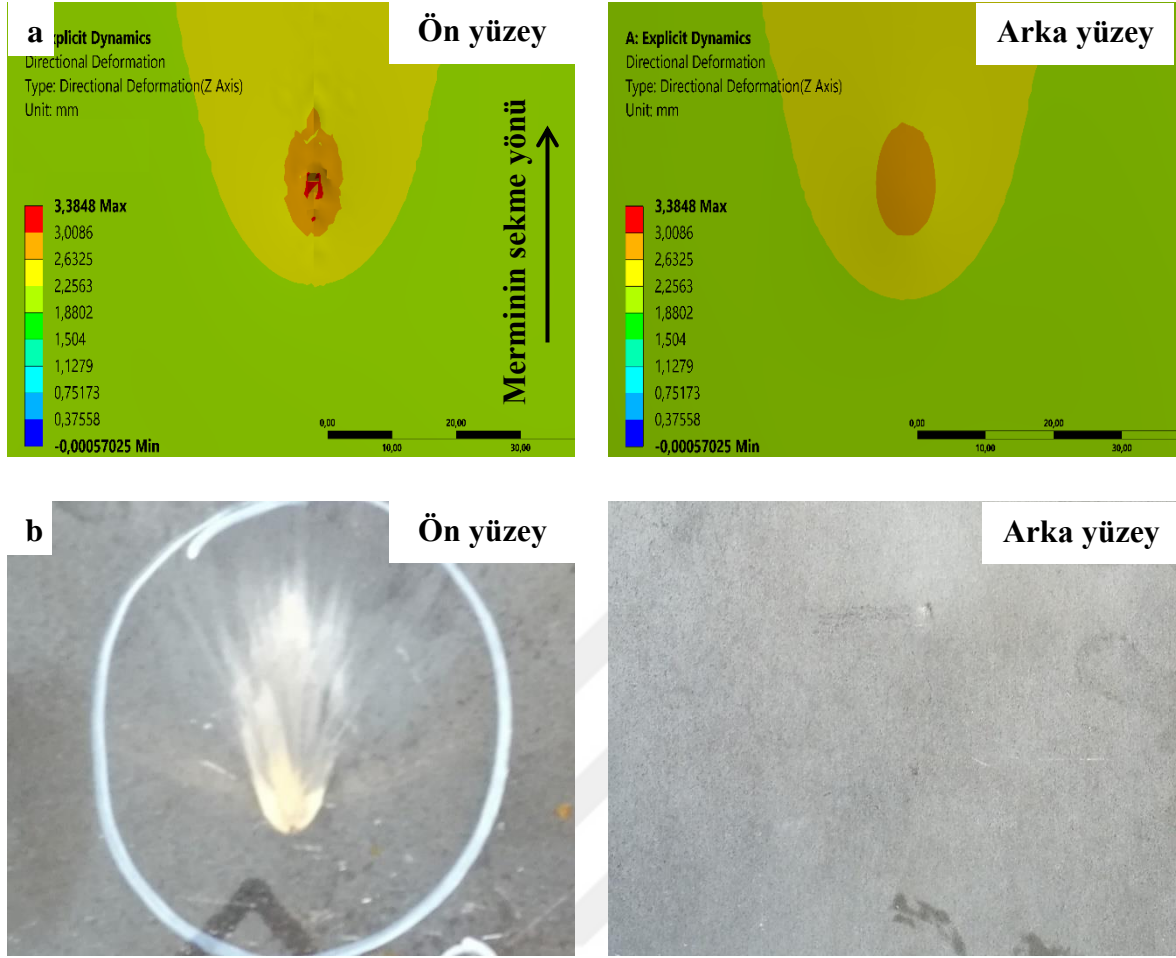
Şekil 2.29. 1 no'lu plakanın ön ve arka yüzeylerinde oluşan delik detayının (a) sayısal analiz, (b) test sonucu görüntüleri

2 no'lu plaka ile 60° çarpma açısında gerçekleştiren testin sayısal analizi sonucunda mermi, plakayı delemeyen sekmiştir ve plaka üzerinde meydana gelen Z doğrultusundaki maksimum yer değiştirme değeri yaklaşık 3.4 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 2.30).



