

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CTP DESTEKLİ AA-6082 T6
LEVHALARDA TERMİNAL BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

HALİL BİNAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. YAMAN ERARSLAN**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CTP DESTEKLİ AA-6082 T6
LEVHALARDA TERMİNAL BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Halil BİNAY tarafından hazırlanan tez çalışması 18.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Onuralp YÜCEL

İstanbul Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2013-07-02-YL03 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada; bilgi, destek ve tecrübelerini benden esirgemeyen çok değerli öğretim üyeleri Doç. Dr. Yaman ERARSLAN ve Prof. Dr. A. Okan ADDEMİR'e, deneysel çalışmalarımızda laboratuvarını kullandığımız Roket Sanayi ve Ticaret A.Ş. yönetimi ile deneylerde destek olan Eralp AKGÜL, Gökçe DARA ve Ahmet Kaan TOKSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez süreci boyunca görev yaptığım değerli şirketim Kreon Aydınlatma A.Ş.'ye ve buradaki değerli yöneticilerim olan Hüseyin ÇOLAKOĞLU ve Arman SUER'e bana verdikleri her türlü desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Kasım, 2016

Halil BİNAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
LİTERATÜR.....	5
2.1 İç Balistik	5
2.2 Dış Balistik	5
2.3 Terminal Balistik.....	5
2.3.1 Penetrasyon Teorisi ve Mekanizması	8
2.3.2 Metallerin Penetrasyon ve Perforasyonu.....	11
2.3.3 Seramiklerin Penetrasyon ve Perforasyonu	13
2.3.4 Kompozitlerin Penetrasyon ve Perforasyonu.....	14
2.3.5 Zırh Malzemeleri ve Temel Özellikleri	17
2.3.5.1 Metal Zırhlar.....	19
2.3.5.2 Alüminyum, Çelik ve Titanyumun Balistik Performansları.....	26
2.3.5.3 Seramik Zırhlar	27
2.3.5.4 Kompozit Malzemelerin Balistik Özellikleri.....	27
2.3.6 Mühimmatlar	31

2.3.6.1 Zırh Delici Mermiler	32
BÖLÜM 3	
DENEY HAZIRLAMA VE UYGULAMA.....	34
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler	34
3.1.1 AA-6082 T6 Malzemenin Özellikleri	34
3.1.2 G10 FR4 Kompozit (cam-epoksi) Malzemenin Özellikleri	35
3.1.3 Epoksi Yapıştırıcı Özellikleri	36
3.2 Zırh Malzemesinin Hazırlanışı	37
3.2.1 A Zırh Malzemesi	38
3.2.2 B Zırh Malzemesi	40
3.3 Terminal Balistik Deney Düzeneği	42
3.3.1 Yarı Sonsuz Referans RHA Malzemesi Üzerine Yapılan Atışlar.....	47
3.3.2 A Zırh Malzemesinin Üzerine Yapılan Atışlar.....	49
3.3.2.1 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 1. Atış.....	50
3.3.2.2 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 2. Atış.....	54
3.3.2.3 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 3. Atış.....	58
3.3.2.4 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 4. Atış.....	62
3.3.2.5 A Zırh Malzemesi Atış Sonuçları.....	66
3.3.3 B Zırh Malzemenin Üzerine Yapılan Atışlar	67
3.3.3.1 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 5. Atış.....	68
3.3.3.2 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 6. Atış.....	71
3.3.3.3 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 7. Atış.....	74
3.3.3.4 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 8. Atış.....	76
3.3.3.5 B Zırh Malzemesi Atış Sonuçları	78
3.4 Deney Sonucu	79
BÖLÜM 4	
SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGE LİSTESİ

V_{50} Limit hız



KISALTMA LİSTESİ

AA	Aluminum Association
Al	Alüminyum
AISI	American Iron and Steel Institute
AP	Armour Piercing
BHN	Brinell hardness number
C	Karbon
Cr	Krom
Cu	Bakır
CTP	Cam Takviyeli Plastik
DOP	Depth of Penetration
Fe	Demir
FML	Fiber Metal Lamine
FMJ	Full Metal Jacket
FSP	Fragment Simulating Projectile
GPa	Gigapascal
GLARE	Glass Laminate Alüminyum Reinforced Epoxy
HB	Brinell Hardness
HRC	Rockwell C Hardness
İDM	İşlevsel Derecelendirilmiş Malzeme
Mg	Magnezyum
MKE	Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu
Mn	Manganez
Mo	Molybdenum
MPa	Megapascal
Ni	Nikel
P	Fosfor
RHA	Rolled Homogeneous Armor
S	Sülfür
SAE	The Society of Automotive Engineers
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Ti	Titanyum

UL	Underwriters Laboratories
V	Vanadyum
WC	Tungsten Carbide
Zn	Çinko



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri [10]..... 7
Şekil 2.2	İstatiksel hızın tanımı [9] 8
Şekil 2.3	Kinetik enerji penetrasyonu ilişkisi [11] 9
Şekil 2.4	Kinetik enerji penetrasyonu ve gerilme dalgaları [11]..... 9
Şekil 2.5	Çarpmanın 10 μ s'inde(sol) ve 20 μ s'inde(sağ) gerilme dayanımı [13] 10
Şekil 2.6	Çarpmanın 30 μ s'inde(sol) ve 40 μ s'inde(sağ) gerilme dayanımı [13] 11
Şekil 2.7	Çarpmanın 200 μ s'inde gerilme dayanımı [13]..... 11
Şekil 2.8	Hedefin kırılma modülleri [9]..... 12
Şekil 2.9	Seramik malzemelerin kırılma mekanizması [9] 14
Şekil 2.10	DOP (penetrasyon derinliği) testi [14] 14
Şekil 2.11	Yönlendirilmiş laminat çeşitleri [12] 15
Şekil 2.12	Sürekli fiber kompozitin tipik bir yük – yerdeğiştirme eğrisi [9]..... 16
Şekil 2.13	Lamineli kompozit malzemenin balistik çarpma sıralaması [15] 17
Şekil 2.14	Zırhların genel olarak zaman diliminde gösterilmesi [16] 18
Şekil 2.15	Mermilere göre malzemelerdeki balistik verimlilik [16]..... 18
Şekil 2.16	Alaşımın V_{50} hızında çarpma açılarına göre karşılaştırılması [14]..... 20
Şekil 2.17	(a) Deforme olabilen mermi, (b) Pirinç ceketli, (c) Kurşun çekirdekli [9] 21
Şekil 2.18	(a) Önden görünüm, (b) Arkadan görünüm, (c) Yarım kesit görünüm [9]... 22
Şekil 2.19	Balistik performans ile sertlik arasındaki bağlantı [20]..... 23
Şekil 2.20	RHA çeliğin balistik V_{50} hızında çarpma açısına göre karşılaştırılması [14].. 25
Şekil 2.21	Ti-6Al-4V ve RHA zırh ile yapılan karşılaştırma [14]..... 26
Şekil 2.22	Alüminyum, çelik ve titanyumun balistik performansları [14] 27
Şekil 2.23	Cam fiber- epoksi matrisli gövdenin görünümü [12]..... 28
Şekil 2.24	GLARE malzemenin kesit görünümü [12] 29
Şekil 2.25	GLARE 5 (3/2) FML panellerin giriş ve çıkış hızları [23] 30
Şekil 2.26	Mühimmatın sistematik görünümü [12]..... 32
Şekil 3.1	0°/90° yönlü-iki eksenli-cam elyaf dokuma kumaş [27] 36
Şekil 3.2	Zırh yapıştırmasının bir görünümü 38
Şekil 3.3	Zırh yapıştırmasının bir görünümü 38
Şekil 3.4	A zırh malzemesinin kesit görünümü çizimi 40
Şekil 3.5	A zırh malzemesi 40
Şekil 3.6	B zırh malzemesinin kesit görünümü çizimi..... 42
Şekil 3.7	B zırh malzemesi 42
Şekil 3.8	AP 7,62x51 MKE veya 7,62mmx51 (M61) zırh delici fişek mermisi [29] 43

Şekil 3.9	Deney düzeneğinin izometrik görünümü	44
Şekil 3.10	Deney düzeneğinin yandan görünümü	45
Şekil 3.11	Atış düzeneği.....	45
Şekil 3.12	Deneyde kullanılan sayaçlar.....	46
Şekil 3.13	Deneyde kullanılan hedef	46
Şekil 3.14	RHA şahit numune çeliğin atış öncesi görünümü	47
Şekil 3.15	RHA çeliğin atış sonrası önden görünümü	48
Şekil 3.16	A zırh malzemesi önden görünümü	49
Şekil 3.17	A zırh malzemesi yandan görünümü	49
Şekil 3.18	A zırh malzemesi 1. atış sonrası önden görünümü	50
Şekil 3.19	A zırh malzemesi 1. atış sonrası arkadan görünümü	50
Şekil 3.20	Al6082 T6 levhanın 1. atış sonrası arkadan görünümü.....	51
Şekil 3.21	Epoxyglas G10/ FR4 1. atış sonrası önden görünümü	51
Şekil 3.22	1. atış sonrası AA-6082 T6 kesit görünümü	52
Şekil 3.23	1. atış sonrası EpoxyglasG10/FR4 kesit görünüm	52
Şekil 3.24	1. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü.	53
Şekil 3.25	A zırh malzemesi 2. atış sonrası ön görünümü	54
Şekil 3.26	A zırh malzemesi 2. atış sonrası arkadan görünümü	55
Şekil 3.27	Al6082 T6 levhanın 2. atış sonrası arkadan görünümü.....	55
Şekil 3.28	Epoxyglas G10/ FR4 2. atış sonrası önden görünümü	56
Şekil 3.29	2. atış sonrası Al6082 T6 kesit görünümü	56
Şekil 3.30	2. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü	57
Şekil 3.31	2. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	57
Şekil 3.32	A zırh malzemesi 3. atış sonrası önden görünümü	58
Şekil 3.33	A zırh malzemesi 3. atış sonrası arkadan görünümü	59
Şekil 3.34	Al6082 T6 levhanın 3. atış sonrası arkadan görünümü.....	59
Şekil 3.35	Epoxyglas G10/ FR4 3. atış sonrası önden görünümü	60
Şekil 3.36	3. atış sonrası AA-6082 T6 kesit görünümü	60
Şekil 3.37	3. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü	61
Şekil 3.38	3. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	61
Şekil 3.39	A zırh malzemesi 4. atış sonrası önden görünümü	62
Şekil 3.40	A zırh malzemesi 4. atış sonrası arkadan görünümü	63
Şekil 3.41	Al6082 T6 levhanın 4. atış sonrası arkadan görünümü.....	63
Şekil 3.42	Epoxyglas G10/ FR4 4. atış sonrası önden görünümü	64
Şekil 3.43	4. atış sonrası Al6082 T6 kesit görünümü	64
Şekil 3.44	4. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü	65
Şekil 3.45	4. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	65
Şekil 3.46	A zırh malzemesi tam delaminasyon a)Al 6082 T6, b)Epoxyglas G10/FR4..	66
Şekil 3.47	B zırh malzemesi önden görünümü	68
Şekil 3.48	B zırh malzemesi yandan görünümü.....	68
Şekil 3.49	B zırh malzemesi 5. atış sonrası önden görünümü	69
Şekil 3.50	B zırh malzemesi 5. atış sonrası arkadan görünümü	69
Şekil 3.51	B zırh malzemesi 5. atış sonrası kesit görünümü.....	70
Şekil 3.52	5. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	70
Şekil 3.53	B zırh malzemesi 6. atış sonrası önden görünümü	71
Şekil 3.54	B zırh malzemesi 6. atış sonrası arkadan görünümü	72

Şekil 3.55	B zırh malzemesi 6. atış sonrası kesit görünümü	72
Şekil 3.56	6. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü.	73
Şekil 3.57	B zırh malzemesi 7. atış sonrası önden görünümü	74
Şekil 3.58	B zırh malzemesi 7. atış sonrası arkadan görünümü	74
Şekil 3.59	B zırh malzemesi 7. atış sonrası kesit görünümü	75
Şekil 3.60	7. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	75
Şekil 3.61	B zırh malzemesi 8. atış sonrası önden görünümü	76
Şekil 3.62	B zırh malzemesi 8. atış sonrası arkadan görünümü	77
Şekil 3.63	B zırh malzemesi 8. atış sonrası kesit görünümü	77
Şekil 3.64	8. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü	78



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Bazı alüminyum alaşımların fiziksel ve balistik özellikleri [18]..... 19
Çizelge 2.2	7.62 deforme edilebilen merminin bazı özellikleri [9] 21
Çizelge 2.3	AA-7017 mekanik özellikleri [9] 21
Çizelge 2.4	AA-7017 malzemenin balistik test sonuçları [9]..... 22
Çizelge 2.5	RHA çeliğin kimyasal kompozisyonu(% Ağ.) [21] 24
Çizelge 2.6	RHA çeliğin sınıflandırılması [21]..... 24
Çizelge 2.7	GLARE 5 panellerin farklı kombinasyon ve oryantasyonları [23]..... 30
Çizelge 2.8	AP 7.62x51 merminin bazı özellikleri [25]..... 33
Çizelge 2.9	7.62x51 ile RHA malzeme arasındaki ilişki [12]..... 33
Çizelge 3.1	AA-6082 T6 malzemenin kimyasal kompozisyonu(% Ağ.) [26]..... 34
Çizelge 3.2	AA-6082 T6 malzemenin fiziksel özellikleri 35
Çizelge 3.3	AA-6082 T6 malzemenin mekanik özellikleri [26]..... 35
Çizelge 3.4	G10 FR4 kompozit malzemenin fiziksel özellikleri [27]..... 35
Çizelge 3.5	G10 FR4 kompozit malzemenin mekanik özellikleri [27] 35
Çizelge 3.6	Reçine ve sertleştirici karışım oranı [28] 36
Çizelge 3.7	Araldite® AW106/Hardener HV953U malzemenin özellikleri [28] 37
Çizelge 3.8	A zırh malzemenin fiziksel özellikleri..... 39
Çizelge 3.9	B zırh malzemenin fiziksel özellikleri..... 41
Çizelge 3.10	7,62mmx51 (M61) zırh delici fişek merminin özellikleri [29] 43
Çizelge 3.11	Referans RHA malzemenin mekanik özellikleri..... 47
Çizelge 3.12	RHA çeliği üzerine yapılan atış değerleri ve sonuçları..... 48
Çizelge 3.13	A zırh atış sonuçları 67
Çizelge 3.14	B zırh atış sonuçları 79

**CTP DESTEKLİ AA-6082 T6
LEVHALARDA TERMİNAL BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Halil BİNAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaman ERARSLAN

Bu tez çalışmasında; metal alaşımların, seramiklerin ve kompozitlerin terminal balistik performansları, limit hızları, merminin zırh üzerinde ki davranışı ve kalıntı hızları hakkında literatür araştırmaları yapılmış olup, bu malzemelerden AA-6082 T6 alaşımı ile G10 FR4 kompozittin farklı kombinasyonu sonucu üretilen FML (Fiber Metal Lamine) zırhların AP 7.62x51 mm tehdidlere karşı olan davranışları incelenmiştir. FML zırhların, tehditler karşısındaki blastik davranışlarına göre savunma sanayi ve balistik zırh yapımına uygunlukları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik, kompozit, alüminyum alaşımları, zırh, AP 7.62x51, tabakalı kompozit, darbe dayanımı, AA-6082 T6, FML (Fiber Metal Lamine), G10 FR4, nüfuziyet, delinme, dop, rha çeliği.

**INVESTIGATION OF TERMINAL BALLISTIC PROPERTIES GLASS-FIBER
REINFORCED PLASTIC SUPPORT AT AA PLATE 6082-T6**

Halil BİNAY

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Yaman ERARSLAN

In this study; it was searched in literature in relation to terminal ballistic performance, limit velocity, the behaviours of armours and, ceramics and composite structures. As a result, production of FML (Fibre Metal Laminate) of the combination with G10 FR4 and AA-6082 T6 of this material behavior with threats API 7.62x51 mm were examined. According to their behavior in the face of threats of ballistic armor materials have been investigated compliance with the construction and defense industries.

Keywords: Ballistic, composite armor, aluminum alloys, AP 7.62x51, laminated composites, impact, AA-6082 T6, FML(Fibre Metal Laminate), G10 FR4, penetration, perforation, dop, rha steel.

1.1 Literatür Özeti

Havacılık ve uzay alanında sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımlı levhaların, çok farklı uygulamalarının yanında, hareket halindeki hedeflerin hafif korunma sistemlerinde de kullanım alanı bulmaktadır.

Yüksek hızlı yükleme veya çarpma şartları, zırh sistemleri ile ilgili uygulama alanlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Buna benzer uygulamalarda, yapının ağırlığı önemli bir tasarım ölçütüdür. Bu nedenle, yüksek yoğunluğa sahip geleneksel malzemeler yerine, daha hafif olan alüminyum alaşımlarının sıklıkla tercih edildiği bilinmektedir.

Savunma sanayi için seçilen zırhlı malzemenin kritik bir önemi vardır. Bu amaçla seçilecek malzemenin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Çelik malzemelerin mekanik özelliklerinden dolayı zırhlı sistemlerde kullanımı yaygındır. Bu malzemelerin üretimi, bulunabilirliği, ucuzluğu ve malzeme hakkındaki yeterli bilgi birikiminin olması tercih edilmesi için avantajı oluşturmaktadır. Diğer taraftan çeliğin en büyük dezavantajı ise yoğunluğunun yüksek olmasıdır. Bu neden ile alüminyum alaşımları önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır, bunun en büyük nedeni alansal yoğunluklarının düşük olmasıdır [1].

$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = \text{zırlı sistemin ağırlığı} / \text{koruma yüzey alanı} [2]. \quad (1.1)$$

Buradan ortaya çıkan sonuç;

$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = \text{zırhın yoğunluğu} \times \text{zırhın kalınlığı} [3]. \quad (1.2)$$

Alüminyum alaşımlı plakalar, düşük alansal yoğunluktan dolayı gerek uçak – uzay sanayi gerekse de savunma sanayisinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Savunma sanayisinde en önemli ölçüt ağırlıktır, hatta fiyattan daha önce gelmektedir. Bundan dolayı alüminyum alaşımları, geleneksel çelik ve beton yerine tercih edilmektedir [1].

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, hafif olmaları ve aynı zamanda yüksek özgül dayanımları nedeniyle giderek artan uygulama alanlarına ve kullanım miktarına sahip olmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerin daha yaygın bir şekilde kullanımlarını sınırlayan en önemli faktör, karmaşık bir hasar mekanizmasına sahip olmalarıdır. Bu hasarlar çoğunlukla birbiriyle etkileşimli olarak meydana gelip, malzemenin yüklere karşı dayanım sınırlarını etkiler.

Tabakalı bir kompozit malzemenin maruz kalabileceği darbe üç türde sınıflandırılabilir. Enerjisi düşük olan darbe; düşük hızlı darbe (low velocity impact) olarak isimlendirilir. Enerjisi yüksek olan darbe ise yüksek hızlı darbedir (high velocity impact) ve literatürde de çoğu zaman balistik darbe (ballistic impact) olarak isimlendirilir. Üçüncü türdeki darbe ise, enerjisi diğer iki türe göre daha yüksek olan çok yüksek hızlı darbe (hypervelocity impact)dir. Bu nedenle, tabakalı kompozit malzemelerin hasar türlerinin ve sonuçlarının anlaşılmasında, darbe enerjisi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Darbe sonucunda tabakalı kompozit malzemelerde oluşan hasar türleri genel olarak; fiberlerin kırılması veya kopması, matris malzemesinin kırılması, delinmenin meydana gelmesi ve delaminasyon oluşması şeklinde sınıflandırılabilir. Kompozit malzemede meydana gelen bu hasar türlerinin herhangi birisi veya birkaçı, darbe enerjisine bağlı olarak baskın olabilir [4].

Tabakalı kompozit malzemelerin balistik dayanımını incelemek için kullanılan farklı metotlar mevcuttur. Tabakalı kompozit malzemelerin balistik dayanımını etkileyen

birden fazla sayıda parametrenin oluşu, bu metotların, aynı tabakalı malzemeler için değişken sonuçlar vermesine neden olabilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerde balistik dayanımın belirlenmesinde en çok kullanılan metot; V_{50} limit hız veya balistik limit hızdır. V_{50} limit hız veya balistik limit hız; merminin, malzemede kısmi bir delinme sağlayan en yüksek hızı, diğeri tam delinme sağlayan en düşük hızdan meydana gelir [5].

V_{50} limit hız (balistik limit hız); %50 zırh plakasının delinme veya %50 delinmeme ihtimalini gösteren hız olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, V_{50} hızında zırh plakasının delinme ihtimali %50'dir. V_{50} delme hızından düşük hızlar malzemede kısmi delinme meydana getirirken, V_{50} delme hızından yüksek hızlar ise malzemede tam delinme meydana getirir [6].

V_{50} hızını tespit etmek için plakaya minimum dört atışın yapılması gerekir. Değerlendirmeye alınan en az dört atıştan, ikisi plakayı delen en düşük hızlar, diğeri ikisi de delmeyen en yüksek hızlar olmalıdır [7].

Ayrıca, bu dört hız dağılımında, plakayı en düşük hızda delen merminin çarpma hızından, plakayı delmeyen en yüksek hızdaki merminin çarpma hız farkı, zırhın malzemesine ve test şartlarına göre 18, 27, 30, 38 ve 45 m/s değerleri kullanılır. Bu sonuçları veren dört atışın mermi çarpma hızlarının aritmetik ortalaması alınır. Bulunan sonuç zırh plakasının V_{50} balistik sınır değerini verir. Bu hız merminin çarpma hızlarının ortalaması ile bulunur [8].

1.2 Tezin Amacı

Aynı alansal yoğunlukta iki farklı kompozit malzemenin, tabaka kalınlığı ve yerleşim kombinasyonu değiştirilerek meydana gelen zırh malzemelerinin, terminal balistik davranışlarını incelemek ve uygun şartları sağlayacak zırhın savunma sanayisinde kullanılmasını sağlamaktır.

