

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TERMİNAL BALİSTİKTE 7,62mm ÇAPLI MERMİLERE KARŞI
V-ARA GEOMETRİLİ VE TABAKALI YAPILARIN ENERJİ
ABSORPSİYON PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Erdal CAMCI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fehim FINDIK

Temmuz 2023

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TERMİNAL BALİSTİKTE, 7,62mm ÇAPLI MERMİLERE KARŞI
V-ARA GEOMETRİLİ, TABAKALI YAPILARIN ENERJİ
ABSORPSİYON PERFORMANSININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Erdal CAMCI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 11/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: PROF. DR. FEHİM FINDIK	BAŞARILI
Üye: PROF. DR. MEHMET ÇALIŞKAN	BAŞARILI
Üye: PROF. DR. CAN HAŞİMOĞLU	BAŞARILI
Üye: DOÇ. DR. SERDAR ASLAN	BAŞARILI
Üye: DOÇ. DR. SEDAT İRİÇ	BAŞARILI

BEYAN

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

Erdal CAMCI

11/07/2023

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini esirgemeyen, araştırma, planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni teşvik eden, aynı titizlikte yönlendiren değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Fehim FINDIK ve Dr. Özgecan Barlay ERGÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Roketsan A.Ş. kuruluşunun değerli yönetici ve çalışanlarına, gerekli deneylerin yapılması için laboratuvar olanaklarını sunan Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. yetkilileri ve laboratuvar çalışanlarına, mikroyapı deney ve incelemelerin yapılmasına olanak tanıyan ASAŞ Alüminyum Sanayii ve Ticaret A.Ş. yetkili ve çalışanlarına, tasarım ve imalat sürecinde her türlü yardım olanaklarını bizlerden esirgemeyen E.M.S. Endüstri Mamulleri San. Tic. Ltd. Şti. yönetici ve çalışanları adına Serbüent Erdem'e, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım Prof. Dr. Mehmet Çalışkan ve Doç. Dr. Serdar Aslan hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No:035-2021) teşekkür ederim.

Yine çalışmalarım boyunca her türlü sabır ve desteği benden esirgemeyen kıymetli ailemin bireylerine, değerli eşim Sema CAMCI ile gözümün nuru evlatlarım Ali CAMCI ve Mediha CAMCI' ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR	vii
SİMGELER	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Balistik Terimler ve Açıklamaları	3
1.1.1. Balistik	3
1.1.1.1. İç balistik	3
1.1.1.2. Dış balistik	3
1.1.1.3. Terminal balistik	4
1.1.2. Hedef.....	4
1.1.3. Tehdit	5
1.1.4. Penetrasyon	5
1.1.5. Perforasyon	6
1.1.6. V50 performans deneyi.....	6
1.1.7. Balistik performans.....	7
1.1.8. Darbe dayanımı.....	8
1.1.9. Hasar analizi	8

BÖLÜM 2.

YAPILAN ÇALIŞMALAR VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	10
---	----

BÖLÜM 3.

BALİSTİK MALZEMELER	36
3.1. Çelikler	37
3.1.1. St37 çeliği	39
3.1.2. St52 çeliği	40

3.1.3. Zırh çeliği-12560	40
3.1.4. Zırh çeliği-46100	41
3.2. Alüminyum.....	41
3.3. Titanyum	43
3.4. Seramikler	44
3.4.1. Balistik seramikler	46
3.5. Alternatif Zırh Malzemeleri	47
3.5.1. Kevlar.....	47
3.5.1.1. Kevların mekanik özellikleri.....	47
3.5.2. Aramid	48
3.5.2.1. Aramid elyaflar ve kumaşlar	48
3.5.3. Nanotüp hibirtler.....	49
3.5.3.1. Nanotüp hibrit kompozit zırhlar.....	49
3.5.4. Nylon ve CNT fiber	50
3.5.5. Nylon kompozitler	50
3.5.6. Karbon fiber.....	51
3.5.7. Polimer kompozitler	51
3.5.8. Polipropilen plastik esaslı malzemeler	52
3.5.9. E-(elektrik) cam	53
3.5.10. S-(strength) cam:.....	53
3.5.11. Yüksek mukavemetli polietilen	54

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
4.1. Balistik Test Düzeneği	56
4.1.1. Deneylerde kullanılan cihaz ve mühimmatlar	56
4.1.1.1. Hız ölçüm sensörleri (kapıları)	57
4.1.1.2. Hızlı kamera	58
4.1.1.3. Şahit plaka	59
4.1.1.4. 7.62mm (AP- armor piercing) zırh delici mermi	59
4.2. Mikro ve Makro Yapı Ölçümleri:	61
4.2.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu).....	61
4.2.2. SEM'in uygulaması	62
4.2.3. EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)	63
4.2.4. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM).....	64
4.3. Çekme Deneyi	66
4.4. Balistik Performans Deneylerini Belirleyen Değişkenler	67
4.4.1. Malzeme özellikleri	67
4.4.2. Yapı geometrisi.....	67
4.4.3. Diğer değişkenler	68
4.5. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	68
4.6 Birinci Grup Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Ortamı.....	69
4.7. Birinci Grup Deney Numunelerinin Özellikleri	71
4.7.1. Birinci grup numuneler ve yapılan deney sonuçları	72
4.7.1.1. Birinci grup 1. numune	72
4.7.1.2. Birinci grup 2. numune	73
4.7.1.3 Birinci grup 3.numune	74

4.8. İkinci Grup Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Ortamı.....	75
4.9. İkinci Grup Deney Numunelerinin Özellikleri.....	76
4.9.1. İkinci grup deney numuneleri ve yapılan deney sonuçları	78
4.9.1.1 İkinci grup 1. numune	78
4.9.1.2 İkinci grup 2. numune	78
4.9.1.2 İkinci grup 2. numune	79
4.9.1.3 İkinci grup 3. numune	79
4.9.1.4. İkinci grup 4. numune	80
4.9.1.5 İkinci grup 5. numune	81
4.9.1.6 İkinci grup 6. numune	82
4.9.1.7 İkinci grup 7. numune	83
4.9.1.8 İkinci grup 8. numune	84
4.9.1.6 İkinci grup 9. numune	85

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ANALİZLER.....	87
5.1 Hasar Mekanizmaları ve Katmanlı Yapıların Etkisi	87
5.1.1. Hasar mekanizmaları incelemesinde gerekli faktörler.....	87
5.1.2. Deney numunelerinde ilk katman- ön destek	88
5.1.3. Deney numunelerinde ikinci katman- V deflektor içyapı.....	89
5.2.4. Deney numunelerinde üçüncü katman- arka destek	89
5.2. İlk Grup Deney Sonuçları.....	90
5.2.1. Birinci numune	90
5.2.2 İkinci numune	92
5.2.3 Üçüncü numune	94
5.3. İkinci Grup Deney Sonuçları.....	97
5.3.1 İkinci grup 1. numune hasar analizi	97
5.3.2.İkinci grup 2. Numune, V deflektör yapı (120 °) da hasar analizi.....	97
5.3.3. İkinci grup 3. numunede (St52 levhalar arka arkaya sıralı) hasar analizi	97
5.3.4 İkinci grup 4.ve 5. numunelerde hasar analizi	100
5.3.5 İkinci grup 6. numunede görülen hasarlar	101
5.3.6 İkinci grup 7. numunede görülen hasarlar	102
5.3.7 İkinci grup 8. numunede görülen hasarlar	103
5.3.8 İkinci grup 9. numunede görülen hasarlar	103

BÖLÜM 6.

GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	107
---	------------

KAYNAKLAR	109
------------------------	------------

EKLER.....	116
-------------------	------------

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadiyen Stiren
ABAQUS	: Abaküs Sonlu Elemanlar Yöntemi
ANSYS	: Analysis Sytems
AP	: Armor Piercing- Zırh delici
APP	: Armor- Piercing Projectile- Zırh Delici Mermi
APP	: Armor- Piercing Projectile- Zırh Delici Mermi
CNT	: Kaebon Nano Tüpler
CTP	: Cam Takviyeli Plakalar
FMJ	: Full Metal Jacket
FML	: Elyaf Metal Tabaka
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FGM	: Fonksiyonel Gradyan Malzeme
GFRP	: Cam Takviyeli Polimer Elyaf
GPa	: Gigapascal
HPPE	: Yüksek performanslı Polietilen
MIL-STD	: Department of Defense Test Method Standard- Savunma Bakanlığı Test Yöntemi Standardı
MPa	: Megapascal
mBRPC	: Mikro örgü takviyeli polimer kompozitler
LS-DYNA	: Livermore Yazılım Teknolojisi Şirketi- Dinamik Analiz
MWCNT	: Multi-Walled Carbon Nano Tube
MSC	: Yumuşak Çelik Çekirdek
NF	: Natural Fibers- Doğal Lifler
NIJ-STD	: National Institute of Justice -Ulusal Adalet Enstitüsü Standardı

NATO	: North Atlantic Treaty Organization- Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
PBDMS	: Polidimetilsiloksan
PP	: Polipropilen
ROE	: Yaklaşık Riemann Yöntemi
SHS	: Yüksek sıcaklık sentezi
SRPP	: Kendinden takviyeli polipropilen
TFML	: Termoplastik fiber metal laminat
UD	: Unidirection/ Tek Yönlü
WRT	: Water Repellent- Su Geçirmez
CCET	: Silindirik Boşluk Genişleme Teorisi

SİMGELER

2B	: İki boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
50CrV4	: Yay Çeliği
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alümina
C	: Karbon
Cr	: Krom
CrS	: Krom Sülfür
E_i	: Darbe enerjisi
E_k	: Kinetik Enerji
J-C	: Johnson and Cook
Fe	: Demir
Mn	: Manganez
m	: Kütle
Mo	: Molibden
N	: Azot
Ni	: Nikel
P_n	: Penetrasyon eşiği
S	: Kükürt
SiC	: Silicon Karbür
V	: Vanadyum
V_{50}	: Yüzde 50 ihtimalle delinme hızı- velocity at 50% penetration
v_i	: İlk hız
v_f	: Son hız
ZrO_2	: Zirkonyumdioksit

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1 : Alüminyumun Mekanik Özellikleri.....	41
Tablo 3.2 : Alüminyum alaşımlarının seri numaralarının gösterimi.....	42
Tablo 3.3 : Titanyumun mekanik özellikleri.....	44
Tablo 3.4 : Seramik (Alümina %98 Al ₂ O ₃) için mekanik özellikler.....	45
Tablo 3.5 : Dupont Kevlar49 aramid mekanik ve fiziksel özellikleri.....	48
Tablo 3.6 : Nylon Polyamid için mekanik özellikler	50
Tablo 3.7 : Polimer Kompozit için mekanik özellikler.....	52
Tablo 3.8 : E-Cam için mekanik özellikler	53
Tablo 3.9 : S-Cam için mekanik özellikler	54
Tablo 3.10 : Polietilen (UHMWPE) için mekanik özellikler.....	55
Tablo 4.1 : Balistik performans testlerinde kullanılan mühimmat özellikleri	60
Tablo 4.2 : 7,62x51 mm NATO AP Zırh Delici Mermi teknik özellikleri	60
Tablo 4.3 : NIJ standardına göre mermi tanımlaması	61
Tablo 4.4 : Bazı balistik malzemelerin fiziksel özellikleri	69
Tablo 4.5 : Birinci grup 1. numune özellikleri.....	73
Tablo 4.6 : Birinci grup 2. numune özellikleri.....	74
Tablo 4.7 : Birinci grup 3. Numune özellikleri.....	75
Tablo 4.8 : İkinci grup 1. Numune özellikleri.....	78
Tablo 4.9 : İkinci grup 2. numune özellikleri	79
Tablo 4.10 : İkinci grup 3. numune özellikleri.	80
Tablo 4.11 : İkinci grup 4. Numune özellikleri.....	81
Tablo 4.12 : İkinci grup 5. numune özellikleri.	82
Tablo 4.13 : İkinci grup 6. Numune özellikleri.....	83
Tablo 4.14 : İkinci grup 7. numune özellikleri.	84
Tablo 4.15 : İkinci grup 8. Numune özellikleri.....	85
Tablo 4.16: İkinci grup 9. numune özellikleri.	86
Tablo 5.1 : Birinci grup 1. Numune balistik test sonuçları.	90
Tablo 5.2 : Birinci grup 2. numune deney sonuçları.....	92
Tablo 5.3 : Birinci grup 3. Numune balistik test sonuçları	94
Tablo 5.4 : İkinci Grup Numunelerde Balistik Sonuçlar	99

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1 : Deney ortamı balistik düzeneği şematik gösterimi.....	57
Şekil 4.2 : Mermi testlerinde kullanılan 7.62 mm NATO normal mermi ve çekirdeği.....	61
Şekil 4.3 : FE-SEM cihazı.....	65
Şekil 4.4 : AutoCAD ile tasarlanmış yapı örneği.....	70
Şekil 4.5 : V saptırıcılı içyapı kesiti.....	70
Şekil 4.6 : a ve b İçyapı değişik varyasyonları için hazırlanmış V şekilli bükümler ve montaj yan çerçeveleri.....	77
Şekil 5.1 : İlk numune için ön ve arka levhalarda oluşan kalıcı hasar ölçümleri.....	91
Şekil 5.2 : Birinci grup 2. numunenin hasar ölçümleri.....	93
Şekil 5.3 : Birinci grup 3.numunenin ön ve arka levhalarda oluşan kalıcı hasar ölçümleri.....	95
Şekil 5.4 : Balistik enerjinin alansal yoğunluğu ile etkileşimi.....	96
Şekil 5.5 : İkinci grup ilk üç numune için enerji ağırlık karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.6 : Al 5754 için balistik enerji gösterimi.....	101
Şekil 5.7 : Numune 6 ve 7 (Al 2024) İçin balistik enerji- ağırlık grafik gösterimi...	102
Şekil 5.8 : Al7075 İçin balistik enerji- ağırlık ilişkisini gösteren grafik.....	104
Şekil 5.9 : Malzeme St52 için SEM görüntüsü.....	104
Şekil 5.10 : Malzeme Al2024 için SEM görüntüsü.....	105
Şekil 5.11 : Malzeme Al7075 için SEM görüntüsü.....	105
Şekil 5.12 : Al 7075 ten alınan EDS analizi.....	106
Şekil A1: Otokar tarafından düzenlenen İlk grup numune atış hızları ve sonuçları	117
Şekil B1: Roketsan A.Ş. tarafından hazırlanan ikinci grup atış hızları ve sonuçları	118

TERMİNAL BALİSTİKTE, 7,62mm ÇAPLI MERMİLERE KARŞI V-ARA GEOMETRİLİ, TABAKALI YAPILARIN ENERJİ ABSORPSİYON PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZET

Korunulması gereken hedefler, balistik biliminin ilgi alanındadır. Bu hedeflerin korunmasının ilk yöntemi, balistik zırhların üretimi ve performansının artırılması için araştırılmasıdır. Sabit yapılar, mobil araçlar ve personellerin korunması zırh tasarım ve üretiminde farklılıklar ortaya çıkarır. Hareketsiz yapı ve hedeflerde zırhın ağırlığı göz ardı edilebilir. Ancak mobil hedeflerde ağırlığın göz önünde bulundurulması ve zırh alansal yoğunluğunun hesaba katılması ve sınırlayıcı bir parametre olarak düşünülmesi gerekmektedir. Burada hafif zırhlar ve özellikleri ile bu zırhların balistik performansı önemli hale gelmektedir.

Bu tez çalışmasının birincil hedefi, yerli imkanlarla erişilebilir malzemeler kullanılarak zırh varyasyonları oluşturmaktır. Oluşturulan bu yapılar da tehdit adı da verilen delici hareketli penetran parçacığın yapıda perforasyonu gerçekleştirmesini engelleyecek form verilerek gerçekleştirilmiştir.

Koruyucu balistik zırhın tasarımında tehdit parçacığının önce yönünün değiştirilmesi, aynı anda parçacığın ucunun körelmesi veya parçalanması, sahip olduğu enerjinin zırh bünyesinde sönmülmesi ve mümkünse yapının son katmanından çıkmaması hedeflenmiştir. Bu amaçla zırh içerisine saptırcılı V kanatçıklar yerleştirilmiş değişik bir yapı elde edilmiştir.

Üretilen ilk grup zırh yapılarında balistik limit belirlemeleri yapılmış ve III. seviye tehdit mermisine karşı 700m/s balistik limit elde edilmiş ve balistik performansın arttığı gözlemlenmiştir.

İkinci grup zırh deneylerinde yine aynı tehdit seviyeli NATO mermisi ile direkt atışlar yapılmış ve merminin zırh yapısını terkettiği hızlar ölçülerek enerji hesaplamaları yapılmıştır. Saptırcılı iç yapı varyasyonlarındaki değişikliğin, balistik performansı artırdığı gözlemlenmiştir.

Her iki grup numunelerinde oluşan hasar bölgelerinin makro ve mikro gözlemleri yapılarak, yapıları incelenmiş hasar mekanizmaları hakkında bilgi edinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Terminal Balistik, Balistik Malzemeler, Balistik Enerji, Hasar Mekanizmaları.

STUDY OF THE ENERGY ABSORPTION PERFORMANCE OF LAYER STRUCTURES WITH V-INNER FORM AGAINST 7.62mm CALIBER BULLETS IN TERMINAL BALLISTICS

ABSTRACT

The targets to be protected are in the field of ballistics science. The first method of protecting these targets is the production and research of ballistic armors to improve their performance. Immobile structures, mobile vehicles and protection of personnel reveal differences in armor design and production. The weight of the armor on stationary structures and targets is negligible. However, for mobile targets, weight should be considered and armor areal density should be taken into account and considered as a limiting parameter. Here, light armors and their properties and ballistic performance of these armors become important.

The primary goal of this thesis is to create armor variations using locally available materials. These structures were formed by giving a form to prevent the penetrating penetrating particle, also called the threat, from perforating in the structure.

In the design of the protective ballistic armor, it is aimed to change the direction of the threat particle first, to atrophy or fragment the tip of the particle at the same time, to absorb the energy it has within the armor and not to leave the last layer of the structure if possible. For this purpose, a different structure has been obtained by placing deflector V-fins inside the armor.

Ballistic limit determinations were made in the first group of armor groups produced, and a ballistic limit of 700m/s was obtained against the level III threat bullet, and it was observed that the ballistic performance was increased.

In the second group armor experiments, direct shots were made with the same threat level NATO bullet and energy calculations were made by finding the velocities at which the bullet left the armor structure. It has been observed that the internal structure change with V-shaped deflector increases the ballistic performance.

Macro and micro structures of the damage areas in both groups of samples were made and their structures were examined and information was obtained about the damage mechanisms.

Keywords: Terminal Ballistic, Ballistic Materials, Ballistic Energy, Damage Mechanisms.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hedeflerin korunması her dönemde önemini korumuştur. Bir parçacığın enerji kazanarak bir atış rejimi içerisinde belirli bir süre yol alması, karşısındaki bir hedefe çapması ve hedef içindeki veya hedefi geçmesi durumunda hızının bitişine kadarki ölçüm ve değerlendirmelerle balistik bilimi ilgilenir. Balistik biliminin ilgisi içerisinde birçok değişkenleri vardır. Tehdit parçacığının hızı, kütlesi, çarpma açısı, burun geometrisi ve malzemesi diğer değişkenlerdir. Korunma malzemelerinin mekanik özellikleri, üretim metotları, geometrik yapısı, kimyasal bileşimleri yine değişkenler arasındadır.

Teknolojik gelişmeler balistik biliminin ilgisini sürekli canlı tutmaktadır. Malzemelerde yeni bir alaşım veya mekanik özellik artırıcı bir işlemi takiben balistik performansı da merak edilmiştir. Aynı şekilde tehdit araç ve gereçlerinde yapılan bir değişiklik ve yenilik karşısında, mevcut koruma sistemlerinin yeterliliği sorgulanmış ve test edilmiştir. Tehdit daha hızlı ve etkin hale geldikçe, hedef daha dayanıklı ve performansı yüksek hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Balistik performansı etkileyen değişkenlerin en önemlilerinden birisi malzemenin mekanik özellikleridir. Bu özelliklerin hızlı deformasyon özelliğini belirleyen etken, darbe dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Diğer adıyla malzemenin tokluğu yani parçacığın çarpması durumunda üzerinde absorbe edeceği enerji miktarı balistik biliminin malzeme yönünü ilgilendiren değişkenidir. Yine batma olayı yani penetrasyonun analizi, malzeme özellikleri ile birlikte ele alınmasını gerektiren bir durumdur. Bazı durumlarda tehdit parçacığının hedefi tamamen dağıtması, içinden geçip gitmesi perforasyon olarak adlandırılır. Bu durumlarda hasar mekaniğini iyi belirlemek ve hasar analizini iyi açıklamak yine malzemelerin mekanik özelliğini iyi değerlendirmekle mümkündür.