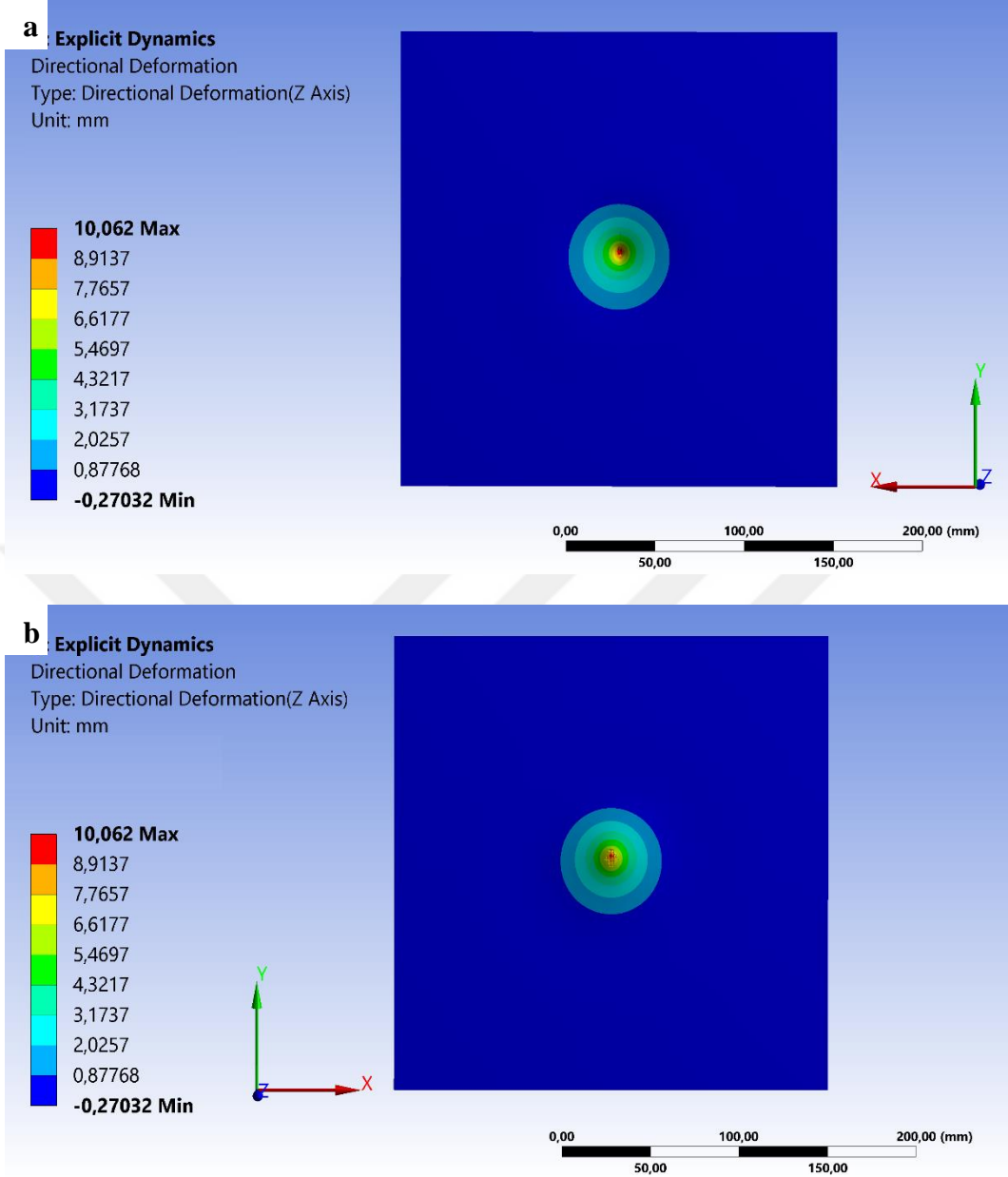
Şekil 2.30. 2 no'lu plakannın (60° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değıştirme değeri

Şekil 2.31'de 2 no'lu plakannın mermi ile etkileşime girdiği bölgesinin ön ve arka yüzeylerinin test sonrası ve sayısal analiz sonucu elde edilen Z yönündeki maksimum yer değıştirme değeri görüntüleri yer almaktadır. Sayısal analiz sonrası arka yüzeydeki şişme yüksekliği 3 mm olarak elde edilmiştir.



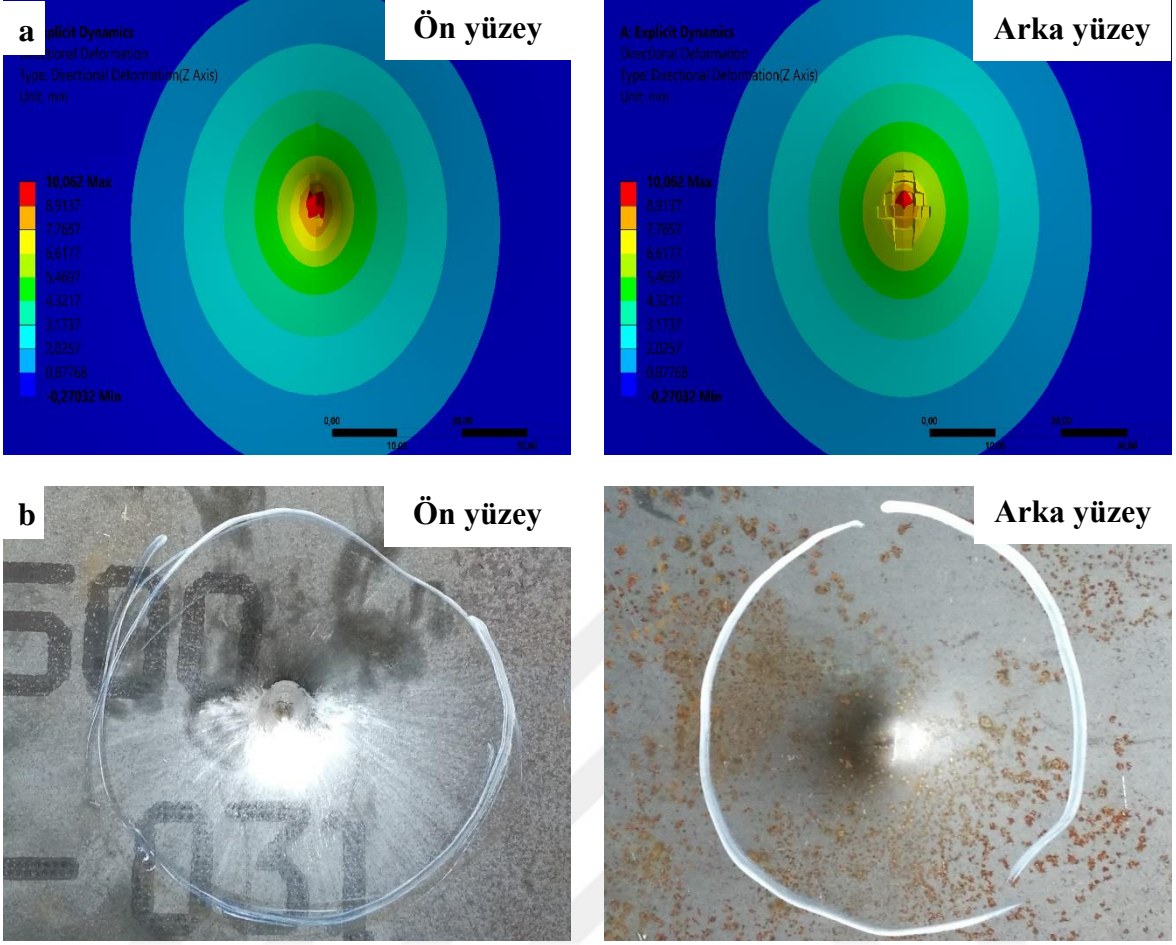
Şekil 2.31. 2 no'lu plakanın mermi ile etkileşime girdiği bölgenin ön ve arka yüzeylerinin (a) sayısal analiz, (b) test sonucu görüntüleri