1.3 Hipotez

Planlanan deneysel çalışmada, birer adet 10mmx300mmx300mm AA-6082 T6 plaka ve birer adet 10mmx300mmx300mm Epoxyglas G10/ FR4 plakayı ARALDITE®AW 106 Resin epoxy ile yapıştırma sonucu elde edilen zırhın, sekizer adet 1mmx300mmx300mm AA-6082 T6 plaka ve 1mmx300mmx300mm Epoxyglas G10/ FR4 plakayı ARALDITE®AW 106 Resin epoxy ile yapıştırma sonucu oluşan zırhtan daha dūřuk balistik özellikler vereceği dūřünülmektedir.



Balistik bilimi, merminin hareketini ve bu hareketi etkileyen parametreleri inceleyen bilim dalıdır. Balistik üçe ayrılır; iç, dış ve terminal balistik.

2.1 İç Balistik

Merminin silah içindeki hareketini inceleyen bilim dalıdır.

Merminin ateşlenmesi ile kovandaki sıcaklık biranda 3.000 dereceye kadar çıkar ve barut miktarı ve kalitesine göre mermi çekirdeğinin tabanına inç kare başına 25 ton değerine kadar bir basınç uygulanır [9].

2.2 Dış Balistik

Merminin silahtan ayrıldıktan sonra zırha ulaşana kadarki hava, su ve yer çekimi gibi parametreleri vs. içine alacak şekilde inceleyen bilim dalıdır [10].

Çalışmamızın temelini oluşturan ve zırh teknolojisinde çok önemli bir yere sahip olan terminal balistik konusu yeni bir başlık altında detaylı olarak incelenecektir.

2.3 Terminal Balistik

Terminal balistik, merminin zırh malzemesi üzerinde ya da zırhın merminin üzerinde meydana gelen darbenin etkisini inceleyen bir mühendislik dalıdır. Terminal balistik çalışmaları genellikle 0,5 km/s ve 2,0 km/s hıza sahip mermi ile askeri araçları, zırhlı sivil araçları ve binaları hedef alan çalışmaları inceler. Bunun dışında 2 km/s ve 8 km/s hıza sahip, aşırı yüksek hızlı mermi de terminal balistik üzerine çalışan mühendisler için ayrı bir çalışma konusudur.

Terminal balistik çalışmaları, hedefin kalınlığına göre sınıflandırılır. Bu kalınlıklar; yarı sonsuz, orta ve ince kalınlıktan oluşmaktadır.

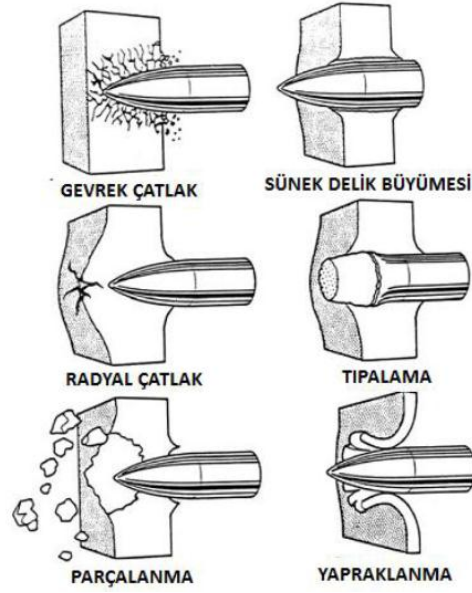
Yarı sonsuz kalınlıktaki zırhın arka kısmı, mermiden etkilenmeyecek büyüklükte kalınlığa sahiptir, yani zırhın arka kısmı mermiden etkilenmez. Çalışmalarda tespit edilen ölçümler şu şekildedir; merminin ilk derinliği, meydana gelen delik boyutu ve hacmidir.

Yarı sonsuz kalınlıkta yapılan deneylerde genel olarak gerçek bir zırh tasarımıdan öte, mermi ile zırh arasındaki fiziksel ve mekanik özellikler incelenir. Mermi ile hedef arasındaki açı arttıkk balistik limit hızın da arttığı görülmüştür. En düşük balistik limit hız merminin zırha dik çarpması ile elde edilir.

Orta kalınlıktaki zırh deneylerinde, mermi zırhı tamamen geçemez ama zırhın arka kısmı mermiden etkilenir. Zırh tasarımı yapan bilim insanları, mermi ve orta kalınlıktaki zırhların birbirleri ile olan ilişkilerini inceleyerek gerçek bir zırh tasarımı yapabilmektedirler. Ama bu seviyede mermi ve zırh arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır.

Orta kalınlıktaki zırh ve mermi arasındaki etkileşim sonucu meydana gelen olası kırılma mekanizmaları şekil 2.1'de gösterilmektedir.

İnce kalınlıktaki zırh malzemelerinde ise; mermi zırhı delip geçer ve zırhın mermi üzerindeki etkileri incelenir. Sonuç olarak zırhın mermi üzerindeki davranışları iyi bilinirse, gerçek bir zırh tasarımı oldukça kolaylaşır [10].



Şekil 2.1 Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri [10]

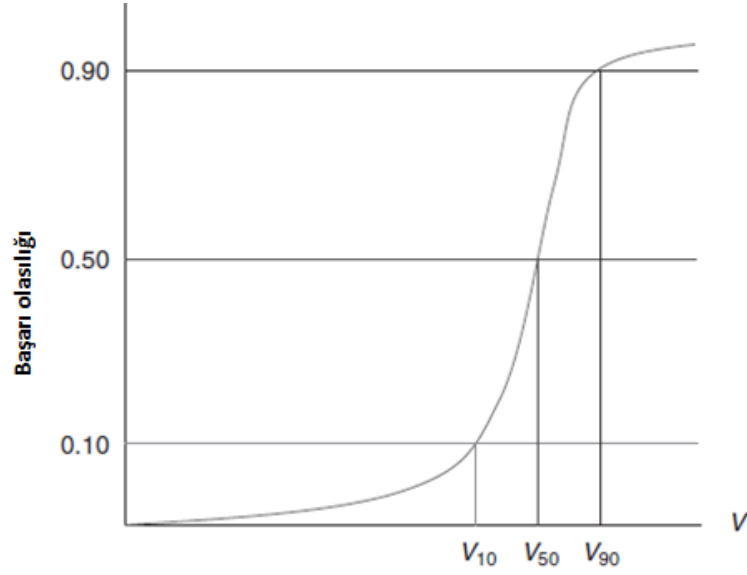
Yapılan deneysel çalışma sonuçları; malzemenin balistik ve mekanik özelliklerinin birbirleri ile genel olarak doğru orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Yani mekanik özellikler azaldıkça balistik özelliklerin de genel olarak azaldığı, mekanik özellikler artıkça balistik özelliklerin de genel olarak arttığı tespit edilmiştir.

Bazı tanımlar;

- **Penetrasyon:** Delme, içine girme
- **Perforasyon:** Delip geçme
- **Mermi:** Delici, penetrator, tehdit, projektıl
- **Parçacık:** Fragman, kırılmış parça
- **Sekme:** Merminin hedeften sekmesi [10].

Bu tanımlara, daha kapsamlı olarak çalışma içinde değenilecektir.

Terminal balistik tanımlanırken bazı terimlerin hem sözel hem de sayısal verilerle açıklanması önemlidir. V_{10} tanımı; bir tehdidin hedefte %10 oranında delip geçmesi düşünülür, V_{50} ise tehdidin %50 oranında delip geçmesi, V_{90} ise %90 oranında hedefi deldiği düşünülür. Bu oranlar Şekil 2.2'de gösterilmiştir [9].



Şekil 2.2 İstatiksel hızın tanımı [9]

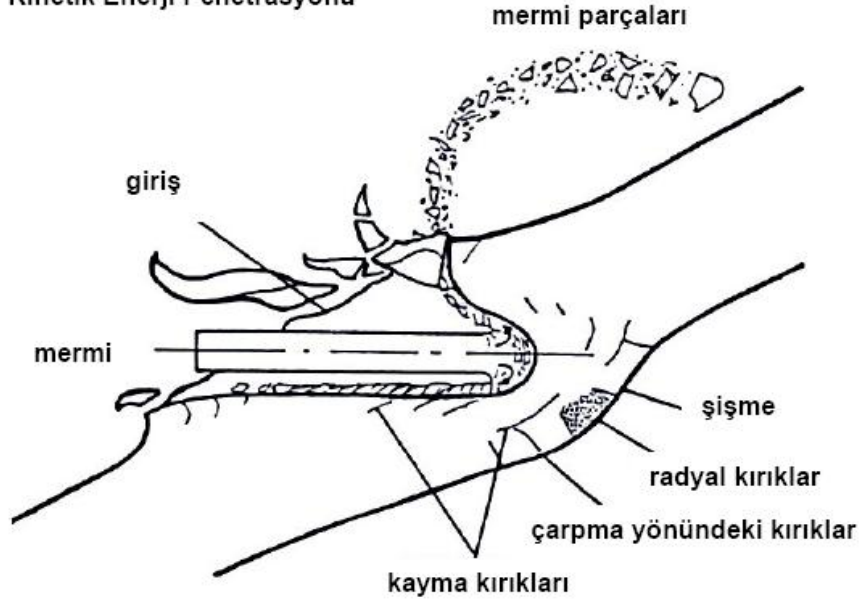
2.3.1 Penetrasyon Teorisi ve Mekanizması

Fiziksel proseslerin, penetrasyon sırasında farklı tehditlerin zırh üzerinde yarattığı etkileri inceleyen bilim dalına penetrasyon mekanizması denilir.

Kinetik enerji, penetrasyon sürecinin çok önemli yerlerinde karşımıza çıkar. Kavramsal olarak penetrasyon tehdidin hedef içine kısmi olarak girmesi, yani hedef içinde belirli bir yol aldıktan sonra durmasıdır. Uygun bir zırh tasarımının elde edilmesini amaçlayan bir çalışmanın temel dayanak noktası da budur.

Perforasyon ise hedefin kalınlığı boyunca penetrasyonun devam etmesi, yani merminin hedefi tamamıyla delip geçmesi olarak tanımlanır. Bir mermi hedefin içine girmek (penetrasyon) ya da onu delip geçebilmek (perforasyon) için hareketinden kaynaklanan kinetik enerjiyi kullanır. Bu nokta; kinetik enerjili çarpışmaları, kimyasal enerji boşalmılarından ayırır. Kinetik enerji ile penetrasyon arasındaki ilişki Şekil 2.3'de özetlenmiştir [11].

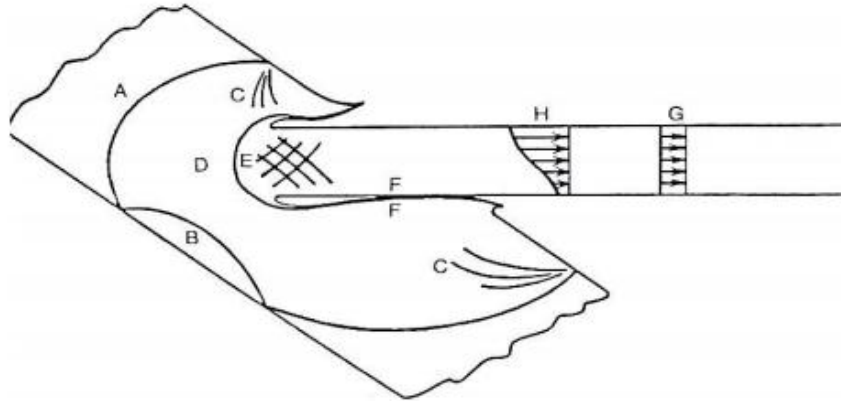
Kinetik Enerji Penetrasyonu



Şekil 2.3 Kinetik enerji penetrasyonu ilişkisi [11]

Tehdidin hedefe çarpması ile birlikte, etki tepki kuralından dolayı hem tehditte hem de hedefte gerilme dalgaları meydana gelir. Bu gerilme dalgaları; tehdidin ve hedefin özelliklerine ve tehdidin çarpma hızına bağlı olarak ses hızına yakın değerlerde hatta daha yüksek hızlarda yol alırlar. Bunları daha yavaş olan kayma dalgaları izler. Şekil 2.4’de gerilme dalgaları şematik olarak gösterilmiştir.

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| A: şok dalgaları | E: plastik deformasyon |
| B: yansıma | F: arayüz etkileri |
| C: kayma | G: uzunlamasına dalgalar |
| D: yüksek basınç bölgesi | H: eğilme dalgaları |



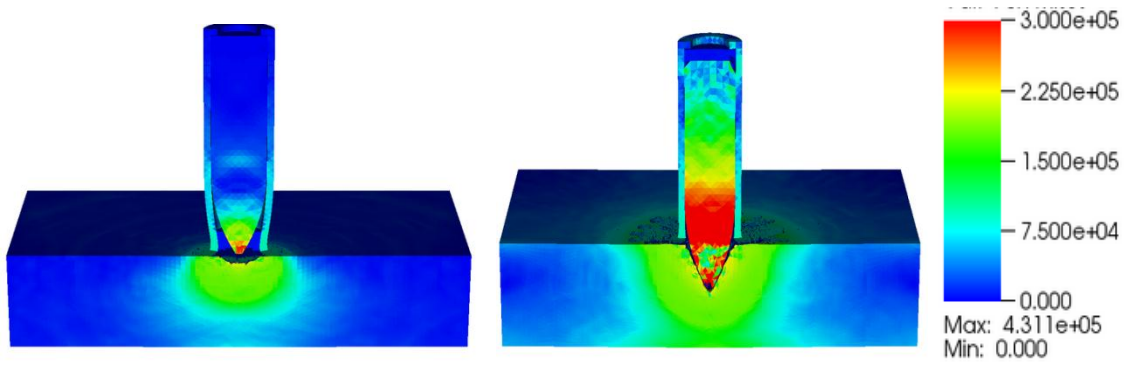
Şekil 2.4 Kinetik enerji penetrasyonu ve gerilme dalgaları [11]

Penetrasyon teorisi ve mekanizması birçok faktöre bağılı olarak değişir bunlar arasında en önemlileri;

- Tehdidin ve zırhın hızı,
- Tehdidin ve zırhın geometrisi,
- Tehdidin ve zırhın malzeme özellikleridir [12].

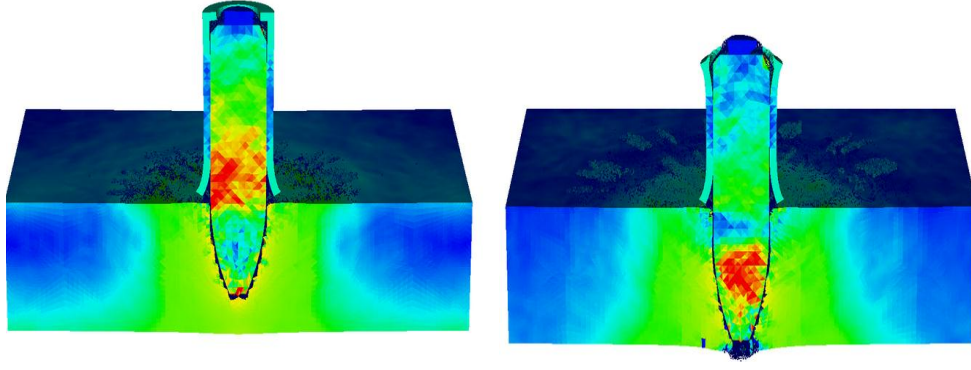
Penetrasyon mekanizması, malzeme özelliğine göre; metal, seramik, polimer ve kompozit türüne göre incelenir. Tehdidin hız aralıklarına göre sıralarsak; düşük hız (500 m/s altı), genel tehdit hız aralığı (500-2000 m/s) ve hiper hız aralığı (2000 m/s üstü) dır [10].

Çelik, alüminyum, titanyum, polimer kompozitler gibi sünek malzemeli zırhlara, AP 7.62x51 mm tehdidin 800 m/s hız ile çarpma mekanizması Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Çarpmanın ilk 10 µs sinde bakır ceket daha sünek olduğu için plastik şekil değiştirme ile belirli bir forma gelir. Aynı zamanda merminin ucunda gerilmeler maksimum seviyeye doğru ilerler. Maviden kırmızıya doğru gerilme dayanımı artar. Çarpmanın 10-20 µs'inde mermi daha çok zırha nüfus eder ve şok dalgaları hızlıca oluşmaya başlar [13].



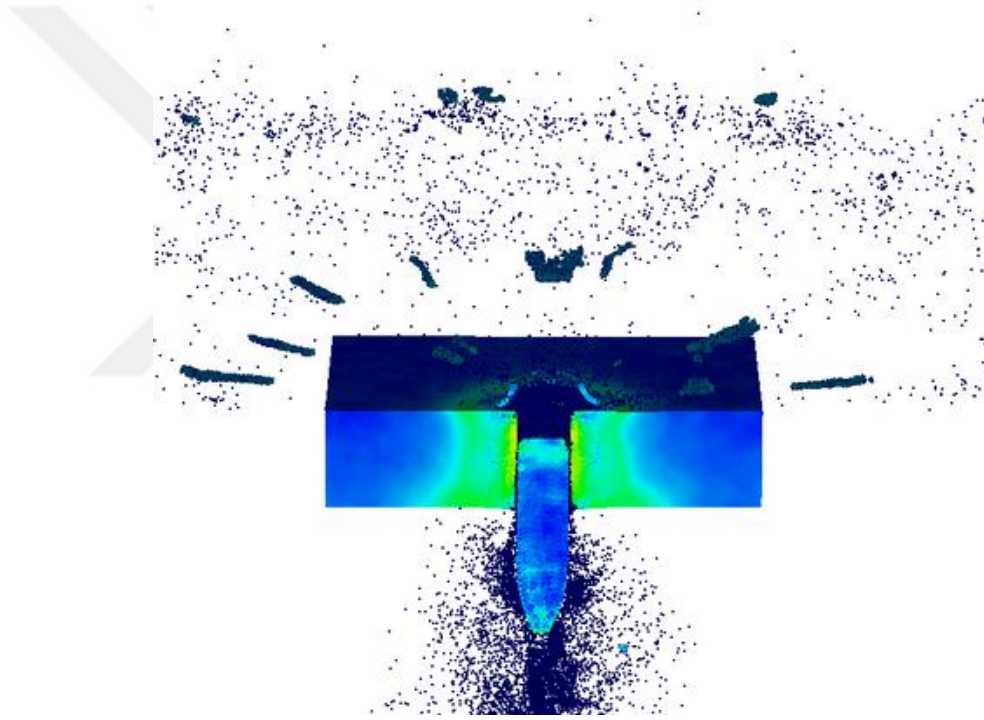
Şekil 2.5 Çarpmanın 10 µs'inde(sol) ve 20 µs'inde(sağ) gerilme dayanımı [13]

Çarpmanın zamanla etkileşmesi sonucu (AP 7.62x51 mm tehdidin 800 m/s hız ile çarpması), 30-40 µs'inde penetrasyon gerilim dağılımı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Çarpmanın 30 μ s'inde(sol) ve 40 μ s'inde(sağ) gerilme dayanımı [13]

Perforasyon sonucu (AP 7.62x51 mm tehdidin 800 m/s hız ile çarpması), merminin zırhı terk etme şekli ve gerilme dağılımları Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Çarpmanın 200 μ s'inde gerilme dayanımı [13]

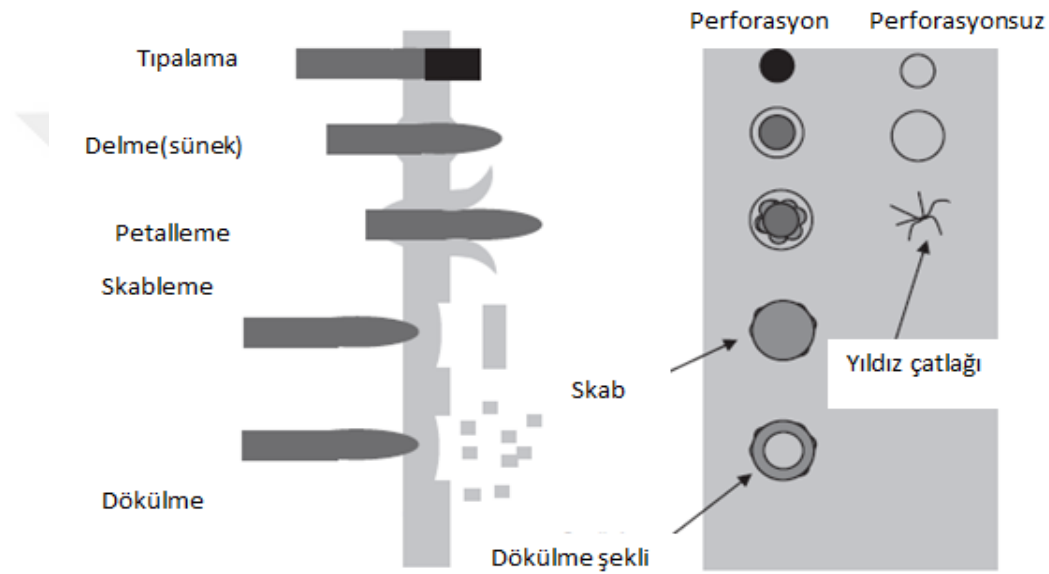
2.3.2 Metallerin Penetrasyon ve Perforasyonu

Metal malzemeler, en çok kullanılan zırhlar ve tehditler arasında ilk sırayı alır. En çok kullanılan metal zırhlar; çelik ve alüminyumdur.

Tehdidin, zırha ilk çarpması ile basma dalgaları oluşur. Oluşan bu dalgalar hem zırh üzerinde hem de tehdit üzerinde yayılır. Rahatlama dalgalarının yayılması, genel olarak tehdidin merkezinden, serbest yan yüzeylere doğrudur ve bu dalgalar yüksek oranda

çekme dalgaları meydana getirir. Çarpma normal (90 derece) olursa, iki boyutsal gerilme durumu olur, eğer çarpma oblik (dereceli) olursa, tehdidde bükme gerilmesi oluşur. Basma dalgaları hedefin serbest yüzeylerine ulaştığında, çekme dalgaları geri yansıma olarak döner. Bu noktada hedefin kırılması meydana gelir.