Balistik yapıların performansı malzeme seçimleri ile doğrudan ilgilidir. Bu malzemelerin doğru sıralamasının araştırılması gereklidir. Bazı durumlarda kompozit gibi yapılar oluşturulması, iki veya daha fazla farklı fazdaki malzemenin özelliklerinden aynı anda

yaralanmanın gerektiği durumlar vardır. Veya malzemeler çekirdek yani iç yapı olasılıklarının iyi değerlendirilmesi ve geometrik dizilimin yeterli yapılması gerekir.

Balistik yapıları tehdit eden hareketli parçacığın, yapı içerisinde yolculuğunu sonlandırmasını sağlamak hedeflenen uğraşıdır. Bunun için içyapı seçeneklerini değerlendirmek değişkenleri araştırmak ve optimum yapı geometrisine ulaşmak balistik biliminin ana hedeflerindendir.

Araştırmalarda, malzeme edinmek, numune hazırlamak, test ortamları hazır etmek bir dizi olanak gerektirmektedir. Bundan dolayı çalışmaların daha etken olması ve istenen hedef yapıya en yakın sonuca ulaşılması simülasyon programları ile mümkün olabilmektedir. Program girdileri için tehdit parçacık özelliklerinin ve hedef malzeme özelliklerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir.

Balistik bilimi, şu sorunların üstesinden gelme çabası içindedir. Tesirli parçacıkların, karşısındaki hedefe girmesi ki bu hedefin canlı olduğu düşünülürse, özellikle insan vücuduna girmesi durumunda organ hasarına ve sonuçta ölümüne neden olabilmektedir. Sorunun giderilmesi için canlıya ulaşmasına engel olabilecek sert ve dayanıklı malzemelerden oluşan engeller konulmalıdır.

Birinci sorun; hedefi koruyan malzemelerin hasarına engel olmak, tehdit parçacığının yapıya girmemesini sağlamak, girmesi durumunda ise tam penetrasyonun (perforasyonun) engellenmesini sağlamak.

İkinci sorun; Hedef ve tehdit değişkenlerinin çok fazla olması, çözüm varyasyonlarının aşırı fazlalığı, araştırmanın sınırlandırılmasını ve belirli hedef özelliklerinde karar kılınması, tehdit parçacığı özelliklerinde yaygın olanı üzerinde yoğunlaşarak araştırılmasını lüzumlu kılmaktadır.

Bu doktora tezinde, bütün değişkenler göze alınarak ve bu konuda yapılan çalışmalardan yola çıkılarak malzeme ve iç yapı geometrisi ele alındı. Denenmemiş yapı ve alaşımların teorik olarak tehdit parçacığının balistik yapı içerisinde durdurulması veya yönünün değiştirilmesi amaç edinildi. Bunun için iç yapı geometrisinde yeni model tasarımı

yapılmış ve burada kullanılacak malzeme varyasyonlarının balistik performansının ölçümleri gerçekleştirilerek hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Zırh tasarımı süreci, çalışmanın önemli maliyetine sahip olan kapsamlı test denemelerini gerektirir. Bu testlerin amacı bazen bazı malzeme veya geometrik etkileri izole etmektir. Ancak, gerçekte, her tasarım parametresini optimize etmek için deneyler yapmak çok zordur.

1.1. Balistik Terimler ve Açıklamaları

1.1.1. Balistik

Balistik terimi, nesnelerin hareketi ve etkileşimiyle ilgilenen fizik dalıdır. Özellikle mermi, roket, top mermisi gibi cisimlerin hareketini ve etkisini inceler. Balistik, bu nesnelerin uçuş yollarını, hızlarını, ivmelerini, etkileşimlerini ve hedeflere olan etkilerini analiz etmeyi amaçlar. Genellikle üç ana bölümde incelenir:

1.1.1.1. İç balistik

İç balistik, nesnelerin ateşlenmesinden önceki hareketini ve davranışını inceler. Örneğin, bir ateşli silahtan atılan bir mermi veya roketin namlu içindeki hareketi iç balistiğe girer. Bu aşamada, gaz basıncı, mermi veya roketin hızı, ivmesi, namlu etkisi ve diğer faktörler göz önünde bulundurulur.

1.1.1.2. Dış balistik

Nesnelerin atıldıktan sonra dış ortamda nasıl hareket ettiğini ve etkileşime girdiğini inceler. Örneğin, bir mermi veya roketin atmosferdeki uçuşu, yerçekimi etkisi, aerodinamik kuvvetler, hedefe olan isabeti ve diğer faktörler dış balistiğe girer. Bu aşamada, nesnelerin uçuş yolları, menzilleri, darbe enerjileri ve diğer performans özellikleri analiz edilir.

Balistik, askeri ve savunma alanlarında, mühendislik, güvenlik, havacılık, uzay ve sualtı araştırmalarında yaygın olarak kullanılan bir disiplindir. Ayrıca suç mahallindeki olayların incelenmesi ve ateşli silahların etkisi üzerine araştırmaları da balistikle ilgilenir.

Balistik, matematik, fizik, malzeme bilimi ve mühendislik prensiplerini bir araya getiren çok disiplinli bir alandır.

1.1.1.3. Terminal balistik

Mermi veya projektinin hedefi vurduğunda hedef üzerindeki etkisini ve hasarını açıklayan bir balistik alt disiplindir. Terminal balistik, mermi veya projektinin hedefle etkileşimine odaklanır ve genellikle hedefin hasarı, yaralanma veya öldürme potansiyeliyle ilgilidir. Terminal balistik, bir projektinin hedefle çarpıştıktan sonra nasıl davrandığını ve hedef üzerinde hangi etkileri oluşturduğu ile ilgilenir. Bu etkiler arasında penetrasyon (nüfuz), genişleme, deformasyon, fragmentasyon ve enerji transferi gibi faktörler yer alır.

1.1.2. Hedef

Hedef, bir mermi, roket veya diğer balistik nesnenin etkileşime girdiği veya hedef aldığı nesneyi ifade eder. Hedef, genellikle belirli bir amaç için seçilen, vurulması veya etkilenmesi amaçlanan bir nesnedir.

Hedefler farklı tiplerde olabilir. Örneğin, askeri balistikte hedefler, düşman birlikleri, araçları veya yapıları olabilir. Polis veya güvenlik güçleri tarafından kullanılan balistikte hedefler, suçlular veya tehditler olabilir. Balistik atış eğitimlerinde hedefler, atıcının nişan aldığı veya vurmayı amaçladığı hedef panoları veya hedeflerdir.

Hedefler, balistik olayın sonucunu etkileyebilir. Mermi veya roket, hedefe çarptığında veya hedefle etkileşime girdiğinde, çeşitli sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunlar arasında hedefin delinmesi, yıkılması, etkilenmesi, hasar görmesi veya yok edilmesi yer alabilir.

Balistik biliminde hedeflerin analizi, mermi veya roketin hedefe olan etkisini, penetrasyon yeteneklerini, enerji transferini ve hedef üzerindeki etkisini anlamaya yardımcı olur. Bu bilgiler, silah sistemlerinin tasarımı, savunma stratejileri ve etkili atış teknikleri üzerinde önemli bir rol oynar. Bu tezde, korunması gereken hedefler için üretken balistik yapı hedef olarak adlandırılacaktır.

1.1.3. Tehdit

Balistik biliminde "tehdit" terimi, potansiyel olarak zararlı veya tehlikeli olan bir nesneyi, durumu veya olayı ifade eder. Balistik açıdan, tehdit genellikle bir mermi, roket veya diğer saldırı aracının potansiyel hedefe yönlendirildiği veya kullanıldığı durumu ifade eder.

Tehditler, farklı kaynaklardan gelebilir ve çeşitli şekillerde ortaya çıkabilir. Örneğin, askeri veya güvenlik bağlamında, düşman birlikleri veya saldırı araçları tehdit olarak kabul edilebilir. Terör saldırıları, saldırganların ateşli silahlar veya patlayıcılar kullanarak potansiyel zarar verebileceği tehdit olarak kabul edilir. Tehditler ayrıca doğal afetler, felaketler veya güvenlik zafiyetleri gibi olaylardan da kaynaklanabilir.

Balistik biliminde tehdit analizi, bir tehdidin doğası, potansiyel etkileri, hareket yolu, hedef seçimi ve diğer faktörlerin değerlendirilmesini içerir. Bu analizler, savunma stratejilerinin geliştirilmesi, koruma önlemlerinin alınması ve risklerin azaltılması için önemlidir. Tehditlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, savunma ve güvenlik alanında etkili önlemlerin alınmasına yardımcı olur. Çalışmada tehdit terimi, penetan, projecktil veya mermi olarak adlandırılan sırh delici parçacığa verilen isim olarak açıklanmaktadır.

1.1.4. Penetrasyon

Bir cismin bir diğer cisim veya engel içine girmesi veya delmesi anlamına gelir. Özellikle balistik nesneler, yani mermi, roket veya diğer projektıl veya mermiler, hedefleri üzerinde penetrasyon yapabilme yeteneğine sahip olabilir.

Penetrasyon, balistik nesnenin hedefe çarptığında, hedefin içine nüfuz etmesini ve ilerlemesini ifade eder. Bu penetrasyon sürecinde, balistik nesne hedefin yüzeyini geçer ve iç kısımlarına doğru ilerler. Penetrasyonun başarılı olabilmesi için, balistik nesnenin hedefi delip geçebilecek yeterli kinetik enerjiye, geometriye ve yapısal dayanıklılığa sahip olması gerekmektedir.

Penetrasyon kabiliyeti, balistik nesnenin yapısal özellikleri ve hedefin direnci ile ilişkilidir. Balistik malzemeler, genellikle yüksek sertlik, yüksek yoğunluk, yüksek

mukavemet ve özel tasarım özelliklerine sahip olabilir. Örneğin, balistik zırh çelikleri veya balistik seramikler, mermi veya roketin penetrasyon kabiliyetini artırmak için kullanılan malzemelerdir.

Penetrasyon yeteneği, askeri, savunma ve güvenlik alanlarında önemlidir. Örneğin, bir tank mermisinin düşman zırhını delip geçebilmesi veya bir zırh delici mermi veya roketin hedef aracın zırhını aşabilmesi hedefe etkili bir şekilde zarar verme veya yok etme kabiliyetini sağlar. Penetrasyonun analizi ve testi, balistik malzemelerin ve sistemlerin etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar.

1.1.5. Perforasyon

Bir nesnenin veya yüzeyin delinmesi veya deliklerle kaplanması anlamına gelir. Perforasyon, genellikle balistik nesnelerin, yani mermi, roket veya diğer projektillerin delinmesi sürecini ifade eder.

Perforasyon, balistik nesnenin hedefe çarptığında, hedefin üzerinde geçici veya kalıcı delikler oluşturmasını içerir. Balistik nesnenin hedefi delme veya delme yeteneği, balistik nesnenin kinetik enerjisi, geometrisi, hedefin direnci ve diğer faktörlere bağlıdır.

Perforasyon, askeri, savunma ve güvenlik alanlarında önemlidir. Örneğin, bir mermi veya roketin zırhı delip geçebilme kabiliyeti, hedefe etkili bir şekilde zarar verme veya etkisiz hale getirme yeteneğini sağlar. Perforasyon testleri, balistik malzemelerin ve sistemlerin performansının değerlendirilmesinde kullanılır.

Perforasyon analizi, balistik nesnenin hedef üzerindeki etkisini anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, balistik malzemelerin penetrasyon yeteneklerini, enerji transferini, delinme derinliğini ve delik özelliklerini değerlendirir. Perforasyon testleri, malzeme seçimi, zırh tasarımı ve etkili koruma sistemleri geliştirmek için önemlidir.

1.1.6. V_{50} performans deneyi

Balistikte, V_{50} testi, bir projektilin veya mermi tipinin belirli bir hızda ve belirli bir açıda bir zırh malzemesini veya koruyucu yapıyı delip geçme yeteneğini ölçmek için kullanılan

bir test yöntemidir. V_{50} , "velocity at 50% penetration" (delinme ihtimali %50'de olan hız) ifadesinin kısaltmasıdır.

V_{50} testi genellikle balistik koruyucu malzemelerin, zırh plakalarının veya diğer koruyucu yapıların performansının değerlendirilmesinde kullanılır. Test sırasında, belirli bir projektile veya mermi tipi, belirli bir hız ve açıyla test malzemesine ateşlenir. Projektile veya mermi tipinin hedef malzemeyi tamamen delip geçme hızı ve performansı ölçülür.

V_{50} testi, balistik malzemelerin ve koruyucu yapıların sınıflandırılmasında ve tasarımında önemli bir rol oynar. Bu test, askeri, savunma ve güvenlik alanlarında kullanılan zırh sistemlerinin performansının değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi için standart bir test yöntemi olarak kabul edilir.

1.1.7. Balistik performans

Bir projektile veya mermi tipinin belirli bir hedef üzerindeki performansını ve etkinliğini ifade eder. Balistik performans, balistik nesnenin kinetik enerjisi, penetrasyon kabiliyeti, enerji transferi, delinme derinliği, etki mesafesi ve diğer parametrelerle değerlendirilir.

Balistik performans, balistik malzemelerin, silah sistemlerinin ve koruyucu yapıların tasarımı, geliştirilmesi ve test edilmesi sırasında önemli bir faktördür. Balistik performans analizi, bir projektile veya mermi tipinin hedef üzerindeki etkisini ve etkinliğini anlamak için kullanılır.

Balistik performans, projektile hedefi delme veya perforasyon yeteneği, enerji transferi ve dağılımı, şekil değiştirme, geri tepme etkisi, mermi yolu ve stabilite gibi çeşitli faktörlerle ilişkilidir. Bu performans faktörleri, mermi ve hedef malzemelerinin özelliklerine, mermi tasarımına, kinetik enerjiye, uçuş hızına, çarpma açısına ve diğer parametrelere bağlı olarak değişir.

Balistik performans testleri, balistik malzemelerin ve silah sistemlerinin performansının değerlendirilmesi için kullanılır. Bu testler, mermi penetrasyonu, enerji transferi, delinme derinliği, etki mesafesi ve diğer performans ölçümlerini içerir. Balistik performans

analizi, askeri, savunma, güvenlik ve araştırma alanlarında önemli bir rol oynar ve silah sistemlerinin etkinliğinin ve güvenilirliğinin belirlenmesine yardımcı olur.

1.1.8. Darbe dayanımı

Malzemelere uygulanan darbe ve dayanım, malzemenin dış etkilere karşı ne kadar dirençli olduğunu ve ne kadar enerji absorbe edebildiğini ifade eder.

Darbe dayanımı, malzemenin darbe veya çarpma kuvvetlerine karşı direncini ifade eder. Malzeme, bir darbe veya çarpma kuvveti altında nasıl davrandığını ve ne kadar enerji absorbe edebildiğini belirler. Darbe dayanımı genellikle malzemenin tokluk özelliği ile ilişkilidir. Malzeme, darbeye maruz kaldığında çatlama, kırılma veya deformasyon gibi istenmeyen sonuçlar oluşmadan enerjiyi emebilmelidir.

Dayanım ise malzemenin dış etkilere, yüklemelere veya kuvvetlere karşı ne kadar dirençli olduğunu ifade eder. Bu etkiler, gerilme, bükülme, çekme veya basınç gibi farklı şekillerde olabilir. Malzeme, bu etkilere karşı direnç gösterebilmeli ve mekanik olarak stabil kalmalıdır. Dayanım genellikle malzemenin maksimum gerilme veya kırılma noktasına kadar ne kadar yük taşıyabildiğini belirler.

Darbe dayanımı ve dayanım, malzemelerin tasarımında, üretiminde ve performansının değerlendirilmesinde önemli faktörlerdir. Özellikle mühendislik uygulamalarında, malzemelerin darbe ve dayanım özellikleri, yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve performansı açısından büyük öneme sahiptir. Malzemelerin darbe dayanımı ve dayanım özellikleri, malzeme seçimi, ürün tasarımı, yapısal analiz ve testlerle belirlenebilir.

1.1.9. Hasar analizi

Balistik araştırmalarında hasar analizi, bir cismin veya yapısal elemanın balistik etkiye maruz kaldıktan sonra nasıl davrandığını ve ne kadar hasar aldığını değerlendiren bir analiz yöntemidir. Hasar analizi, balistik etkiler sonucu oluşan deformasyonlar, kırılmalar, çatlaklar veya diğer zarar tiplerini belirlemek ve hasarın boyutunu değerlendirmek için kullanılır.

Hasar analizi genellikle şu adımları içerir:

Hasarın tespiti: Balistik etkiye maruz kalan cismin veya yapısal elemanın hasarı gözlemlenir ve kaydedilir. Deformasyonlar, kırılmalar, çatlaklar, delikler veya diğer hasar belirtileri incelenir.

Hasarın sınıflandırılması: Hasar türü ve derecesi belirlenir. Örneğin, deformasyonlar bükülme veya sıkışma sonucu oluşmuş olabilir, kırılmalar çatlamlar veya kopmalar olabilir.

Hasarın ölçülmesi: Hasarın boyutu, uzunluğu, derinliği ve genişliği gibi parametreler ölçülür. Bunun için çeşitli ölçüm araçları ve teknikler kullanılabilir.

Hasarın etkilerinin değerlendirilmesi: Hasarın etkileri ve yayılma potansiyeli analiz edilir. Hasarın diğer bileşenlere veya yapıya olan etkisi değerlendirilir ve hasarın yayılmasını engellemek veya kontrol altına almak için önlemler alınabilir.

Hasarın etkisinin değerlendirilmesi: Hasarın, cisim veya yapısal elemanın işlevselliği üzerindeki etkisi değerlendirilir. Hasarın onarılması veya değiştirilmesi gerekip gerekmediği belirlenir.

Hasar analizi, balistik etkiye maruz kalan malzemelerin, yapıların veya araçların performansını değerlendirmek, tasarım hatalarını tespit etmek, geliştirmeler yapmak ve daha güvenli sistemler oluşturmak için kullanılır. Ayrıca, balistik testlerin sonuçlarını analiz etmek ve balistik koruma sistemlerini optimize etmek için de kullanılır.

BÖLÜM 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bir çalışmada; farklı kalınlıklarda hazırlanan düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelik numunelerin kritikler arası tavlama ile içyapısında çift faz (ferrit + martensit) elde edildikten sonra 7,62 mm zırh delici mermilere karşı balistik performansı incelenmiştir. Farklı ara kritik tavlama sıcaklıklarında ısıtıl işlemler uygulanarak farklı martenzit hacim oranlarına sahip çeşitli kalınlıklardaki numuneler üzerinde atışlar gerçekleştirilmiştir. Bu sayede martenzit hacim oranı ve kalınlığının balistik performansı nasıl etkilediği araştırılmıştır. 3 farklı ara kritik tavlama ve bir tam tavlama olmak üzere toplam 4 farklı ısıtıl işlem koşulu test edilmiştir. Ayrıca seramik ön tabaka kullanılarak her bir ısıtıl işlem koşulu için tabakalar halinde çekimler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede seramik ön tabakanın balistik performansı nasıl etkilediği araştırılmıştır [1].

Yapılan bir çalışmada hafif silahlara karşı bireysel savunma için balistik koruyucu zırh malzemeleri tasarlanmıştır. Fiziksel ve balistik mukavemeti ölçmek için hibrit kompozit zırh örnekleri; E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine hibrit kompozit levha, Kevlar49, PolietilenHB26 (UHMW-PE, malzemelerin farklı varyasyonları üretim prosesleri takip edilerek hazırlanmış ve oda koşullarında şartlandırılmıştır. Farklı çap ve kalibrelerde mermilerle (9 mm FMJ), 7,62 mm Normal NATO) zırh numuneleri uluslararası standartlar (NIJ STD 0101-04, STANAG 2920) ile, balistik test laboratuvarında test düzeneği kullanılarak çekilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Günümüzde kullanılan balistik koruyucu yapıların yanı sıra farklı hibrit kompozit tasarım perspektifleri ile koruma düzeyi, ağırlık, kullanım kolaylığı ve maliyet analizleri geliştirilmiştir [2].

Bir doktora tez çalışmasında, seramik kompozit zırh sistemi bileşenlerinin darbe davranışı, ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak darbe testleri ile incelenmiştir. Kompozit malzemenin darbe davranışını belirleyen parametreler arasında yer alan ve malzemenin karakterizasyonunda oldukça önemli olan kritik eşik enerjileri; penetrasyon ve perforasyon eşik enerjileri bulunmuştur. Darbe enerjisine bağlı olarak kompozit

malzemenin absorbe ettiği enerji bulunarak malzemenin enerji profili (dağılımı) elde edilmiştir. Balistik testlerde hasar mekanizmaları araştırıldı. Kompozit yapıdaki delaminasyonların balistik darbeye makroskobik ölçekte geliştiği, düşük enerjili darbeye ise daha çok mikroskobik boyutta delaminasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir [3].

Yapılan bir çalışmada, hedef sertliğin bir fonksiyonu olarak sertleştirilmiş çelik levhaların balistik performansını araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Sayısal analiz aracı olarak ANSYS Autodyn kullanılmış ve hedefler için J-C dayanım modeli parametreleri açık literatür kullanılarak oluşturulmuştur. Hem 2B hem de 3B sayısal analizin mermi artık hızları açısından makul sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir [4].