3 no'lu plaka için gerçekleştiren 30° çarpma açılı testin sayısal analizinde ise, balistik test sonucunda olduğu gibi mermi plakayı delememiş ve ön yüzeyde çöküntü, arka yüzeyde ise 10 mm yüksekliğinde şişme oluşturmuştur (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. 3 no'lu plakanın (30° açılı) çarpma testinin sayısal analiz sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeylerde oluşan Z doğrultusundaki yer değiştirme değeri

Şekil 2.33'te merminin 3 no'lu plakanın ön yüzeyinde çöküntü, arka yüzeyinde ise oluşturduğu şişmenin görüntüleri verilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, test sonuçları ile kıyaslandığında test sonucu elde edilen şekil değişimlerinin başarılı bir şekilde modellenebildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Test sonucundan farklı olarak, sayısal analiz sonrası hedefin arka yüzeyinden bir miktar parça koptuğu görülmüştür.



Şekil 2.33. 3 no'lu plakanın ön yüzeyinde çöküntü, arka yüzeyinde ise oluşturduğu şişmenin (a) sayısal analiz ve (b) test sonucu görüntüleri

Genel olarak değerlendirildiğinde, eğik plaka testleri için gerçekleştirilen sayısal analizlerin test sonuçları ile büyük oranda örtüştüğü, ancak bazı iyileştirmelerin gerekli olduğu anlaşılmıştır. Bu hususların başında, sayısal analizlerde hedef malzeme olan Ramor 500 için dayanım ve hasar parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi gelmektedir. Yapılan analizlerde Ramor 500 yerine literatürde mevcut olan ve benzer özellikteki bir diğer zırh çeliği Armox 500T'ye ait Johnson-Cook dayanım ve hasar sabitleri kullanılmıştır. Gerçek verilen kullanılması halinde sayısal analiz ve test sonuçlarının daha yüksek oranda örtüşeceği tahmin edilmektedir.

3. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin farkı koşullardaki balistik davranışları incelenmiştir. Balistik testler, Otokar A.Ş. Balistik Laboratuvarı'nda (Sakarya) gerçekleştirilmiştir. Mühimmat olarak, FB6 ve FB7 koruma seviyelerindeki tehdit unsurları olan 7.62x51 mm NATO Ball ve 7.62x51 mm NATO AP mermiler kullanılmıştır. Balistik testler sonrasında plakalarda meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiştir. Sınırlı sayıda gerçekleştirilen testler üzerinden elde edilen değerlendirmeler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 4.5 mm kalınlığındaki Ramor 500 zırh çeliği plakasının 7.62 mm Ball tipi mühimmata karşı 0° çarpma açısıyla gerçekleştirilen testte delinerek arka yüzeyinde yapraklanma hasar mekanizması oluşturmuştur. Böylece hedefin ince kalınlıktaki malzeme kategorisine girdiği sonucu elde edilmiştir. Nitekim, üretici firma tarafından FB6 kategorisindeki koruma seviyesi için minimum 6.5 mm kalınlık önerilmektedir.
- 60° çarpma açısında 4.5 mm kalınlıklı Ramor 500 zırh plakasına karşı gerçekleştirilen testte ise mermi hedeften sekerek yüzeyde herhangi hasar oluşturmamıştır. Eğik plaka testinde kullanılan plaka, yarı sonsuz kalınlıkta hedef malzeme kategorisinde değerlendirilmiştir. 30° çarpma açısında 4.5 mm kalınlıklı Ramor 500 zırh plakasına karşı gerçekleştirilen testte ise, hedef plakanın arka yüzeyinde kayda değer yükseklikte şişme oluşmuştur; ancak delinme gerçekleşmemiştir. Bu nedenle, hedef zırh plakası orta kalınlıklı olarak değerlendirilmiştir. Literatürde de ifade edildiği gibi, eğik plaka testlerinde artan çarpma açısı ile balistik dayanımın arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Monolitik plakalar kullanılarak gerçekleştirilen testlerde hem 6.7 mm kalınlığındaki Ramor 500, hem de 6.2 mm kalınlığındaki Ramor 550, 7.62 mm AP mühimmat ve 0° çarpma açısında delinmiş; her iki plakanın arka yüzeylerinde yapraklanma tipi hasar mekanizması oluşmuştur. Bu sonuçlardan hareketle, her iki plaka ince kalınlıkta hedef malzemesi olarak kabul edilmiştir. Diğer bir deyişle, teste tabî tutulan plaka kalınlıklarının tavsiye edilen değerlerden küçük olması nedeniyle testlerin gerçekleştirilmelerinde referans olarak alınan FB6 ve FB7 koruma seviyeleri sağlanamamıştır. Ancak, aynı