Hedefin, zırha çarpmasının etkisi ile bazı deformasyonlar meydana gelir. Bu deformasyonları etkileyen en önemli faktörler; hedefin ve tehdidin malzeme özellikleri, çarpmanın hızı, tehdidin geometrisi (özellikle sivri uçlu olması), tehdidin ve hedefin ölçüleridir. Hedefin kırılma şekilleri Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 Hedefin kırılma modülleri [9]

Dökülme (Spalling): Çok yaygın olarak meydana gelen bir kırılma şeklidir. Arka plakadan yansıyan basınç dalgaları sonucu oluşur. Daha çok gevrek malzemelerde oluşan bir kırılma modülüdür.

Skableme (Scabbing): Dökülme kırılmasına benzer fakat kırılan ve ayrılan parçalar daha çok plaka şeklinde olur. Bu kırılma mekanizması düşük yoğunluklu ve zayıf hedef malzemelerinde meydana gelir. Özellikle çekme dayanımı, basma dayanımından düşük olan seramik malzemelerde bu kırılma şekilleri çok sık görülür. Fakat bazı zırh çeliklerinde de bu kırılmalar görülmektedir.

Tıpalama (Plugging): Çoğunlukla sünek malzemelerde meydana gelen bir kırılma şeklidir. Özellikle çarpma hızı balistik limit hıza yakın olduğu zaman görülür.

Petalleme (Petaling): Radyal ve çevresel gerilmelerin yüksek olduğu ve tehdidin çarpma hızının balistik hız limitine yakın olduğu zaman meydana gelen kırılma şeklidir.

Tehdidin metal malzemeye çarpması sırasında adyabatik kayma gerilmeleri oluşur. İlk çarpmanın etkisi ile bölgesel olarak yoğun kaymalar meydana gelir. Bu durum o kadar hızlı (μs) bir sürede oluşur ki metalin kendini toparlanması yetersiz kalır ve bölgesel ısı yoğunluğu oluşur. Bu kısa zaman ve yüksek orandaki deformasyondan dolayı, ısı transferi meydana gelmez ve ısı iletilemez. Yüksek sıcaklıkta malzemelerin mekanik özellikleri daha düşük olduğu için, malzeme akma eğilimi ile plastik akış gösterir, bu işlem kendi kendini besleyerek devam eder ve sonuç olarak kırılma meydana gelir [9].

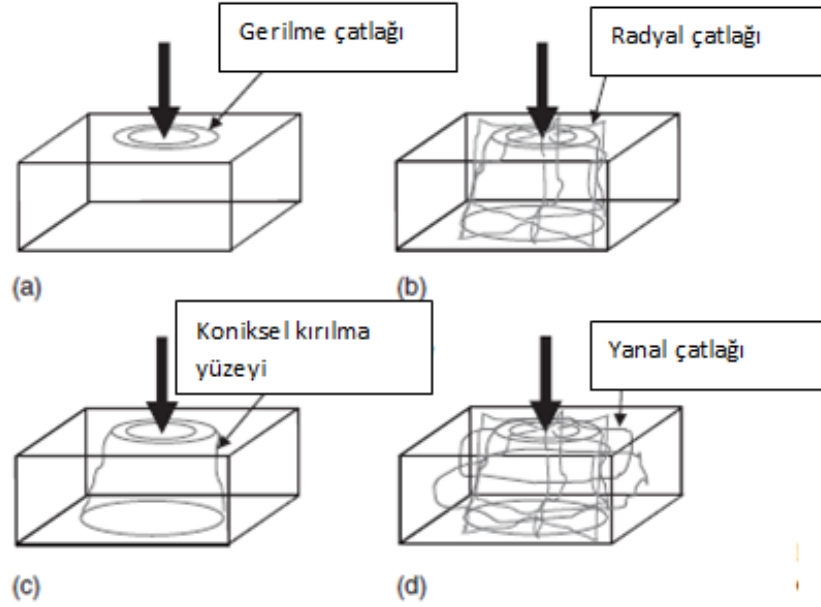
2.3.3 Seramiklerin Penetrasyon ve Perforasyonu

Zırh sistemlerinde, ağırlık çok önemli bir konumda olduğu için seramiklerin kullanımı artmıştır. Genel olarak zırh teknolojisinde kullanılan seramikler; bor karbür, silisyum karbür ve alüminadır.

Seramiklerin zırh olarak kullanılmasının avantajları şöyle sıralanabilir; düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve yüksek basma dayanımıdır. Dezavantajı ise; kırılma, düşük çekme dayanımı, yüksek maliyet ve çoklu atışlarda düşük dayanımdır. Bu özelliklerden dolayı zırh yapımında kullanılan seramikler, genel olarak arka kısımdan polimer kompozit ile desteklenirler.

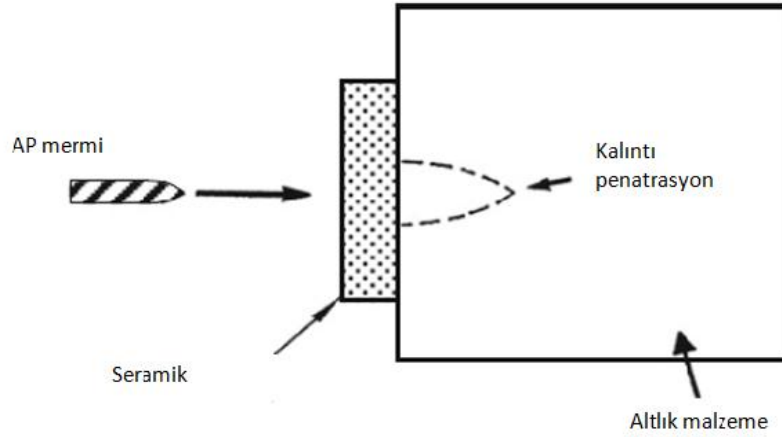
Seramiklerin, sertliği yüksek olduğu için çarpma anında tehdidin uç kısmını deforme ederler ve bu durumda penetrasyon etkisi azalır.

Tehdidin seramik malzemeye çarpmasından sonra şok dalgaları oluşarak arka taraftan yansır ve sonuç olarak ya perforasyon ya da penetrasyon oluşur ve ilk olarak çatlama gerilmeleri, tehdidin çarptığı noktanın çevresinde dairesel olarak meydana gelir. Bu çatlama yayılması normal yüzey düzleminden 25-75 derece boyunca oluşur. Çatlamlar bir kez uzak olan sınıra ulaştığında birleşerek koniksel bir form meydana getirirler. Bu noktada radyal çatlama meydana gelecektir. Radyal çatlama sonrası koniksel kırılmalar oluşur. Daha sonra çarpma yüzeyindeki düzlemde yanal çatlamlar meydana gelir. Bu mekanizmanın gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir [9].



Şekil 2.9 Seramik malzemelerin kırılma mekanizması [9]

Seramik malzemelerde kullanılan balistik testler genel olarak DOP (penetrasyon derinliği) ile yapılır. Bu test ile arka-referans malzeme derinliği ölçümü yapılır. Bu test, özellikle seramiklerde kullanılsa da diğer malzemeler için de kullanılabilir. Şekil 2.10'da bu testin düzeneği verilmiştir. Altlık referans malzemesi RHA çeliği olabileceği gibi alüminyum alaşımı da olabilir [14].

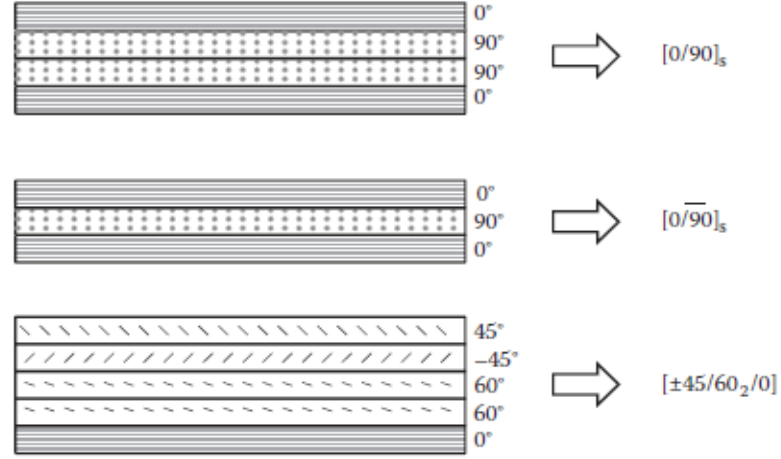


Şekil 2.10 DOP (penetrasyon derinliği) testi [14]

2.3.4 Kompozitlerin Penetrasyon ve Perforasyonu

Ayrıntılı olarak kompozitlerin penetrasyon ve perforasyon özelliklerine geçmeden önce, bazı terimlerin tanımlanması daha sağlıklı olacaktır.

- **Lamine (tabaka):** Matristeki fiber ya da dokuma kumaşın tek yönlü her bir tabakasına lamine denir.
- **Laminat:** İki ya da daha fazla laminanın çeşitli yönlerde matris ile yapıştırılması sonucu oluşan kısımdır. Şekil 2.11’de lamine türleri verilmiştir [12].

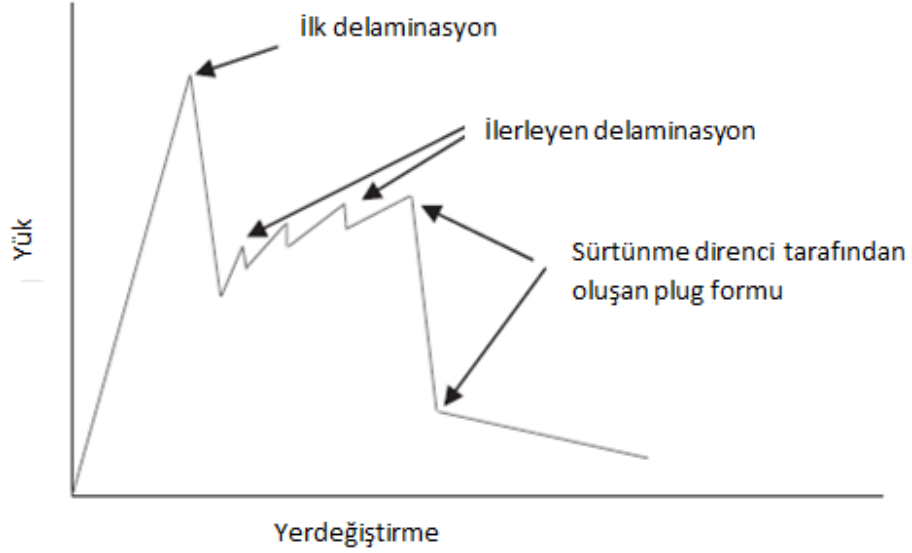


Şekil 2.11 Yönlendirilmiş laminat çeşitleri [12]

Kompozit malzemelerin, zırh teknolojinde kullanımında en önemli avantajları; düşük yoğunluk, giyinmesinin kolaylığı ve oldukça yüksek dayanımıdır. Dezavantajları ise; her zaman kararlı olmaması, üretim prosesine göre mekanik özellikler, kısmen yüksek maliyettir. Ayrıca kompozit malzemelerin değişken yapıya sahip olmaları nedeniyle tasarımcıların da işini zorlaştırmaktadırlar.

Kompozitler, enerji söndürücü etkileri ile penetrasyona direnci gösterirler. Buradaki mekanizma laminenin ve fiberlerin kırılması, matriksin çatlaması ve delaminasyondur.

Sürekli fiber yapılı kompozitler metallerden farklı davranış gösterirler. İlk delaminasyondan sonra, yük taşıma kapasitesi düşüş gösterir ve daha sonra yük taşıma yeteneği, plug oluncaya kadar inişli-çıkışlı bir yol izler. Tipik yük ve yer değiştirme eğrisi Şekil 2.12’de verilmiştir [9].



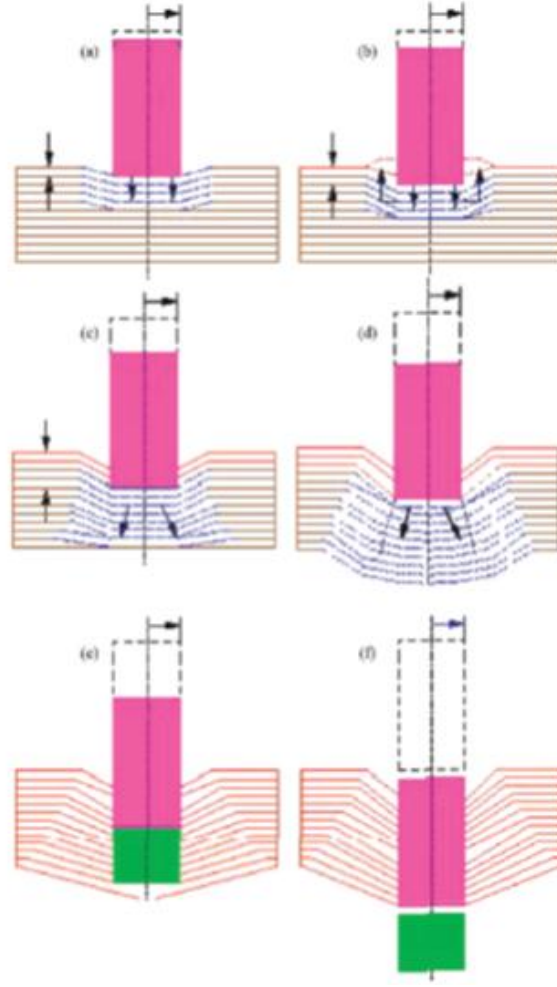
Şekil 2.12 Sürekli fiber kompozitin tipik bir yük – yerdeğiştirme eğrisi [9]

En çok kullanılan zırh kumaşlar, lamine şeklinde veya seramik gibi sert olan bir başka malzeme ile yapıştırılmış olanlardır. Lamine kumaşlar, ayrıca zırhlı araçların iç kısmına yapıştırılarak tehdidden gelecek olan kalıntıları durdururmak için kullanılır. Bu lamine kumaşlar, polyester ya da epoksi reçine ile kullanılırlar.

Kompozitlerin balistik özelliklerini etkileyen çok sayıda faktör vardır. Bu faktörler; fiberin ve matrisin mekanik özelliklerine, fiberin dokuma şekline ve yapısına, tehdidin mekanik özelliklerine ve hızına, ayrıca kumaş ile tehdidin arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Bu kadar değişken faktörün olması, performans ve penetrasyon proses analizlerini zorlaştırmakta ve her zaman deneylerde benzer sonucu vermeyebilmektedir [10].

Tehdit hedefe çarptığı anda şok-basma dalgaları oluşmaya başlar ve bu dalgalar hedefin kalınlığı boyunca hareket ederler. Tabakalardaki şok dalgaları ayrıca çekme dalgaları oluşturur. Basma dalgalarını kayma dalgaları izler. Bu basma, çekme ve kayma dalgaları kalınlık boyunca hareket ederler. Bu dalgaların serbest yüzeyden yansıması sonucu bir birleri ile basma, kayma ve çekme kuvvetleri oluştururlar ve bu kuvvetler altında malzemenin kritik deformasyon noktası aşıldığında önce deformasyon oluşur daha sonra da kırılma sınırının aşılması ile kırılmalar meydana gelir.

Lamine yapılı kompozit malzemenin balistik çarpma şeması Şekil 2.13’de verilmiştir.

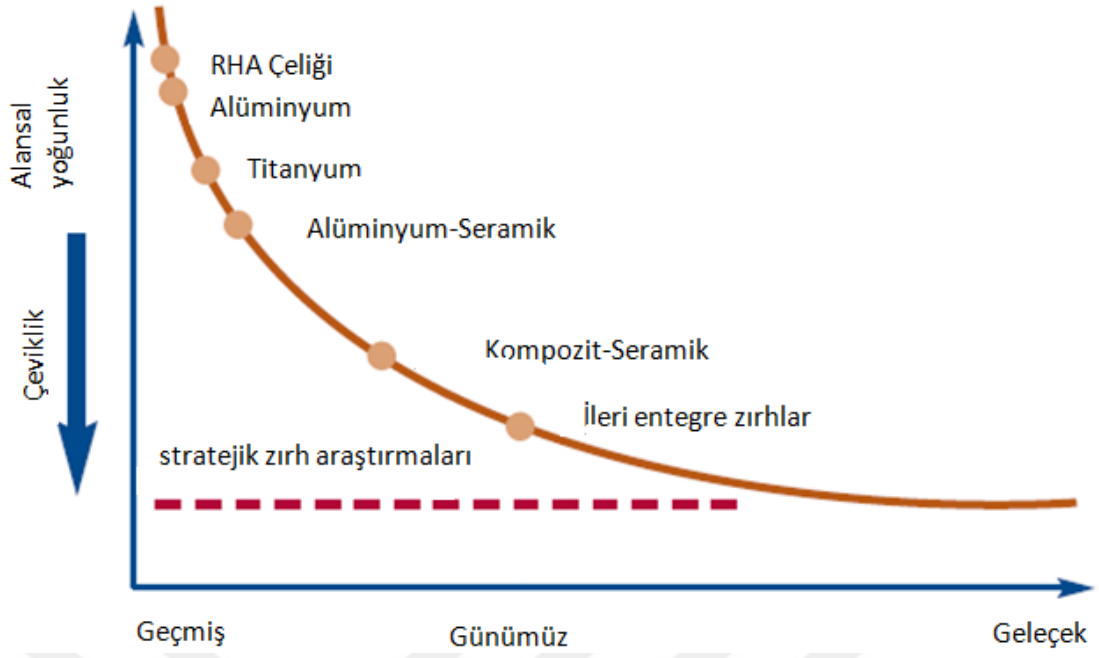


Şekil 2.13 Lamineli kompozit malzemenin balistik çarpma sıralaması [15]

2.3.5 Zırh Malzemeleri ve Temel Özellikleri

Genel olarak zırh malzemeleri üç guruba ayrılır. Bunlar; metaller, seramikler ve kompozitlerdir.

Zırhlar; zamanla kullanım alanı, teknolojisi, alansal yoğunluğu, mekanik özellikleri ve balistik etkileri ciddiye alınarak bir değişim geçirmişlerdir. Bu değişim Şekil 2.14'de analitik olarak verilmiştir.



Şekil 2.14 Zırhların genel olarak zaman diliminde gösterilmesi [16]

Yapılan çalışmalarda; zırh malzemelerinin balistik verimliliğinin, farklı mermilerde ve farklı hızlarda farklı davranışlar gösterdiği görülmüştür. Merminin sertliği ve hızı yükseldikçe, zırhın balistik verimliliği azalmaktadır. Zırhların kendi içinde farklı balistik verimlilik göstermeleri, onları karmaşık yapılara doğru zorlamıştır. Bu karmaşık yapıların balistik verimliliklerinin özeti Şekil 2.15’de verilmiştir [16]

Mermi		Malzeme			
Türü	Çarpma hızı(m/sn)	Alüminyum	Çelik	Kompozit	Seramik
Yuvarlak uçlu	800-900	Green	Cyan	Cyan	Cyan
(AP)Zırh delici	800-900	Green	Yellow	Yellow	Red
(AP)Zırh delici-(WC)	800-900	Yellow	Green	Yellow	Yellow
		Verimlilik(küçükten büyüğe) →			
		Yellow <	Green <	Cyan <	Red <

Şekil 2.15 Mermilere göre malzemelerdeki balistik verimlilik [16]

2.3.5.1 Metal Zırhlar

Metal malzemeler, zırh teknolojisi ve tasarımında halen günümüzde çok yaygın olarak kullanılırlar. En önemli avantajları yapılarının daha tok, homojen ve yeterince kuvvetli olmalarıdır. Ayrıca diğer zırh malzemelerine göre daha ucuzdurlar [17].

• Alüminyum Alaşımların Balistik Özellikleri

Alüminyum alaşımları, özellikle 1950 yıllardan sonra, hafif ve orta zırhlı araçlarda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandı. Alüminyum alaşımlarının tercih edilmesinin nedeni; hafiflik, yüksek dayanım, kaynak yapılabilir ve kolay işlenebilir olmasıdır.

Son dönemde, Afganistan ve Irak savaşlarında karşılaşılan yeni tehditler, zırh teknolojisinde yeni gelişmelere neden olmuştur. Bu gelişmelerden biri de alüminyum alaşımlarıdır [16].

Alüminyum alaşımlarının yoğunluğu, hem çelik malzemelerden hem de titanyum alaşımlarından daha düşüktür. Fakat bununla birlikte sertliğinin de diğer iki malzemeye göre düşük olması, balistik performansını da düşürmektedir. Fakat yine de bazı alüminyumun alaşımlarının üstün özellikleri zırh olarak kullanılmasına izin vermektedir. Özellikle düşük ağırlıkları, gerilimli korozyon çatlaklarına dayanımalarının yüksek oluşu, işlenebilirlik ve kaynak edilebilir olmaları avantaj sağlar [18].

Balistik zırhta en çok kullanılan alüminyum alaşımları 2xxx, 5xxx ve 7xxx serisidir.

AA 2219 alaşımı, balistik özellikleri açısından, AA 5083 daha üstün ve AA 7039'a daha yakındır. Bu karşılaştırma Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bunun yanında AA 2219 gerilimli korozyon çatlaklarına dayanımı hepsinden daha yüksektir.