Yapılan bir çalışma kapsamında, katlı E-cam dokuma kumaş kullanılarak, dikişsiz, dikişsiz/dolgulu, dikişli ve dikişli/dolgulu formlarda kompozit yapılar elde edilmiştir. Kompozit yapıların mekanik ve düşük hızda darbe test sonuçlarına göre; nano malzeme, kompozit yapının düzlemde ve düzlem dışındaki dayanımlarına önemli bir ölçüde etki etmemekte ancak yapıyı genel olarak kırılğan hale getirmekte olduğu ve dikiş, kompozit yapının düzlemde özelliklerini bir miktar düşürmekle beraber düzlem dışı özelliklerini iyileştirmekte olduğu tespit edilmiştir [5].

Yapılan bir çalışmada, belirli bir tehdide karşı hafif zırh geliştirebilmek amaçlı test ve simülasyon tabanlı bir işlem sırası oluşturularak uygulanmıştır. Delikli plaka tasarımı ile hafif zırh çözümü geliştirilmeye çalışılmış ve bu plakaların tasarımında etkili olan hasar mekanizmalarının açıklanması uygulamalı mühendisliğe katkı amacı gütmüştür. Plakalardaki hasar mekanizmalarını tahmin edebilmek için simülasyon ile bu çözüme katkıda bulunacak parametreler kapsamlı olarak incelenmiştir [6].

Yapılan bir çalışmada konvansiyonel katı yakıtlı silahlar için dahili balistik simülasyon programı oluşturulmuş ve bu amaçla dahili balistik hesaplamaları sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada iki sayısal model oluşturulmuştur; Sıfır boyutlu bir model ve tek boyutlu bir model sunulmuştur. Yığılmış parametre yaklaşımına dayalı sıfır boyutlu modelde, barut parçacıklarının ateşlenmesi ile balistik parametrelerin değişimi incelenmiştir. Tek boyutlu kodda problem tek boyutlu viskoz olmayan akış olarak modellenmiş ve çözüm tekniği olarak Roe (yaklaşık Riemann) yöntemi kullanılmıştır. Her iki kodda da gerçek gaz akışını simüle edebilmek için eşdeğer hacim Noble-Abel

durum denklemindeki gibi tanımlanmış ve her iki sayısal kod arasındaki farklar incelenmiştir [7].

Yapılan bir çalışmada zırh uygulamalarında kullanılan seramiklerin çoklu atış direncini arttırmak için çekirdek malzemelerden daha hafif yapılar kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla termal sprey kaplama tekniklerinden biri olan atmosferik plazma sprey yöntemi kullanılarak seramik plakaların yapışma yüzeyleri kırılma tokluğu yüksek alümina-zirkona kompozitlerle kaplanmıştır. Kaplamalardan biri işlevsel aşamalarda yapılmış ve etkinliği diğer kaplamalarla karşılaştırılmıştır. İlave edilen ZnO_2 oranına göre büyütülen kaplamaların sertlik ve kırılma tokluklarındaki değişimler yaklaşık olarak hesaplanmış, kaplama malzemelerinin kaplama öncesi faz analizleri yapılmış ve bulunan fazlar kaplama sonrası fazlar ile karşılaştırılmıştır. Kaplama morfolojisinin incelenmesi alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Son olarak kaplanmış malzemelerle bir zırh paketi oluşturulmuş ve balistik testleri gerçekleştirilmiştir. Balistik testler sonucunda oluşturulan kaplamanın etkinliği kanıtlanmıştır [8].

Bir diğer çalışmada kavram olarak ele alınan ve fonksiyonel derecelendirilmiş levhalar ve alüminyum petek kullanılarak oluşturulan sandviç yapı tasarlanmış ve balistik performansı incelenmiştir. Seramik ve metal yüzeyler arasında kademeli oluşan bu çok katmanlı yapı balistik uygulamalarda kullanılabileceği için balistik performansın belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, yapıları gereği çalışma koşullarının zor olduğu darbe ortamlarında ve sıcaklık değişimlerinin yüksek olduğu ortamlarda kullanılabilmektedir. Fonksiyonel kademeli plakalar ve alüminyum petek ile oluşturulan bu zırh sisteminin, yapısındaki seramik-metal içeriği ve peteğin enerji emme özelliği sayesinde balistik uygulamalarda kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş plakalarla güçlendirilmiş petek yapılı sandviç yapıların balistik performansı, hasar mekanizmaları ve deformasyon geometrileri açısından sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir [9].

Yapılan bir çalışmada, savunma sanayinde kullanılan aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik özellikleri ve mekanik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak; 16, 18, 20, 22 ve 24 kat aramid kumaş kullanılarak, 10, 21, 42, 63 ve 84 bar basınçta plakalar hazırlanmıştır. Aramid kumaştan yapılan plakalara farklı atış hızlarında mermi ve parçacık testi yapılarak balistik mukavemetleri ölçülmüştür. Hazırlanan

plakadan ve atış yapılan plakanın mermi gelmeyen kısmından bir kesit alınarak çekme mukavemetleri ölçülmüştür [10].

Yapılan bir çalışmada, 7075 ve 7085 gibi yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlar kullanarak balistik zırh destek plakası üretimi için alüminyum matriksli kompozit üretme amacı güdülmüştür. Çalışma kapsamında, alüminyum matriksli kompozitlerin balistik zırh destek plakası üretimindeki önemini kavrayabilmek için, bu iki yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları yüksek basınçlı döküm yöntemleri ile üretilmiştir. İstenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesi için 7000 serisi bu alaşımlara bazı ısıtma işlemi, haddeleme ve dövme işlemleri uygulanmıştır. Bu sayede 7075 ve 7085 alüminyum alaşımların balistik uygulamalar için kullanımı incelenmiştir. Daha sonra alümina ve bor karbür preformlara karbon fiber sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile bu alaşımlar emdirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, alüminyum matriksli kompozitlerin balistik uygulamalardaki önemini daha iyi anlamak için mikro yapı incelemesi, sertlik ölçümleri, bazı mekanik testler ve faz analizleri yapılarak kompozitler karakterize edilmiştir [11].

Yapılan bir doktora tez çalışmasında, yumuşak vücut zırhlarında kullanılan Twaron® CT709 kumaşın balistik dayanımının, vizkoelastik özellik gösteren poli (bor siloksan) (PBDMS) polimeri emdirilmesi sonrasındaki durumu incelenmiştir. Çalışmada, PBDMS; iki farklı viskozite değerine sahip poli(dimetilsiloksan) (PDMS) kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan reolojik testler sonucunda daha yüksek depolama modülü (G') değerine sahip PBDMS, Twaron® CT709 balistik kumaşın Scoured (SC) ve Water Repellent (WRT) tiplerine farklı oranlarda emdirilmiştir. Yapılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile PBDMS polimerinin kumaş üzerindeki dağılımları incelenmiştir. Hazırlanan numunelere iplik çekme ve iplik sürtünme testleri yapılmıştır. Farklı PBDMS emdirme oranına sahip numuneler atışlı testlere tabi tutulmuştur. Ardından kumaşın finiş tipinin, PBDMS emdirme sonrasındaki balistik dayanıma etkisi incelenmiştir. PBDMS polimerinin, Twaron® CT709 SC kumaşına emdirilmesi sonrasında balistik dayanımı artırıcı etkisi, reolojik, iplik çekme, iplik sürtünme ve balistik testler yapılarak kanıtlanmıştır. WRT tipi kumaşlarda ise PBDMS emdirilmesi sonrasında balistik dayanım artmasına rağmen, PBDMS emdirme oranı ile bu artış arasında sağlıklı bir ilişki kurulamamıştır. Son olarak yapılan analiz çalışmaları ile sonraki çalışmalarda kullanılabilecek balistik model ortaya konulmuştur [12].

David ve arkadaşları; farklı malzeme sistemlerinden üretilen ve farklı balistik enerji emilim mekanizmaları sergileyen çeşitli antibiyotik vücut zırhlarının tasarımı, karakterizasyonu ve performans değerlendirmesi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma amaçlamışlardır. Her bir vücut zırh malzemesi sisteminin bilimsel veya teknolojik değerlerini değerlendirmek amacı taşımadan çeşitli malzeme sistemlerinin karşılaştırmalı bir analizini ve kullanıcıya balistik koruma sağlama performanslarını sunmuşlardır. Balistik koruma zırhının performansını etkileyen çeşitli temel faktörler, malzeme sistemleri, yapı ve özellikleri, kumaş katlama tasarımı ve enerji emici mekanizmalar, mevcut araştırma makaleleri, patentler ve test standartları analiz edilerek karşılaştırılabilir olduğu sonucuna varmışlardır [13].

Yapılan bir doktora tezinde, balistik performansı en üst düzeye çıkarmak için balistik hedefler içindeki sert ve yumuşak malzeme kombinasyonlarının dağılımı ve yapısı sistematik olarak incelenmiştir. Genel olarak, sert kaparımların eklenmesi, hibrit hedeflerin balistik performansını artırır. Simülasyonlar, sert seramik ön katman ve sünek metal arka katman içeren iki katmanlı tasarımın, çok katmanlı malzemelerin tasarım alanı içinde en iyi zırh konfigürasyonu olduğunu doğrulamaktadır. Olağanüstü balistik performans için yeterli destek malzemesi çok önemlidir. Gerçek balistik darbe testleri, alümina inklüzyonları ile sermet matrisi arasında yüksek tokluğa ve mükemmel yapışma özelliğine sahip olan krom-krom sülfür (Cr-CrS) sermetler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler, sistematik olarak değiştirilebilen bir metal içeriği ile net şekilli numunelerin üretilmesine izin veren kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi (SHS) yöntemi ile sentezlenir. Deneysel testlerin sonuçları, yüksek yoğunluklu Cr-CrS sermetlerinin, benzer bir alan yoğunluğuna sahip alümina-çelik iki katmanlı bir tasarıma kıyasla daha yüksek dirence sahip olduğunu göstermektedir. Cr-CrS sermetlerinin performansı, yeni balistik koruma sistemlerinin tasarımı için çekici bir malzeme olduğunu göstermiştir [14].

Yapılan bir çalışmada, çelik ve alüminyum tabakalardan oluşan katmanlı bir kompozit panel, grafen takviyeli poliüretan ile birleştirilmiştir. Dört tip lamine panel, çelik kaplama plakası ve ardından çeşitli alüminyum alaşımlı katmanların bir kombinasyonu ile imal edildi. Üretilen panellerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi, bindirme kesme mukavemeti testi ve üç nokta eğilme testi gibi farklı testler yapılmıştır. Kompozit laminatların eğilme sertliği, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellendi ve deneylerle doğrulandı. Zırh delici mühimmat ile balistik bir etkinin etkisi, balistik

yüklemeye altında başarısızlığa karşı göreceli dirençlerini niteliksel olarak ölçmek için de yapılmıştır [15].

Yapılan bir çalışmada, E-cam/doymamış poliestere kompozit laminalar örgü ve kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş ve isophtalic and orthophthalic poliestere reçinelerden RTM (reçine transfer kalıplama) tekniği kullanılarak üretilmiştir. Kompozit laminalara ek olarak, kompozit yapının balistik dayanımını artırmak amacıyla alüminyum plakalar ve alümina tabakalar ilave edilmiştir. Alüminyum (Al) plakaları ve alümina (Al_2O_3) tabakalar kullanılarak çok tabakalı sandviç laminalar üretilmiştir. Alüminyum ve alümina içeren ve içermeyen E-cam/doymamış poliestere kompozit laminaların mekanik ve balistik performansını belirlemek amacıyla deneysel çalışma sürdürülmüştür. $0^\circ/90^\circ$ örgü, $0^\circ/90^\circ$ ve $0^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ$ kıvrımsız dikişli kumaştan ve iki farklı reçine kullanılarak üretilen kompozit laminaların mekanik özellikleri fiber kumaş ve reçine tipinin etkilerini karşılaştırmak için ölçülmüştür. Kompozitlerin eğme mukavemeti ve modülü, tabakalanma yönünde ve tabakalanma yönüne dik yönde basma mukavemeti ve modülü, mod I laminalar arası kırılma tokluğu, laminalar arası akama mukavemeti değerleri fiber kumaş yapısının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelemek üzere ölçülmüştür. Çarpma sonrasında kompozitlerin hasar yüzeyleri incelenmiştir. Sonuç olarak çok tabakalı kompozit yapıların balistik tehditlere karşı kapasitesinin olduğu ve hafif zırh malzemesi olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir [16].

Flores-Johnson ve arkadaşları; çiftli, üçlü plaka sıralamasının ve üçlü karışık metal levha sıralamasının, APM 2, 7,62 mm kalibreli merminin 775-990 m/s hızla vuruşu karşısında ki balistik performansı incelemiştir. LS-DYNA nüfuzlu eleman metodu kullanılan sonlu elemanlar geliştirilmiştir. Tekli plakaların, aynı metalden yapılmış çoklu plakalara göre daha iyi balistik performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu etki darbenin hızı ile azalmakta olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ince ön plakalı, kalın çelik arka plakalı katmanların, aynı alansal yoğunluklu çoklu katmanlı plakalardan daha iyi balistik performans göstermektedir. Bu tahminler, farklı metalik malzemeler kullanılan çok tabakalı hedeflerin ağırlık yönünden tasarrufu araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır [17].

Özgültekin yaptığı çalışmada; kişisel koruyucu zırhlarda kullanılan kompozit malzemelerin balistik davranışları deneysel ve sayısal metotla incelemiştir. İki kademe

olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, ilk kademe deneyleri yapılarak zırh numunelerindeki tabaka dizilişleri hakkında altyapı bilgisi elde edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda aynı malzemelerin farklı şekilde dizilişleri ile birbirinden çok farklı davranışlar gösterdiği saptanmıştır. İlk kademede dört ve altı numaralı zırh numuneleri, ikinci kademede ise sekiz numaralı zırh numunesi başarı ile insan bedenini, 10 m mesafeden 700 m/s hıza sahip mermiye karşı korumuştur [18].

Übeyli ve arkadaşları; çelikler, savunma uygulamalarında zırh malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmakta olması, ancak nispeten yüksek bir dayanıklılık dezavantajına sahip olması nedeniyle, hafif zırh üretimi için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Öte yandan, lamine kompozitler, aynı balistik koruma için çeliklere kıyasla zırh ağırlığını azaltmada önemli bir potansiyele sahip olması nedeniyle, balistik testler için çelik zırh olarak yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik ($50CrV_4$) seçilmiş ayrıca, zırh numunelerinin balistik performansını alümina/alüminyum lamine kompozit numunelerle karşılaştırmak için üç alansal yoğunluk değeri sabit tutulmuştur. Ayrıca çelik numunelerde sertliğin balistik performansa etkisi incelenmiştir. Ayrıca balistik testler sonrasında başarısızlık mekanizmaları araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, lamine kompozitler çeliğe kıyasla %26 ağırlık tasarrufu sağlanmıştır [19].

Chai ve arkadaşları; düşük hız etkisine maruz kalan fiber-metal laminatların dinamik tepkisi üzerine yayınlanan geçmiş ve güncel araştırma çalışmalarının kapsamlı bir incelemesini sunmayı amaçlamışlardır. Fiber metal laminatların tarihsel gelişimi önce ayrıntılı olarak gözden geçirilmiş ve önemli araştırmacılar ve katkıları kronolojik olarak tablo haline getirilerek ve gözden geçirilmiştir. Ayrıca, fiber-metal laminatların düşük hız etkisine ilişkin yayınlanmış deneysel, sayısal ve analitik çalışmalara ilişkin incelemeler de yer almakta ve fiber metal laminatların düşük hızlı darbeye karşı yapısal tepkisini etkileyen geometri ve malzeme bazlı parametreler olmak üzere iki ana parametre grubu hakkında ayrıntılı tartışmalar yapılmıştır. İnceleme, düşük hızlı darbe yüklerine maruz kalan fiber-metal laminatlar için gelecekte ihtiyaç duyulan çalışmalar hakkında ayrıntılı tartışmalarla sona ermiştir [20].

Bandaru ve arkadaşları; Kevlar® kumaş ve polipropilen (PP) matrinden yapılmış termoplastik esaslı kompozit zırhların balistik darbe tepkisini, balistik test standardı NIJ-STD 0106.01 Tip IIIA'ya karşı araştırmışlardır. Farklı kumaş tasarımına sahip zırh

paneller üzerine 9 mm full metal ceket (FMJ) ile balistik darbe testleri yapılmıştır. Balistik test sonuçları, 2B zırhın, 3B zırhlara göre hasara karşı %2,4-7 daha duyarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır [21].

Übeyli ve arkadaşları; lamine kompozitlerin, hafif zırh üretiminde büyük potansiyele sahip olduğu gerçeğinden yola çıkarak, Al_2O_3/Al_{2024} (alümina /alüminyum) lamine kompozitlerin 7,62×51mm zırh delici (AP) mermilere karşı düşük hızlı balistik davranışının deneysel çalışması yapmışlardır. Yapıştırıcı tipinin yanı sıra destek malzemesinin ve laminasyon tipinin mekanik özelliklerinin kompozit zırhın balistik performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak deformasyon modunu analiz etmek için kırılma yüzeylerinin bir incelemesi yapılmış, test sonuçları, alümina/alüminyum kalınlık oranı 1-3 aralığında olan kompozitlerde ön katman olarak alümina ve arka katman olarak Al2024-T6 kullanımının en yüksek balistik performansı koruduğunu göstermiştir. Ayrıca, poliüretan ile yapıştırılan kompozitler, yapıştırıcı tipinin kompozitlerin balistik performansı üzerinde kayda değer bir etkisi olmamasına rağmen, seramik karoların çatlamasına karşı epoksi ile bağlananlara göre daha fazla direnç gösterdiğini tespit etmişlerdir [22].

Medvedovski; zırh sistemleri için gelişmiş seramiklerin kullanılması, yeterli balistik koruma sağlayan merminin ve balistik darbe enerji dağılımının yenilmesine olanak tanıdığını belirten bir çalışmayapmıştır. Hafif ve ucuz seramik ve zırh tasarımlarının geliştirilmesi hem seramik zırh üreticileri hem de zırh kullanıcıları tarafından sürekli ilgi görmekte olduğunu ve çalışmasında, çoğunlukla geliştirme sırasında elde edilen farklı zırh seramiklerinin balistik performansının yanı sıra diğer tanınmış zırh seramik tedarikçileri tarafından üretilen malzemelerin ve tasarlanmış seramik tabanlı zırh sistemlerinin kapsamlı çalışmalarının sonuçlarını özetlemiştir. İncelenen zırh seramikleri, homojen oksit ve karbür seramikleri ve heterojen seramik malzemelerdir. Balistik performansı etkileyen söz konusu seramiklerin bileşimi, yapısı ve ana özellikleri incelenmekte ve analiz edilmektedir. Seramik zırhın uygun seçimi ve değerlendirilmesi için, yalnızca balistik enerjiyi dağıtma yeteneği ve üretim süreçlerinin optimizasyonu dahil olmak üzere tüm ilgili fiziksel özelliklerin ve mikro yapının bir kombinasyonu dikkate alınması gerekmekte olduğunun sonuncuna varılmıştır [23].

Kılıç ve arkadaşları; 7,62x54mm zırh delici mühimmata karşı yüksek sertlikte delikli plakaların önemli hasar mekanizmalarından bazılarını incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçlar, mermiyi olay yörüngesinden saptıran asimetric kuvvetler, mermi çekirdeği kırılması ve mermi çekirdeği burun erozyonu olan delikli zırh plakaları üzerinde etkili olan üç hasar mekanizması tanımlanmıştır. Simülasyon ve malzeme modeli parametrelerinin aslına uygunluğunu doğrulamak için 9 ve 20 mm kalınlığındaki monolitik zırh plakaları üzerinde ilk testler yapılmış ve delikli zırh plakaları üzerindeki balistik testlerin stokastik doğası, deliklere göre kurşun çarpma bölgesi temelinde analiz edilmiştir. Mermi arızasının mekanizmalarını belirlemek için kurşunsuz ve kurşunlu arıza modelleri de dâhil olmak üzere çeşitli senaryolar daha fazla araştırılmıştır. Mermi kırılma kriteri ve mermi burnu erozyon eşiğinin simülasyona dâhil edilmesiyle sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyum önemli ölçüde artmıştır. Sonuçlarda gösterildiği gibi, Ls-Dyna simülasyonları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum sağlanmış ve delikli plakaların yenilgi mekanizması açıkça gösterilmiştir [24].

Jena ve arkadaşları; 30° çarpma açısında ve 840 ± 15 m/s hızındaki 7,62 zırh delici mermiye karşı metal-metal ve metal-kumaş katmanlı yapıların balistik davranışını ve penetrasyon mekanizmasını inceleyerek, balistik sonuçları homojenik metalik zırh ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada aynı zamanda hedef katmanlar arasında boşluk bırakmanın etkisini de açıklamışlardır. Deneysel sonuçlar, incelenen malzemeler arasında en iyi balistik performansın metal-kumaş katmanlı yapılarda elde edildiğini göstermiştir. Balistik performanstaki gelişmeler, optik ve elektron mikroskobu, X-ışını radyografisi ve sertlik ölçüm cihazları kullanılarak numunelerin arıza modu ve kırılma mekanizmaları açısından analiz edilmişlerdir [25].