kalınlığa sahip plakaların açılı testlerde daha yüksek performans gösterdikleri ve delinmedikleri tespit edilmiştir.

- Çift tabakalı kompozit plakalar kullanılarak gerçekleştirilen testlerde 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ile 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 zırh plakaları kullanılmıştır. İlk mermi (7.62x51 mm Nato AP) her iki plakayı da delip hasar mekanizması olarak her iki plaka için de tıkaç oluşumu meydana getirmiştir. İkinci atışlarda ise her iki plaka yapısı için ndeki plakayı delebilmif, ikinci plakaya sadece nüfuz ederek şifme oluşturmuştur. Balistik test sonuçları delik çapı ve şifme ykseklifif açısından değerlendirilmiştir. Ramor 550'nin nde, Ramor 500'n ise arkada olduğu yapının diğer alternatif sıralı yapıya göre daha yüksek balistik performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, göreceli olarak daha sert olan malzemenin mühimmat ile ilk etkileşime giren plaka olması durumunun balistik performansı iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.
- Gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile balistik testler başarılı bir şekilde modellenebilmiştir ve hasar sırasındaki yerdeğiftirmeler ile gerilmeler gerçekçi bir şekilde elde edilebilmiştir.

4. ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın sınırlı kapsamı dikkate alınarak ve sonuçları değerlendirildiğinde yapılması önerilen çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sabit kalınlıkta eş bir malzeme için tek tabakalı ve çok tabakalı hedef plaka yapıları oluşturarak tabakalama işleminin deney sonuçlarına etkisi incelenebilir
- Çalışma kapsamında sadece iki farklı zırh malzemesi kullanıldığı için çift tabakalı kompozit yapı ile sadece iki farklı kombinasyonda balistik test yapılabilmektedir. Malzeme tipini çeşitlendirerek üç ve üzeri tabakalı kompozit yapılar oluşturarak bu yapıların balistik dayanımları incelenebilir.
- Boşluklu plaka yapısının ve farklı boşluk mesafelerinin balistik performansa etkisi incelenebilir.
- Farklı burun yapısına sahip mühimmatların hedef plaka üzerinde oluşturacağı hasar mekanizmaları incelenebilir.
- Yüksek hızlı kamera kullanarak çarpma anında mermi-hedef etkileşimi daha detaylı olarak incelenebilir ve mermi kalıntı hız değeri hesaplanabilir.
- Hedef plaka üzerinde delik, havuz vb. profiller oluşturmanın plakanın balistik performansına olan etkisi incelenebilir.
- Kullanılan her bir zırh malzemesine ait mekanik, dayanım ve hasar özelliklerinin elde edilmesiyle, farklı mühimmat, plaka kalınlığı, çarpma açısı, farklı plaka kombinasyonlarının balistik performansa etkisi minimum sayıdaki balistik testler ve sayısal analizler yardımıyla yüksek doğruluk ile elde edilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Wallace, J., S., Chemical Analysis of Firearms, CRC Press, New York, 2008.
2. Ambrosini, J., F., Simulation of Ballistic Impacts in Steel Plates, Bachelor's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014.
3. <http://www.surelockmcgill.com/uk/accreditation-ballistics.html>, 1 Ocak 2019.
4. <http://www.closefocusresearch.com/european-en-1522-1523-ballistic-standards>, 1 Ocak 2019.
5. Standard, N. I. J., 0108.01: Ballistic Resistant Protective materials. US Department of Justice, National Institute of Justice, 1985.
6. Jonas, G. H. and Zukas, J. A., Mechanics of Penetration: Analysis and Experiment, International Journal of Engineering Science, 16 (1978) 879-903.
7. Zukas J. A., Nicholas T., Swift H. F., Greszczuk L. B., Curran D. R., Impact Dynamics, John Wiley & Sons, 1982.
8. Hakan, M., Güneş, R. ve Apalak, M. K., Alüminyum Plakaların Balistik Performansının Araştırılması, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
9. Evcı, C., Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
10. Hazell, P., J., Armour Material Theory and Design, CRC Press, New York, 2016.
11. Rosenberg, Z. and Dekel, E., Terminal Ballistics, Springer, Berlin, 2012.
12. Backman, M., E., Terminal Ballistics, Naval Weapons Center Report NWC-TP-5780, California, 1976.
13. Deniz, H., Çift Fazlı Bir Çeliğin 7.62 mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
14. Özgültekin, M., S., Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2012.
15. Deniz, T., Ballistic Penetration of Hardened Steel, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