Çizelge 2.1 Bazı alüminyum alaşımların fiziksel ve balistik özellikleri [18]

Alaşım	Yoğunluk (gr/cm ³)	Akma dayanımı (%0,2) MPa	Çekme dayanımı (MPa)	Elastiklik modülü (%)	Alansal yoğunluk (kg/m ²)	V ₅₀ (m/s)
2519-T87	2,82	478	503	11-14	73	663
5083-H131	2,66	318,50	544	9,3	68	554
7039-T64	2,73	400	598	13,6	68	624

AA 5083 alaşımının mükemmel parçalanma dayanımı, yüksek korozyon direnci ve kaynak kabiliyetinin iyi olması nedeni ile zırh uygulamalarında oldukça yaygın kullanılır. AA 7039 alaşımı ise; yüksek kırılma tokluğu ve yüksek balistik özellikleri nedeni ile özellikle zırh delicilere (AP) karşı olan dayanımı AA 5083 alaşımından daha yüksektir. Fakat gerilimli korozyon çatlaklarına dayanımı daha düşüktür. AA 2219 alaşımı zırh uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

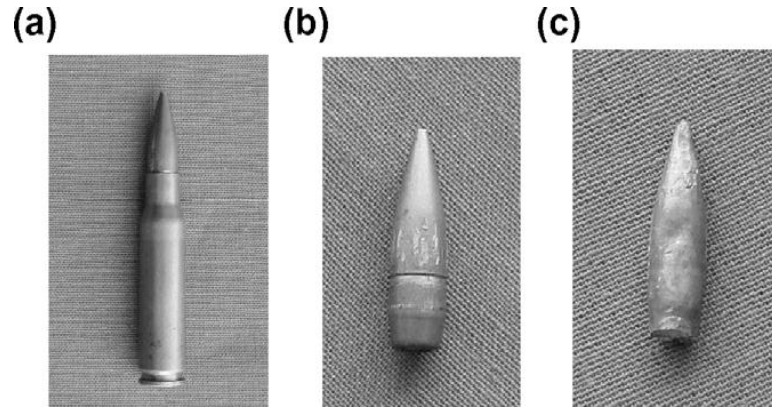
Bu karşılaştırma ile birlikte merminin zırha çarpma açısı balistik limit hızı direk olarak etkileyeceği için dikkate alınmıştır. AA 2014-T6 veya AA 7075-T73 alaşımların balistik V_{50} limit hızında merminin zırha çarpma açılarına göre karşılaştırılması Şekil 2.16'de analitiksel olarak verilmiştir [14].



Şekil 2.16 Alaşımların V_{50} hızında çarpma açılarına göre karşılaştırılması [14]

Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının zırh sisteminde kullanılmasının en büyük nedeni, düşük yoğunluk ve yüksek dayanımıdır. Yapılan çalışmalarda 15 mm AA 7017 alaşıma karşı kullanılan 7.62 deforme edilebilen mermi, görsel olarak ceketli ve çekirdekli olarak Şekil 2.17'de verilmiştir. Bunun yanında Çizelge 2.2'de de deforme edilebilen mermin teknik özellikleri gösterilmiştir. Kullanılan bu merminin çarpma hızı

ortalama olarak 830 ± 10 m/s'dir. Çizelge 2.3'de ise zırhın mekanik özellikleri verilmiştir [9].



Şekil 2.17 (a) Deforme olabilen mermi, (b) Pirinç ceketli, (c) Kurşun çekirdekli [9]

Çizelge 2.2 7.62 deforme edilebilen merminin bazı özellikleri [9]

Tür	Özellikleri
Fişek uzunluğu	70.88 ± 0.48 mm
Fişek malzemesi	Bakır
Ceket malzemesi	Pirinç
Çekirdek malzemesi	Kurşun
Merminin toplam ağırlığı (ceketli)	9.034 g
Merminin ağırlığı (ceketsiz)	6.05 g
Merminin uzunluğu	26.53 mm
Merminin çapı(ceketsiz)	5.66 mm
Burun tipi	Koniksel

Çizelge 2.3 AA-7017 mekanik özellikleri [9]

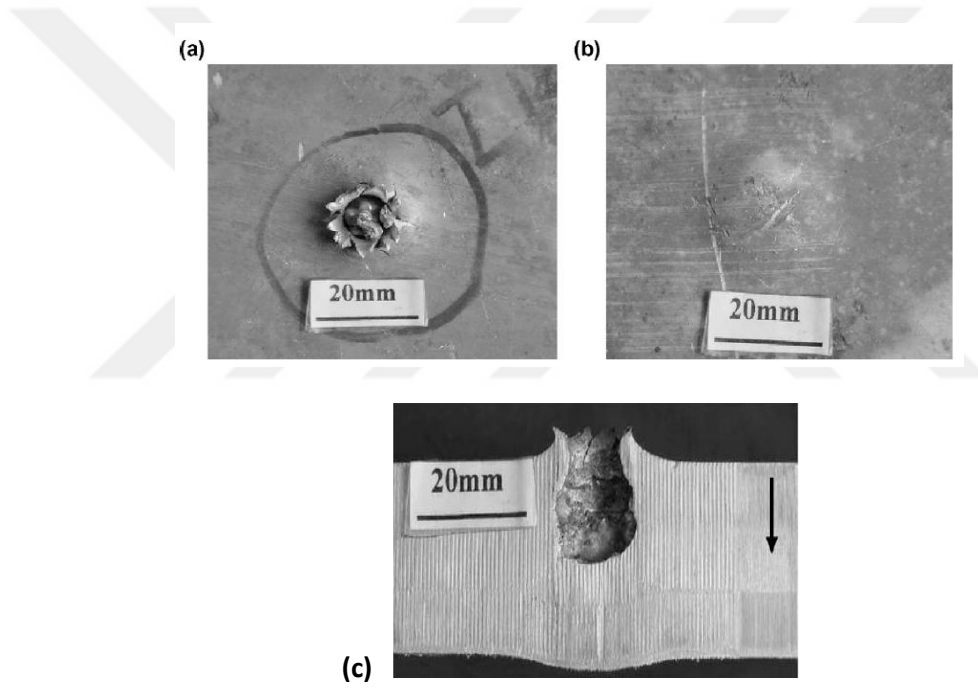
Malzeme	Akma dayanımın (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastiklik modül (%)	Sertlik (VHN)
AA-7017	458	508	17	135

Balistik test sonuçları AA-7017 malzemenin minimum olması gereken kalınlığının 27 mm olması gerektiğini ifade eder. Sonuçlar detaylı olarak Çizelge 2.4'de incelenmiştir.

Çizelge 2.4 AA-7017 malzemenin balistik test sonuçları [9]

Malzeme	Çarpma hızı (m/s)	Kalınlık (mm)	Alansal yoğunluk (kg/m ²)	Sonuç
AA-7017	830	30	83.4	Delinmedi (arka kısımda iz yok)
AA-7017	830	28	77.8	Delinmedi (arka kısımda çok az iz var)
AA-7017	830	27	75.06	Delinmedi (arka kısımda çok az iz var)
AA-7017	830	26	-	Delindi

Şekil 2.18 27 mm kalınlığındaki AA-7017 malzemenin önden ve arkadan kesit görüntüsü gösterilmiştir [9].



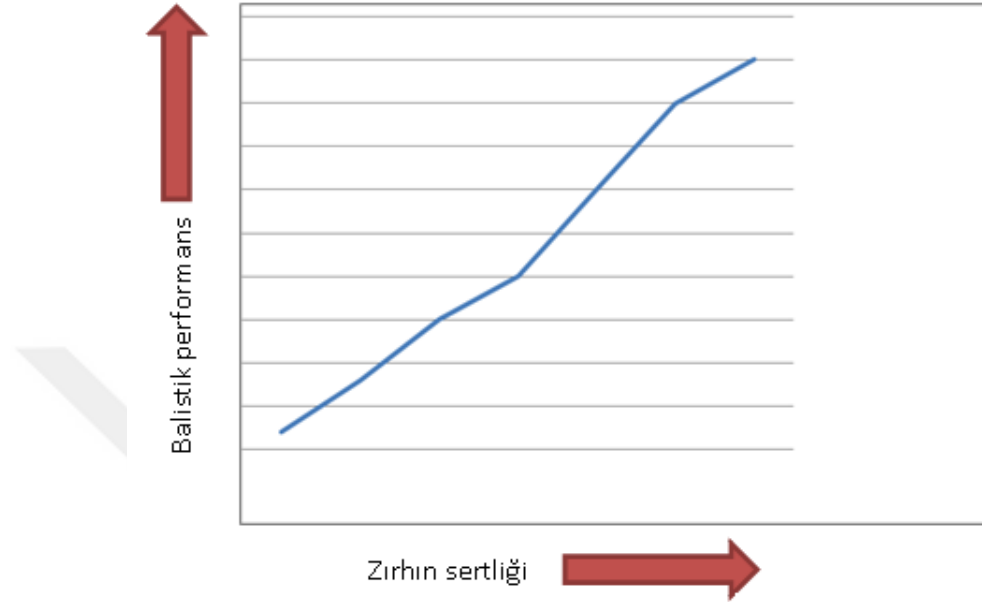
Şekil 2.18 (a) Önden görünüm, (b) Arkadan görünüm, (c) Yarım kesit görünüm [9]

- **Çeliklerin Balistik Özellikleri**

Çeliklerin balistik performansı, çoğunlukla malzemenin sertliğine bağlıdır. Yüksek sertlik demek yüksek balistik performans demektir. Çeliklerdeki sertlik genellikle içerdiği karbon (C) miktarına bağlıdır. Bu nedenle yüksek karbon oranı, yüksek balistik performans demek çok da hatalı olmaz [19].

Fakat sertlik sadece karbon artışı ile artmaz, yani tek etken olarak karbonu vermek hatalı olur. Karbon artışı ile tokluk düşer. Yapılan son çalışmaların odaklandığı nokta;

yüksek sertliğin yapısal kapasitesi ile mermiye direnç sağlanmasıdır. Diğer tüm çalışmalarda hedef, yapı ile oynamadan balistik performansın en iyi olduğu sertlik değerlerine ulaşmaktır. Şekil 2.19'da balistik performans ile sertlik arasındaki bağlantılar gösterilmektedir [20].



Şekil 2.19 Balistik performans ile sertlik arasındaki bağlantı [20]

Homojen Haddelenmiş Zırh Çeliği (RHA):

RHA (Homojen Haddelenmiş Zırh Çeliği) malzemesi, yakın geçmişte çok yoğun olarak kullanılan bir zırh malzemesi olarak bilinir. RHA çeliği çoğunlukla benchmark malzeme gibi, deneylerde penetrasyon derinlik testlerinde referans malzeme olarak kullanılırlar. Bu nedenle RHA çeliği farklı malzemelerin balistik davranışlarını ölçerken karşılaştırma ölçütü olarak tanımlanır [12].

RHA malzemesi, yapısal uygulamalar içinde kullanılan tek zırh çeliğidir. Ağırlık faktörü zırh malzemesinde kritik bir öneme sahiptir. Mermi RHA zırhına çarptığı anda, sünekliği düşük olduğundan zırh nispeten daha kolay deforme olur. Düşük sertlikten dolayı, gelişen adyabatik kayma gerilmeleri sınırlandırılmış olur [21].

Uluslararası standartlara göre RHA çeliğinin kimyasal kompozisyonu ve sınıflandırılması Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'da gösterilmiştir [21].

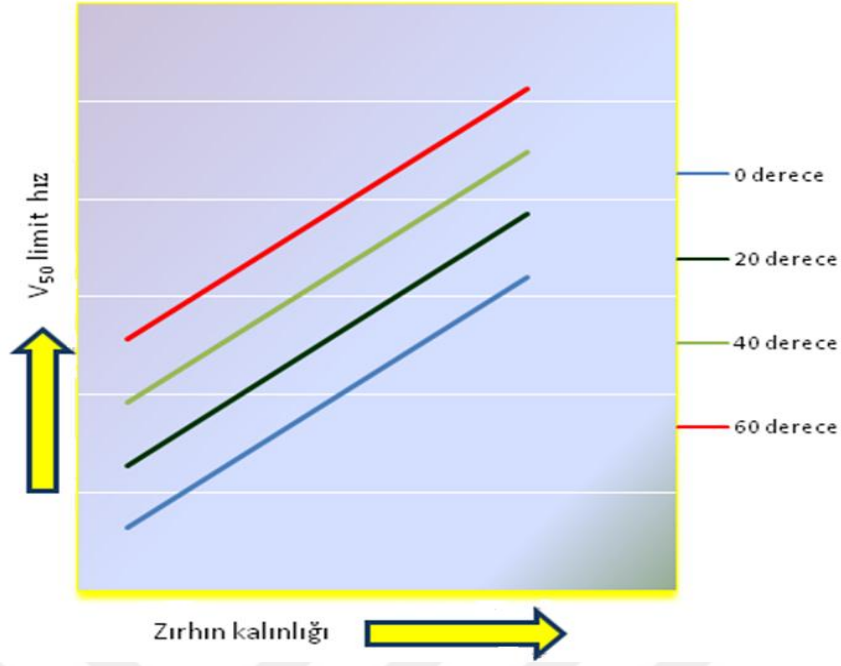
Çizelge 2.5 RHA çeliğin kimyasal kompozisyonu(% Ağ.) [21]

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P
0,18-0,32	0,60-1,5	0,05-0,95	0,0-0,90	0,30-0,60	0,015(max)	0,015(max)

Çizelge 2.6 RHA çeliğin sınıflandırılması [21]

Sınıflanan dırma	Tanımlama	Sertlik (HB)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1. sınıf	Yapısal yüklere karşı sağlanacak korumada kolay kaynak edilir	262-311	895-1,050	15
2. sınıf	AP mermilere karşı sağlanacak korumada kolay kaynak edilir	255-341	895-955	14-16
3. sınıf	Kolaylıkla kaynaklanabilen yüksek sertlik çelik	470-540	1,450-1,850	8
3A sınıf	Kolaylıkla kaynaklanabilen yüksek sertlik çelik	420-480	1,200-1,600	9
4. sınıf	Daha yüksek karbon ve alaşım içeriği yüksek sertlik Kalın zırhlar	475-605	1,450-2,000	7
5. sınıf	Çok yüksek alaşım ve sertlik içeren özel yüksek özellikli çelikler	560-655	1,800-2,400	6

Şekil 2.20'de RHA çeliğinin balistik V_{50} limit hızının, merminin zırha çarpma açısı ile değişim grafiği verilmiştir.

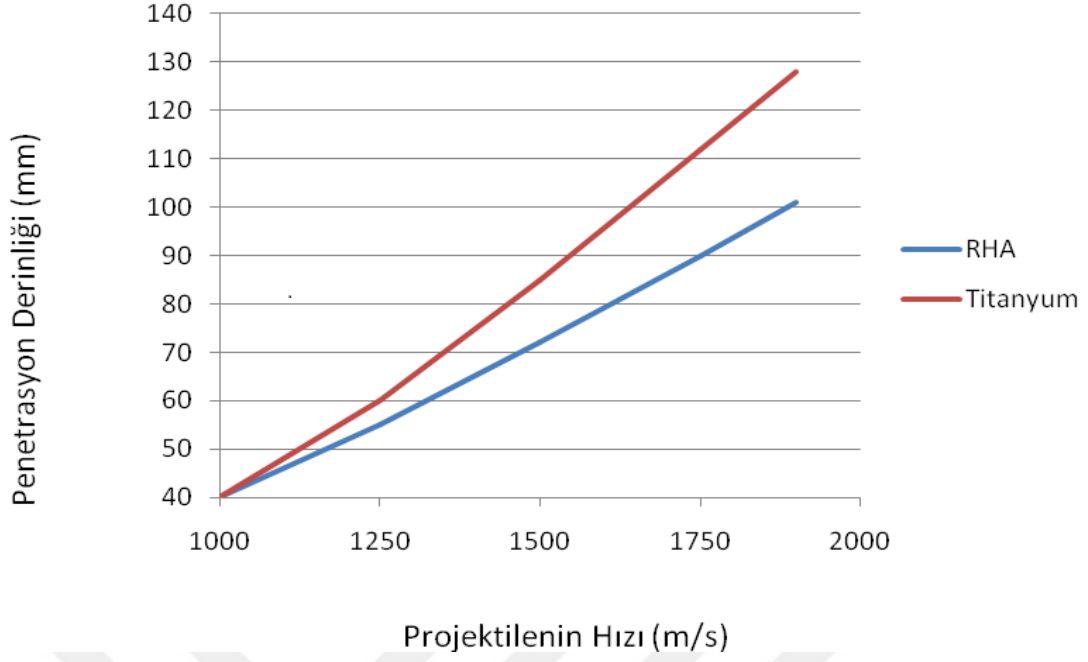


Şekil 2.20 RHA çeliğinin balistik V_{50} hızında çarpma açısına göre karşılaştırılması [14]

- **Titanyum Alaşımların Balistik Özellikleri**

Çeliğinin balistik performansı oldukça iyi olmasına karşın, ağırlığının yüksek oluşu bir dezavantajdır. Bu neden ile ağırlık – etkinlik açısından daha hafif malzemeler düşünölmek zorundadır. Titanyum alaşımlarının; yüksek sıcaklıkta gösterdiği yüksek performans ve yoğunluğunun çeliğe göre düşük olması önemli bir avantaj olmasına karşın fiyatının çok yüksek olması, işlenebilirlik ve kaynak edilebilirlik yeteneğinin düşük olması, zırh olarak kullanımını sınırlandırmıştır.

Zırh olarak kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı, RHA zırh ile karşılaştırıldığında benzer sertlik ve dayanıma sahip olmasına karşın, Ti-6Al-4V alaşımı %25 ağırlıkça RHA zırha göre daha hafiftir. Şekil 2.21’de bu iki zırh malzemenin balistik davranışları grafiksel olarak verilmiştir [20].

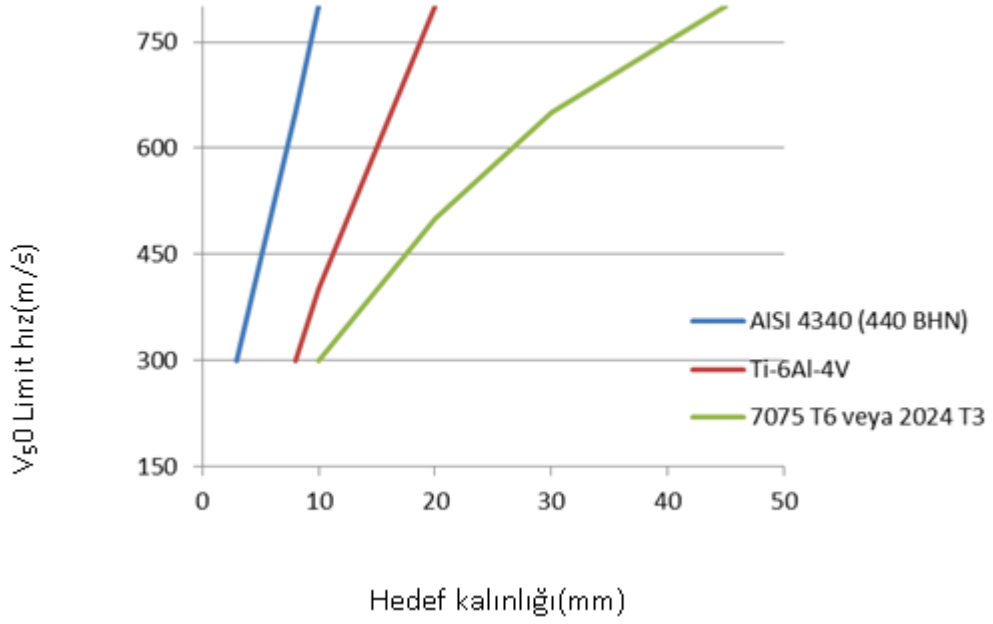


Şekil 2.21 Ti-6Al-4V ve RHA zırh ile yapılan karşılaştırma [14]

Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımı yüksek çarpma dayanımı, yüksek kırılma tokluğu ve çoklu atışlara olan uygunluğuna karşın, gerilimli korozyon çatlaklarına dayanımı düşüktür [14].

2.3.5.2 Alüminyum, Çelik ve Titanyumun Balistik Performansları

Bu malzemeler içinde çelik hiç kuşkusuz en iyi balistik performans sağlayan metaldir. Fakat yoğunluğu yüksektir. Ti-6Al-4V alaşımın balistik performans ve yoğunluk (balistik performans/yoğunluk) ilişkisinde çelikten daha iyi olduğunu gösterir. Alüminyum alaşımlarında yoğunluğunun düşük olması önemli bir avantaj iken balistik performansının çelikle yarışabilmesi için yüksek malzeme kalınlığı gerekmektedir. Bu üç zırh malzemesinin balistik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 2.22’de grafiksel olarak verilmiştir [14].



Şekil 2.22 Alüminyum, çelik ve titanyumun balistik performansları [14]

2.3.5.3 Seramik Zırhlar

Malzemelerin penetrasyon direnci basma dayanımı ile doğrudan ilgili olduğu düşünülmektedir. Seramik malzemeler yüksek basma dayanımına ve sertlik değerlerine sahiptir. Bu özelliklerden dolayı seramik malzemelere zırh teknolojisinde ciddi olarak önem verilmektedir. Ayrıca düşük yoğunlukta olmaları nedeni ile son zamanlarda önemli düzeyde zırh malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yüksek dayanımlı seramiklerden; alümina, bor karbür, silisyum karbür malzemeleri yüksek basma dayanımları nedeni ile metallere göre daha çok önem kazanmıştır. Bu nedenle gelecekte daha efektif olarak zırh yapımında kullanılacaklardır [12].

2.3.5.4 Kompozit Malzemelerin Balistik Özellikleri

Kompozit malzemelerin sahip olduğu yüksek dayanım ve spesifik rijitlik sebebiyle merminin çarpması ile yüksek oranda oluşun kinetik enerji absorbe olur. Ayrıca kompozitlerin en büyük özelliklerinden birisi de dayanım/yoğunluk oranının yüksek olmasıdır [22].

Kompozitlerin delinmeye karşı gösterdikleri ilk tepki, çarpmanın etkisi ile enerji dalgalarını sönmülemektir. Çünkü kompozitin karmaşık yapısından dolayı bu

absorbsiyon kendini; fiberlerin kırılması, laminenin delinmesi, matris yapısının hasar görmesi ve deliminasyon ile kendisini gösterir. Kompozit malzemenin yapısı izotropikten kompleks anizotropik yapıya dönüşme ihtimali olması neden ile malzemenin davranışları, malzemenin konfigürasyon ile direkt olarak bağlantılıdır. Kırık fiberlerde, kompozit malzemenin özellikleri çoğunlukla izotropiktir [9].