Borvik ve arkadaşları, asıl amacın düşük mermi hızı rejiminde küt burunlu silindirik mermilerden etkilenen Weldom 460 E çelik levhalarının davranışını incelemek olan çalışma için gerekli fiziksel bilgileri, darbe deneyi ortamında elde etmişlerdir. Hedef plaka için malzeme sabitleri belirlenmiş, önerilen model, plaka penetrasyon probleminin simülasyonlarında uygulanmış ve sonuçlar test verileri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal simülasyonlar ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum, balistik sınırın çok üzerindeki hızlar için bulunurken, sayısal simülasyonlarda balistik sınırın kendisi yaklaşık %10 daha fazla tahmin edilmiştir [26].

Santiago ve arkadaşları, alüminyum alaşımı ve kendinden takviyeli polipropilen (SRPP) bazlı, TFML'ler olarak adlandırılan yeni nesil fiber metal laminatları araştırmışlardır. Dairesel plakalar, sınırlandırılmış darbe yüklemesi koşulları altında deneysel olarak incelenmiş, TFML plakalarının, darbe koşulları altında cam elyaf/epoksi bazlı FML'lerden daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Metal/polimer arayüzü ve ara tabaka sertliği ile ilgili sınırlamalar detaylı olarak tartışılmıştır. Bu malzemenin ve bileşenlerinin tepkisi, yenilikçi donanım ve tekniklerin kullanılmasıyla geniş bir gerinim oranları aralığında karakterize edilmiştir. SRPP'nin mekanik özelliklerinin gerinim hızına bağlı olduğu kabul edildiğinden, bu özellikle önemlidir. Çalışmada darbe koşulları altında TFML'lerin tepkisini modellemek için kullanılabilecek kapsamlı deneysel veriler sunulmuştur [27].

Yunfei ve arkadaşları; küt ve sivri uçlu mermilerden etkilenen farklı malzemelerden çift katmanlı çelik plakaların balistik performansını bir gaz tabancası ile deneysel olarak incelemişlerdir. Balistik limit hız, her bir yapılandırma için, tabakaların sırası ve mermilerin burun şeklinin hedeflerin balistik direnci üzerindeki etkisinin araştırılması yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, yüksek mukavemetli ve düşük süneklikli malzemenin üst tabakasının çift katmanlı plakaları ve düşük mukavemetli ve yüksek süneklikli malzemenin alt tabakasının balistik sınır hızlarının, zıt tabaka düzeni konfigürasyonuna göre daha yüksek olduğunu göstermiştir [28].

Kolopp ve arkadaşları; havacılık uygulamaları için zırh çözümlerini belirlemek ve geliştirmek için sandviç yapılar üzerinde deneysel bir darbe çalışması yapmıştır. Amaçlanan en iyi konfigürasyonları, yani minimum ağırlık ve destek levha deformasyonları ile delinmeme olarak belirlemişlerdir. 127 g küresel mermi kullanılarak orta hızda darbeler (120 m/s) gerçekleştirilmiştir. Hedefler yapının arkasından basit dektekleme yapılmıştır. Sandviç yapı için iki potansiyel ön yüzey seçeneği belirlenmiştir: Birincisi; 3 mm kalınlığında AA5086-H111 alüminyum levhalar ve ikincisi; kuru aramid dikişli kumaşlar (8 ile 18 kat arası). Kuru dikişli kumaşlar, hafif bir yapı ve iyi bir delinme direncini birleştiren orijinal bir çözüm gibi görünmektedir. Ayrıca, ön katman ile iç yapı arasında güçlü bir bağlantı bulunmuştur. Darbe testleri, alüminyum kaplamalarla ilişkili alüminyum petek içyapının hafifletilmiş sonuçlar gösterdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, sade kumaş ön yüzey ve alüminyum petek kombinasyonu, genel bir ağırlık

düşüşü ile alüminyum sandviçlerden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir [29].

Safri ve arkadaşları; doğal elyaf bazlı polimer kompozitlerin düşük darbe performanslarından dolayı gelişmiş yapısal sistemlerde sınırlı uygulamaları olduğunu belirtmişler, bununla birlikte, doğal lifler, ürün ağırlığını azaltmak, malzeme maliyetini düşürmek ve dönüştürülebilirlik potansiyeli açısından zengin olduğunu ve nedenle, doğal/sentetik elyaflar, doğal/doğal elyaflar veya sentetik/sentetik elyafların bir kombinasyonundan yapılan hibrit kompozitler, bu malzemelerin uyarlanmış mekanik ve darbe özellikleri sayesinde yapısal uygulamalar için hem araştırmacıların hem de endüstrinin dikkatini çekmekte olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla üretilen hibrit kompozitlerin darbe özelliklerini incelemiş ve özellikle doğal ve sentetik liflerle güçlendirilmiş hibrit kompozitlerin darbe direnci ve penetrasyon davranışı ile bunların modern yapısal yapılara uygunluğunu belirtmişlerdir [30].

Sadighi ve arkadaşları; yeni malzeme türlerinin uygulanmasının arkasındaki fikir olarak metallerin ve fiber takviyeli kompozitlerin (FML'ler) olarak adlandırılan fiber metal laminatların uygun özelliklerini birleştirmek, yorulma performansında önemli bir iyileşmenin yanı sıra üstün darbe özelliklerine yol açtıklarından bahsetmişlerdir. Darbe yükü altındaki FML'lerin özellikleri ve bu tür yüklemelere dayanacak özelliklerini iyileştirme yolları, havacılık yapılarında ve diğer uygulamalarda özellikle önemine değinmişler [31].

Kpenyigba ve arkadaşları; farklı mermi burnu şekilleri kullanılarak ince çelik plakaların delinmesi işlemi ile ilgili deneysel ve sayısal bir çalışma rapor etmişlerdir. Çalışmada, mermi şeklinin malzemelerin balistik özelliklerini nasıl değiştirebileceğini analiz etmek amaç edinilmiştir. Testler sırasında 35 ila 180 m/s arasında geniş bir darbe hızı aralığı kapsanmıştır. Malzeme sabitlerinin tam olarak tanımlanması, titiz bir malzeme karakterizasyonuna dayalı olarak yapılmış ve bazı deneysel testlerin sayısal simülasyonları, doğrusal olmayan bir sonlu eleman kodu ABAQUS/Explicit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellerin, perforasyon sürecindeki fiziksel mekanizmaları iyi bir doğrulukla tanımlayabildiği bulunmuştur [32].

Aktaş ve arkadaşları; tek yönlü cam/epoksi laminatların darbe tepkisi, enerji profil diyagramları ve ilgili yük-sehim eğrileri dikkate alınarak araştırmışlardır. Hasar modları ve çeşitli darbe enerjileri altında laminatların hasar sürecini tartışmışlardır. Karşılaştırma için testlerde [0/90/0/90]_s ve [0/90/+45/45]_s olmak üzere iki farklı istifleme dizisi seçilmiştir. Penetrasyon eşiğini (P_n) belirlemek için aşırı enerjinin (E_e) darbe enerjisine (E_i) karşı değişimine dayanan alternatif bir yöntem sunulmuştur. İstifleme dizisi [0/90/+45/45]_s için penetrasyon eşiğinin [0/90/0/90]_s’den daha küçük olduğu bulunmuştur. Birincil hasar modunun, daha yüksek darbe enerjileri için fiber kırılması olduğu bulundu; oysa daha küçük darbe enerjileri için delaminasyona ve matris çatlaklarına neden olan girintiydi. Genel hasar alanlarının kontur çizimleri de çeşitli darbe enerjileri için gösterilmişlerdir [33].

Sonnenfeld ve arkadaşları; termoplastik malzeme darbe direnci özelliklerinden yararlanarak termoset reçine matrisli kompozitlerin darbe hasar toleransını geliştirmek için bir yöntem sunmuşlardır. Termoplastik/termoset çok katmanlı kompozitlerin iki konfigürasyonu göz önünde bulundurulmuşlardır; ilkinde numune yüzeyinde amortisör olarak termoplastik malzeme kullanılmış, ikincisinde ise ara katman olarak işlev görmesi için termoset katmanlar arasına termoplastik film ve termoset reçine eklenmiştir. Bu yöntemle elde edilen termoplastik ve termoset reçineler arasındaki yüksek yapışma, termoplastiklerin ilk katlardaki darbe hasarını dağıtma yeteneği ile birlikte bu yığılmış konfigürasyonun güvenilirliğini sağlamıştır. Son olarak, bu çok katmanlı kompozitin kompozit malzemelerin darbe direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir [34].

Boria ve arkadaşları; kompozitlerin, mükemmel mukavemet/ağırlık ve rijitlik/ağırlık/ özelliklerinden dolayı hafif yapılar için tercih edilen malzemeler olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmalarında hem takviyenin hem de matrisin polipropilenden yapıldığı, tamamen termoplastik bir kompozit yapılan deneysel bir kampanyanın sonuçlarını vermişlerdir. Hedef, bir ağırlık düşürme test makinesi kullanarak farklı darbe yükleme koşulları altındaki davranışını analiz etmişler, darbe kütlesinin ve hızın malzemenin enerji emme kapasitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Testler sırasında, malzeme sünek bir davranış gösterdi ve çatlak ucu olmadan genişletilmiş plastisite geliştirilmiştir. Ana hasar mekanizmaları iplik kaymasından oluştuğunu gözlemlemişlerdir [35].

Allen yaptığı bir çalışmada; serbest uçuşta küresel saçmalar için balistik denklemler, pelet hızının ve pelet mesafesinin uygun şekilde ölçeklendirilmesi yoluyla basitleştirilmiştir. İki farklı sürtünme katsayısı eğrisinin ortalaması alınarak, atış peletlerine ve yuvarlak bilyelere uygulanabilen tek bir eğri elde edilmiş, ortaya çıkan S-şekilli sürüklenme katsayısı eğrisi, üç düz çizgi parçası ile yaklaştırılır. Ölçeklendirilmiş balistik denklemler daha sonra tam olarak çözülür ve yörünge mesafesine göre hız ve uçuş süresi için basit formüller bulunur. Formüller, herhangi bir atmosferik koşulda herhangi bir bileşimin küresel atış peletlerine ve yuvarlak toplarına uygulanabilir. Formüller hızlı ve kolay hesaplamaya uygundur ve ayrıca kara kutu balistik hesaplayıcılarını anlama ve karşılaştırmada yardımcı olabilir. Çalışmada, gerçekçi sürtünme katsayıları kullanılarak pompalı tüfeklerin ve namlu yükleyicilerin küresel mermileri için doğru balistik formüllerin türetilmesiyle önceki araştırmalardan farklı olduğu sonucuna varılmıştır [36].

Gilioli ve arkadaşları; yapılan çalışmanın ana amacı, aşırı yükleme koşullarını tahmin etmek için özel bir malzeme kalibrasyonundan yararlanmaktır. Küçük bir kol balistik darbesi nedeniyle bir helikopter kuyruk rotor şanzıman şaftının hasarını incelemişlerdir. Hasar alanındaki tipik bir malzeme noktası, çatlak uzaması sırasında kesme deformasyonu yoluyla büyük bir basma gerilmesinden başlayarak kalan bağın çekme kırılmasına kadar karmaşık bir gerilme ve gerinim geçmişine maruz kalmaktadır. Mermi etkisinin sayısal simülasyonunun sonucu, 7,62mm küresel merminin helikopter şaftına karşı balistik etkisi üzerindeki deneylerle karşılaştırıldı. Hem hasar şekli hem de artık hız için çok iyi bir uygunluk bulunmuştur [37].

Camcı ve arkadaşı; balistik ile ilgili konularda çalışmak isteyen yeni araştırmacılara en çok kullanılan malzemeler ve balistik test yöntemleri hakkında genel bilgi vermişlerdir. Ayrıca balistikte en çok kullanılan FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) gibi benzetim yöntemleri ve sayısal yöntemler ile ilgili konuları özetlenmiştir. Ayrıca çalışma da, liflerle güçlendirilmiş kompozitlerin darbe dayanımı ve penetrasyon davranışı ile modern yapısal uygulamalara uygunluğu üzerine odaklanmıştır. Kompozit laminatların tarihsel gelişimi önce ayrıntılı olarak gözden geçirilmiş, ardından önemli araştırmacılar ve katkılarına göz atılmıştır. Ayrıca, kompozit laminatların düşük hız etkisine ilişkin yayınlanmış deneysel, sayısal ve analitik çalışmalara ilişkin incelemeler de yer almıştır. İlgili sonuçlar tartışılacak ve gelecekte çözülmesi gereken öneriler ele alınmıştır [38].

Pandya ve arkadaşları; epoksi reçinesi içinde dağılmış olan çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT: Multi-Walled Carbon Nano Tube) balistik darbe davranışının tahmini için analitik bir formülasyon sunmuştur. Formülasyon, mermi ile hedef arasındaki stres dalgası yayılımına ve enerji dengesine dayanmaktadır. Saf epoksi ve MWCNT dispersiyonlu epoksinin balistik darbe davranışı üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış, balistik sınır hız ve çeşitli mekanizmalar tarafından emilen enerji ile ilgili tipik sonuçlar sunulmuştur. Analitik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir eşleşme gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, MWCNT dispersiyonlu epoksi reçinesinin balistik darbe davranışının tahmini için analitik bir formülasyon sunulmuştur [39].

Phoenix ve arkadaşları; vücut zırhı uygulamalarında ilgi duyulan lifli malzemelerin balistik darbe tepkisi için analitik bir model geliştirmektedir. Yarım asırdır çözülmemiş bir problem olan küt burunlu bir mermi tarafından enine etkilenen, gerilmemiş bir 2D membrana odaklanıyor. Sabit mermi hızı altında, önce çekme patlaması dalgası ve onun ardından gelişen eğri koni dalgası için kendine benzer çözüm formları geliştirmişler, koni dalga cephesindeki sınır koşullarını eşleştirerek, koni dalga hızı ve gerinim dağılımı dâhil olmak üzere membran tepkisi için doğru bir yaklaşık çözüm elde edilebilmiştir [40].

Fang ve arkadaşları; dokuma kumaşların ve yumuşak vücut zırhının balistik direncini değerlendirmek için sonlu eleman modelleme ve simülasyonlarını kullanılması kuralından hareketle çalışmalarında, tek ve çok katmanlı dokuma kumaşların balistik etkiler altındaki tepkisini değerlendirmek için doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) simülasyonları gerçekleştirilmişlerdir. Hem tek hem de çok katmanlı darbelerin benzetim sonuçlarının, merminin artık hızları açısından deneysel verilerle iyi bir şekilde eşleştiği gösterilmiştir [41].

Crouch ve arkadaşları; personel vücut zırh sistemleri için tehdit spektrumunun hala yaygın bir ögesi olarak bilinen, AK47 küresel, 7,62 mm çapında ve 39 mm uzunluğundaki Yumuşak Çelik Çekirdek (MSC: Mild Steel Core) bir bilye mermisi için penetrasyon davranışını incelenmiştir [42].

Sun ve arkadaşları; yüksek hızlı ve düşük kütleli mermilerin neden olduğu domino etkisine karşı koruyucu tabakanın mekanizması balistik deneyler kullanılarak çeşitli kalınlık, yüzey yoğunluğu, kumaş yapısı ve çarpma hızı değerleri altında incelenmiştir. Sonuçlar, birim absorpsiyon enerjisinin genel olarak azaldığını ve ardından kalınlık ve

yüzey yoğunluğu ile arttığını göstermiştir. Kritik kalınlık değeri mevcuttu, en yüksek absorpsiyon UD (Unidirection kumaş) kompozitte gösterilmiş ve darbe hızı balistik sınırlamaya ulaştığında arka dışbükey maksimuma ulaşmıştır. Lifin gerilme kırığı, enerji absorpsiyonunun ana yoluydu. Son olarak koruyucu katman için dört katman tasarlanmıştır [43].

Rahman ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada, mevcut zırhlı çelik levhanın ağırlığının azaltılmasını gerektiren farklı kalınlık kombinasyonlarında yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımlı Al7075-T6 levhadan oluşan lamine metal panellerin hesaplama tabanlı balistik limitini sunmuşlardır. Monolitik yapılandırma, çift katmanlı yapılandırma ve üç katmanlı konfigürasyonun sayısal modelleri, ticari bir açık, sonlu eleman kodu kullanılarak geliştirilmiş ve 900 ila 950 m/s hız aralığında 7.62 mm zırh delici merminin etkisine maruz bırakılmıştır. Benzer alan yoğunluğuna sahip üç katmanlı yapılandırma panelleri, %20-30 ağırlık azalmasına tabi tutulan tüm panellerin 950 m/s'lik mermiyi başarıyla durdurduğu yerlerde çok daha iyi performans gösterdi. Bu nedenle, üç katmanlı konfigürasyonlar, ağırlık azaltmada performanstan ödün vermeden koruyucu bir yapı tasarlamada ilginç bir seçenek olduğu görülmüştür [44].

Garcia-Avila ve arkadaşları; yükleme altında büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilen düşük ağırlıklı, yüksek mukavemetli gözenekli bir malzemeler olan kompozit metal köpük paneller üzerine çalışmışlardır. Bu paneller, toz metalurjisi tekniği ve çelik matris içinde 2 mm çelik içi boş küreler kullanılarak üretilmekte ve yeni bir hafif kompozit zırh sistemi üretmek için seramik bir plaka ile birlikte kullanılmaktadır. Bu zırh sistemi, tek ve çok darbeli senaryolar için 7,62x51mm M80 ve 7,62x63mm M2 AP mermileri kullanılarak farklı darbe hızlarında balistik yükleme altında test edilerek gözlemlenmiştir [45].

Munoz ve arkadaşları; asimetrik lif dağılımına sahip hibrit bir 3D dokuma ortogonal kompozitin balistik etkisi altındaki mekanik davranışı, darbe testleri ve arıza mekanizmalarının X-ışını bilgisayarlı tomografi analizinin bir kombinasyonu vasıtasıyla incelemiştir. Kalınlık boyunca z-ipliklerinin varlığının, 2D dokuma kompozitlere kıyasla balistik performansı önemli ölçüde iyileştirmede farkedilmiştir, çünkü her iki durumda da hasar mermi yörüngesi çevresinde sınırlandırılmış olmuştur. Bununla birlikte, numunenin karbon yüzüne çarpması durumunda hibrit 3D dokuma kompozitler

tarafından yayılan enerji arttırıldı. Son olarak, artık hız eğrilerinin yanı sıra enerji yayılım mekanizmalarının, sonlu elemanlar analiz çerçevesi içinde gömülü eleman yöntemine dayalı sayısal simülasyonlar vasıtasıyla yeniden üretilebileceği gösterilmiştir [46].

Pandya ve arkadaşları; hibrit kompozitlerin balistik çarpma davranışı üzerine deneysel çalışmalar sunmuşlardır. Çalışmalar için, düz dokuma E-cam kumaş ve epoksi reçineli 8H saten dokuma T300 karbon kumaş kullanılarak yapılan dört tip simetrik hibrit kompozittir malzemeler düşünülmüştür. Karşılaştırma için düz örgü E-cam/epoksi ve 8H saten örgü T300 karbon/epoksi üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Aynı laminat kalınlığı için sadece karbon kompozitlere kıyasla, T300 karbon tabakalarına E-cam tabakalar eklenerek kompozitler için balistik sınır hız V_{50} 'nin artırılabilceği gözlemlenmiştir. E-cam katmanları dışa ve karbon katmanlarını içeriye yerleştirmek, karbon katmanlarını dışa ve E-cam katmanlarını içeriye yerleştirmekten daha yüksek balistik sınır hızı sağlar. Ele alınan malzemeler için balistik çarpma sırasında deneysel hasar kalıpları elde edilmiştir [47].

Shanel ve arkadaşı; kompozit zırh üzerindeki mermi etkisinin bazı deneysel sonuçlarını, sayısal modelleme yaklaşımı ile birlikte tartışmışlardır. Balistik koruma için yüksek kaliteli kompozit sandviçlerin geliştirilmesi, araştırmanın yürütüldüğü bir hibe projesinin hedefidir. Geleneksel olarak, bir araç balistik koruması esas olarak ağır olan ve dolayısıyla manevra kabiliyeti gibi diğer araç parametrelerini olumsuz etkileyen metal bazlı zırh kullanılarak sağlanır. Bu günlerde kompozit veya hibrit sandviçler giderek daha popüler hale gelmekte, sayısal simülasyonlar, uygun balistik koruma tasarımını elde etmek için gereken deneylerin sayısının ve değişkenliğinin azaltılmasına izin vermektedir, ancak bunlar doğrulanmış modelleme yaklaşımları ve güvenilir malzeme verileri gerektirmektedir. Bu nedenle, farklı modelleme yaklaşımları test edilmiş ve bu modellerin deneysel verilere uyarlanma olanakları araştırılmıştır [48].