16. Atapek, Ş., H., Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri, Kocaeli, 2006.
17. Şen, H., AlMg₃/SiCp Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2013.
18. Atapek, H., Bor Katkılı bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
19. Karagöz, Ş., Atapek, H. Ş. ve Yılmaz, A., Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fragtografik Etüd. Metal Dünyası, 182 (2008) 102-107.
20. Uslu, M., Docol 22MnB5 Çeliğinin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
21. Arıkan, V., Zırhlı Araçlarda Parçalanma (Spall) Etkisini Önleyecek Kompozit Yapının Tasarımı ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2014.
22. Çakır, M., Investigation of Layered-spaced and Oblique Mild Steel Targets Against 7.62 mm AP Projectile, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
23. Şanlı, F., Darbe Tesiri Altındaki Kompozit Levhannın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
24. Goldsmith, W., Non-ideal Projectile Impact on Targets, International Journal of Impact Engineering, 22 (1999) 95-395.
25. https://www.researchgate.net/publication/274257056_Penetration_of_Metallic_Plates_by_Kinetic_Energy_Projectiles, 1 Ocak 2019.
26. Öztürk, G., Numerical and Experimental Investigation of Perforation of St-37 Steel Plates by Oblique Impact. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
27. <https://www.otokar.com.tr/tr/urunler/cobra-tekerlekli-zirhli-arac>, 1 Ocak 2019.
28. https://www.militaryfactory.com/armor/detail.asp?armor_id=1030, 1 Ocak 2019.
29. Iqbal, M. A., Gupta, P. K., Deore, V. S., Tak, S. K., Tiwari, G. and Gupta, N. K., Effect of Target Span and Configuration on the Ballistic Limit, International Journal of Impact Engineering, 42 (2012) 11-24.

30. Jankowiak T., Rusinek, A. and Wood, P., A Numerical Analysis of the Dynamic Behavior of Sheet Steel Perforated by a Conical Projectile Under Ballistic Conditions, Finite Elements in Analysis and Design, 65 (2013) 39-49.
31. Dey, S., Børvik, T., Teng, X., Wierzbicki, T. and Hopperstad, O. S., On the Ballistic Resistance of Double-layered Steel Plates: An Experimental and Numerical Investigation, International Journal of Solids and Structures, 44,20 (2007) 6701-6723.
32. Nia, A. A. and Hoseini, G. R., Experimental Study of Perforation of Multi-layered Targets by Hemispherical-nosed Projectiles, Materials & Design, 32 (2011) 1057-1065.
33. Wei, Z., Yunfei, D., Sheng, C. Z. and Gang, W., Experimental Investigation on the Ballistic Performance of Monolithic and Layered Metal Plates Subjected to Impact by Blunt Rigid Projectiles, International Journal of Impact Engineering, 49 (2012) 115-129.
34. Teng, X., Dey, S., Børvik, T. and Wierzbicki, T., Protection Performance of Double-Layered Metal Shields Against Projectile Impact, Journal of mechanics of materials and structures, 2 (2007) 1309-1329.
35. <https://www.pewpewtactical.com/bullet-sizes-calibers-and-types/>, 1 Ocak 2019.
36. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Mermi>, 1 Ocak 2019.
37. http://www.inetres.com/gp/military/infantry/rifle/762mm_ammunition.html, 1 Ocak 2019.
38. <https://www.britannica.com/technology/tank-military-vehicle#ref521348>, 1 Ocak 2019.
39. Zaloga, S., J.,0., T-62 Main Battle Tank 1965–2005, Osprey Publishing, Oxford, 2009.
40. Teixeira-Dias, F., Dodd, B., Marques, A. T., Lach, E., and Walley, S., Damage Caused to Metals by Kinetic and Chemical Energy Projectiles, Security and Use of Innovative against terrorism – LWAG (2010) ISBN 978-972-789- 289-1.
41. https://www.halopedia.org/High_explosive_ammunition, 1 Ocak 2019.
42. https://www.msm.sk/en/msm-group/zvs/ammunition/medium-and-big-caliber_ammunition/155-mm-ammunition/, 1 Ocak 2019.
43. Liu, M. B., Liu, G. R., Zong, Z. and Lam, K. Y., Computer Simulation of High Explosive Explosion Using Smoothed Particle Hydrodynamics Methodology, Computers & Fluids, 32 (2003) 305-322.
44. <http://docplayer.biz.tr/1820596-Mbm432-balistik-malzemeler.html>, 1 Ocak 2019.