- **Cam Fiber Kompozit Zırhların Uygulama Alanları**

Cam takviyeli kompozitlerin zırhlarda kullanımları oldukça yoğundur. Buna örnek olarak balistik tank verilebilir. Bu tanklar, %30-%40 oranında matris epoksi bazlıdır. Zırh delici tehdidlere karşı kompozit malzemelerin dayanımı genellikle yetersiz kalır. Bu nedenle ikincil seramik veya yüksek sertlikte zırh malzeme kullanılır. Karbon takviyeli kompozitlerin aksine cam takviyeli kompozitler, şok yüklemelere karşı daya iyi direnç gösterirler. Sonuç olarak cam takviyeli kompozitlerin zırh teknolojisinde kullanımları oldukça önemlidir. Şekil 2.23’de verilen tankın gövde kısmı cam takviyeli epoksi matrisli kompozitten oluşmaktadır [12].

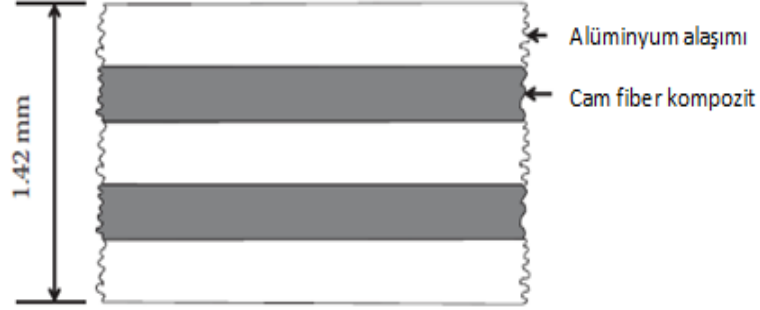


Şekil 2.23 Cam fiber- epoksi matrisli gövdenin görünümü [12]

- **Sandviç Yapılı Kompozitlerin Zırh Uygulaması**

Sandviç yapılı kompozitlerin en önemli zırh uygulamalarının başında; hava ve uzay sektörü gelmektedir. Bu uygulamaların başında da GLARE (Glass Laminate Alüminyum Reinforced Epoxy) malzemesi gelir. Yani bu malzeme, cam takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin alüminyum ile yapıştırılması sonucu oluşur. Bu malzeme Airbus A380

gövdesinde ve yanal alanlarında yoğun olarak kullanılır, düşük alansal yoğunluğu ve çarpma dayanımının yüksek olması nedeni ile kullanılmaktadır. Bu tabakaların birbiri ile yapışması epoksi ile sağlanır. Şekil 2.24’de GLARE malzemenin yapısı görülmektedir



Şekil 2.24 GLARE malzemenin kesit görünümü [12]

GLARE malzemesinin geleneksel alüminyum malzemesine göre başlıca avantajları;

- Daha yüksek darbe dayanımı
- Daha yüksek yorulma dayanımı
- Daha yüksek korozyon direnci
- Daha yüksek yanma direnci
- Daha yüksek darbe enerjisi sönmüleme [12].

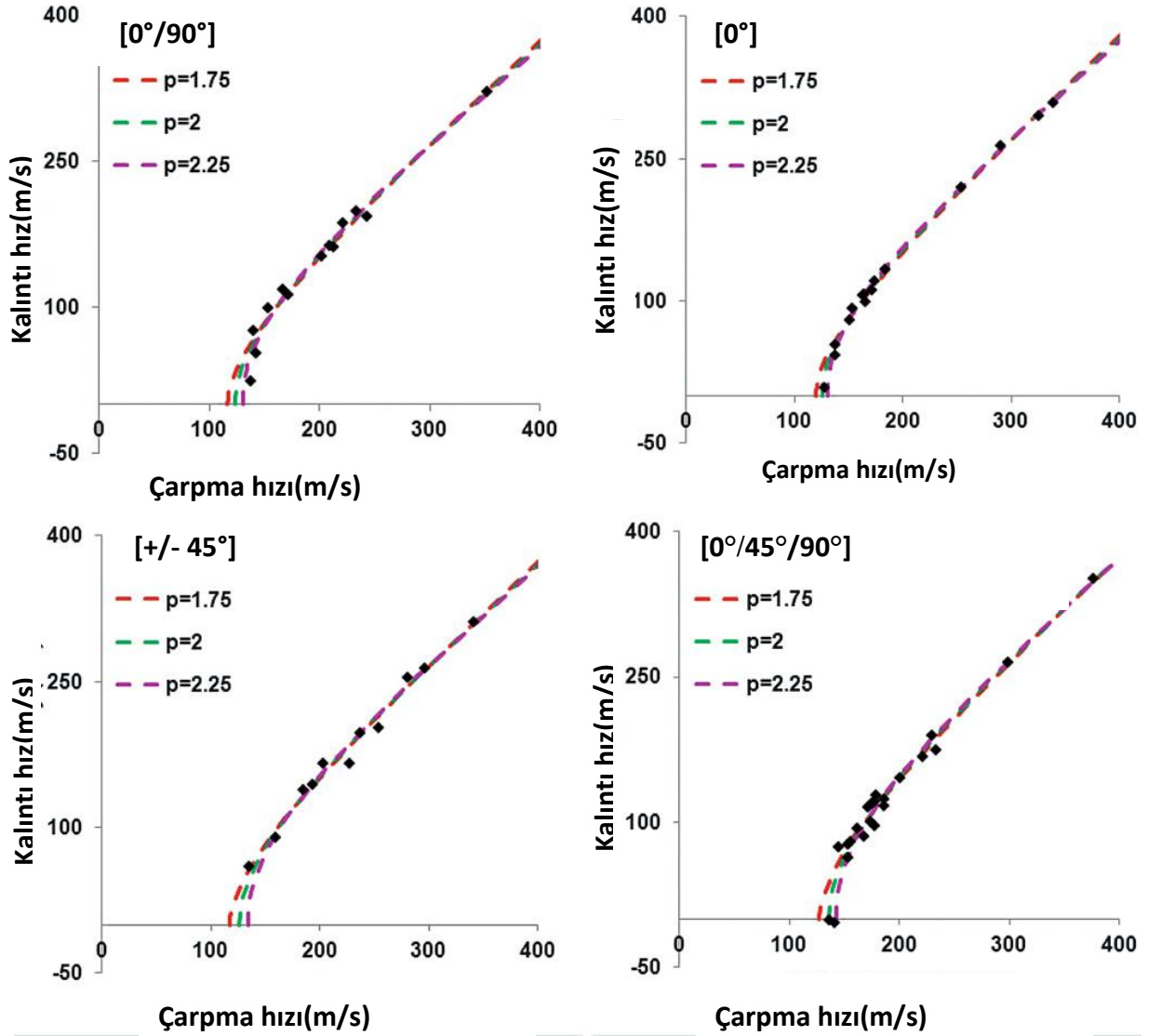
Yaghoubi ve Liaw yaptıkları çalışmada [23]; Fiber Metal Lamine (FML)- GLARE 5 kompozit malzemenin 152.4-101.6 mm ölçülerinde ve çeşitli bileşiminde yapılan zırhın, üzerine yüksek hızda .22 kalibreli (5,58 mm) mermi ile çeşitli deneyler yapmışlardır.

GLARE 5 malzemesi; S2 cam/epoksi lamineler ile 2024-T3 alüminyum alaşımlı laminelerin birleşimi ile oluşan Fiber-Metal-Lamine'nin (FML) özel bir türü olan tabaka yapalı kompozit bir malzemedir. Yaghoubi ve Liaw çalışmalarında, kullanılan 2024-T3 alüminyum malzemenin kalınlığı 0,305 mm, S2 cam/epoksinin ise 0,508 mm'dir [23].

Bu kombinasyonun ve oryantasyonun özellikleri Çizelge 2.7’de verilmiştir. Burada; m, alüminyum lamine sayısını, n ise S2/epoksi lamine sayısını vermektedir. Bunun yanında GLARE 5 (3/2) FML panellerin farklı oryantasyondaki giriş ve çıkış hızlarının dağılımı Şekil 2.25’de grafiksel olarak verilmiştir.

Çizelge 2.7 GLARE 5 panellerin farklı kombinasyon ve oryantasyonları [23]

Lay-up configuration (Yerleşim düzeni) (m/n)	Plakaların yerleşim şekli / oryantasyonu	Toplam kalınlık (mm)
3/2	[0°] tekyönlü	1,930
3/2	[0°/90°] iki yönlü	1,930
3/2	[+/- 45°] açılı yönlü	1,930
3/2	[0°/45°/90°] çok yönlü	1,930



Şekil 2.25 GLARE 5 (3/2) FML panellerin giriş ve çıkış hızları [23]

Yaghoubi ve Liaw'ın [23] yaptığı deney sonucunda; balistik limit değerleri en yüksek [0°/45°/90°] konfigürasyonunda sağlanırken en düşük ise [0°] konfigürasyonda görülmüştür. Diğer konfigürasyonlarda benzer değerler meydana gelmiştir [23].

2.3.6 Mühimmatlar

Mühimmat; mermi ve onun kısımları ile tanımlanır. Çekirdekdeki hızda da bunların kombinasyonu belirlenir. Mühimmat şu kısımlardan oluşur;

Kovan: Mermide; çekirdek, barut ve kapsülü bir arada tutan parçadır. Kovan aynen bir vazoya benzer; üstü açık, altı kapalıdır. Kovan, mermi bireylerini bir arada tutmaktan başka atış anında genişleyip, yuvayı geri tepen gazlardan korur. Kovanlar genelde pirinçten (%70 bakır ve %30 çinko) yapılır. Bazı kovanlarda bu alaşıma destek olarak pirinçten daha dayanıklı olan nikel eklenir. Aynı zamanda çelikten yapılan kovanlar da vardır [24].

Barut: Tarih boyunca mermilerde hep kara barut kullanıldı. Fakat günümüzde kara baruta alternatif olarak “dumansız barut” var. Kara barut (%70 potasyum nitrat, %15 odun kömürü, %15 sülfür) ateşli silahlar ilk icat edildiğinden beri kullanılmaktadır. Kara barut “dumansız baruta” göre namluda daha çok pislik bırakır. Bu da namlunun sık sık temizlenmesini gerektirir. Dumansız barut (nitroselüloz + nitrogliserin) kara barutun aksine daha stabil ve kalitelidir, ayrıca hapsedilmeden tutuşturulursa patlamaz [23].

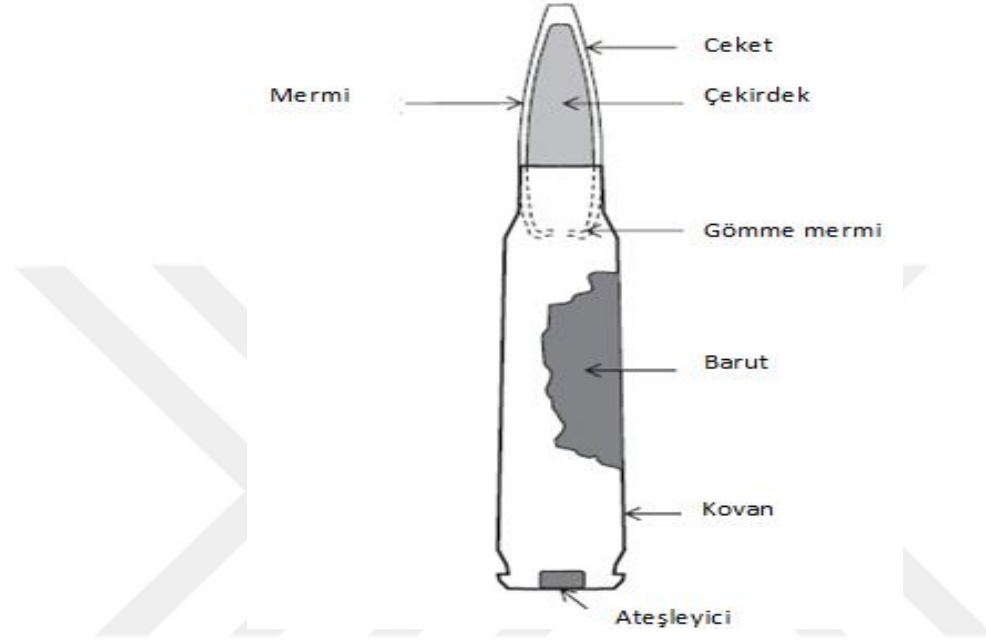
Modern barutlar yuvarlak veya düz parçacıklar halinde yapılmakta ve değişik büyüklüklere gelebilmektedirler. Hafif ve hızlı yanan barutlar hızlı mermiler için, ağır ve yavaş yanan barutlarsa daha yavaş mermiler için kullanılmaktadır [24].

Ateşleyici (Kapsül): Mermide barutu ateşleyen parçadır. Kapsül; kupa, patlayıcı, örs ve alev kanallarından oluşur. İğne kapsüle çarptığı an, örs kupaya çarpar ve patlayıcıyı ateşler. Ortaya çıkan kor alev, alev deliklerinden geçip baruta ulaşır. Böylece barut yanar [24].

Çekirdek: Patlamadan sonra namluyu terk eden parçadır. Eskiden çekirdekler sadece kurşundan yapılırdı; fakat bu çekirdekler namluya zarar verdiği gibi namlunun yivine uyum gösteremiyorlardı. Çekirdeğin bu problemlerini çözmek için metal bir gömlekle kaplanmasına ihtiyaç duyulmuştur [24].

Gömlük genelde tombak (%90 bakır ve %10 çinko) denilen bir alaşımdan yapılır. Aynı zamanda çelik ve pirinçten de yapılan gömlükler vardır. Günümüzde halen kurşun çekirdekler de kullanılır. Ancak bu çekirdeklerin yapısına kalay eklenerek daha sert olması sağlanır. Günümüzde birçok çekirdek türü bulunmaktadır [24].

Mühimmatın kısımları Şekil 2.26’da görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.26 Mühimmatın sistematik görünümü [12]

2.3.6.1 Zırh Delici Mermiler

Özel olarak tasarlanmış yüksek sertlikte çelik (yaklaşık 60 HRC) veya tungsten karbür çekirdeğe sahip olan mermilere verilen genel isim “zırh delici mermi”dir. En çok bilinen zırh delici, AP 7.62x51 mm olandır [8]. Bu merminin genel özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir [25]

Çizelge 2.8 AP 7.62x51 merminin bazı özellikleri [25]

Tür	Özellikleri
Fişek uzunluğu	71,12 ±0,76 mm
Fişegin ağırlığı	25,47 ±1,75 gr
Kovan malzemesi	Pirinç (CuZn30)
Çekirdeğin malzemesi	DIN 100Cr6 (HRC 61–62)
Merminin toplam ağırlığı (ceketli)	9,75 ±0,1 gr
Merminin uzunluğu	32.95 mm
Burun tipi	Koniksel

Yarı sonsuz RHA malzemesi üzerine, 860 m/s hızla atılan 7.62x51 mm merminin penetrasyon sonuçları Çizelge 2.9’da verilmiştir [12].

Çizelge 2.9 7.62x51 ile RHA malzeme arasındaki ilişki [12]

Kalibre	Çekirdek türü	Penetrasyon derinliği (mm)
7.62 X 51	Küre	8
7.62 X 51	AP (Sert çelik)	15
7.62 X 51	AP(WC)	24

DENEY HAZIRLAMA VE UYGULAMA

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyisel çalışmalarda incelenmek amacı ile kullanılan zırhlar üç farklı malzemeden üretilmiştir.

- AA-6082 T6,
- G10 FR4 kompozit (cam-epoksi) ve
- Epoksi Yapıştırıcı (ARALDITE®AW 106)

3.1.1 AA-6082 T6 Malzemenin Özellikleri

Zırh teknolojisinde, son zamanlarda kullanılan alüminyum alaşımların hem hafif hem de dayanımının yeterli olması neden ile deneyisel çalışmada zırhın bir parçası olarak AA-6082 T6 kullanılmıştır. Alaşımın kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de verilmiştir [26].

Çizelge 3.1 AA-6082 T6 malzemenin kimyasal kompozisyonu(% Ağ.) [26]

Al	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Cu
Kalan	0,5	0,7-1,3	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,15	0,1

AA-6082 T6 malzemenin kimyasal kompozisyonu, direk olarak o malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir.

AA-6082 T6 kalite alaşımın mekanik özellikleri direk olarak balistik performansını etkilemektedir. AA-6082 T6 kalite alaşımın fiziksel özellikleri izelge 3.2’de, mekanik özellikleri ise izelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 AA-6082 T6 malzemenin fiziksel zellikleri

Yoğunluk	Ergime noktası
2.70 g/cm ³	555 C

Çizelge 3.3 AA-6082 T6 malzemenin mekanik zellikleri [26]

Akma Dayanımı (MPa)	ekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (MPa)	Uzama (%50)	Sertlik (Brinel-HB)
260-310	310-340	70000	19	91

Karakteristik zellikleri: Korozyon dayanımı yüksek, çok iyi kaynak yapılabilir, makine yapımı için uygundur, yorulma dayanımı orta seviyededir [26].

3.1.2 G10 FR4 Kompozit (cam-epoksi) Malzemenin zellikleri

Deneyde kullanılan zırh malzemesinin bir diğer yesi ise G10 FR4 polimer matrisli kompozit malzemesidir. Bu malzemenin seçimindeki en büyük etken; kolay retilbilirliği, yüksek nem direnci, dayanımının yüksek olması ve alevlenebilirliğinin çok düşük olmasıdır. Çizelge 3.4’de bu malzemenin fiziksel özellikleri verilmiştir. Bunun yanında zırh teknolojisinde önemli bir yere sahip olan mekanik özellikler de izelge 3.5’de gösterilmiştir [27].

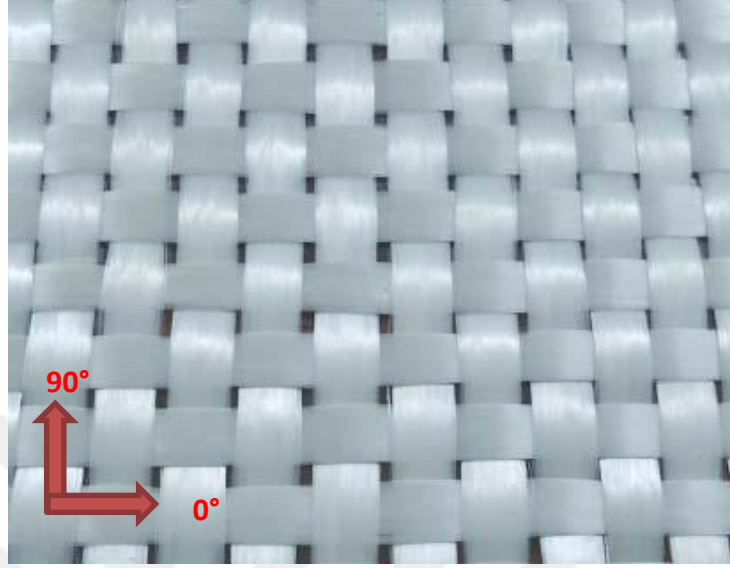
Çizelge 3.4 G10 FR4 kompozit malzemenin fiziksel zellikleri [27]

Yoğunluk	Ergime noktası	Alevlenebilirlik	Su absorpsiyonu
1.90 g/cm ³	140C	UL94V-0	<% 0.10

Çizelge 3.5 G10 FR4 kompozit malzemenin mekanik özellikleri [27]

Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (MPa)	Sertlik (Rockwell-M)
262-320	24000	110

G10 FR4 kompozit malzemenin fiber ve matris oranı, sırasıyla %55 E-camı ve %45 epoksidir. Fiberler birbirlerine 0°/90° dokuma şeklinde dizilmişlerdir. Bu dizime ait resim Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 0°/90° yönlü-iki eksenli-cam elyaf dokuma kumaş [27]

Karakteristik özellikleri: Yüksek alevlenme direnci, yüksek mekanik ve fiziksel özellikler, düşük yoğunluk ve yüksek darbe absorpsiyonudur [27].

3.1.3 Epoksi Yapıştırıcı Özellikleri

Zırh malzemelerin üretiminde kullanılan yapıştırıcı malzemesi olarak ARALDITE®AW 106 ve Hardener HV 953U kullanılmıştır. Çizelge 3.6’da ağırlıkça (1/0,8) ve hacimce (1/1) karışım oranları verilmiştir. Bu oranlarda yapılacak karışımın mekanik ve fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.7’de gösterilmiştir [28].

Çizelge 3.6 Reçine ve sertleştirici karışım oranı [28]

Malzeme	Ağırlıkça karışım oranı	Hacimce karışım oranı
ARALDITE® AW 106	100	100
Hardener HV 953U	80	100

Çizelge 3.7 Araldite®AW106/Hardener HV953U malzemenin özellikleri [28]

Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%50)	Sertlik (Shore D)	Basma dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
22-33	9	80	45,3-50	1,8

Karakteristik özellikleri: Düşük yoğunluk, çok iyi yapışabilme, yüksek dayanım, yüksek kimyasal özelliklerdir [28].

3.2 Zırh Malzemesinin Hazırlanışı

Bu çalışmada iki farklı zırh malzemesi oluşturulmuştur. Bu iki malzemede de alansal yoğunluğun aynı olmasına özen gösterilmiştir.

Hazırlanma aşamasında düzgün bir yapılaşma olabilmesi için, öncelikle malzemelerden yağ alma işlemi yapılmıştır. Akabinde yüzey pürüzlülüğü oluşturmak için malzeme yüzeyi 180 mesh SiC numara zımpara kâğıdı ile yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. Zımpara işlemi sonrası parçalar tekrar yıkanmıştır ve kurumaları için oda şartlarında yaklaşık beş saat bekletilmiştir. Ardından hassas terazi ile (+/-0,01 kg) ağırlıkları ölçülmüştür.

Kompozit malzemelerin üretilmesinde en önemli ekipmanlardan birisi de kalıptır. Çünkü kalıp olmadan istenilen ölçüde, düzgünlükte ve istenilen doğrulukta malzeme oluşturulamaz. Kalıbın buradaki görevi yapışmış olan plakaları aynı bir havuzda tutarak reçinenin kaymasını engellemektir. Bu deneyde kullanılan kalıp, punch makinasında 2mm x 302mm x 302mm olacak şekilde kesildikten sonra abkant presde bükme operasyonlarında üretilmiştir.