Tham ve arkadaşları; bir KEVLAR kaskına uygulanan balistik darbe üzerindeki deneyinden ve AUTODYN-3D simülasyonlarından elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Deneyde, hafif bir gaz tabancasından fırlatılan küresel mermi (11,9 g), kaska 205 m/s darbe hızıyla çarpmaktadır. Merminin KEVLAR kaskıyla etkileşimi, yüksek hızlı fotoğraf çekimi kullanılarak yakalanmıştır. Bu kask-mermi etkileşimi, AUTODYN-3Ds simülasyonundan elde edilenle karşılaştırıldı. Deneylerden elde edilen test sonrası hasar

fotoğrafları da simülasyonlardan alınanlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçlar, KEVLAR kaskının 358 m/s hızla hareket eden 9 mm'lik tam ceketli bir mermiyi yenebildiğini göstermiştir [49].

Palleti ve arkadaşları; metalik hedeflerin balistik darbe yükü altındaki performansını araştırmışlardır. Hedef performansına göre tüm balistik çarpma olayı, dinamik plastik penetrasyon, küresel şişkinlik oluşumu, şişkinlik ilerlemesi, tıkaç oluşumu ve mermi çıkışı şeklinde incelenebilmekte olup, merminin hızı, yer değiştirmesi, kuvveti, yavaşlaması ve hedef tarafından emilen enerji zamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. 85 J'lık gelen kinetik enerjiye kadar bir balistik darbe test cihazı üzerinde tipik deney çalışmaları yapılmıştır. Analitik tahminler ile deneysel gözlemler arasında balistik sınır hız ve enerji soğurma mekanizmaları açısından çok iyi bir ilişki gözlemlenmiştir. Önemli gözlem, iki farklı kalınlığa sahip hedeflerin, diğer tüm koşullar aynı kaldığında aynı balistik sınır hızını verebilmeleridir. Bu davranış, farklı hedef kalınlıklarına sahip farklı belirgin enerji soğurma mekanizmalarına dayalı olarak açıklanmaktadır [50].

O'masta ve arkadaşları; ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiber takviyeli polimer matris kompozit laminatın darbe tepkisini araştırmışlardır. Tabandan darbe alan numunelerin arka laminatına nüfuz edememesi, bu laminat sınıfında darbe basıncı kontrollü aşamalı nüfuz etme mekanizmasının yakın zamanda tanımlanmasıyla tutarlı sonuç elde edilmiştir [51].

Sorrentino ve arkadaşları; yaptıkları literatür araştırmasında zırhların balistik davranışını tahmin etmek için birkaç analitik model olduğunu, ancak bu modellerin genellikle fiber/matris hacim fraksiyonunun, fiberlerin mekanik özelliklerinin veya düşünülen kompozit laminat türlerinin bir fonksiyonu olarak balistik performansların sadece ortalama değerlerini sağlamakta olduğundan bahisle, söz konusu kompozit zırhların balistik sınır hızını öngörmek için literatürdeki bir modeli doğrulamak için deneysel testlerin sonuçları analitik balistik limitlerle karşılaştırılmıştır [52].

Srivathsa ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada pahalı ve zaman alıcı deneylere başvurmadan metalik malzemelerin zırh kalitesini değerlendirmek için belirli bir türde Balistik Performans Haritası oluşturmaya yönelik bir kavram sunmuşlardır. Haritalar esasen yazarlar tarafından daha önceki bir çalışmada geliştirilen ve malzemenin statik

mekanik özellikleri ve merminin çarpma hızı açısından tipik bir metalik zırhın performansını tanımlayan bir Balistik Performans İndeksine dayanmaktadır. Korelasyon, bir enerji dengesi yaklaşımı ve zırhın çarpma ucunda radyal akış ve arkada şişkinlik yaşadığı iki aşamalı bir delme mekanizması varsayılarak türetilmiştir. Haritalar, belirli bir çarpma hızı için akma dayanımının ve gerinim-sertleşme oranının bir fonksiyonu olarak eş-performans konturlarını sağlamıştır. Haritaların geçerliliğini göstermek için çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarına ait haritalar deneysel verilerle birlikte sunulmuştur [53].

Garcia-Avila ve arkadaşları; sert zırh sistemleri üretmek için ileri malzemelerin uygulanması, yüksek performanslı balistik korumayı getirdiğinden bahsederek, hafifliği ve yüksek darbeli enerji emme yetenekleri nedeniyle, kompozit metal köpükler, balistik zırh olarak uygulamalar için iyi bir potansiyel gösterdiğini vurgulamışlardır. Vuruş yüzü olarak bor karbür seramikler, kurşun kinetik enerji emici ara katmanı olarak toz metalurjisi tekniği ile işlenmiş kompozit metal köpük ve arka plakalar olarak 25 mm'den az toplam zırh kalınlığına sahip alüminyum 7075 veya Kevlar™ paneller kullanılarak yüksek performanslı hafif bir kompozit zırh sistemi üretilmiştir. Bu yeni kompozit zırh sisteminin balistik toleransı, ABD ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) 0101.06 standardına göre 7,62 x51 mm M80 ve 7,62 63 mm M2 zırh delici mermilere karşı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kompozit metal köpüklerin merminin toplam kinetik enerjisinin yaklaşık %60-70'ini etkili bir şekilde emdiğini ve NIJ 0101.06 standart kılavuzlarında belirtilenden daha az nüfuz etme derinliği ve arka plaka deformasyonu ile her iki mermi tipini durdurduğunu göstermiştir. Zırh sisteminin hasar mekanizmalarını ve enerji emilimini incelemek için Abaqus/Explicit kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmış, Sonuçlar, deneysel ve analitik sonuçlar arasında yakın bir uygunluk olduğunu göstermiştir [54].

Chen ve arkadaşları; küresel boşluk genişleme teorisi uygulayarak mermi burnunun direncinin ve mermi gövdesinin sürtünmesinin mermilerin nüfuz derinlikleri ve artık hızları üzerindeki etkileri dikkate alınan bir çalışma yapmışlardır [55].

Kılıç ve arkadaşı; gelişmiş hafif kompozit esaslı zırhlar mevcut olsa da, askeri araçlarda yüksek sertlikte çelikler, nispeten düşük maliyetle balistik koruma sağlamak için sıklıkla kullanılmakta ve araç yapısında yaygın kullanımı nedeniyle ilginç bir malzemedir. Bu durumdan hareketle yapılan çalışmada; 7,62 mm 54R B32 API ile sertleştirilmiş çelik

çekirdekli mühimmat için 500 HB zırh çeliği balistik limiti belirlenmiş, Lagrange ve düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (smoothed particle hydrodynamics SPH) simülasyonları, merminin 3 boyutlu modeli ve yüksek sertlikte zırh hedefi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma, seçilen benzetim metodolojisinden bağımsız olarak balistik sınırın nicel olarak iyi tahmin edilebileceğini, ancak perforasyon ve parçalanma sırasında niteliksel olarak bazı farklılıklar görüldüğünü göstermektedir. Sonuçlarda, tam mermi modeli ile Lagrange formülasyonu ile Ls-Dyna simülasyonları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum sağlanmıştır [56].

Rosenberg ve arkadaşları; yaptıkları bir çalışmada sert mermilerin polikarbonat (PC) hedeflere nüfuzu, konik uçlu girintiler ile derin girinti testleri ve zırh delici 7.62 mm mermiler için balistik delme sonuçlarını araştırmışlardır. Her iki deney setinde de penetrasyon direncinin pratik olarak aynı olduğunu görmüşler, bu da PC'nin hız hassasiyetinin penetrasyon direncinde önemli bir rol oynamadığı anlamına gelmektedir. Bu gözlemi, elastik sabitlerin basınç bağımlılığını ve PC'nin gücünü, sayısal simülasyonlarda uygulanan kurucu denkleme dâhil ederek açıklanmıştır. Bu basınca bağlı kurucu ilişki, PC hedeflerini etkileyen zırh delici mermilerin hem delme derinlikleri hem de artık hızları için benzetim sonuçları ve deneysel veriler arasında uyumlu olması ile sonuçlanmıştır [57].

Ansari ve arkadaşları; lamine GFRP kompozit levhanın balistik darbe altındaki davranışı hem deneysel hem de sayısal modelle incelemişlerdir. Artık hız, enerji emilimi, hasarlı alan ve hasar modlarının değişimi incelenmiştir. Boşluk etkileşimli ve Lagrange ağırlı kompozit plaka ve çarpma tertibatı için basitleştirilmiş bir üç boyutlu FE modeli sunulmuştur. GFRP kompozitin malzeme stres/gerinim kırılması kriterlerine dayalı aşamalı hasar analizi için malzeme karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Darbe sırasında lamine kompozitin doğrusal olmayan hacimsel tepkisi ile şok etkisi de dikkate alınmış, darbe nedeniyle kompozit plakada basınç dalgası yayılımı da incelenmiştir. Mevcut FE modelinden elde edilen sayısal sonuçlar, hasarlı uzunluk, enerji absorpsiyonu ve artık hızların değişimi açısından yakın anlaşmalar gösteren deneysel sonuçların sonuçlarıyla doğrulanmıştır [58].

Holmen ve arkadaşları; alüminyum alaşımı AA6070'in farklı temperlerdeki balistik özellikleri, O (tavlanmış), T4 (doğal yaşlandırılmış), T6 (pik dayanımlı) ve T7 (aşırı

yaşlanmış) temperlerde 20 mm kalınlığında hedef plakalar kullanılarak incelenmiştir. Farklı temperlerin gerilme şekil değiştirme davranışı, yarı statik gerilme testleri ile karakterize edilmiş ve mukavemet, süneklik, gerilme sertleşmesi ve mukavemet açısından temper ile önemli ölçüde değiştiği bulunmuştur. Sayısal simülasyonlar, balistik sınır hızındaki aynı değişimi öngörülmüştür. Deneylerde bulunan temper durumu ile ilgili olarak, ancak sonuçlar tutarlı bir şekilde muhafazakâr taraftaydı. Ayrıca silindirik boşluk genişleme teorisi (CCET) kullanılarak analitik hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen balistik sınır hızlarının deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur [59].

Reddy ve arkadaşları; balistik tehditlere karşı hafif zırh kullanımı, hareket kabiliyetini ve bekasını arttırmak için önemini belirtmişler ve yaptıkları çalışmada, yumuşak çelik çekirdek mermi kullanan bir E-cam/fenolik kompozitin balistik performansını, laminat kalınlığının ve mermi çarpma hızının bir fonksiyonu olarak açıklamışlardır. Sonuçlar, enerji absorpsiyonu ve laminat kalınlığı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Kalınlık ve hızın laminatlardaki enerji absorpsiyonuna etkisi, hedef ve mermi arasındaki etkileşim süresi açısından açıklanmıştır. Ayrıca merminin deformasyonunun vuruş hızından çok hedef kalınlığına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Hedef kalınlıktaki değişikliklerle birlikte kırılma mekanizmalarındaki değişiklikler de açıklanmaktadır [60].

Gamache ve arkadaşları; basınç dalgası iletimi ve darbe üzerinden viskoelektrik faz geçişine uğrayan ön yüz laminatı, ikincisi değişen ince metal katmanlarından ve bir yumuşak polimerden oluşan çelik substratların balistik penetrasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Laminat/çelik yapıların balistik özellikleri, geleneksel askeri zırhlardan önemli ölçüde daha iyidir. Bu gelişmiş performansın üç kaynağı vardır: viskoelastik polimer tarafından büyük enerji emilimi, malzemenin önemli ölçüde gerinerek sertleşmesi ve darbe kuvvetinin yanal yayılması. Yalnızca yüksek gerinim hızlarında aktif olan bu mekanizmalar, laminatta kullanılan belirli metale değil, polimerin kimyasal yapısına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [61].

Monero ve arkadaşları; Kevlar 29 darbeye dayanıklı kompozitler, balistik dirençli zırh dâhil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için yaygın olarak kullanılmakta olduğunu, kompozitin enerji absorpsiyonundaki ilerleme ve ağırlığın azaltılması, uygulamadaki

etkinliklerini artırmak için kritik öneme sahip olduğundan bahisle, termoset reçine sistemleri içine sertliği ve enerji emilimini artırmak için karbon nano tüpler ve nano boyutlu parçacıklar eklenmekte olduğunu belirtmişlerdir. [62].

Gama ve arkadaşı; Kalın kesitli kompozitlerin darbe, hasar gelişimi ve nüfuzu, açık sonlu elemanlar (FE) analizi kullanılarak araştırılmış, kalın kesitli kompozitler üzerinde tam bir 3D FE darbe modeli geliştirilmiştir [63].

Balos ve arkadaşları yaptıkları bir araştırmada; farklı çelik türlerinden yapılmış delikli plakaların balistik direnci, montajı ve geometrisini incelenmişlerdir. Çeşitli ısıtma işlem koşullarında farklı çelik türleri test edilmiş, hedef montajı da sert, eğik ve asılı olarak çeşitli yapılmıştır. Ayrıca, dört farklı delikli plaka geometrisi test edilmiş: iki plaka kalınlığı ve iki delik çapı. Balistik davranışları, 12,7 mm M-8 API mühimmatının on bir delikli plaka örneğine ateşlenmesinden kaynaklanan etki kullanılarak test edilmiştir. Bu numuneler, iki mesafede 13 mm'lik bir RHA plakası üzerine çelik bir çerçeve vasıtasıyla yerleştirilmiştir. Hedeflerdeki hasarlı alan, optimum delikli plakayı bulmak için tüm zırhın balistik direnciyle ilişkilendirilmiş, optimize edilmiş durumda delikli plakaların, beş parçaya kadar nüfuz eden çekirdeğin sık sık kırılmasını sağladığı bulunmuştur. Bu hasar, temel plakaya nüfuz edememiş, tüm zırh modelinin 1,76'lık kütle etkinliğini ve delikli plakanın 5,91'lik kütle etkinliğini sunmuştur [64].

Karagöz ve arkadaşı yaptığı bir çalışmada; bor katkılı sac çelikleri üzerine uygulanan değişik ısıtma işlemleri sonrası elde edilen mikroyapı karakteristiği ve bu mikroyapıların mekanik test değerleri karşılaştırmalı olarak vermiştir. Tüm bunların dışında darbe testi sonrası elde edilen kırılma yüzeyleri üzerine fraktografik incelemeler yapılarak kırılma karakteristiği belirlenmişlerdir [65].

Jindal ve arkadaşları; çok duvarlı karbon nanotüpler-polikarbonat kompozitler (MWCNT-PC: Multi-walled carbon nanotubes–polycarbonate composites), iki aşamalı bir solvent döküm yöntemi ve ardından sıkıştırılmalı kalıplama ile hazırlamışlar ve dinamik darbe mukavemetleri incelemişlerdir [66].

Ryan ve arkadaşları; ultra yüksek sertlikte zırh çeliğinin (UHA) balistik performansı, zırh delme (AP) ve parça benzetim mermilerine (FSP'ler) karşı bir dizi kalınlık ve eğim için değerlendirilmişlerdir. Bu çalışma ile birlikte, bu sonuçlar, plaka sertliğinin hem AP hem

de FSP tehditlerine karşı performans üzerindeki etkisinin ~ 300 ila 600 HB arasında değişen plaka sertliği aralığında karakterize edilmesini sağlamış, AP mermileri için, değişen mermi ve zırh kırılma mekanizmalarının etkisini tanımlayan tarihsel fenomenolojik eğrilerle iyi bir şekilde örtüşen karmaşık bir ilişki gözlemlenmiştir. [67].

Candan yaptığı çalışmada, aynı kat sayısındaki preslenen ve preslenmeden üretilen yüksek yoğunluklu polietilen (UHMW-PE) zırh plakalarının, hammadde aşamasından nihai mamül haline gelene kadar takip edilen genel üretim aşamalarını, dünya standartlarına uygun olarak zırhlara uygulanan test yöntem ve sonuçları ile hasar bölgesinin görüntülenmesinin terminal balistik açıdan değerlendirilmesini yapmıştır [68].

Gamble ve arkadaşları, bir seramiğin yüksek hızlı mermilerin nüfuz etmesine karşı korumadaki etkinliği, sadece sertliğine değil, aynı zamanda ufalandıktan sonra akışa karşı direncine de bağlı olduğunu belirtmiştir. Yapılan çalışmada, çelik küresel mermiler tarafından darbeye maruz kalan bir alümina kiremit ve iki çelik yüzey levhasından oluşan bir model zırh sisteminin tepkisini deneysel olarak araştırılmıştır [69].

Shim ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, hafif ve ince kurşun geçirmez malzemelerde uygulama için iyon değişimi ile güçlendirilmiş soda-kireç silikat camın balistik darbe direncini değerlendirmişlerdir. 3, 4, 8 ve 10 mm kalınlığındaki güçlendirilmiş camın maksimum eğilme mukavemeti değerleri, ana camdan 3,5 kat daha yüksek değerler olan sırasıyla 0,63, 0,68, 0,73 ve 0,77 GPa idi. Polikarbonat ve çok katmanlı savunma filmini güçlendirilmiş camla lamine ederek, standarttan %16 daha yüksek olan 973,8 m/s'lik bir balistik sınır hızına ulaşılmış, ayrıca, geçirgenlik kurşun geçirmez pencereler için standardı karşılamıştır [70].

Holmen ve arkadaşları, orta hızdaki darbelere maruz kalan 20 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların delinme direncini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. AA6070 alüminyum alaşımından dört farklı sertliğe sahip plakalara, 20 mm çapında sivri uçlu ve kör burunlu silindirik mermiler vurulmuş, bu alaşım için malzeme mukavemetinin levhaların delinmeye karşı direnci için belirleyici faktör olmadığını, ancak hedef levhanın parçalanmasını önleyen süneklik ve mukavemet kombinasyonunun daha önemli olabileceğini göstermişlerdir [71].

Demir ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, 7075 ve 5083 alüminyum alaşımları ile yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik AISI 4140'ın 7,62 mm zırh delici (AP) mermi altında darbe davranışları deneysel olarak incelemiştir. Çeşitli AISI 4140 ve 7075 alaşımlarına sertlik ve mukavemetin balistik davranışları üzerindeki etkisini görmek için ısıtıl işlemler uygulanmış ve deneysel sonuçlar, incelenen malzemeler arasında en iyi balistik performansın, P85 kg/m² alan yoğunluğu ile balistik korumayı sürdüren 7075-T651 alaşımında elde edildiğini göstermiştir [72].

Cwik ve arkadaşları, Dyneema HB26 ve Spectra 3124'ün çelik ve bakır Fragment Simüle Mermilerinin yüksek hız etkisine maruz kalması durumundaki balistik performansını değerlendirmişlerdir. Test edilen malzemelerde meydana gelen çeşitli enerji yayılım mekanizmalarının Dyneema HB26 ve Spectra 3124'ün çarpma olayı sırasında çok farklı şekilde deforme olmasına rağmen benzer bir balistik performansa sahip oldukları gözlemlenmiştir [73].

Zhou ve arkadaşı yayınladıkları bir makalede, yüksek hızlı darbeye maruz kalan balistik kumaşların stres dağılımı ve hasar moduna ilişkin sayısal araştırmaların sonuçlarını incelemiştir. Sonlu elemanlar (FE) modelleri oluşturulmuş ve balistik kumaş sistemlerinin tepkisini tahmin etmek için kullanılmıştır. Araştırma, kumaşın geliştirilmiş iplik-iplik sürtünmesi ile daha fazla darbe enerjisini absorbe edebildiğini doğrulamış, bu da özel dokuma teknikleri ile iplik-iplik sürtünmesinin artması durumunda balistik performansta bir iyileşme beklenebileceğini göstermiştir. FE simülasyonundan, iplik-iplik sürtünmesinin sadece mermiyi etkilemediği de tahmin edilmiştir. [74].

O'Masta ve arkadaşları; İki ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE; ultrahigh molecular weight polyethylene) ile güçlendirilmiş laminat için aşamalı penetrasyon mekanizmaları araştırmışlardır [75].

Tria ve arkadaşı yapmış oldukları bir araştırmada, küçük silah mühimmatının terminal balistiklerinde kullanılan yapısal modelleri ve sayısal algoritmaları deneysel olarak doğrulamak için yeni bir yöntem bilim sunmuşlardır [76].

Rao ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, sert bir kürenin yüksek mukavemetli düz dokuma Kevlar KM2 kumaşı üzerindeki etkisini, sürtünme ve malzeme özelliklerinin balistik performans üzerindeki etkisine odaklanarak LS-DYNA kullanılarak

modellenmiştir. Yüksek mukavemetli kumaş yapılarının balistik performansını incelemek için diğer değişkenler (kumaş mimarisi, sınır koşulları ve mermi parametreleri) ile birlikte sürtünme, elastik modül ve mukavemet gibi üç parametrenin tümü gerekli olduğu görülmüştür [77].