45. Austin, C. F., Lined-cavity Shaped Charges and Their Use in Rock and Earth Materials, State Bureau of Mines and Mineral Resources, New Mexico Institute of Mining & Technology, New Mexico, 1959.
46. <https://laststandonzombieisland.com/tag/i-efp/>, 1 Ocak 2019.
47. Alper, İ., Çoruhlu, A., Silah Sistemleri ve Balistik, Kara Harp Okulu Basımevi, Ankara, 2005.
48. Yumak, N., Pekbey, Y. and Aslantaş, K., Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10 (2013) 1-21.
49. <http://norfolktankmuseum.co.uk/chieftain-mbt-mk-23-fv4201/>, 1 Ocak 2019.
50. <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/flat-rolled-sheet/article-advanced-aluminum-armor-alloys/>, 1 Ocak 2019.
51. Gooch, W., Burkins, M., Ernst, H. J. and Wolf, T., Ballistic Performance of Titanium Against Laboratory Penetrators with Aspect-ratios of 10 or Greater, Proceedings 15th International Ballistics Symposium, Jerusalem, May 1995.
52. Montgomery, J. S., Wells, M. G., Roopchand, B. and Ogilvy, J. W., Low-cost Titanium Armors for Combat Vehicles, JOM, 49 (1997) 45-47.
53. <http://www.strategic-bureau.com/en/m2-bradley-aifv-usa/>, 1 Ocak 2019.
54. Sullivan, J. F., Aircraft Armor—ballistic Characteristics of a Magnesium Alloy, Dowmetal (Type FS). Watertown, MA: Watertown Arsenal Laboratory, 1943.
55. van de Voorde, M. J., Diederer, A. M. and Herlaar, K, Preliminary Investigations of Potential Lightweight Metallic Armour Applications, Proceedings of the 22nd International Symposium on Ballistics, November 2005, Vancouver.
56. Cho, K., T. Sano, K. Doherty, C. Yen, G. Gazonas, J. Montgomery, P. Moy, B. Davis, and R. DeLorme, Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles, Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory, 2009.
57. Sugimoto, K., Niiya, K., Okamoto, T. and Kishitake, K., A Study of Damping Capacity in Magnesium Alloys, Transactions of the Japan Institute of Metals, 18 (1977) 277-288.
58. Martin, L. P., Orlikowski, D. and Nguyen, J. H., Fabrication and Characterization of Graded Impedance Impactors for Gas Gun Experiments from Tape Cast Metal Powders, Materials Science and Engineering: A, 427 (2006) 83-91.

59. Cimpoeru, S. J., The mechanical metallurgy of armour steels, Defence Science and Technology Group Fishermans Bend VIC Australia, 2016.
60. Ryan, S., Li, H., Edgerton, M., Gallardy, D. and Cimpoeru, S. J., The Ballistic Performance of an Ultra-high Hardness Armour Steel: An Experimental Investigation, International Journal of Impact Engineering, 94 (2016) 60-73.
61. Woodward, R. L., Materials for Projectile Disruption, Materials Forum, 12 (1998) 26-30.
62. Gooch, W. A., Showalter, D. D., Burkins, M. S., Thorn, V., Cimpoeru, S. J. and Barnett, R., Ballistic Testing of Australian Bisalloy Steel for Armor Application, 23rd International Symposium on Ballistics, 2007, Tarragona, 1181-1188.
63. Karagöz,Ş., Yılmaz, A. ve Atapek, H., ‘Zırh Çelikleri & Geliştirilmesi’, 3. Savunma Teknolojileri Kongresi, Haziran 2006, Ankara.
64. Børvik, T., Dey, S. and Clausen, A. H., Perforation Resistance of Five Different High-strength Steel Plates Subjected to Small-Arms Projectiles, International Journal of Impact Engineering, 36 (2009) 948-964.
65. Callister., W., D. and Rethwisch, D., G., Materials Science and Engineering, Eight edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2010.
66. Übeyli, M., Yıldırım, R. O. and Ögel, B., On the Comparison of the Ballistic Performance of Steel and Laminated Composite Armors, Materials & Design, 28 (2007) 1257-1262.
67. Showalter, D. D., Gooch, W. A., Burkins, M. S. and Koch, R. S., Ballistic Testing of SSAB Ultra-high-hardness Steel for Armor Applications (No. ARL-TR-4632). Army Research Laboratory report, 2008.
68. https://oxycoupage.com/FichiersPDF/Ruukki_Pdf/English/Ruukki-Ramor-brochure.pdf, 1 Ocak 2019.
69. <https://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/ramor-300>, 1 Ocak 2019.
70. <https://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/ramor-400>, 1 Ocak 2019.
71. <https://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/ramor-450>, 1 Ocak 2019.
72. <https://www.ssab.com/products/brands/armox/ramor-500>, 1 Ocak 2019.
73. <https://www.ssab.com/products/brands/armox/ramor-550>, 1 Ocak 2019.
74. <https://www.ssab.com/products/brands/armox/ramor-600>, 1 Ocak 2019.
75. https://www.oxycoupage.com/FichiersPDF/Ruukki_Pdf/English/Ruukki-Ramor-550-Leaflet.pdf, 1 Ocak 2019.