Bir kaba 1/0,8 (ağırlık olarak) oranında epoksi reçine ve sertleştirici döküldükten sonra temiz bir paslanmaz çelik aracılığı ile karışım yapılmıştır. Elde edilen karışım yaklaşık on dakika karıştırılmıştır. Bir rulo yardımı ile oluşturulan bu yapıştırıcı epoksi, sırası ile AA-6082 T6 ve G10 FR4 polimer kompozit malzemeye sürülmüştür. Bu sürülme yapılırken homojen olması için tüm yüzey alanına olabildiğince temas edilmiştir. Rulo ile yapılan çalışmanın resmi Şekil 3.2’de ve Şekil 3.3’de verilmiştir.

Zırhların yapıştırılması sonucu on iki saat boyunca oda sıcaklığında homojen olarak yüz (100) kg'lık bir yük ile baskı yapılarak kürlenmeye bırakılmıştır. On iki saat sonra zırh malzemeleri kalıplarından çıkarılmıştır.



Şekil 3.2 Zırh yapıştırmasının bir görünümü



Şekil 3.3 Zırh yapıştırmasının bir görünümü

3.2.1 A Zırh Malzemesi

ARALDITE®AW 106 / Hardener ağırlıkça 1/0,8 oranında hazırlanan epoksi yapıştırıcı, rulo yardımı ile AA-6082 T6 ve Epoxyglas G10/ FR4 yüzeylerine sürülmüştür.

Aşağıda A zırh malzemesi hazırlarken kullanılan miktar, ölçüm, hacim vs. gibi sayısal değerler birimleri ile beraber ürünün isminin karşısına yazılmıştır.

- 1 adet 10x300x300mm AA-6082 T6 = 2,411 kg
- 1 adet 10x300x300mm Epoxyglas G10/ FR4 = 1,710 kg
- ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U yapıştırıcı = 0,290 kg
- Toplam ağırlık = 4,400 kg
- ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U yapıştırıcı kalınlığı = 1,50mm
- Toplam kalınlık = 21,50 mm

Bir adet 10x300x300mm AA-6082 T6 ve bir adet 10x300x300mm Epoxyglas G10/ FR4 malzemelerinin, ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U ile yapıştırma sonucu; A zırh malzemesi oluşturulmuştur. Bu malzemenin fiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda (Çizelge 3.8) verilmiştir.

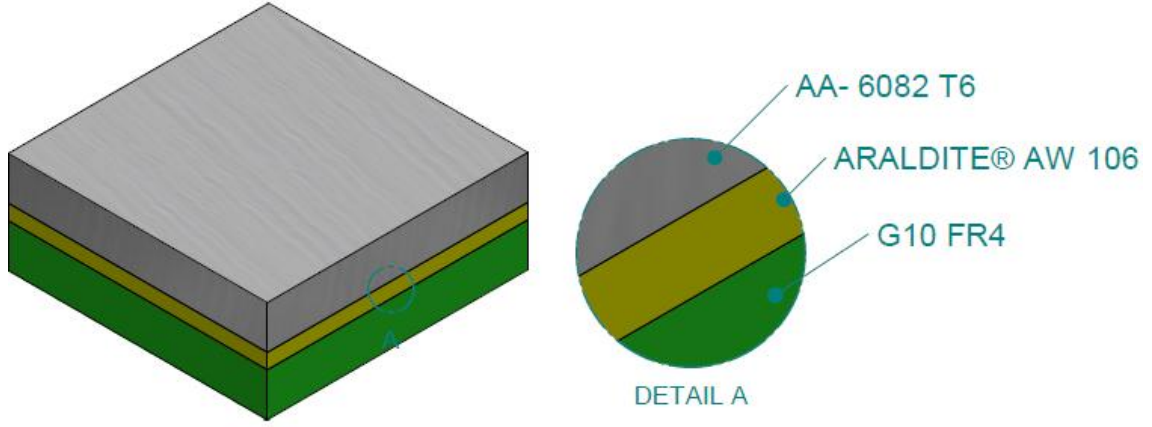
Çizelge 3.8 A zırh malzemenin fiziksel özellikleri

Malzeme	Birim oran ve/veya (adet)	Boyut ölçüleri (mm)	Ağırlık (kg)	Alansal yoğunluk (kg/m ²)
AA-6082 T6	1 adet	10x300x300	2,411	26,78
Epoxyglas G10/ FR4	1 adet	10x300x300	1,710	19
ARALDITE®AW 106 /Hardener HV 953U	1/0,8	1,5x300x300	0,290	3,22
A zırh malzemesi	1 adet	21,5x300x300	4,400	48,88

$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = \text{zırlı sistemin ağırlığı} / \text{koruma yüzey alanı} \quad (3.1)$$

$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = 4,400 / 0,3*0,3 = 48,88 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Yapılmış A zırh malzemesinin kesit görünümü Solidedge St 7 programında çizilmiştir (Şekil 3.4). Yapıştırma ve kürlenme sonrası çıkarılan A zırh malzemesinin bir kesit görünümü Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 A zırh malzemesinin kesit görünümü çizimi



Şekil 3.5 A zırh malzemesi

3.2.2 B Zırh Malzemesi

B zırh malzemesinin oluşumunda da, ARALDITE®AW 106 / Hardener ağırlıkça 1/0,8 oranında hazırlanan epoksi yapıştırıcı, rulo yardımı ile AA-6082 T6 ve Epoxyglas G10/FR4 yüzeylerine sürülmüştür.

Aşağıda B zırh malzemesini hazırlarken kullanılan miktar, ölçüm, hacim vs. gibi sayısal değerler ve birimleri ürünün isminin karşısına yazılmıştır.

- 8 adet 1x300x300mm AA-6082 T6 = 1,952 kg
- 8 adet 1x300x300mm Epoxyglas G10/ FR4 = 1,360 kg
- ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U yapıştırıcı = 1,038 kg
- Toplam ağırlık = 4,380 kg
- ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U yapıştırıcı kalınlığı = 10,50 mm
- Toplam kalınlık = 26,50 mm

Sekiz adet 1x300x300mm AA-6082 T6 ve sekiz adet 1x300x300mm Epoxyglas G10/ FR4 malzemelerinin, ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U ile yapıştırma sonucu; B zırh malzemesi oluşturulmuştur. Bu malzemenin fiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda (Çizelge 3.9) verilmiştir.

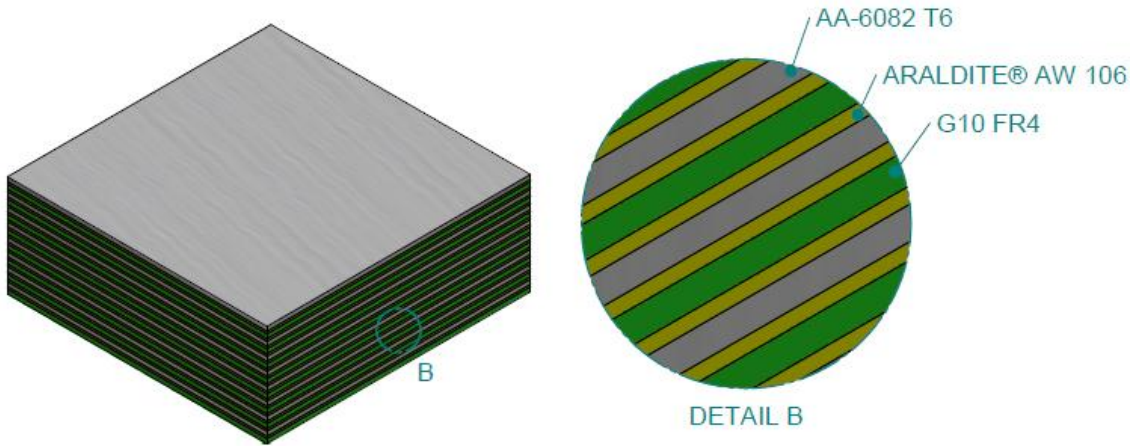
Çizelge 3.9 B zırh malzemenin fiziksel özellikleri

Malzeme	Birim oran ve/veya (adet)	Boyut ölçüleri (mm)	Ağırlık (kg)	Alansal yoğunluk (kg/m ²)
AA-6082 T6	8 adet	1x300x300	1,952	21,68
Epoxyglas G10/ FR4	8 adet	1x300x300	1,360	15,11
ARALDITE®AW 106 / Hardener HV 953U	1/0,8	10,5 x300x300	1,038	11,53
B zırh malzemesi	1 adet	26,5 x300x300	4,380	48,66

$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = \text{zırlı sistemin ağırlığı} / \text{koruma yüzey alanı} \quad (3.2)$$

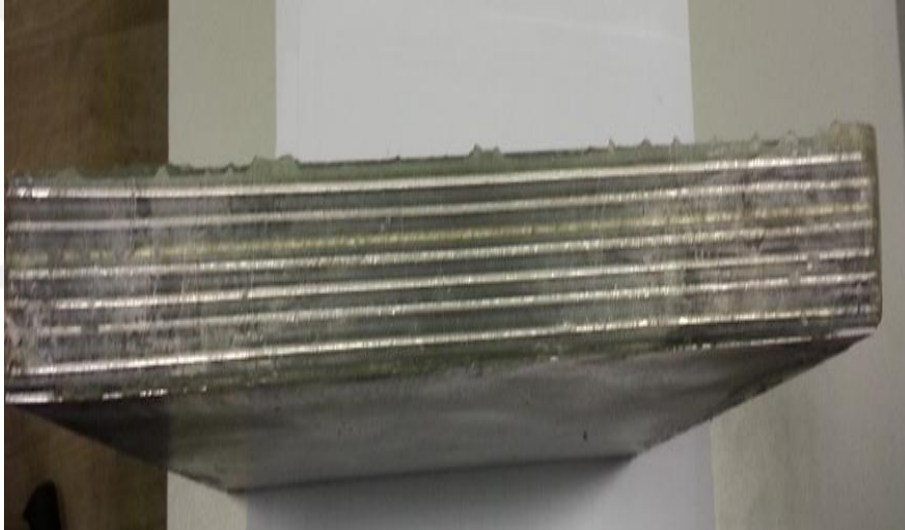
$$\text{Alansal yoğunluk (kg/m}^2\text{)} = 4,380 / 0,3 * 0,3 = 48,66 \text{ (kg/m}^2\text{)};$$

Yapılmış B zırh malzemesinin kesit görünümü Solidedge St7 programında çizilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 B zırh malzemesinin kesit görünümü çizimi

Yapıştırma ve kürlenme sonrası çıkarılan B zırh malzemesinin bir kesit görünümü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 B zırh malzemesi

3.3 Terminal Balistik Deney Düzeneği

Bu deneyde G-3 7,62x51 AP MKE tam metal kaplama (FMJ) veya bir diğer adı ile 7,62mmx51 (M61) zırh delici mermi kullanılmıştır. Merminin şekli (Şekil 3.8) ve teknik özellikleri (Çizelge 3.10) verilmiştir.



Şekil 3.8 AP 7,62x51 MKE veya 7,62mmx51 (M61) zırh delici fişek mermisi [29]

Çizelge 3.10 7,62mmx51 (M61) zırh delici fişek merminin özellikleri [29]

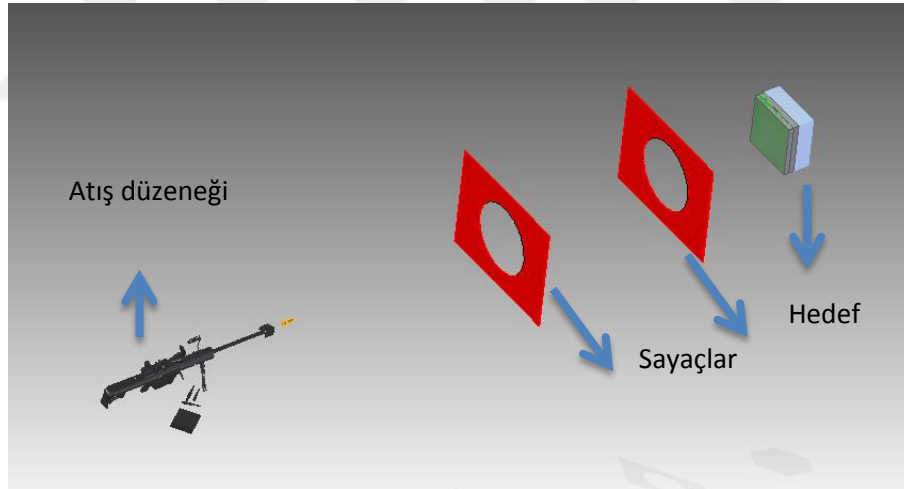
Tür	Özellikleri
Fişek uzunluğu	71,12 mm
Fişegin ağırlığı	24,50 gr
Çarpma hızı(23,7m)	838 ± 9,1 m/s
Mermi malzemesi	Bakır kaplanmış çelik gömlek, çelik çekirdek
Kullanıldığı Silahlar	G3, FAL, MG3, L7A2, M60
Kovan malzemesi	Pirinç (CuZn30)
Çekirdeğin malzemesi	DIN 100Cr6 (HRC 61–62)
Merminin toplam ağırlığı (ceketli)	9,45 ± 0,15 gr
Merminin uzunluğu (ceketli)	32.95 mm
Burun tipi	Küresel
Zırh Delme	Mermilerin en az %80'i 91 metre mesafede 10 mm kalınlığındaki çelik levhayı (SAE 1010 veya 1020) tamamen delmektedir. 100 m'de RHA 300 HB zırhta 18 mm delinme oluşmaktadır.

Mermi sert bir hedefe çarptığı anda bakır ile kaplı olan gömlek yok olurken; çekirdek ilerlemeye devam eder. Bu şekilde merminin nüfuziyet kabiliyeti daha fazla arttırılır. Bu nedenle deneyde kullanılan mermilerde bakır kaplı gömlek kullanılmıştır. Ayrıca merminin zırh çarpması ile oluşan şok dalgaları bakır kaplı gömlek tarafından sönümlenir.

Kullanılan bu mermilerin en önemli özellikleri zırh delici olmalarıdır. Barut miktarına göre çekirdeğin hızı değişmektedir.

Deney öncesi;

Deney düzeneği atış haline getirmek için yaklaşık olarak üç saat zaman harcanmıştır. İş güvenliği çok önemli olduğu için her şey teknik ekip tarafından titizlikle ve özenle takip edilmiştir. Ayrıca deney düzeneğindeki tüm parametreler doğrudan deney sonucunu etkileyeceğinden tüm bu parametreleri korumak için özel tasarlanmış deney düzeneğine ihtiyaç duyulmuştur. Oluşturulan deney düzeneğinin yerleşimi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Deney düzeneğinin izometrik görünümü

Deney düzeneğinin Solidedge St7 ile yandan çizilmiş görünüm Şekil 3.10'de gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmaların tümünde atış düzeneği ile hedef arasındaki mesafe 18,2 m olarak alınmıştır.

hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu deneyde kullanılan sayaçların resmi Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 Deneyde kullanılan sayaçlar

Son olarak da deney düzeneğinin hedef kısmı Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Deneyde kullanılan hedef

Deneylerin yapılışı sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- Yarı sonsuz RHA referans malzemesi üzerine yapılan atış,
- A zırh malzemesi üzerine yapılan atış,
- B zırh malzemesi üzerine yapılan atış.

3.3.1 Yarı Sonsuz Referans RHA Malzemesi Üzerine Yapılan Atışlar

Deney çalışmasında; zırh üzerine atış yapılmadan önce; doğru hedef ayarı, referans değerleri, ölçümleri, derinlikleri belirlerken sağlıklı bir sonuç alabilmek için referans malzemesi üzerine üç atış yapılmıştır. Bu şekilde referans zırh malzemesinin balistik özellikleri hakkında bilgi alınması planlanmıştır.

Bu deneyde; 31,75mmx250mmx250mm ölçülerinde (Rolled Homogenous Armor – RHA) çeliği backup (referans) malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu referans çeliğin ortalama mekanik özellikleri Çizelge 3.11'deki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.11 Referans RHA malzemenin mekanik özellikleri

Sertlik (BHN)	Sertlik (HRC)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)
235	22	790	693

Atış yapılmadan önce tüm güvenlik önlemleri alınmıştır. RHA malzemesi hedef aparatına yerleştirilmiş ve hedef noktası artı işareti ile belirlenmiştir. Bu düzeneğin resmi Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

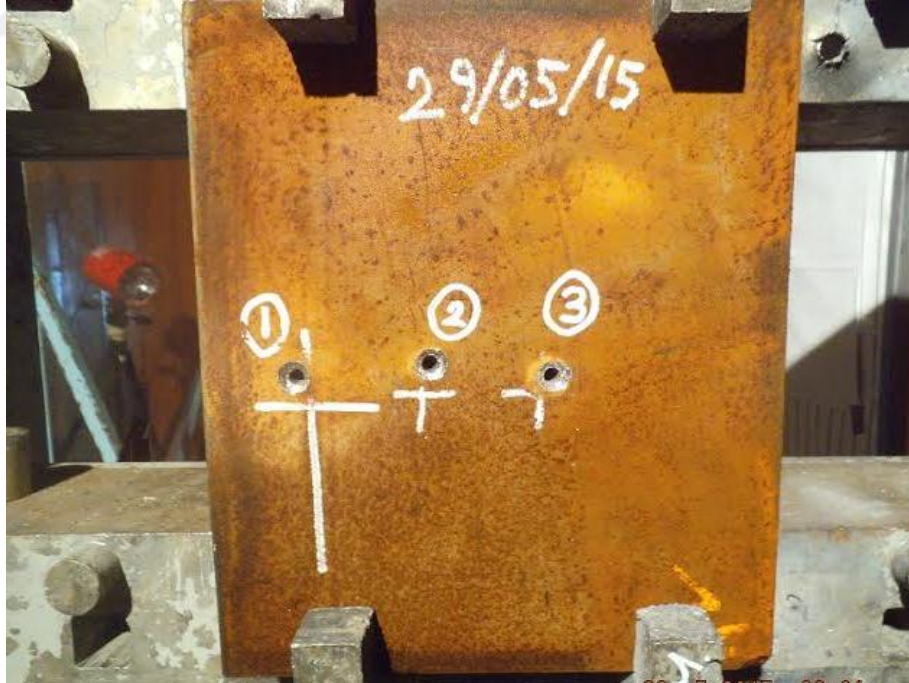


Şekil 3.14 RHA şahit numune çeliğin atış öncesi görünümü

Sırası ile RHA malzeme üzerine yapılan atışlar öncesi ve sonrası bulunan değerler Çizelge 3.12’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hiçbir merminin zırhı delmediği görülmüştür. Çünkü deney öncesi referans malzeme yarı sonsuz kalınlık olarak belirtilmişti. Zaten bu çalışmalar standartlara göre yapıldığı için deneyin güvenilirliği üst düzeyde gerçekleşmiştir. Bu üç atışın yapılmasından sonra ortalama değerler hesaplanmıştır. Yapılan atışların önden görünümü Şekil 3.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.12 RHA çeliği üzerine yapılan atış değerleri ve sonuçları

Kod	Mermi ağırlığı (gr)	Barut ağırlığı (gr)	Mermi çıkış hızı (m/s)	Mermi çarpma hızı (m/s)	Nüfuziyet derinliği (mm)	Sonuç
AP 7,62x51	9,55	2,80	862,3	846,3	16,05	Delinmedi
AP 7,62x51	9,46	2,85	869,8	854,2	17,84	Delinmedi
AP 7,62x51	9,46	2,85	876	859,8	17,17	Delinmedi
Ortalama	9,49	2,83	869,36	853,43	17,02	Delinmedi

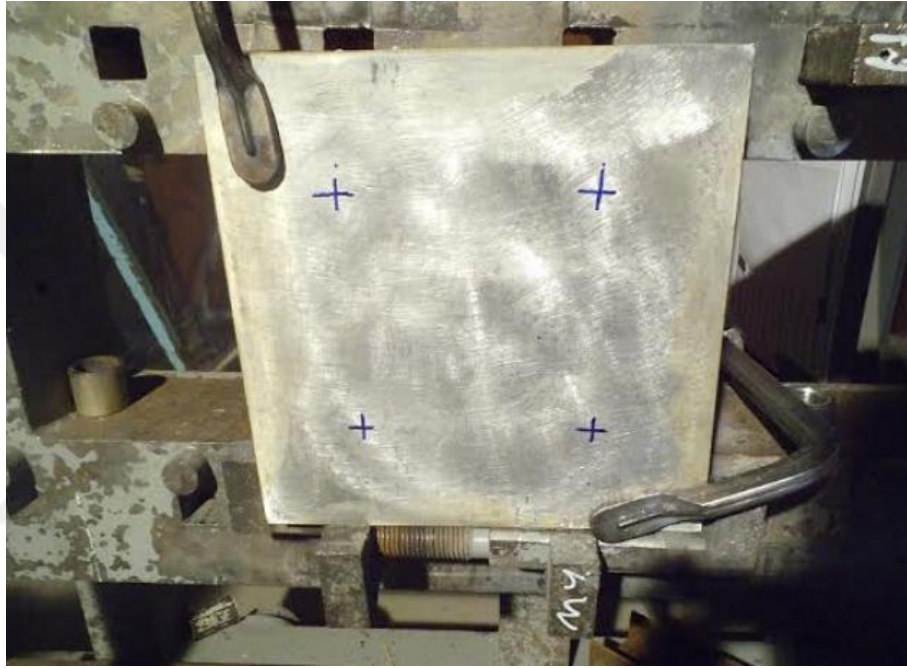


Şekil 3.15 RHA çeliğin atış sonrası önden görünümü

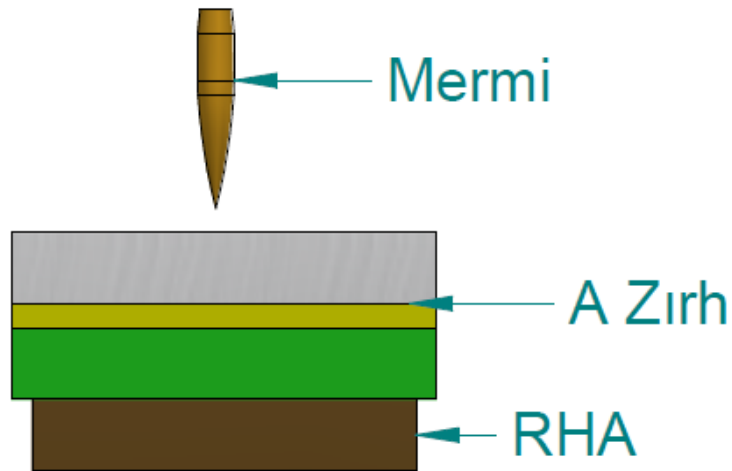
3.3.2 A Zırh Malzemesinin Üzerine Yapılan Atışlar

RHA malzemesi üzerine yapılan atışlardan sonra, atış aparatının ön kısmına A zırh malzemesi ve arka kısmına RHA referans malzemesi yerleştirilmiştir. Daha sonra atış yapılacak yerler, A zırh malzemesinin üzerinde işaretlenmiştir. Bu durumun görünümü Şekil 3.16'da, hedefin yandan görünümü ise Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Sırası ile zırhın üzerine numara verilerek atışlar yapılmıştır ve yapılan atışların durumu incelenmiştir.