Del Rosso ve arkadaşları; darbe yükleme koşullarına maruz kalan mikro örgü takviyeli polimer kompozitlerin (mBRPC) davranışını sunan bir çalışma yapmışlardır. Farklı mimarilere, örgü açılara ve farklı malzemelere (Kevlar ve Dyneema) sahip mikro örgülerle güçlendirilmiş kompozitler üzerine 7,94 mm çelik bilyeler ateşlenerek balistik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Çarpma olaylarını kaydetmek için iki yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, tek yönlü fiberlerle yapılan kompozitlere göre, belirli mBRPC türleri için balistik limitte %19,5'e varan bir iyileşme ortaya çıkarmıştır. Etkilenen laminatların görsel incelemesi, farklı mimarilere ve farklı malzemelere sahip mikro örgülerle güçlendirilmiş kompozitler için benzer deformasyon mekanizmalarını ortaya çıkarmıştır. Çarpma tertibatının laminatların katmanları boyunca kayması, üretilen kompozitlerin balistik özelliklerini olumsuz etkilemiş olabilir. Polimerik yapılarıdaki mikro örgülerin potansiyelinden tam olarak yararlanmak için takviye fazının düzenlenmesinde modifikasyonlara ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır [78].

Borvik ve arkadaşları, 5083-H116 alüminyum zırh plakalarını delen 7,62 mm APM2 mermiler ve sivri uçlu çubuklar için mekanizmaları ve baskın parametreleri anlamak için deneysel ve analitik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [79].

Forrestal ve arkadaşları, eğik darbelerde 6082-T651 alüminyum zırh plakalarını delen 7,62 mm APM2 mermilerin mekanizmalarını ve baskın parametrelerini anlamak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. 7,62 mm çapında, 10,7 g, APM2 mermi, pirinç bir ceket, kurşun dolgu ve 5,25 g, sivri uçlu, sert çelik çekirdekten oluşmaktadır. Pirinç ve kurşun, hedefler tarafından APM2 mermilerinden sıyrıldı, bu yüzden hem APM2 mermilerle hem de sadece sert çelik çekirdeklerle balistik deneyler yapmışlardır. Bu mermiler, bir tüfekten 400 ile 1.000 m/s arasındaki vuruş hızlarına, normal çarpmada ($\beta = 0^\circ$) ve $\beta = 15^\circ$, 30° ve 45° eğik açılarda 20 mm kalınlığındaki plakalara ateşlendi. Tam mermi ve sert çekirdek için ölçülen artık ve balistik sınır hızları, normal çarpma ve tüm eğik açılar için yüzde birkaç içindeydi. Böylece merminin sert çelik çekirdeğinin delme işlemine hâkim olduğunu göstermişler, ek olarak, çelik çekirdekli mermiler için bir

boşluk-genişleme modelinden türetilen perforasyon denklemlerine giriş için 6082-T651 plaka malzemesi üzerinde büyük gerinim, sıkıştırma testleri gerçekleştirildi [80].

Übeyli ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, silisyum karbür takviyeli Fonksiyonel Gradyan Malzemenin (FGM) zırh delici mermi etkisi altında zırh malzemesi olarak kullanılma potansiyelini araştırmışlardır. Bu amaçla SiC- Toz metalurjisi yöntemi ile metalik ve seramik tozlarından farklı kalınlıklarda alüminyum alaşımlı (AA) 7075 fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit üretilmiştir. Balistik testten önce numunelerin çökme sertleşme davranışı belirlendi. test edilen numunelerde makro düzeyde bazı büyük çatlaklar ve tıkaç oluşumu tespit edilirken, bazı mikro çatlaklar, deforme olmuş ve numunelerin deformasyon bölgesine yakın bölgelerde uzamış taneler görülmüştür [81].

Hazell ve arkadaşları; farklı alan geometrilerine sahip ve iki farklı işleme yolu ile üretilen silisyum karbür kare karolar, balistik performanslarını değerlendirmek için polikarbonat katmanlara yapıştırılmıştır. Dört seramik karo boyutu test edildi: 85 mm, 60 mm, 50 mm ve 33 mm. Her durumda, bir polikarbonat yarı sonsuz desteğe artık nüfuz etme derinliği kaydedildi.. Araştırmada, her karoya merkezi olarak vurulduğunda optimum sistem performansını sağlamak için silikon karbür esaslı seramik yüzölçümü mozaik zırh sistemi tasarımında kullanılması gereken kritik bir karo boyutunun olduğunu gösterilmiştir [82].

Nguyen ve arkadaşları, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) kompozitin balistik performansını, 9 mm ila 100 mm arasında değişen panel kalınlıkları için 12,7 mm ve 20 mm kalibreli parçacık benzetim mermilerine (FSP'ler) karşı deneysel olarak belirlemişlerdir [83].

Uçak ve otomotiv endüstrilerinde polimer esaslı kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Fındık ve arkadaşı, bazı polimer esaslı kompozitlerin darbe verimliliğini deneysel olarak incelemiştir. Bu, elle yatırma işlemi kullanılarak bir miktar ısıyla sertleşen reçine kompozit numunenin imalatını içeriyordu. Daha sonra, mekanik ve C-tarama yöntemleri kullanılarak deneysel olarak elde edilen özelliklerle, yaygın olarak bulunan ateşli silahların bir seçimi kullanılarak balistik testler yapılmıştır. Sonuçlar göreceli olarak ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve bu tür malzemelerin zırhlı bir araçta kullanılmasının gelecek vaat eden avantajları vurgulanmıştır [84].

Gömeç yaptığı bir çalışmada, seçilen zırh çeliği levhaları ile çeşitli kombinasyonlar oluşturmuş, gerçek silah ve mermilerle atış yapılarak levhaların delinip delinmediği gözlenmiş, emniyetli bulunan hedef plaka bilgisayar ortamında analiz edilerek sonuçları karşılaştırmıştır [85].

Camcı ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, son on beş yılda balistik üzerine yapılan çalışmaları özetlemiş, malzeme ve metod yönü ile incelemiş, zırh koruma sistemlerinde ağırlıktan tasarruf edilmekle birlikte, hızlı deformasyon özelliklerinde yapılan iyileştirmeler özetlenmiştir [86].

Bir çalışmada, Shih ve arkadaşları; kesme kalınlaştırıcı sıvılar (STF'ler), epoksi veya poliüre elastomerler ile güçlendirilmiş aramid kumaşın darbe dayanımını balistik testlerle incelemiştir. Balistik test sonuçlarına göre, poliüre elastomerlerle işlem görmüş aramid kompozit yapı, birim alan yoğunluğu başına en fazla darbe enerjisini soğurduğu ve en iyi darbe direncine sahip olduğunu görmüşlerdir [87].

Tepedüzü ve arkadaşı, yaptıkları bir çalışmada farklı kalınlık ve farklı donatılara sahip seramik/kompozit yapıların balistik davranışını sayısal olarak incelemiştir. Silahlar, zırh delici 7,62 M61 AP mermileri kullanılarak kompozit modellerde dört farklı hızda ateşlenmiş, kompozit yapının ön yüzeyini oluşturan alümina seramikler üç farklı kalınlıkta kullanılmıştır. Kumaş takviyeli epoksi kompozit, üç farklı kalınlık oranında aramid/epoksi, S2 cam/epoksi, karbon-aramid/epoksi ve hibrit aramid/S2 cam/epoksi olmak üzere toplamda altı farklı bileşime sahip olacak şekilde modellenmiştir. Sonuç olarak, sayısal analiz, zırhların alansal yoğunluğu dikkate alınmadığında, mermilerin giriş-çıkış hızlarına dayalı olarak, verilerdeki alümina/S2 cam/epoksi kompozitlerinin diğerlerinden daha yüksek balistik performans gösterdiğini ortaya koymuştur [88].

BÖLÜM 3. BALİSTİK MALZEMELER

Balistik malzemeler, mermilere hareketli hızlı parçalara, şarapnellere direnç göstermek ve onları durdurmak için kullanılır. Balistik malzemelerin ortak özellikleri şunlardır:

Yüksek mukavemet ve tokluk: Balistik malzemeler, merminin kinetik enerjisini absorbe edebilmeli ve dağıtabilmelidir. Malzemenin çarpma anında hızından dolayı olan enerjisini emmesi, kırılmasını veya çatlamasını önlemek için yüksek mukavemet ve tokluk gereklidir.

Yüksek yoğunluk: Merminin çarpma momentumuna direnmek için yeterli kütleye sahip olması gerektiğinden, malzemenin yoğunluğu mermiyi durdurmak için önemlidir.

Sertlik: Sertlik, merminin malzemeye nüfuz etmesini önlemek için önemlidir. Malzeme ne kadar sertse, merminin delip geçmesi o kadar zor olur.

Düşük ağırlık: Balistik malzemelerin, mobilite ve taşınabilirlik özelliğine sahip olabilmesi için, zırhı giyen veya taşıyan kişinin veya aracın hareketini yavaşlatmamasını veya engellememesini sağlamak için hafiflik önemli özelliklerden birisidir.

Sıcaklık ve çevresel faktörlere karşı direnç: Balistik malzemelerin, çeşitli sıcaklık ve çevre koşullarında güçlerini ve bütünlüklerini korumaları gerekir.

Dayanıklılık: Balistik malzemelerin, etkinliklerini veya performanslarını kaybetmeden uzun süre ve kullanımda özelliklerini korumaları gerekir.

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak balistik panel ve koruyucu zırh tasarımında metal ve türevleri, seramik gibi ağır materyallerin yanında yüksek mukavemetli lifler ve polimer kompozitlerin kullanımı da artmaktadır [89].

Aşağıdakiler dâhil olmak üzere balistik amaçlar için yaygın olarak kullanılan birçok malzeme vardır: Bunlardan birkaçı şunlardır;

- Alüminyum

- Çelik
- Titanyum
- Seramik
- Yüksek performanslı Polietilen Plastikler (HPPE)
- Cam lifler
- Aromatik lifler
- Cam Takviyeli Levhalar (CTP)
- Balistik Kumaşlar
- Kompozitler

Karbon fiber, gibi kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve dayanıklılıklarından dolayı bazen balistik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, etkili balistik zırh oluşturmak için diğer malzemelerle birlikte kullanılabilir.

Genel olarak, balistik uygulamalar için malzeme seçimi, merminin tipi ve hızı, istenen koruma seviyesi ve uygulamanın ağırlık ve hareketlilik gereksinimleri dâhil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

3.1. Çelikler

Çelik, yüksek mukavemeti ve sertliği nedeniyle balistik uygulamalar için popüler bir malzemedir. Zırhlı araçlarda, vücut zırhlarında ve mermilere karşı korumanın gerekli olduğu diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Çelik, karbon ve diğer alaşım elemanlarının bir araya getirilmesiyle ortaya çıkan sert, dayanımlı ve esnek bir malzemedir. Demir (Fe) karbon (C) alaşım olan yapısında karbondan başka ve farklı oranlarda elementler içeren bir metaldir. Çelik özelliklerini içindeki farklı elementlerden ve kimyasal bileşimlerden alır ayrıca çeliğin içyapısı da çeliğe farklı özellik kazandırır. Çeliğin özelliklerini değiştirmek için değişik oranlarda alaşım elementleri katılabildiği gibi çeşitli ısı işlemleri ile (normalizasyon, temperleme, ıslah gibi.) içyapı kontrol edilebilir ve kullanım alanlarına göre değişik özellikler elde edilebilir.

Çelik, birçok endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı malzemeleri, otomotiv endüstrisi, gemi yapımı, silah ve savunma sanayii, tıbbi aletler ile

gastronomik amaçlı ürünler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çeliğin endüstriyel yönünün kuvvetli olmasında, onun geri dönüşüm özelliğinin etkisi de vardır.

Çelik içindeki bazı alaşım elemanlarının çeliğe verdiği özellikler ve etkiler şu şekilde sıralanabilir:

Karbon (C): Karbon, çeliğin ana alaşım elementidir. Karbon miktarı, çeliğin sertliğini, mukavemetini ve dayanıklılığını belirler. Düşük karbonlu çelikler genellikle daha yumuşak ve dövülebilirken, yüksek karbonlu çelikler daha sert ve dayanıklı olabilir.

Manganez (Mn): Manganez, çeliğin sertleşme sürecini iyileştiren bir alaşım elementidir. Aynı zamanda çelikte mukavemet ve sertlik artışına katkıda bulunur. Manganez, oksidasyon direncini de artırabilir.

Nikel (Ni): Nikel, çeliğin korozyon direncini artıran bir alaşım elementidir. Nikel ayrıca çelikte sertlik, mukavemet ve dayanıklılığı artırabilir. Nikel içeren çelikler genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır.

Krom (Cr): Krom, çeliğin korozyon direncini artıran ve paslanmaya karşı dayanıklılığı sağlayan bir alaşım elementidir. Krom ayrıca çeliğin sertliğini, mukavemetini ve oksidasyon direncini artırır. Paslanmaz çeliklerde yüksek krom içeriği bulunur.

Molibden (Mo): Molibden, yüksek sıcaklık dayanıklılığına ve korozyon direncine sahip çeliklerin oluşturulmasında kullanılan bir alaşım elementidir. Molibden, çeliğin sertliğini, mukavemetini ve kaynaklanabilirliğini artırabilir.

Vanadyum (V): Vanadyum, çeliğin mukavemetini, sertliğini ve aşınma direncini artıran bir alaşım elementidir. Vanadyum içeren çelikler, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Kükürt (S): varlığı ile çelik kırılgeanlaşır haddelenme özelliği zayıflar. Haddelenme özelliğinin artırılması söz konusu ise fosfor gibi kükürt de yabancı ve istenmeyen bir element olarak kabul edilir, en fazla izin verilen miktar %0,025 ile %0,050 arasında sınırlandırılmıştır.

Azot (N): Nitrür oluşturduğu için önemlidir. Çelikte yaşlanma meydana getirir. Çeliğin sertliğini, mekanik dayanımını ve korozyon dayanımını artırır. Uygun alaşımlı çeliklerin yüzeyine nüfuz ettirilerek aşınmaya dirençli ve sert bir yüzey tabakası elde edilir.

Sayılan alaşımlandırma elemanlarının çeliğe, yüksek dayanım, düşük maliyet, yüksek termal iletkenlik, yüksek ürün çıktısı ve üretilebilirlik gibi kritik genel özelliklerdir. Endüstride kullanılan birçok farklı çelik türü vardır ve her birinin kendine özgü özellikleri ve özellikleri vardır. Endüstride kullanılan en yaygın çelik türlerinden bazıları şunlardır:

3.1.1. St37 çeliği

ST37 çeliği, %0,20'ye varan karbon içeriğine sahip düşük karbonlu bir çeliktir, bu da onu nispeten yumuşak ve çalışılması kolay hale getirir. ST37 çeliğinin temel özelliklerinden bazıları şunlardır:

Mekanik Özellikler: ST37 çeliği 235 MPa akma dayanımına ve 360-510 MPa çekme dayanımına sahiptir. Bu, onu geniş bir uygulama yelpazesi için nispeten güçlü ve dayanıklı bir malzeme yapar. ST37 çeliğinin yoğunluğu 7,85 g/cm³ olup, diğer çeliklere göre nispeten düşüktür. ST37 çeliğinin termal iletkenliği nispeten düşüktür, bu da onu zayıf bir ısı iletkeni yapar. Elektrik iletkenliği ise; ST37 çeliğinin elektrik iletkenliği de nispeten düşüktür, bu da onu zayıf bir elektrik iletkeni yapar.

Korozyon Direnci: ST37 çeliği, zayıf korozyon direncine sahiptir ve nemli veya nemli ortamlarda paslanmaya eğilimlidir. Korozyon direncini artırmak için genellikle koruyucu kaplamalarla kaplanır veya işlenir.

Kaynaklanabilirlik: ST37 çeliği, çoğu geleneksel kaynak yöntemi kullanılarak kolayca kaynaklanabilir, ancak çatlamayı önlemek için ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlemi gerekebilir.

Genel olarak, ST37 çeliği, yapısal mühendislik, otomotiv üretimi ve makine yapımı dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun, çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Nispeten düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı, onu birçok farklı endüstri için popüler bir seçim haline getiriyor.

3.1.2. St52 çeliği

ST52 çeliği, çeşitli yapısal ve mekanik uygulamalarda kullanılan düşük alaşımlı, yüksek mukavemetli bir çeliktir. ST52 çeliğinin temel özelliklerinden bazıları şunlardır:

Mekanik Özellikler: ST52 çeliği 355 MPa (megapaskal) akma dayanımına ve 490-630 MPa çekme dayanımına sahiptir. Bu yüksek mukavemet, yapı mühendisliği, makine parçaları ve vinçler gibi ağır hizmet uygulamalarında kullanım için idealdir. St52 çeliğinin yoğunluğu 7,85 g/cm³ olup, diğer çeliklere göre nispeten düşüktür. St52 çeliğin termal iletkenliği nispeten düşüktür, bu da onu zayıf bir ısı iletkeni yapar. Elektrik iletkenliği: ST52 çeliğinin elektrik iletkenliği de nispeten düşüktür, bu da onu zayıf bir elektrik iletkeni yapar.

Korozyon Direnci: ST52 çeliği, iyi bir korozyon direncine sahiptir ve standart karbon çeliğine göre korozyona karşı daha dayanıklıdır. Ancak yine de belirli ortamlarda paslanmaya eğilimli olabilir ve koruyucu kaplamalar veya işlemler gerektirebilir.

Kaynaklanabilirlik: ST52 çeliği, çoğu geleneksel kaynak yöntemi kullanılarak kolayca kaynaklanabilir, ancak çatlamayı önlemek için ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıl işlem gerekebilir.

Genel olarak, ST52 çeliği, özellikle yüksek mukavemet ve tokluk gerektirenler olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun, güçlü ve dayanıklı bir malzemedir. Korozyona karşı direnci ve kaynaklanabilirlik kolaylığı, onu inşaat, imalat ve mühendislik dahil olmak üzere birçok endüstride popüler bir seçim haline getiriyor [93].

3.1.3. Zırh çeliği-12560

12560 çelik, balistik amaçlarla kullanılan yüksek mukavemetli bir zırh çeliği türüdür. Zırhlı araçlar, tanklar ve personel taşıyıcılar gibi askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. 12560 çeliği, yüksek sertliği, tokluğu ve darbe direncinin yanı sıra yüksek sıcaklıklara ve korozyona dayanma kabiliyeti ile bilinir. Isıl işlem görmüş bir çeliktir, yani mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için bir ısıtma ve soğutma işlemiyle sertleştirilmiştir. 12560 çelik, balistik dirençli zırh oluşturmak için genellikle seramik veya polimer kompozitler gibi diğer malzemelerle birlikte kullanılır.

3.1.4. Zırh çeliği-46100

Balistik amaçlı kullanılan yüksek sertlikte bir zırh çeliği türüdür. Zırhlı araçlar, tanklar ve vücut zırhı gibi askeri ve kolluk uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Çeliğin yüksek düzeyde mukavemeti ve tokluğu vardır, bu da onu yüksek hızlı darbelerden kaynaklanan deformasyona ve hasara karşı oldukça dirençli kılar. Ayrıca aşınmaya karşı oldukça dirençlidir ve iyi bir ısı direncine sahiptir, bu da onu zorlu ortamlarda kullanıma uygun hale getirir. 46100 Zırh Çeliği, gücünü ve balistik direncini daha da artırmak için tipik olarak ısıtılma işlemine tabi tutulur. Balistik dirençli zırh oluşturmak için genellikle seramik veya polimer kompozitler gibi diğer malzemelerle birlikte kullanılır.

3.2. Alüminyum

Yumuşak ve hafif bir metal olmakla birlikte, mat gümüşümsü bir renktedir. Doğada genelde boksit cevheri halinde bulunur ve oksidasyona karşı direnci ile bilinir. Zehirli ve manyetik değildir. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa (mega pascal) iken alaşımlandığında bu değer 700 MPa'a çıkar. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır.

Tablo 3.1: Alüminyumun Mekanik Özellikleri.

Yoğunluk (g/cm^3)	2,69
Erime noktası ($^{\circ}C$)	660
Elastisite Modülü (GPa)	68
Akma Dayanımı (MPa)	265
Kopma Dayanımı (MPa)	400
Positions Oranı	0,36
Kopma uzaması min %	21
Sertlik (Vickers)	15
Kırılma Tokluğu (MPa. $\sqrt{m}$)	40
Kayma Modülü (GPa)	25

Alüminyum alaşımları bazen balistik uygulamalar için, özellikle araçlar ve yapılar için zırhlarda kullanılır. Alüminyumun yüksek mukavemet-ağırlık oranı, ağırlığın önemli olduğu uygulamalar için onu çekici bir seçenek haline getirir.

Alüminyum, onu birçok farklı uygulamada popüler bir malzeme yapan birkaç spesifik özelliğe sahiptir. Bu özelliklerden bazıları şunlardır:

Hafif: Alüminyum, diğer birçok metale kıyasla hafif olmasını sağlayan düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu özellik, onu, havacılık endüstrisi gibi ağırlığın kritik bir faktör olduğu uygulamalar için ideal bir seçim haline getirir.