76. <https://www.ssab.com.tr/ssab/newsroom/2015/9/22/armox-reduce-weight-not-standards>, 1 Ocak 2019.
77. Yilmaz, A., Development of an Armor Steel for Ballistic Protection, Materials Testing, 52 (2010) 811-818.
78. Flores-Johnson, E. A., Saleh, M. and Edwards, L., Ballistic Performance of Multi-layered Metallic Plates Impacted by a 7.62-mm APM2 Projectile, International Journal of Impact Engineering, 38 (2011) 1022-1032.
79. Singh, B. B., Sukumar, G., Bhattacharjee, A., Kumar, K. S., Bhat, T. B. and Gogia, A. K., Effect of Heat Treatment on Ballistic Impact Behavior of Ti-6Al-4V Against 7.62 mm Deformable Projectile, Materials & Design (1980-2015), 36 (2012) 640-649.
80. Mishra, B., Jena, P. K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T. B. and Gupta, N. K., Effect of Tempering Temperature, Plate Thickness and Presence of Holes on Ballistic Impact Behavior and ASB Formation of a High Strength Steel, International Journal of Impact Engineering, 44 (2012) 17-28.
81. Kılıç, N. and Ekici, B., Ballistic Resistance of High Hardness Armor Steels Against 7.62 mm Armor Piercing Ammunition, Materials & Design, 44 (2013) 35-48.
82. Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A. and Güden, M., Ballistic Behavior of High Hardness Perforated Armor Plates Against 7.62 mm Armor Piercing Projectile, Materials & Design, 63 (2014) 427-438.
83. Jena, P. K. and Senthil, P., Effect of Tempering Time on the Ballistic Performance of a High Strength Armour Steel, Journal of Applied Research and Technology, 14 (2016) 47-53.
84. Iqbal, M. A., Senthil, K., Sharma, P. and Gupta, N. K., An Investigation of the Constitutive Behavior of Armox 500T Steel and Armor Piercing Incendiary Projectile Material, International Journal of Impact Engineering, 96 (2016) 146-164.
85. Jena, P. K., Mishra, B., Rameshbabu, M., Babu, A., Singh, A. K., Sivakumar, K. and Bhat, T. B., Effect of Heat Treatment on Mechanical and Ballistic Properties of a High Strength Armour Steel, International Journal of Impact Engineering, 37 (2010) 242-249.
86. <https://thyme.ornl.gov/Armor/home/home.cgi>, 1 Ocak 2019.
87. Durmuş, A., Güden, M., Gülçimen, B., Ülkü, S. and Musa, E., Experimental Investigations on the Ballistic Impact Performances of Cold Rolled Sheet Metals, Materials & Design, 32 (2011) 1356-1366.
88. Yunfei, D., Wei, Z., Yonggang, Y. and Gang, W., The Ballistic Performance of Metal Plates Subjected to Impact by Projectiles of Different Strength, Materials & Design, 58 (2014) 305-315.

89. Iqbal, M. A., Tiwari, G., Gupta, P. K. and Bhargava, P., Ballistic Performance and Energy Absorption Characteristics of Thin Aluminium Plates, International Journal of Impact Engineering, 77 (2015) 1-15.
90. Bernetič, J., Kosec, B., Kosec, G., Burzić, Z., Podlipec, B., Nagode, A., Karpe, B., Kanalec, S., Vodopivec, F. and Kosec, L., Phenomena in Penetrating Piercing Bullets in Armored Steel Plate, Metalurgija, 55,1 (2016) 95-98.
91. Holmen, J. K., Solberg, J. K., Hopperstad, O. S. and Børvik, T., Ballistic Impact of Layered and Case-hardened Steel Plates, International Journal of Impact Engineering, 110 (2017) 4-14.
92. Senthil, K., Iqbal, M. A., Arindam, B., Mittal, R. and Gupta, N. K., Ballistic Resistance of 2024 Aluminium Plates Against Hemispherical, Sphere and Blunt Nose Projectiles, Thin-Walled Structures, 126 (2018) 94-105.
93. Sadanandan, S. and Hetherington, J. G., Characterisation of Ceramic/Steel and Ceramic/Aluminium Armours Subjected to Oblique Impact, International Journal of Impact Engineering, 19 (1997) 811-819.
94. Gupta, N. K. and Madhu, V., An Experimental Study of Normal and Oblique Impact of Hard-core Projectile on Single and Layered Plates, International Journal of Impact Engineering, 19 (1997) 395-414.
95. Zhou, D. W. and Stronge, W. J., Ballistic Limit for Oblique Impact of Thin Sandwich Panels and Spaced Plates, International Journal of Impact Engineering, 35 (2008) 1339-1354.
96. Ramakrishna, B. and Prakash, T. B., Numerical Studies on Perforation of Multi-layered Targets by Hemispherical-nosed Projectiles, IOSR J. Mech. Civil Eng., 11 (2014) 80-94.
97. Senthil, K., Iqbal, M. A. and Gupta, N. K., Ballistic Resistance of Mild Steel Plates of Various Thicknesses Against 7.62 AP Projectiles, International Journal of Protective Structures, 8 (2017) 177-198.
98. Iqbal, M. A., Chakrabarti, A., Beniwal, S. and Gupta, N. K., 3D Numerical Simulations of Sharp Nosed Projectile Impact on Ductile Targets, International Journal of Impact Engineering, 37 (2010) 185-195.
99. Børvik, T., Olovsson, L., Dey, S. and Langseth, M., Normal and Oblique Impact of Small Arms Bullets on AA6082-T4 Aluminium Protective Plates, International Journal of Impact Engineering, 38 (2011) 577-589.
100. Teng, X., Wierzbicki, T. and Huang, M., Ballistic Resistance of Double-layered Armor Plates, International Journal of Impact Engineering, 35 (2008) 870-884.