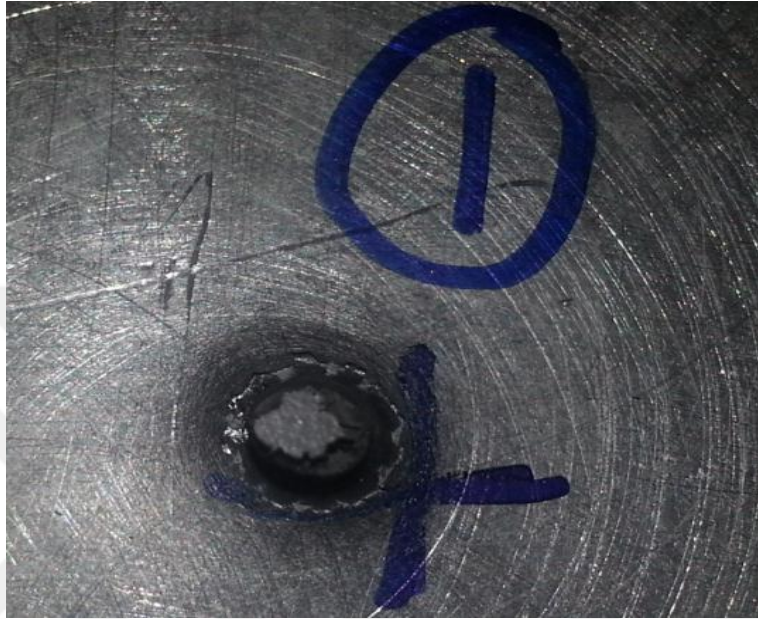
Şekil 3.16 A zırh malzemesi önden görünümü



Şekil 3.17 A zırh malzemesi yandan görünümü

3.3.2.1 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 1. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi, 855,9 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiş ve arkadaki referans RHA çeliğinde 13,2 mm boyunda bir nüfuziyet meydana getirmiştir. 1. atış sonrası önden görünüm Şekil 3.18'de, zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.18 A zırh malzemesi 1. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.19 A zırh malzemesi 1. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası alüminyum ve epoksi kompozit tabakalar bir birlerinden ayrıştırılarak inceleme yapılmıştır. Bu inceleme sonrası AA-6082 T6 arka görünümü Şekil 3.20’de, Epoxyglas G10/ FR4 malzemenin önden görünümü ise Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20 Al6082 T6 levhanın 1. atış sonrası arkadan görünümü



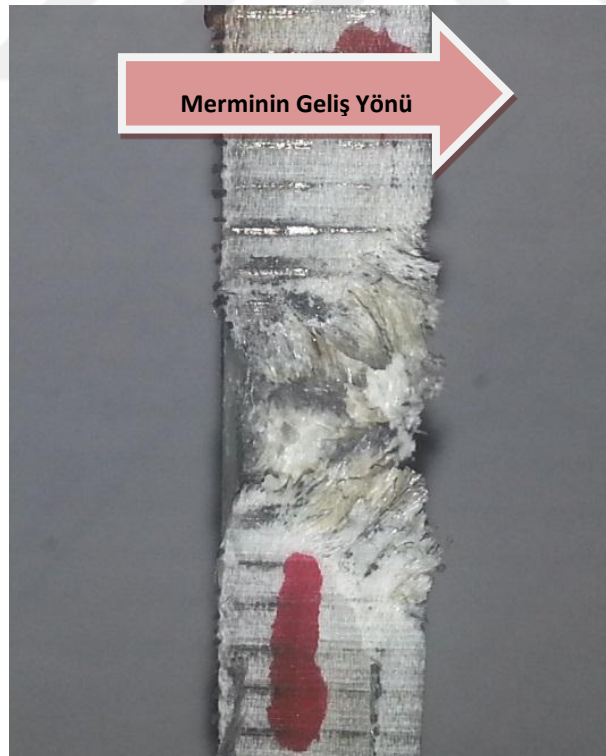
Şekil 3.21 Epoxyglas G10/ FR4 1. atış sonrası önden görünümü

Deney sonrası zırhta delaminasyon görüldüğü için AA-6082 T6 ve Epoxyglas G10/ FR4 malzemeleri birbirlerinden tamamen ayrılmıştır. Ayrılan bu malzemeler şerit testerede

kesit görünümü için düzgün bir şekilde kesilerek incelenmiştir. Bu incelemelere ait görüntüler Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'de gösterilmiştir.

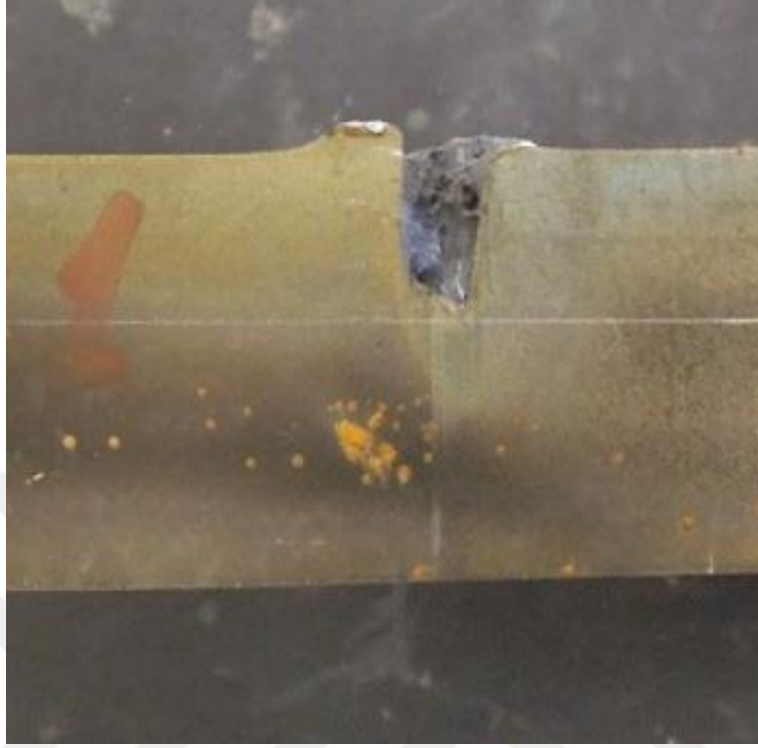


Şekil 3.22 1. atış sonrası AA-6082 T6 kesit görünümü



Şekil 3.23 1. atış sonrası EpoxyglasG10/FR4 kesit görünüm

1. atış sonrası RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği Şekil 3.24'de verilmiştir.



Şekil 3.24 1. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü.

A zırh malzemesi üzerine yapılan 1. atış sonucunda;

- Zırhta delaminasyon görülmemiştir.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şekilde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 15,50 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 34,60 mm'dir.

3.3.2.2 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 2. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi 844,1 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiştir ve arkadaki referans RHA çeliğinde 13,69 mm boyunda bir nüfuziyet meydana getirmiştir. Bu atış sonrası önden görünüm Şekil 3.25’de, zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.26’da gösterilmiştir.



Şekil 3.25 A zırh malzemesi 2. atış sonrası ön görünümü

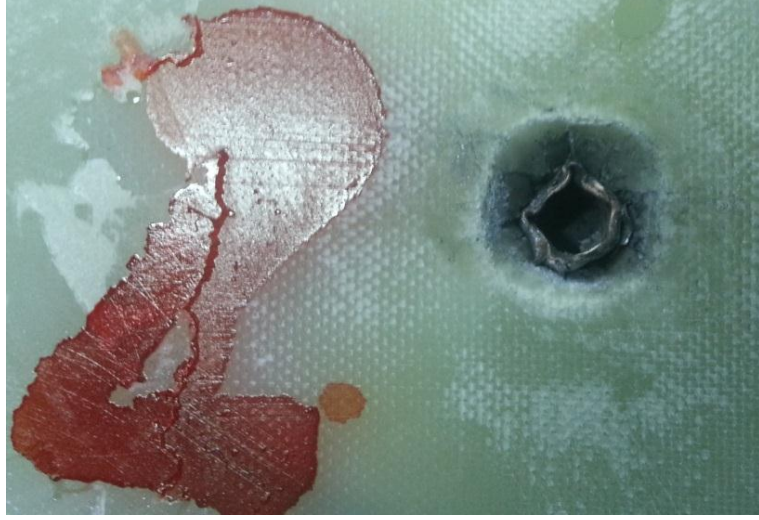


Şekil 3.26 A zırh malzemesi 2. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası alüminyum ve epoksi kompozit tabakalar birbirlerinden ayrıştırılarak inceleme yapılmıştır. AA-6082 T6 arka görünümü Şekil 3.27’de ve Epoxyglas G10/ FR4 malzemenin önden görünümü ise Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.27 Al6082 T6 levhanın 2. atış sonrası arkadan görünümü



Şekil 3.28 Epoxyglas G10/ FR4 2. atış sonrası önden görünümü

Daha öncede bahsedildiği gibi; Deney sonrası zırhta delaminasyon görüldüğü için AA-6082 T6 ve Epoxyglas G10/FR4 malzemeler birbirlerinden tamamen ayrılmıştır. Ayrılan bu malzemeler şerit testerede kesit görünümü için düzgün bir şekilde kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme sırası ile Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

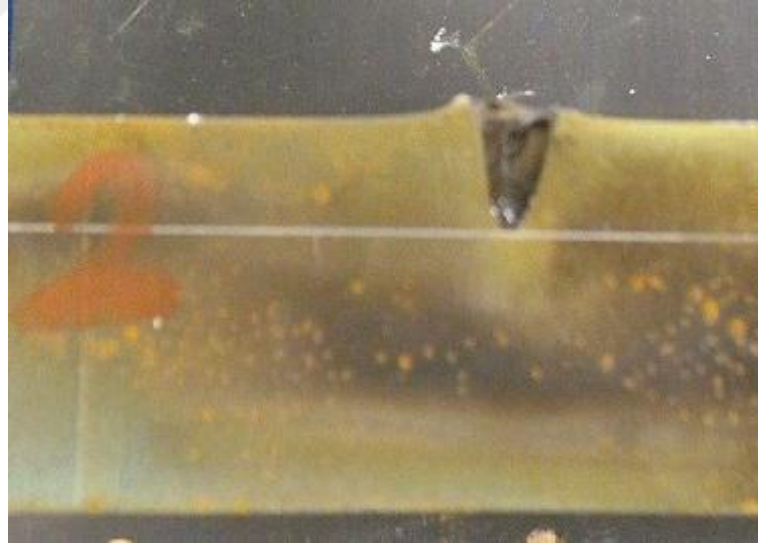


Şekil 3.29 2. atış sonrası Al6082 T6 kesit görünümü



Şekil 3.30 2. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü

2. atış sonrası RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği deneyimizin önemli bir parçası olduğu için Şekil 3.31’de resmi verilmiştir.



Şekil 3.31 2. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü

A zırh malzemesi üzerine yapılan 2. atış sonucunda;

- Zırhta delaminasyon görülmemiştir.
- Merminin ceket kısmı G10/ FR4 malzemesinin içinde kalmıştır.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.

- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şeklinde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 15,25 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 36,20 mm'dir.

3.3.2.3 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 3. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi ile 838,8 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiş ve arkadaki referans RHA çeliğinde 14,28 mm'lik bir nüfuziyet meydana getirmiştir.

3. atış sonrası zırhın önden görünümü Şekil 3.32'de, zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 3.32 A zırh malzemesi 3. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.33 A zırh malzemesi 3. atış sonrası arkadan görünümü
Deney sonrası zırh malzemesi üzerine yapılan inceleme sonrası AA-6082 T6 arka görünümü Şekil 3.34'de ve Epoxyglas G10/ FR4 malzemenin önden görünümü ise Şekil 3.35'de verilmiştir.



Şekil 3.34 Al6082 T6 levhanın 3. atış sonrası arkadan görünümü



Şekil 3.35 Epoxyglas G10/ FR4 3. atış sonrası önden görünümü

3. atıştaki kesit görünüm için zırh şerit testerede kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme sırası ile Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



Şekil 3.36 3. atış sonrası AA-6082 T6 kesit görünümü



Şekil 3.37 3. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü
RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliğinin resmi Şekil 3.38'de verilmiştir.



Şekil 3.38 3. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü

A zırh malzemesi üzerine yapılan 3. atış sonucunda;

- Zırhta kısmi delaminasyon görülmüştür.

- Merminin ceket kısmı G10/ FR4 malzemesinin içinde kalmıştır.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şeklinde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 15,60 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 30,55 mm'dir.

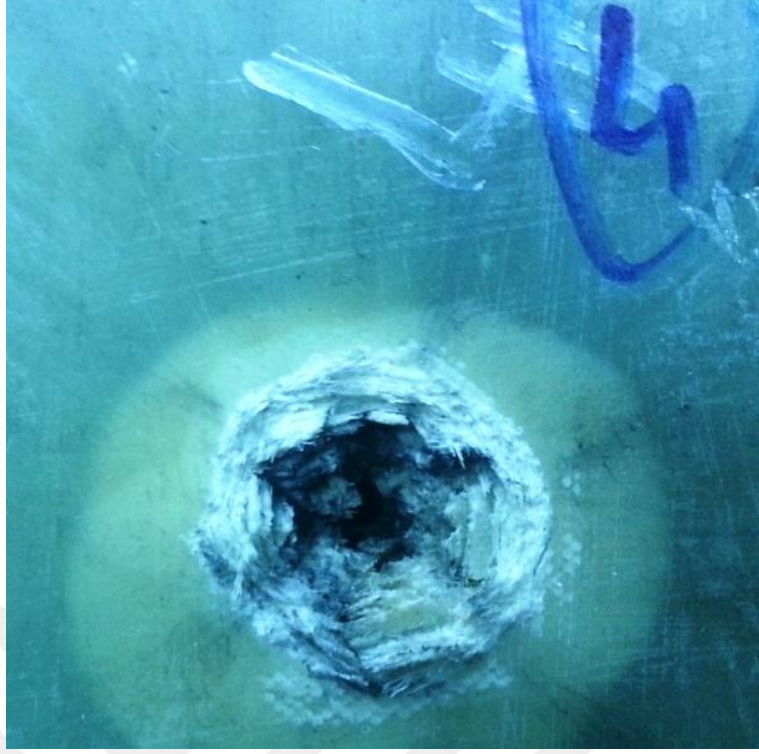
3.3.2.4 A Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 4. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi, 864,3m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiştir. Arkadaki referans RHA malzemesinde de 15,00 mm'lik bir nüfuziyet meydana getirmiştir.

4. atış sonrası zırhın önden görünüm Şekil 3.39'da verilmiştir. Zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



Şekil 3.39 A zırh malzemesi 4. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.40 A zırh malzemesi 4. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası zırh malzemesi üzerinde yapılan inceleme sonrası AA-6082 T6 arka görünümü Şekil 3.41’de ve Epoxyglas G10/FR4 malzemenin önden görünümü ise Şekil 3.42’de verilmiştir.



Şekil 3.41 Al6082 T6 levhanın 4. atış sonrası arkadan görünümü



Şekil 3.42 Epoxyglas G10/ FR4 4. atış sonrası önden görünümü
Deney sonrası alüminyum ve epoksi kompozit tabakalar birbirlerinden ayrıştırılarak inceleme yapılmıştır. Bu incelemeler sırası ile Şekil 3.43 ve Şekil 3.44’de gösterilmiştir.



Şekil 3.43 4. atış sonrası Al6082 T6 kesit görünümü

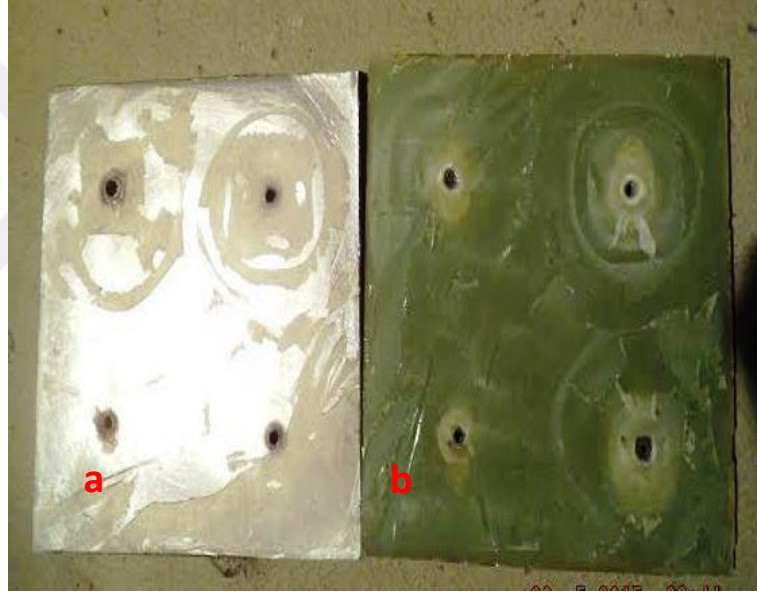


Şekil 3.44 4. atış sonrası Epoxyglas G10/ FR4 kesit görünümü
RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliğinin kesit görünümü Şekil 3.45'de verilmiştir.



Şekil 3.45 4. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü
A zırh malzemesi üzerine yapılan 4. atış sonucunda;

- Zırhta tam delaminasyon görülmüştür. Şekil 3.46'da bu delaminasyonun bir resmi verilmiştir.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şeklinde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 15,20 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 32,25 mm'dir.



Şekil 3.46 A zırh malzemesi tam delaminasyon a)Al 6082 T6, b)Epoxyglas G10/FR4

3.3.2.5 A Zırh Malzemesi Atış Sonuçları

Elde edilen atış sonuçları / bulguları Çizelge 3.13'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.13 A zırh atış sonuçları

Atış no	Kod	Mermi ağırlığı (g)	Barut ağırlığı (g)	Mermi çıkış hızı (m/s)	Mermi çarpma hızı (m/s)	RHA çeliğinde nüfuziyet derinliği (mm)	Sonuç
1	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,46	2,85	868,4	855,9	13,2	Delindi
2	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,46	2,85	856	844,1	13,69	Delindi
3	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,46	2,85	851	838,8	14,28	Delindi
4	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,50	2,90	879,6	864,3	15,00	Delindi
	Ortalama Değerler	9,47	2,86	863,75	850,77	14,04	Delindi

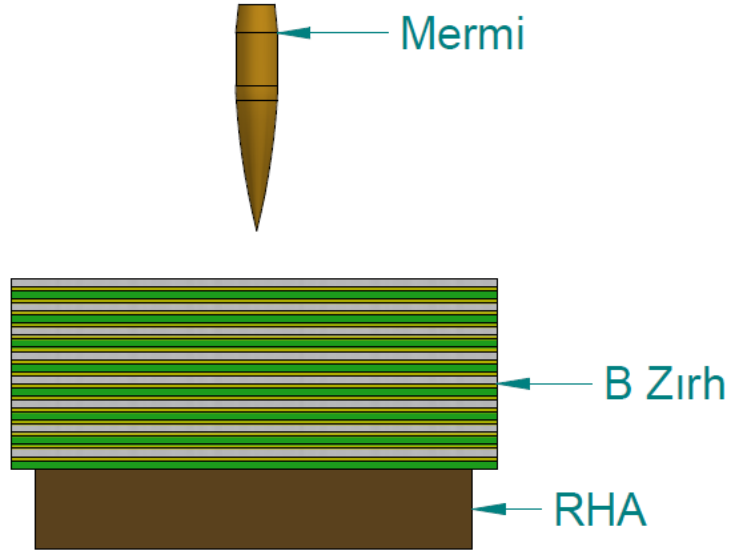
3.3.3 B Zırh Malzemenin Üzerine Yapılan Atışlar

Bir önceki deney çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da aynı süreçler izlenmiştir; RHA referans malzemesi üzerine yapılan atışlardan sonra, atış aparatının ön kısmına asıl zırhlardan olan B zırh malzemesini ve arka kısmına RHA referans malzemesi yerleştirilmiştir. Daha sonra atış yapılacak yerler, B zırh malzemesinde artı işareti ile belirlenmiştir. Bu durum Şekil 3.47’de, hedefin yandan görünümü ise Şekil 3.48’de gösterilmiştir.

Sırası ile zırhın üzerine numara verilerek atışlar yapılmıştır ve yapılan atışlar sırası ile her durumda ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu deney bir önceki atışların devamı olduğu için atış numarası (5 ,6, vs.) kaldığı yerden devam edilmiştir.



Şekil 3.47 B zırh malzemesi önden görünümü



Şekil 3.48 B zırh malzemesi yandan görünümü

3.3.3.1 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 5. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi, 864,3m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiş ve arkadaki referans RHA malzemesinin de 14,69 mm'lik bir nüfuziyet meydana getirmiştir.

5. atış sonrası önden görünüm Şekil 3.49'da gösterilmiştir. Zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.50'de verilmiştir.