Yüksek Mukavemet-Ağırlık Oranı: Düşük yoğunluğuna rağmen alüminyum, yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip güçlü bir malzemedir. Bu, hala hafifken önemli bir güç ve dayanıklılık sağlayabileceği anlamına gelir.

Korozyon Direnci: Alüminyum, yüzeyinde oluşturduğu ve daha fazla korozyondan korunmasına yardımcı olan ince bir oksit tabakası nedeniyle korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu, onu dış mekan uygulamaları ve deniz ortamları için popüler bir seçim haline getirir.

Termal İletkenlik: Alüminyum mükemmel bir ısı iletkenidir, bu da onu ısı alıcılar ve ısı eşanjörleri gibi uygulamalar için popüler bir seçim haline getirir.

Elektriksel İletkenlik: Alüminyum aynı zamanda mükemmel bir elektrik iletkenidir, bu da onu elektrik kabloları ve diğer elektrik uygulamaları için popüler bir seçim haline getirir.

Tablo 3.2: Alüminyum alaşımlarının seri numaralarının gösterimi [90].

Alaşım Serisi	Ana element	Ana elementin etkisi	Açıklama
1000	-----	Korozyona dirençli, düşük dayanımlı, iyi iletkenlik	Alüminyum içeriği %99 dan fazladır. Elektrik ve kimya sektörü ürünlerinde kullanılırlar.
2000	Bakır	İşlenebilirlik özelliği iyi, yüksek dayanım ve sertliğe sahiptir, ısıtıl işlem uygulamaya uygundur.	Alaşım elementlerinden ilki bakırdır. Ve ikincil için magnezyum tercih nedenidir. En iyi özelliği yakalayabilmek için ısıtıl işlem uygulanır. Bazı durumlarda mekanik özelliğini artırmak için yaşlandırma işlemi uygulanır
3000	Mangan	İşlenebilirliği çok iyi dayanım orta seviyededir.	İlk alaşım elementi mangan olduğundan ısıtıl işlem uygulanmaz
4000	Silisyum		İlk alaşım elementi silisyumun oranı çoğunlukla %12 ye kadar çıkmaktadır. Kaynak teli ve lehim alaşımı olarak kullanılırlar.
5000	Magnezyum	Orta ve iyi derecede dayanımı vardır. İşlenebilirliği iyidir.	Magnezyum elementi birincil alaşım elementidir. Dayanımının yüksek olması, kaynak yapılabilirliği ve korozyona direncinin yüksek olması nedeni ile gemi sanayinde geniş kullanım alanı mevcuttur.

6000	Magnezyum silisyum	Şekillendirebilirliği iyi, korozyona direnci ve mukavemeti yüksektir	2000 ve 7000 serisialaşımalar kadar dayanımı iyi olamamsına rağmen korozyon direnci iyidir ve işlenebilir özelliği yeterlidir.
7000	Çinko	Yüksek mukavemetlidir. Isıl işlemle sertleştirme yapılabilir.	Çinkonun oranı %1 ile %8 arasındadır. Dayanımını artırmak için Cu, Mg katılır ayrıca az miktarda Mn ve Cr eklenir. Uçak sanayinde geniş olarak kullanılır. Bu seride en önemli olan alaşımlar 7075, 7050 ve 7049'un oldukça iyi dayanım özellikleri vardır.

Süneklik: Alüminyum oldukça sünek bir malzemedir, bu da çatlama veya kırılma olmadan çeşitli şekil ve boyutlarda kolayca şekillendirilebileceği anlamına gelir.

Yansıtıcılık: Alüminyum son derece yansıtıcıdır, bu da onu yansıtıcı kaplamalar, aynalar ve güneş panelleri gibi uygulamalar için kullanışlı hale getirir.

Geri dönüşülebilirlik: Alüminyum, yüksek oranda geri dönüştürülebilir bir malzemedir ve bu da onu birçok uygulama için çevre dostu bir seçim haline getirir.

Genel olarak, alüminyumun benzersiz özellikleri onu havacılık, otomotiv, inşaat, elektrik ve paketleme endüstrileri dâhil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için popüler bir malzeme haline getiriyor. Hafifliği, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, termal ve elektriksel iletkenliği, sünekliği, yansıtıcılığı ve geri dönüştürülebilirliği onu çok yönlü ve değerli bir malzeme yapar.

Her biri kendine özgü özelliklere ve özelliklere sahip birçok farklı alüminyum alaşımı türü vardır. En yaygın alüminyum alaşım türlerinden bazıları şunlardır:

3.3. Titanyum

Titanyum, kimyasal sembolü "Ti" olan, dördüncü en yaygın element olan bir metaldir. Belirgin fiziksel özellikleri arasında, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve iyi termal iletkenlik bulunur. Bu özellikler, titanyumu birçok endüstriyel uygulamada popüler hale getirir. Titanyumun birçok ticari sınıfı bulunur, ancak en yaygın olarak kullanılanı "titanyum alaşımı"dır. Titanyum alaşımları, genellikle alüminyum, vanadyum, demir, molibden veya nikel gibi elementlerle alaşımlandırma işlemi ile istenen özelliklere göre ayarlanır.

Titanyumun birçok avantajı vardır. Öncelikle, düşük yoğunluğu sayesinde diğer metallerden daha hafiftir. Bu nedenle, havacılık endüstrisinde uçak yapılarında ve motor bileşenlerinde yaygın olarak kullanılır. Aynı zamanda yüksek mukavemetine rağmen esnekliği de korur, bu da titanyum alaşımlarını yüksek gerilim altında kullanılabilen malzemeler haline getirir.

Titanyum ayrıca mükemmel korozyon direncine sahiptir. Suya, tuzlu suya ve birçok kimyasal ortama karşı dayanıklıdır. Bu özellik, denizaltılar, denizaltı boru hatları, gemi parçaları ve kimyasal işleme tesislerinde kullanımını popüler hale getirir.

Titanyumun diğer uygulama alanları arasında tıbbi implantlar (örneğin, yapay kalçalar, dizler ve diş implantları), spor ekipmanları (golf sopaları, bisiklet çerçeveleri) ve otomotiv sektöründe bulunur. Ayrıca, titanyum oksit, güneş kremlerinde ve boya pigmentlerinde kullanılan bir bileşiktir.

Titanyumun yüksek maliyeti ve zor işlenebilirliği, yaygın kullanımını sınırlayan faktörlerdir. Ancak, gelişen teknolojiler ve işleme yöntemleri, bu zorlukları azaltarak titanyumun daha geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır.

Tablo 3. 3: Titanyumun mekanik özellikleri

Yoğunluk (g/cm^3)	4,50
Erime noktası (C°)	1660
Darbe Enerjisi (Charpy) Joule	17,0
Çekme Dayanımı (MPa)	880
Kopma Dayanımı (MPa)	950
Sertlik (Vickers)	349
Kırılma Tokluğu (MPa. $\sqrt{m}$)	74,6
Kayma Modülü (GPa)	44

3.4. Seramikler

Seramik malzemeler genellikle balistik zırh oluşturmak için Kevlar gibi diğer malzemelerle birlikte kullanılır. Seramik plakalar, bir merminin enerjisini emmek ve dağıtmak, penetrasyonunu ve hasarını azaltmak için tasarlanabilir.

Balistik amaçlı kullanılan seramikler arasında bor karbür, silisyum karbür, alüminyum oksit, oksit borid, silisyum nitrit, zirkonya gibi malzemeler bulunur. Bu malzemelerin genellikle yüksek yansımaları ve düşük sıcaklıkları nedeniyle balistik zırh uygulamaları

tercih edilirler. Ayrıca, bu seramik malzemelerin düşük termal genleşme değerleri ve iyi yüksek sıcaklık geçişleri gibi özellikleri de vardır.

Zırh seramiklerinin mekanik özellikleri, belirli malzeme ve bileşime bağlı olarak değişebilir, ancak bazı genel özellikler şunları içerir:

Yüksek sertlik: Zırh seramikleri tipik olarak çok sert malzemelerdir ve bu da onları delinmeye ve mermilerin neden olduğu hasara karşı dirençli kılar.

Yüksek sıkıştırma mukavemeti: Zırh seramikleri ayrıca tipik olarak sıkıştırma yükleri altında çok güçlüdür, bu da bir darbeden gelen enerjiyi emmelerine ve dağıtmalarına yardımcı olur.

Düşük yoğunluk: Zırh seramikleri genellikle hafif malzemelerdir, bu da onları ağırlığın önemli olduğu balistik uygulamalarda kullanım için çekici kılar.

Yüksek sertlik: Zırh seramikleri sert malzemelerdir, yani yük altında deforme olma veya sapma olasılıkları daha düşüktür.

Kırılgan: Bazı zırh seramiği türlerinin bir dezavantajı, kırılgan olabilmeleridir, bu da belirli yük türleri altında çatlamaya veya kırılmaya yatkın oldukları anlamına gelir.

Düşük termal iletkenlik: Zırh seramikleri tipik olarak zayıf ısı iletkenleridir ve bu da kullanıcıyı bir patlama durumunda yanıklardan veya diğer termal yaralanmalardan korumaya yardımcı olabilir.

Genel olarak, zırh seramiklerinin mekanik özellikleri, sertlik, güç ve hafifliğe odaklanılarak balistik koruma için optimize edilmiştir.

Tablo 3.4: Seramik (Alümina %98 Al_2O_3) için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	3,90
Erime noktası (C°)	2054
Elastisite Modülü (GPa)	340
Basma Dayanımı (MPa)	2500
Kopma Dayanımı (MPa)	240
Posisons Oranı	0,22
Sertlik (Mohs)	9,0
Kırılma Tokluğu (MPa. $\sqrt{m}$)	4
Kayma Modülü (GPa)	140

3.4.1. Balistik seramikler

Seramikler, yüksek sıcaklık dayanımı, sertlik, kimyasal inertlik ve düşük yoğunluk gibi özelliklere sahip inorganik bileşiklerdir. Balistik seramikler ise, özellikle balistik koruma amaçlı olarak tasarlanmış seramiklerdir. Bu seramikler, çeşitli silah tiplerinden kaynaklanan yüksek hızlı mermilerin etkilerine karşı yüksek dayanıklılık gösterirler.

Balistik seramiklerin özellikleri, birçok faktöre bağlıdır, ancak genellikle aşağıdakileri içerir:

Yüksek sertlik: Seramikler, yüksek sertlikleri sayesinde yüksek hızlı mermilere karşı dayanıklı olabilirler.

Yüksek basınç dayanımı: Balistik seramikler, yüksek basınçlara dayanabilecek şekilde üretilirler. Bu özellikleri sayesinde, silahların neden olduğu yüksek basınçları absorbe edebilirler.

Düşük yoğunluk: Seramiklerin düşük yoğunluğu, balistik koruma amaçlı uygulamalar için önemlidir çünkü ağırlık taşıma kapasitelerini azaltır.

Yüksek sıcaklık dayanımı: Balistik seramikler, yüksek sıcaklık dayanımı göstererek, yüksek hızlı mermilere karşı etkili bir koruma sağlarlar.

Kimyasal inertlik: Seramikler, kimyasallara karşı direnç gösterirler ve bu özellikleri, balistik koruma amaçlı uygulamalar için önemlidir.

Balistik seramikler, genellikle zırh plakaları, zırhlı araçlar, helikopterler, uçaklar, gemiler, tanklar ve kişisel koruyucu ekipmanlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılırlar.

Düşük yoğunluk: Zırh seramikleri genellikle hafif malzemelerdir, bu da onları ağırlığın önemli olduğu balistik uygulamalarda kullanım için çekici kılar.

Kırılgan: Bazı zırh seramiği türlerinin bir dezavantajı, kırılgan olabilmeleridir, bu da belirli yük türleri altında çatlamaya veya kırılmaya yatkın oldukları anlamına gelir.

Düşük termal iletkenlik: Zırh seramikleri tipik olarak zayıf ısı iletkenleridir ve bu da kullanıcıyı bir patlama durumunda yanıklardan veya diğer termal yaralanmalardan korumaya yardımcı olabilir.

Genel olarak, zırh seramiklerinin mekanik özellikleri, sertlik, güç ve hafifliğe odaklanılarak balistik koruma için optimize edilmiştir.

3.5. Alternatif Zırh Malzemeleri

3.5.1. Kevlar

Kevlar, Dupont şirketi tarafından geliştirilen ve pazarlanan bir çeşit yüksek performanslı aramid elyaf malzemesidir. Kevlar, diğer aramid elyaf malzemeleri gibi yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek modül elastikiyet özelliklerine sahiptir. Kevlar, çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir, özellikle savunma, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde zırh malzemeleri, yüksek mukavemetli kablolar ve teller, lastik takviye malzemeleri, balistik koruma malzemeleri, kayışlar, halatlar ve daha birçok ürün için kullanılmaktadır. Kevlar, düşük yoğunluğu sayesinde, aynı mukavemet özelliklerine sahip diğer malzemelerden daha hafiftir, bu da uygulamalarında daha verimli bir performans sağlar.

3.5.1.1. Kevlar'ın mekanik özellikleri

Kevlar'ın mükemmel mekanik özellikleri, onu yüksek mukavemet, dayanıklılık ve darbe ve aşınma direnci gerektiren yüksek performanslı uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirir. Kevlar'ın öne çıkan mekanik özelliklerinden bazıları şunlardır:

Yüksek Çekme Mukavemeti: Kevlar çok yüksek bir gerilme mukavemetine sahiptir, bu da kırılmadan çok fazla stres ve gerginliğe dayanabileceği anlamına gelir. Aynı ağırlıktaki çelikten yaklaşık 5 kat daha güçlüdür.

Düşük Yoğunluk: Kevlar'ın yoğunluğu çok düşüktür, yani çok hafiftir. Bu, ekstra ağırlık eklemekten yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme olmasını sağlar.

Yüksek Elastikiyet Modülü: Kevlar'ın yüksek bir elastikiyet modülü vardır, bu da çok sert olduğu ve deforme edilmesinin zor olduğu anlamına gelir. Bu özellik, iyi rijitliğe sahip bir malzeme gerektiren uygulamalarda kullanışlı olmasını sağlar.

3.5.2. Aramid

Aromatik poliamid"den türetilen “Aramid”, kimyasal olarak "poli para fenilen terepitemid" olarak tanımlanır. Bu nedenle “para-aramid” olarak da adlandırılır. Üretim sürecine bağlı olarak meta aramid kumaşlar da mevcuttur. Bu kumaşlar ise genellikle ısı mukavemeti istenen, tutuşma istenmeyen durum ve malzemelerde kullanılmaktadır.

3.5.2.1. Aramid elyaflar ve kumaşlar

Aramid lifleri, güçlü kimyasal bağlarla birbirine bağlanan uzun molekül zincirlerinden oluşan aramid adı verilen bir polimer türünden yapılır. Bu, aşınmaya, ısıya ve kimyasallara karşı mükemmel dirençli çok güçlü ve dayanıklı bir malzeme ile sonuçlanır.

Aramid elyaflar, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarıyla bilinirler, bu da onları düşük ağırlık ve yüksek mukavemetin kritik olduğu uygulamalarda kullanım için ideal kılar. Kurşun geçirmez yelekler, kasklar, uçak parçaları, lastikler ve halatlar gibi ürünler yapmak için havacılık, askeri, otomotiv ve inşaat dâhil olmak üzere çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadırlar.

Aramid kumaşlar, bir tekstil malzemesi oluşturmak için aramid liflerinin birbirine dokunması veya örülmesiyle yapılır. Aramid kumaşlar, olağanüstü dayanıklılıkları, aşınma dirençleri ve dayanıklılıklarıyla bilinir. Koruyucu giysiler, yalıtım ve filtrasyon gibi yüksek mukavemet, ısı direnci ve alev geciktiriciliğin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

Tablo 3.5 : Dupont Kevlar49 aramid mekanik ve fiziksel özellikleri.

Yoğunluk (g/cm^3)	1,44
Çekme Dayanımı (GPa)	3,6
Basma Dayanımı (MPa)	165
Kopma Uzaması	%2,4
Posisons Oranı	0,36
Maksimum Çalışma Sıcaklığı(C°)	177
Çekme Modülü (g/denye)	1100
Young Modülü (GPa)	130
Sertlik (Vickers)	15
Erime noktası (C°)	450 C° de ayrışır

Aramid elyaflar ve kumaşlar, yüksek gerilme mukavemeti, darbe direnci ve aşınmaya, ısıya ve kimyasallara karşı direnci içeren istisnai özellikleri nedeniyle büyük saygı

görmektedir. Ayrıca hafif olmaları ve düşük ısıl büzölmeleri, onları yüksek performans ve güvenilirliğin gerekli olduğu birçok uygulama için ideal bir seçim haline getiriyor.

3.5.3. Nanotüp hibritler

Nanotüp hibritleri, farklı malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan nano boru yapıları olarak yönlendiriciler. Bu yapıların, nanotüplerin benzersiz mekanik, elektronik ve termal özellikleri ile diğer malzemelerin farklı özellikleri arasında birleştirilerek daha yüksek maliyetli malzemelerin elde edilmesini sağlayan olanaklar sağlar.

Örneğin, karbon nanotüp-polimer hibritleri, karbon nanotüplerin yüksek mukavemeti ve sertliği ile polimerlerin elastikiyeti ve işlenebilirliği arasındaki dengeyi sağlayarak daha dayanıklı ve esnek malzemelere olanak tanır. Şekilde, metal nanotüp hibritleri, metalin yüksek iletkenliği ile nanotüplerin benzersiz elektronik özellikleri arasında bir denge sağlayarak daha yüksek elektrik tüketimi sağlayan elektronik cihazlar Benzerine olanak tanır.

Nanotüp hibritleri, biyomedikal uygulamaları, malzeme bilimi ve nanoteknoloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanım olanaklarındaki olanaklar, çalıştırmanın devam etmesiyle birlikte daha da geliştirilebilir.

3.5.3.1. Nanotüp hibrit kompozit zırhlar

Nanotüp hibrit alaşımlı baret, miğfer, kask gibi malzemelerin farklı birleştirilmesiyle oluşan nano gövdeli, zırhın kullanılmasıdır. Bu yapıların, nanotüplerin kendine özgü mekanik ve fiziksel özellikleri ile diğer malzemelerin farklı özellikleri arasında birleştirilerek daha yüksek iletkenlik zırhlarının elde edilmesini sağlar.

Örneğin, karbon nanotüp-polimer kompozit zırhlar, karbon nanotüplerin yüksek dayanım ve sertliği ile polimerlerin elastikiyeti ve işlenebilirliği arasındaki dengeyi sağlayarak daha dayanıklı ve esnek zırhların sınırlarına inebilir. Şekilde, metal nanotüp hibritleri, metalin yüksek iletkenliği ile nanotüplerin kendine özgü fiziksel özellikleri arasında bir denge sağlayarak daha yüksek sarfiyat zırhlarının benzerlerini ayırt eder.

Nanotüp hibrit kompozit zırhlar, askeri, savunma ve güvenlik amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, daha hafif, daha dayanıklı ve daha etkili zırhların imkânlarını bire bir tanır. Ayrıca nanotüp hibrit kompozit zırhlar, balistik koruyucu

giysiler, araç zırhları, helikopter zırhları ve diğer savunma ve güvenlik uygulamalarında kullanılmaktadır.

3.5.4. Nylon ve CNT fiber

Naylon, sentetik bir polimer olan poliamidin bir çeşididir. Genellikle giyim, ev tekstili, otomotiv parçaları, halatlar ve kordlar gibi birçok farklı kılavuz kullanılır. Yüksek dayanım ve dayanım, aynı zamanda hafifliği de içeren özellikler nedeniyle özellikle güç taleplerini karşılamak için popülerdir.

CNT fiber ise karbon nanotüp (CNT) adı verilen çok ince bir karbon bileşenleri yapılandırılmış bir lif yapılarıdır. CNT fiber, hafif, yüksek dayanımlı ve yüksek hız özellikleri nedeniyle birçok farklı kılavuz kullanılır. Özellikle balistik koruma gibi yüksek dayanım gereksinimleri kullanılan bir malzemedir.

3.5.5. Nylon kompozitler

Naylon, poliamidin bir çeşidi olarak sentetik bir polimerdir ve farklı bileşenler kullanılan birçok kompozit malzeme kullanılır. Bu kompozit malzemeler, naylondan yapılmış matris malzemeleri ve farklı dolgu malzemeleri veya takviye malzemeleri içerir.

Örneğin, naylon takviyeli kompozit malzemeler, fiber cam, karbon fiber, aramid fiber veya doğal lifler gibi farklı özelliklere sahip olamaz ve ağırlıklarının çoğu naylon matris malzemesinden gelir. Naylon takviyeli kompozit malzemeler, otomotiv, koruyucu, inşaat ve hatta spor ekipmanları gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Naylon kompozit malzemeler, yüksek dayanım, dayanıklılık, düşük ağırlık ve kimyasal direnç gibi özelliklerin yanı sıra kolay imalat ve işleme özellikleri de üzerinde bulundurulur.