101. Babaei, B., Shokrieh, M. M. and Daneshjou, K., The Ballistic Resistance of Multi-layered Targets Impacted by Rigid Projectiles, Materials Science and Engineering: A, 530 (2011) 208-217.
102. Yunfei, D., Wei, Z., Yonggang, Y. and Lizhong, S., Experimental Investigation on the Ballistic Performance of Double-layered Plates Subjected to Impact by Projectile of High Strength, International Journal of Impact Engineering, 70 (2014) 38-49.
103. Özşahin, E., ve Tolun, S., Polietilen Destekli AA 7075 T651 Levhalarda Katman Sıralamasının Balistik Dayanıma Etkisi, İTÜDERGİSİ/d, 8.2 (2011).
104. Standard, A. S. T. M. E8/E8M-09, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, 2009.
105. <https://www.otokar.com.tr/tr/ar-ge/test-ve-validasyon>, 1 Ocak 2019.
106. He, Q., Xie, Z., Xuan, H. and Hong, W., Ballistic Testing and Theoretical Analysis for Perforation Mechanism of the Fan Casing and Fragmentation of the Released Blade, International Journal of Impact Engineering, 91 (2016) 80-93.
107. Purwanto, H., Soenoko, R., Purnowidodo, A. and Suprpto, A., Effect of Soft-hard Plate and Rubber Sandwich Against on 5.56 mm Deformable Projectile, Journal of Engineering Science & Technology Review, 11 (2018).
108. Topçu, M. ve Taşgetiren, S., İki Boyutlu Problemler İçin Sonlu Elemanlar Ağı Oluşturulması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3 (1997) 315-322.
109. Güler, M. S. ve Şen, S., Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5 (2015).
110. Ovalı, İ. ve Esen, C., Ansys Workbench, 2. Baskı, İnkılâp Kitapevi, 2017
111. Arias, A., Rodríguez-Martínez, J. A. ve Rusinek, A., Numerical Simulations of Impact Behaviour of Thin Steel Plates Subjected to Cylindrical, Conical and Hemispherical Non-deformable Projectiles, Engineering Fracture Mechanics, 75 (2008) 1635-1656.
112. Banerjee, B., An Evaluation of Plastic Flow Stress Models for the Simulation of High-temperature and High-strain-rate Deformation of Metals, arXiv preprint cond-mat/0512466, (2005).
113. Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S. and Malo, K. A., Ballistic Penetration of Steel Plates, International Journal of Impact Engineering, 22 (1999) 855-886.
114. Gupta, N. K., Iqbal, M. A. and Sekhon, G. S., Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Thin Aluminum Plates Subjected to Impact by Blunt and Hemispherical-nosed Projectiles, International Journal of Impact Engineering, 32 (2006) 1921-1944.

115. Iqbal, M. A., Senthil, K., Bhargava, P. and Gupta, N. K., The Characterization and Ballistic Evaluation of Mild Steel, International Journal of Impact Engineering, 78 (2015) 98-113.
116. Kurtaran, H., Buyuk, M. and Eskandarian, A., Ballistic Impact Simulation of GT Model Vehicle Door Using Finite Element Method, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 40 (2003) 113-121.
117. Ali, M.W., Mubashar, A. and Uddin, E., An Experimental and Numerical Investigation of the Ballistic Response of Multi-level Armour Against Armour Piercing Projectiles, International Journal of Impact Engineering, 110 (2017) 47–56.
118. Sjöberg, T., Sundin, K. G. and Oldenburg, M., Calibration and Validation of Plastic High Strain Rate Models for Alloy 718'', In XII-International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications-COMPLAS, January 2013.
119. Teng, X. and Wierzbicki, T., Evaluation of Six Fracture Models in High Velocity Perforation, Engineering Fracture Mechanics, 73 (2006) 1653-1678.
120. Vijayan, V., Hegde, S. and Gupta, N. K., Observations on Impacts of Deformable Conical Projectiles at 60 Degree Target Obliquity, Procedia Engineering, 173 (2017) 123-129.
121. Wiśniewski, A. and Żochowski, P., Building and Validation of the Johnson-Cook Constitutive Model of Nano-Composite NANOS-BA® Steel for Armour Applications, Problems of Mechatronics: Armament, Aviation, Safety Engineering, 5 (2014) 7-18.
122. Johnson, G.R. and Cook, W.H, A Constitutive Model and Data for Materials Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, April 1983, Hague, 541-547.
123. Johnson, G. R. and Cook, W. H., Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, Engineering Fracture Mechanics, 21 (1985) 31-48.
124. <https://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/armox-500t>, 1 Ocak 2019.
125. Borvik, T., Dey, S. and Clausen, A. H., Perforation Resistance of Five Different High-strength Steel Plates Subjected to Small-arms Projectiles. International Journal of Impact Engineering, 36 (2009) 948– 64.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Latif BEKÇİ, 1992 yılında Ordu'da doğmuştur. 2010 yılında Bulancak Anadolu Lisesi'nden mezun olup aynı yıl Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitimine başlamıştır. 2015 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 1 adet SCI-Expanded indexli makalesi ve 1 adet uluslararası bildirisi (poster) vardır. Muhammed Latif Bekci İngilizce bilmektedir.