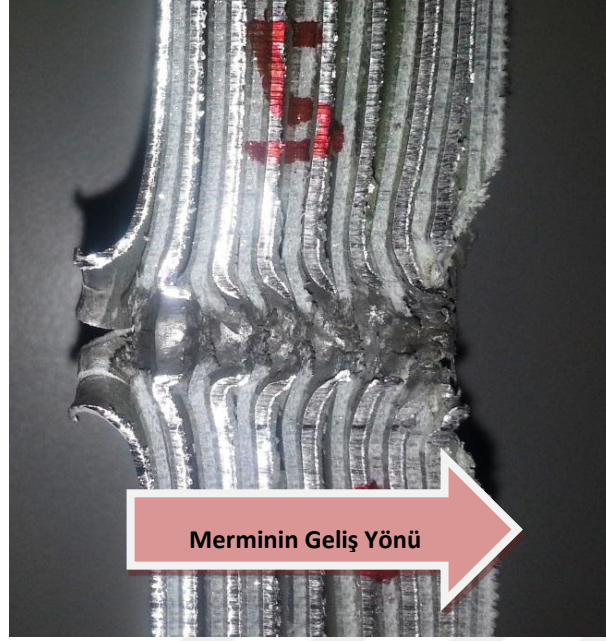


Şekil 3.49 B zırh malzemesi 5. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.50 B zırh malzemesi 5. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası bu atıştaki B zırhın kesit görünümü şerit testerede kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme Şekil 3.51'de gösterilmiştir.



Şekil 3.51 B zırh malzemesi 5. atış sonrası kesit görünümü

RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği Şekil 3.52’de verilmiştir.



Şekil 3.52 5. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü.

B zırh malzemesi üzerine yapılan 5. atış sonucunda;

- Zırhta delaminasyon görülmemiştir.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.

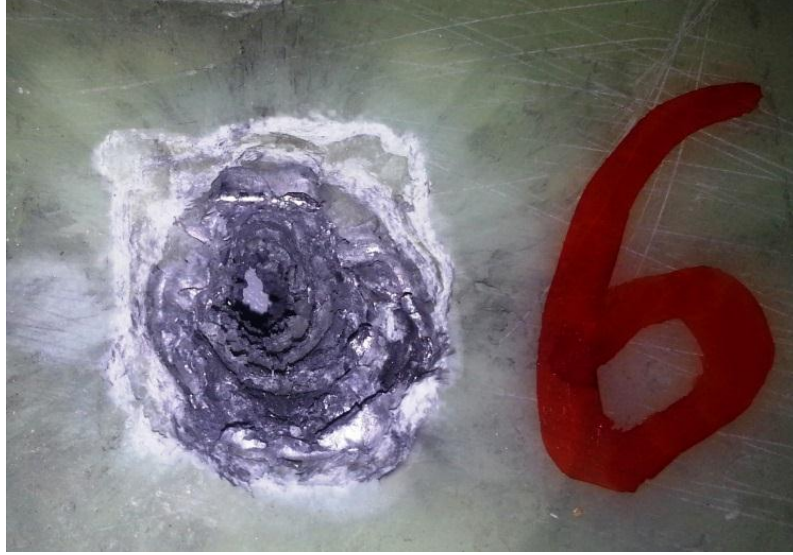
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şeklinde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 20,20 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 31,25 mm'dir.

3.3.3.2 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 6. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi ile 861,6 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiştir. Fakat çok yalpalı bir yol izlediği için, geçersiz sayılmıştır. 6. atış sonrası önden görünüm Şekil 3.53'de, zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.54'de gösterilmiştir.



Şekil 3.53 B zırh malzemesi 6. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.54 B zırh malzemesi 6. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası bu atıştaki B zırhın kesit görünümü şerit testerede kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme Şekil 3.55’de gösterilmiştir.



Şekil 3.55 B zırh malzemesi 6. atış sonrası kesit görünümü

RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği Şekil 3.56’da verilmiştir.



Şekil 3.56 6. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü.

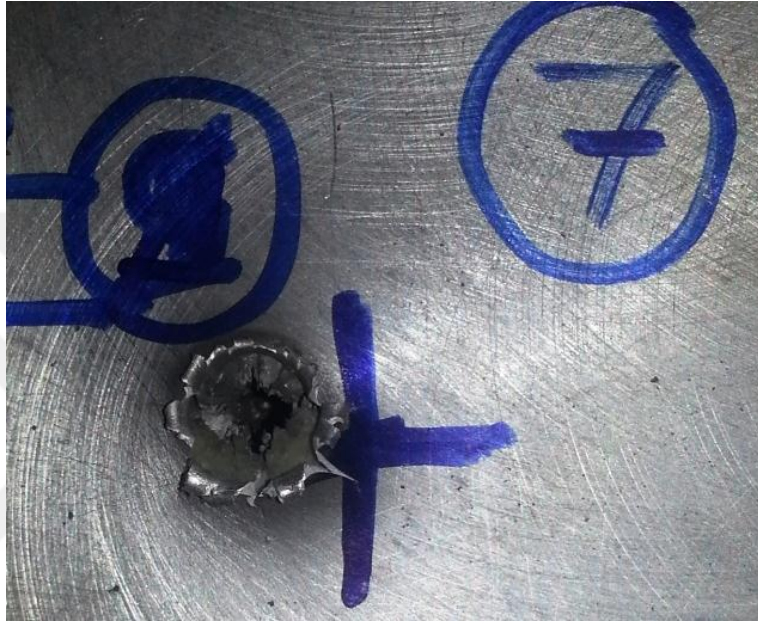
B zırh malzemesi üzerine yapılan 6. atış sonucunda;

- Zırhta delaminasyon görülmemiştir.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şekilde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 21,20 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 32,30 mm'dir.
- Atış geçersiz olarak kabul edilmiştir. Çünkü RHA referans üzerinde çok yalpalı bir yol meydana gelmiştir.

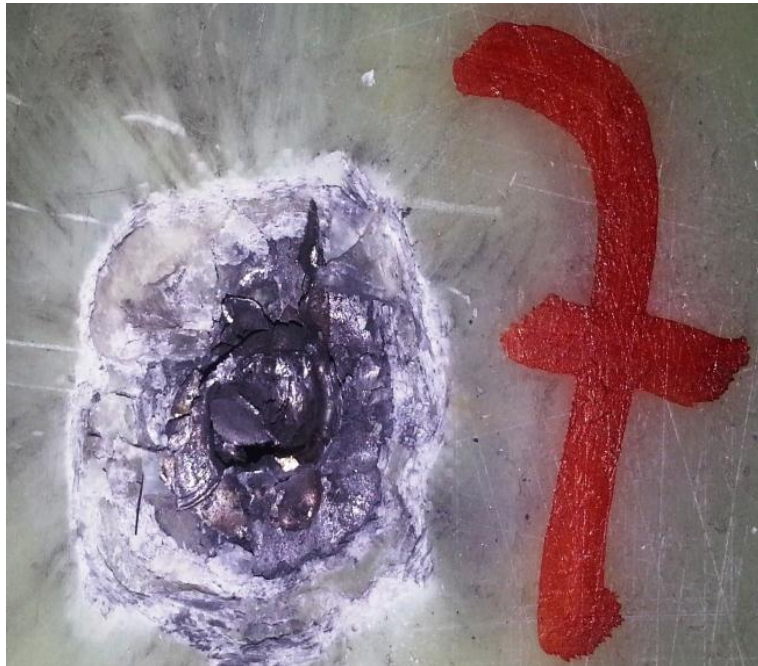
3.3.3.3 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 7. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi, 870 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiş ve arkadaki referans RHA çeliğinde 14,94 mm'lik bir nüfuziyet meydana getirmiştir.

7. atış sonrası önden görünüm Şekil 3.57'de gösterilmiştir. Zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.58'de verilmiştir.

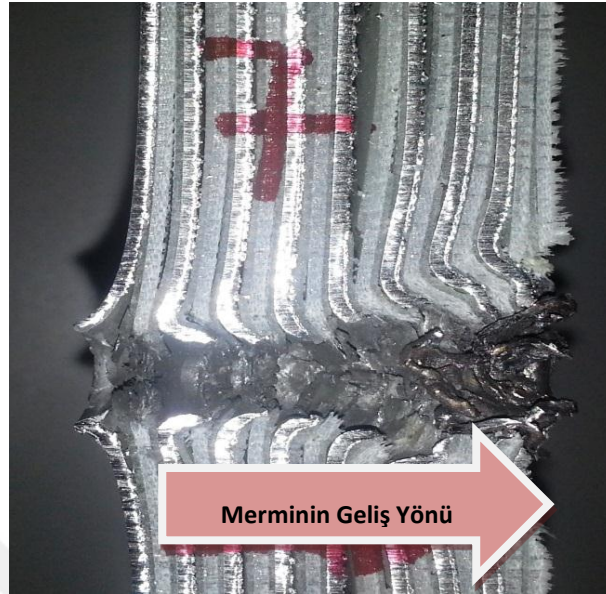


Şekil 3.57 B zırh malzemesi 7. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.58 B zırh malzemesi 7. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası 7. atıştaki B zırhın kesit görünümü şerit testerede kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme şekil 3.59'da gösterilmiştir.



şekil 3.59 B zırh malzemesi 7. atış sonrası kesit görünümü

RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği şekil 3.60'da verilmiştir.



şekil 3.60 7. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü

B zırh malzemesi üzerine yapılan 7. atış sonucunda;

- Zırhta delaminasyon görülmemiştir.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi zırhta ve RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şekilde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 20,40 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 32 mm'dir.

3.3.3.4 B Zırh Malzemesi Üzerine Yapılan 8. Atış

7.62 AP MKE çelik uçlu mermi ile 847,6 m/s hızla zırha çarpması sonucu zırh tamamen delinmiş ve arkadaki referans RHA çeliğinde 11,39 mm'lik bir nüfuziyet meydana getirmiştir.

8. atış sonrası önden görünüm Şekil 3.61'de, zırhın arkadan görünümü ise Şekil 3.62'de gösterilmiştir.

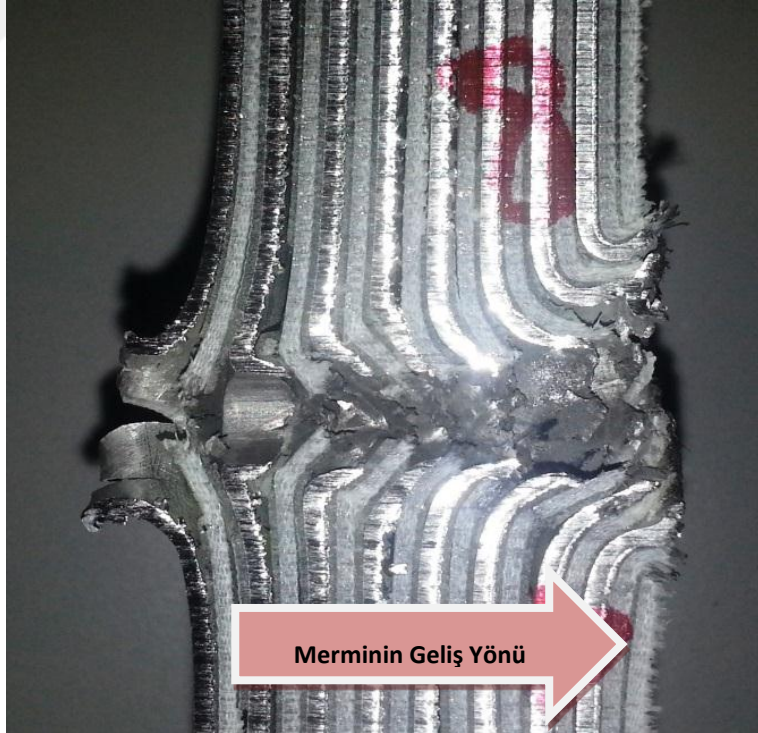


Şekil 3.61 B zırh malzemesi 8. atış sonrası önden görünümü



Şekil 3.62 B zırh malzemesi 8. atış sonrası arkadan görünümü

Deney sonrası 8. atıştaki B zırhın kesit görünümü şerit testerede kesilerek incelenmiştir. Bu inceleme Şekil 3.63'de gösterilmiştir.



Şekil 3.63 B zırh malzemesi 8. atış sonrası kesit görünümü

RHA referans malzemenin delinme şekli ve derinliği Şekil 3.64'de verilmiştir.



Şekil 3.64 8. atış sonrası referans malzemedeki nüfuziyetin kesit görünümü

B zırh malzemesi üzerine yapılan 8. atış sonucunda;

- Zırhta çok küçük ölçekte delaminasyon görülmüştür.
- Merminin herhangi bir kalıntısı gözlenmemiştir.
- Tamamen delinme gerçekleşmiştir.
- Mermi gerek hedeften gerekse arka RHA malzemesinde standartlar içinde yol almıştır.
- Kırılma şekli sünek ve yapraklanma şeklinde gerçekleşmiştir.
- Zırhtaki merminin hareketi giderek büyüyen konik şeklinde gerçekleşmiştir.
- Merminin girişteki deformasyon boyut çapı \varnothing 19 mm'dir.
- Merminin çıkıştaki deformasyon boyut çapı \varnothing 33 mm'dir.

3.3.3.5 B Zırh Malzemesi Atış Sonuçları

Elde edilen atış sonuçları Çizelge 3.14'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.14 B zırh atış sonuçları

Atış no	Kod	Mermi ağırlığı (g)	Barut ağırlığı (g)	Mermi çıkış hızı (m/s)	Mermi çarpma hızı(m/s)	RHA çeliğinde nüfuziyet derinliği (mm)	Sonuç
5	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,50	2,90	870,1	858,9	14,69	Delindi
6	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,50	2,90	875,6	861,6	Geçersiz-atış çok yalpalı	Delindi
7	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,50	2,90	880	870	14,94	Delindi
8	7.62 x51 AP MKE Çelik uçlu	9,50	2,90	870	847,6	11,39	Delindi
	Ortalama Değerler	9,50	2,90	873,92	858,83	13,67	Delindi

3.4 Deney Sonucu

Yapılan çalışmalardaki deneysel sonuçlarda alüminyum esaslı kompozit zırhlı malzemesi hakkında şu çıkarımlar yapılabilir.

- Zırhlara çarpma açısı 90 ± 1 derece ile gerçekleştirilmiştir.
- Zırhlardaki terminal balistik özellikler RHA şahit numune ile ölçülmeye çalışılmıştır.
- Her bir zırh malzemeye toplam dört adet atış yapılmıştır.
- Her iki zırh malzeme de tamamen delinme meydana gelmiştir.
- A zırhında; merminin ortalama çarpma hızı 850,77 (m/s) dir. Bu çarpma hızında; A zırhı tamamen delinmiş ve RHA referans malzemede ortalama 14,04 mm'lik bir delinme meydana getirmiştir.
- B zırhında; merminin ortalama çarpma hızı 858,83 (m/s) dir. Bu çarpma hızında; B zırhı tamamen delinmiş ve RHA referans malzemede ortalama 13,67 mm bir delinme meydana getirmiştir.

- A zırh malzemesinde dört atış sonrasında tam delaminasyon meydana gelirken, B zırh malzemesinde küçük ölçekte kısmi delaminasyon oluşmuştur.
- A zırh malzemesinde, merminin daha doğrusal bir yol izlediği görülmüştür.
- B zırh malzemesinde, merminin hareketi daha açılı bir yol izlemiştir.
- B zırh malzemesinin balistik özellikleri, A zırh malzemesinden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum hipotezin doğruluğunu göstermektedir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

B zırh malzemesi, A zırh malzemesini göre balistik performans artış sağlandığı görülmektedir. Zırhın oluşumunda, malzeme dizayn tabaka sayısının artışı, balistik özelliklerini de artırdığı görülmektedir.

Deney sonrası; alansal yoğunluk sabit iken tabaka sayısı artıkça ve inceldikçe merminin zırhtaki aldığı yol daha çok açılı eğilimindedir. Bu durumda balistik limit hızı artırmakta ve balistik özelliklerini iyileştirmektedir. Bu durum 6'ncı atışta görülmüştür.

Bu deneyde balistik özellikleri artırmak için; tamamen aynı malzemeden oluşan zırhın aynı alansal yoğunlukta, daha çok ve daha ince tabakalar kullanılması önerilmektedir. Kullanılan plakanın kalınlığı azaldıkça ve aynı anda plaka sayısı artıkça, aynı alansal yoğunlukta, V_{50} limit hızın artışı belirlenmiştir.

Malzemenin darbe enerji sönmemesi artıkça, balistik performansın artışı gözlemlenmiştir.

Kompozit malzemelerdeki en büyük problemlerden birtanesi, çoklu atışlarda yapıda meydana gelen delemantasyondur. Bu çalışmada tabaka sayısını artması ile delemantasyon oranı azalmıştır. Bu durumda zırhın mevcut durumunu koruduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Özşahin, E. ve Tolun, S., (2010). "Influence of Surfacecoating on Ballistic Performance of Aluminum Plates Subjected to High Velocity Impact Loads", *Materials & Design*, 31(3):1276-1283.
- [2] National Research Council of The National Academies, (2011). *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*, Washington.
- [3] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S. ve Bhat, T.B., (2010). "An Experimental Study on The Ballistic Impact Behavior of Some Metallic", *Materials & Design*, 31(3):3308-3316.
- [4] Turan, M., (2007). "Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı", *Mühendis ve Makine*, 48(575):3-8.
- [5] Frissen, R.J.T., (1996), *Modelling of the Ballistic Impact Behaviour of Polyethylene - Fibre Reinforced Composites*, <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/1692.pdf>, 20 Mayıs 2016.
- [6] MIL-STD-662F, (1997). *V₅₀ Ballistic Test For Armor*, DODD Service, Washington.
- [7] Grubinskas, R.C., (1993), *A Review of the V₅₀ Ballistic Limit Requirements of MIL-A-46100*, <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a274927.pdf>, 10 Mayıs 2016.
- [8] Craig, B. D., Lane, R. A. ve Babcock, W. G., (2001). *Blast and Penetration Resistant Materials Art Report*, AMPTIAC - Advanced Materials and Processes Technology Information Analysis Center, Final Version, 8-9.
- [9] Carlucci, D. E. ve Jacobson, S. S., (2008). *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*, First Edition, CRC Press, New York.
- [10] Rosenberg, Z. ve Dekel, E., (2012). *Terminal Ballistics*, First Edition, Springer, Heidelberg.

- [11] Zukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B. ve Curran, D.R., (1990). High Velocity Impact Dynamics, First Edition, Wiley-Interscience, Chichester.
- [12] Hazell, P.J., (2015). Armour; Materials, Theory and Design, First Edition, CRC Press, New York.
- [13] Rosenberg, Z., Ashuach, Y., Yeshurun, Y. ve Dekel, E., (2009). "On the Main Mechanisms for Defeating Projectiles, Long Rods and Shaped Charge Jets", International Journal of Impact Engineering, 36(4):588-596.
- [14] Avery, J. G., (1981), Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structure, <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a109290.pdf>, 30 Haziran 2016.
- [15] Pandya, K.S., Kumar, S., Nair, N.S., Patil, P.S. ve Naik, N.K., (2016). "Analytical and Experimental Studies on Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Fabric Composites", International Journal of Damage Mechanics, 25:1235-1254.
- [16] Edwards, M., (2000). "Land-Based Military Applications", Comprehensive Composite Materials, 6(37):681-699.
- [17] Hazell, P.J., (2006). Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms, First Edition, Argos Press, Canberra.
- [18] Wolfe, T.D. ve Gedeon, S.A., (1987), Weldability of 2219-T851 and 2519-T87 Aluminum Armor Alloys for Use In Army Vehicle Systems, <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a184296.pdf>, 20 Haziran 2016.
- [19] Graves, J. H. ve Beatty, J.H., (1994), Ballistic Performance and Adiabatic Shear Behavior of AerMet 100 Steel, <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a283266.pdf>, 15 Mayıs 2016.
- [20] Laible, R. C., (1980). Ballistic Materials and Penetration Mechanics, First Edition, Elsevier Science, Massachusetts.
- [21] DODD 5101.8, (2004). DoD Executive Agent (DoD EA) for Bulk Petroleum, DODD Service, Washington.
- [22] Bhatnagar, A., (2006). Lightweight Ballistic Composites, Military and Law-Enforcement Applications, First Edition, Woodhead Publishing, Chicago.
- [23] Yaghoubi, A.S. ve Liaw, B., (2012). "Ballistic Impact Behaviors of GLARE 5 Fiber-Metal Laminated Plates", International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics 12th, 11-14 June 2012, California.

- [24] Massaro,P.P., (2015). Understanding Ballistics Complete Guide to Bullet Selection, First Edition, Gun Digest Books, USA.
- [25] DODD 2040.3, (1991). End Use Certificates (EUCs), DODD Service, Washington.
- [26] Seykoç Alüminyum, Alüminyum 6082, <http://seykoc.com.tr/aluminyum-alasimlar/6082.aspx>, 10 Mart 2016.
- [27] Material Property Data, G-10 Fiberglass Epoxy Laminate Sheet, <http://www.matweb.com/search/datasheetText.aspx?bassnum=PGLAM04>, 15 Haziran 2016.
- [28] Huntsman, ARALDITE®AW 106 Resin Hardener HV 953U Multi-Purpose Epoxy Adhesive [http://adhesive.leaderseal.com/download/TDS-A106-953\(US\).pdf](http://adhesive.leaderseal.com/download/TDS-A106-953(US).pdf), 5 Mayıs 2016.
- [29] Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu, 7,62mmx51 (M61) Zırh Delici Fişek Teknik Özellikleri,<http://www.mkek.gov.tr/tr/Urunler.aspx?UretimYeriID=0&UrunID=9&AnaKategori=106&AltKategori=119&EnAltKategori=>, 8 Şubat 2016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Halil BİNAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 08.06.1983 / Kemah
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : binayulas@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	-	Kocasinan Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-Halen	Kreon Aydınlatma A.Ş	Tasarım ve Proses Mühendisi
2012-2013	Yıldız Kalıp A.Ş	Üretim Mühendisi
2009-2012	Kartay ve Karmiks Makina Ltd. Şti	Üretim ve Kalite Mühendisi