Tablo 3.6 : Nylon Polyamid için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	1,12
Erime noktası (C°)	220
Darbe Enerjisi (İzod çentikli) kJ/m^2	5
Çekme Dayanımı (MPa)	75
Esneklik Modülü (GPa)	3,10

3.5.6. Karbon fiber

Karbon fiber, karbon elementinin yüksek oranda örgülü bir formülüdür ve düşük yoğunluğa ve yüksek dayanıklılığa sahiptir. Karbon fiber, karbon filamentlerinin termal karbonizasyon ve grafitleştirme yoluyla üretilir.

Karbon fiber, diğer malzemelere göre çok daha hafif, daha sert ve daha güçlüdür. Bu özellikler sayesinde, insanları, otomotiv, spor endüstrileri, savunma sanayi ve uzay endüstrisi gibi birçok farklı ülkede yaygın olarak kullanılır.

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, karbon fiberin yüksek dayanım ve rijitlik özellikleriyle, polimer matris malzemelerinin kimyasal direnci, işlenebilirlik ve sonucunda özelliklerini birleştirir. Bu özellikler sayesinde, karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, uçak parçaları, otomobil parçaları, spor ekipmanları ve hatta yapay organlar gibi birçok farklı kılavuz kullanılır.

Karbon fiber, aynı zamanda yüksek dayanım, düşük sıcaklık ve kimyasal dayanıklılık özellikleri nedeniyle balistik zırh malzemelerinde de kullanılır.

3.5.7. Polimer kompozitler

Biri polimer matris, diğeri takviye malzemesi olan iki veya daha fazla bileşen malzemeden oluşan malzemelerdir. Dolgu veya güçlendirme olarak da adlandırılan takviye malzemesi tipik olarak lifler, parçacıklar veya pullar biçimindedir ve kompozite geliştirilmiş mekanik, termal ve/veya elektriksel özellikler sağlar.

Polimer kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri, sertlikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer kompozitlerin bazı yaygın uygulamaları şunları içerir:

Havacılık: Kanatlar, gövde ve iniş takımı gibi uçaklar için yapısal bileşenler.

Otomotiv: Gövde panelleri, süspansiyon sistemleri ve iç bileşenler gibi otomobiller ve kamyonlar için hafif parçalar.

İnşaat: Elyaf takviyeli polimerler (FRP) inşaat demirleri ve levhalar gibi beton için takviye malzemeleri.

Spor malzemeleri: Tenis racketleri, golf sopaları ve bisikletler gibi spor malzemeleri için yüksek performanslı malzemeler.

Tüketim malları: Ev aletleri, elektronik cihazlar ve mobilyalar.

Polimer kompozitlerin özellikleri, takviyenin tipine ve miktarına, polimer matrisin tipine ve özelliklerine ve işleme yöntemine bağlıdır. Kompozitlerde kullanılan bazı yaygın polimer matrisler arasında termosetler (örn. epoksi, polyester, fenolik) ve termoplastikler (örn. polietilen, polipropilen, naylon) bulunur. En sık kullanılan takviyeler cam elyafı, karbon elyafı, aramid elyafı ve nanoparçacıklardır (örneğin grafen, karbon nanotüpler).

Polimer kompozitler, metaller ve seramikler gibi geleneksel malzemelere göre çeşitli avantajlar sunar. Hafiftirler, korozyona dayanıklıdır ve kolayca karmaşık şekillere dönüştürülebilirler. Ayrıca, tasarım esnekliği, geliştirilmiş enerji verimliliği ve azaltılmış bakım maliyetleri sunarlar.

Tablo 3.7 : Polimer Kompozit için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	1,35
Erime noktası (C°)	182-210
Darbe Enerjisi (İzod çentikli) Joule	0,9-8,01
Çekme Dayanımı (MPa)	48
Sertlik (Shore)	68-83
Esneklik Modülü (GPa)	2,23-3,31

3.5.8. Polipropilen plastik esaslı malzemeler

Polipropilen, çeşitli plastik bazlı malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimer türüdür. Birçok kimyasala ve aside karşı direnci yüksek, dayanıklı ve hafif bir malzemedir. Polipropilen ayrıca mükemmel elektriksel yalıtım özellikleriyle bilinir ve bu da onu elektronik bileşenler için popüler bir seçim haline getirir.

Polipropilen bazlı malzemeler, lifler, filmler, levhalar ve kalıplanmış nesneler dahil olmak üzere çeşitli şekillerde üretilebilir. Polipropilen bazlı malzemelerin bazı yaygın örnekleri şunları içerir:

Ambalaj malzemeleri: Polipropilen, neme ve delinmeye karşı yüksek direnci nedeniyle genellikle torba, kap ve ambalaj filmi gibi ambalaj malzemeleri üretmek için kullanılır.

Tekstil: Polipropilen lifler, halı, döşeme ve jeotekstiller gibi çeşitli tekstil ürünlerinin üretiminde kullanılmaktadır.

Otomotiv parçaları: Polipropilen esaslı malzemeler, dayanıklılıkları ve darbelere karşı dirençleri nedeniyle tampon, ön panel ve kapı pervazı gibi otomotiv parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tıbbi cihazlar: Polipropilen, mükemmel kimyasal direnci ve düşük toksisitesi nedeniyle şırınga, tüp ve kap gibi çeşitli tıbbi cihazların üretiminde de kullanılmaktadır.

Genel olarak, polipropilen bazlı malzemeler çok yönlüdür ve mükemmel özellikleri ve karşılanabilirlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.5.9. E-(elektrik) cam

Elektrokromik zırh camı olarak da bilinen elektrikli zırh camı, uygulanan elektrik akımına veya voltajına tepki olarak optik özelliklerini değiştirebilen özel bir cam türüdür. Bu cam, tungsten oksit veya nikel oksit gibi elektrokromik malzemeler içeren çok sayıda ince film katmanından oluşur. Bir elektrik akımı uygulandığında, elektrokromik malzeme rengini ve şeffaflığını değiştirerek camın şeffaf ve opak haller arasında geçiş yapmasına izin verir.

Tablo 3.8 : E-Cam için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	2,56
Erime noktası ($^{\circ}C$)	1725
Çekme Dayanımı (MPa)	521
Kayma Modülü (GPa)	30

Elektrikli zırh camı, optik özelliklerine ek olarak bir miktar balistik ve darbe direnci de sağlar. Genellikle askeri araçlar, zırhlı araçlar, bina pencereleri gibi hem optik hem de koruyucu özelliklerin istendiği uygulamalarda kullanılır.

3.5.10. S-(strength) cam:

Balistik cam veya kurşun geçirmez cam olarak da bilinen zırh mukavemetli cam, mermi veya patlama gibi yüksek hızlı darbelere dayanacak şekilde tasarlanmış bir cam türüdür. Tipik olarak, bir çarpma enerjisini emmeye ve dağıtmaya yardımcı olan poliüretan veya polikarbonat gibi bir ara katman malzemesi ile birden fazla cam tabakasının katmanlanmasıyla yapılır.

Zırh mukavemetli camın spesifik mekanik özellikleri, kullanılan ara tabaka malzemesinin tipinin yanı sıra cam tabakalarının sayısına ve kalınlığına bağlı olarak değişebilir. Genel

olarak, yüksek gerilme mukavemetine, mükemmel darbe direncine ve iyi şeffaflığa sahiptir. Uygulamanın özel gereksinimlerine bağlı olarak yangına dayanıklılık, UV koruması ve ses yalıtımı gibi ek özelliklere de sahip olabilir.

S-glass, olağanüstü sağlamlığı ve sertliği ile bilinen bir tür yüksek performanslı cam elyafıdır. İnce lifler oluşturan burç adı verilen bir alettaki küçük deliklerden erimiş camın çekilmesiyle yapılan bir cam elyafı türüdür.

Tablo 3.9 : S-Cam için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	2,46
Esneklik Modülü (GPa)	86,9
Çekme Dayanımı (MPa)	4890
Kayma Modülü (GPa)	35

S-cam, mekanik özelliklerini iyileştirmek için ek kimyasal bileşenlerle güçlendirilmiş "E-cam" adı verilen özel bir cam türünden yapılır. S-camındaki "S", standart E-cam elyaflarına kıyasla üstün mukavemet ve sağlamlık sağlama kabiliyetini ifade eden "yapısal" anlamına gelir.

S-cam elyafları, havacılık, otomotiv ve askeri uygulamalar gibi yüksek mukavemet ve sertliğin gerekli olduğu çeşitli uygulamalarda kullanılır. Tenis raketleri, hokey sopaları ve oltalar gibi yüksek performanslı spor ekipmanlarının yapımında da kullanılır.

Diğer cam elyaf türleri ile karşılaştırıldığında, S-cam elyafları daha yüksek çekme mukavemetine ve elastikiyet modülüne sahiptir, bu da kırılmadan veya deforme olmadan daha yüksek yüklere dayanabilecekleri anlamına gelir. S-glass ayrıca yorulmaya ve sürünmeye karşı oldukça dirençlidir, bu da onu yüksek gerilimli uygulamalarda kullanım için ideal kılar.

3.5.11. Yüksek mukavemetli polietilen

HSPE olarak da bilinen yüksek performanslı polietilen HPPE, üstün mukavemet, dayanıklılık ve diğer arzu edilen özelliklere sahip olacak şekilde özel olarak tasarlanmış bir polietilen plastik türüdür.

HPPE, polimerin, polimer zincirlerini belirli bir yönde hizalayan özel bir çekme işlemine tabi tutulmasıyla yapılır. Bu hizalama, HPPE'ye standart polietilenden çok daha fazla olan yüksek gerilme mukavemetini verir.

HPPE'nin özellikleri onu, özellikle güç, tokluk ve dayanıklılığın önemli olduğu bir dizi uygulama için çekici bir malzeme haline getirir. Örneğin, HPPE, çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalar için halatların, kabloların ve ağların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemeti ve delinme ve aşınmaya karşı direnci nedeniyle balistik zırh ve kask ve vücut zırhı gibi diğer koruyucu ekipmanlarda da kullanılır.

HPPE'nin en önemli avantajlarından biri, onu otomotiv ve havacılık endüstrileri gibi ağırlık azaltmanın önemli olduğu uygulamalar için ideal kılan hafif yapısıdır. Ek olarak, HPPE kimyasallara, UV radyasyonuna ve hava koşullarına karşı mükemmel dirence sahiptir ve bu da onu zorlu ortamlara dayanabilecek dayanıklı bir malzeme yapar.

Tablo 3.10 : Polietilen (UHMWPE) için mekanik özellikler

Yoğunluk (g/cm^3)	0,9
Erime noktası (C°)	135
Darbe Enerjisi (Charpy) Joule	21
Çekme Dayanımı (MPa)	24,5
Sertlik (Shore)	60

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Balistik Test Düzeneği

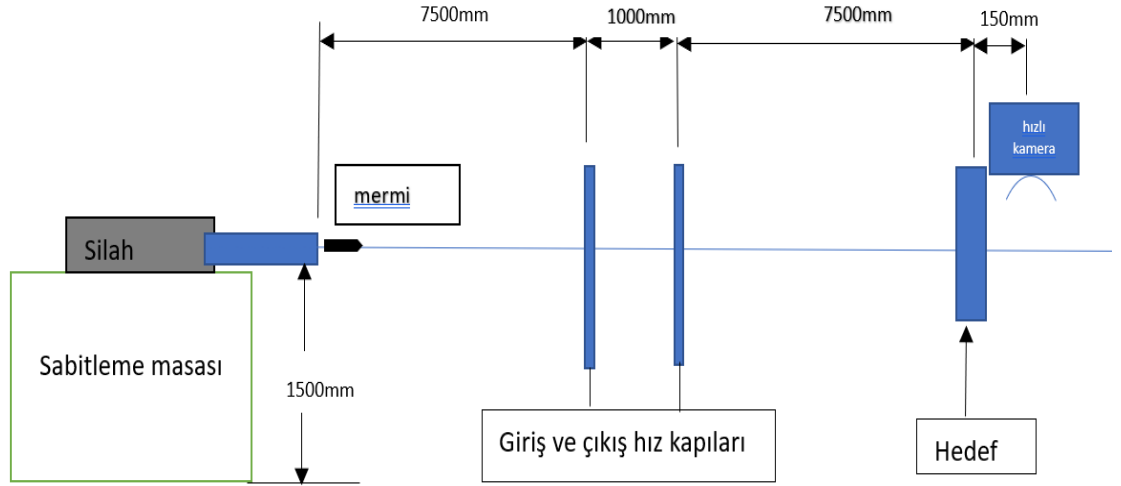
Test cihaz ve ekipmanları şekil 4.1'de gösterildiği gibi düzenlenmiştir. Tüfek mermileri için zırh panelinin rijit kalabilmesi için oluşturulan numune yapılar fikstür kullanılarak monte edilmiştir. Sabitlenmiş silah ucundan hedefin mesafesi 16 m dir. Bu mesafeden merminin yalpalama açısının ayarlanabilmesi için ısıtma atışları yapılmış ve zırh yapının normale açısı 0° olmasına dikkat edilmiştir. Namlu ucu ile zırh hedef noktası ortak eksenel çizgidedirler.

Balistik testlerin gerçekleştirilmesi esnasında iki değişik ölçüm durumu mevcuttur. Balistik performansı ölçen test ortamında şekilde görülen düzenden hızlı kamera eksik olması durumunda, hedefin hemen arkasına şahit folye yerleştirilerek kurşun veya parçalarının test numunesini tamamen geçip geçmediği ile ilgili gözlemlene imkânı bulunmaktadır. Bu ölçüme V_{50} , veya balistik performans deneyi denmektedir.

Diğer test ortamında şahit folye yerine hızlı kamera görev almakta ve merminin veya parçacıklarının test numunesini delip çıkması durumunda artık hızlarını ölçmekte ve giriş ile çıkış arasında hız farklarından test numunesinin balistik absorpsiyon değeri bulunabilmektedir.

4.1.1. Deneylerde kullanılan cihaz ve mühimmatlar

- Silah
- Mermi
- Giriş ve çıkış Kapıları- Hız ölçüm sensörleri
- Hedef Yapı
- Hızlı Kamera ,Şahit Plakalar
- Mikro ve Makro yapı ölçümleri (SEM ve EDS)
- Koparma testi cihazı (tensile test)



Şekil 4.1 : Deney ortamı balistik düzeneği şematik gösterimi.

4.1.1.1. Hız ölçüm sensörleri (kapıları)

Hız ölçüm kapıları veya sensörleri, bir nesnenin hızını ölçmek için kullanılan özel cihazlardır. Bu sensörler, bir nesnenin ölçüm kapılarını geçtiği süreyi ve nesnenin hızını hesaplamak için tasarlanmıştır.

Hız ölçüm kapıları genellikle bir çift olarak kullanılır. Bu iki sensör, ölçüm yapılacak olan alanda belirli bir mesafede birbirlerine yerleştirilir. Sensörlerden biri gönderici olarak çalışırken, diğeri ise alıcı olarak çalışır.

Gönderici sensör, genellikle bir kızılötesi ışık veya lazer ışını yayar. Bu ışın, merminin ölçüm kapılarından geçtiği anda, alıcı sensöre ulaşana kadar kesilir. Alıcı sensör, ışın kesildiğinde bir sinyal oluşturur ve sensörlerin bulunduğu cihaza bu sinyal gönderilir.

Hız ölçüm kapıları, ölçülen merminin hızını hesaplamak için ölçüm kapıları arasındaki mesafeyi ve ölçüm kapılarını geçen süreyi kullanır. Deneyimizde kullanılan hız ölçüm kapıları, merminin belirli bir mesafede ne kadar sürede geçtiğini hesaplayarak mermini hızını ölçer.

Hız ölçüm kapıları, endüstriyel uygulamalarda, araç yarışlarında ve spor etkinliklerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sensörlerin doğruluğu ve hassasiyeti, ölçülen nesnenin hızına ve mesafeye bağlı olarak değişebilir.

4.1.1.2. Hızlı kamera

Hızlı kamera, yüksek hızda hareket eden bir cismin hareketini yakalamak için kullanılan özel bir kameradır. Normal kameralardan çok daha yüksek bir kare hızı sunarak, hızlı kameraların oluşumunun hızlı hareketlerini ve değişimlerini daha ayrıntılı olarak gösterirler. Örneğin, bir kamera 1000 kare/sn çekim yapabilirse, çok hızlı hareket eden yerlerde çok daha yüksek hızlarda ve ayrıntılı olarak yakalayabilir.

Hızlı kameralar genellikle endüstriyel ve bilimsel amaçlar için kullanılır. Örneğin, bir hızlı kamera, bir arabanın çarpma testindeki davranışını inceleme veya bir patlamayı analiz etmek için kullanılabilir. Ayrıca yüksek hızlı cisimlerin oluşturduğu, yüzey tahribatını denetleme, mermi, top ve roket gibi hareketlilerin uçuşunu takip etmek veya hava hareketlerini analiz etmek gibi birçok uygulama alanı vardır.

Hızlı kameraların dezavantajları arasında yüksek maliyetler, büyük boyut, yüksek enerji tüketimi ve sonucunda bellek kapasiteleri vardır. Bunula birlikte gelişen teknoloji sayesinde bu dezavantajlar azalmakta ve hızlı kameralar daha fazla erişilebilir hale gelmektedir.

Hızlı kamera sistemleri genellikle yüksek hızda hareket eden nesnelerin hareketini algılamak için kullanılan sensörlerle donatılır. Bu sensörler, nesnenin hareketini algılar ve kamerayı tetiklemek için bir sinyal gönderir.

Kamera tetiklendiğinde kameraların içindeki deklanşör açılır ve ışığın kısa bir süre geçmesine izin verir. Bu, hareketli nesnenin hareket etmeyi durdurması ve bir çerçeve oluşturması için yeterli bir süredir. Kamera bu süre zarfında çok hızlı bir şekilde bir dizi fotoğraf çeker ve bu fotoğraflar daha sonra tek bir görüntü oluşturmak için birleştirilir.

Testlerde kullanılan hızlı kameranın ölçümü şu şekilde olmuştur. Roketsan kapalı balistik test laboratuvarında yapılmış ve DOC-00043729 Test Hazırlık Raporuna göre gerçekleştirilmiş zırh testidir. Testler sırasında numuneyi terk eden mermi çekirdeğinin hızını ölçmek amacıyla 1024x768 çözünürlükte 40000 fps hızlı kamera verisi alınmıştır. Testler sırasında yaklaşık 3 ms boyunca aydınlanma sağlayan ışık kaynakları 7-10 ms gecikmeler ile çalıştırılmıştır. Işık kaynaklarına tetik sinyali namluya 2 m mesafede yer alan akustik trigger ile sağlanmıştır.

4.1.1.3. Şahit plaka

Balistik deneylerde şahit plaka, bir mermi veya hareketli parçacığın etkisini değerlendirmek için kullanılan bir test aracıdır. Şahit plaka, mermi veya projektilin çarpmasıyla oluşan etkiyi kaydeden ve analiz eden bir ölçüme yardımcı malzemedir. Genellikle hedef yapının arkasına ve ince alüminyum folyo ile oluşturulur. V_{50} deneyinde merminin yapıyı geçip geçmediği folyonun üzerinde oluşan hasar ve deliklerden karar verilir.

Balistik testlerde, mermi veya projektilin hedefe olan etkisini anlamak ve değerlendirmek için şahit plakalar kullanılır. Şahit plakalar üzerindeki hasar, mermi hızı, penetrasyon derinliği, enerji transferi ve diğer parametreleri analiz etmek için kullanılır. Bu bilgiler, balistik performansı değerlendirmek, malzeme veya yapı tasarımını iyileştirmek ve koruyucu ekipmanların etkinliğini değerlendirmek gibi amaçlarla kullanılabilir.

4.1.1.4. 7.62mm (AP- armor piercing) zırh delici mermi

7,62 armor piercing mermi, 7,62 mm çapında bir mermi olup, genellikle zırh delici özelliği olan bir mermi türüdür. 7,62 armor piercing mermilerin bazı özellikleri:

Zırh Delici Özelliği

7,62 zırh delici mermiler, yüksek kinetik enerjiye sahip ve sert malzemeleri delmek için tasarlanmıştır. Genellikle sert çelik çekirdekleri ve özel tasarımları vardır.

Delme Kapasitesi

7,62 zırh delici mermiler, genellikle çelik zırh plakaları gibi dirençli hedefleri delme kabiliyetine sahiptir. Bu tür mermiler, yüksek hızlarda ilerlerken kinetik enerjilerini odaklayarak zırhın penetrasyonunu sağlar.

Kalibre

7,62 zırh delici mermiler, 7,62 mm çapında olup genellikle otomatik ve yarı otomatik silahlarda kullanılır. Bu çap, genellikle askeri tüfeklerde kullanılan standart bir kalibredir.

Kullanım Alanı

7,62 zırh delici mermiler, genellikle askeri ve güvenlik güçlerince kullanılan silah sistemlerinde tercih edilir. Zırhlı araçlara, zırhlı hedeflere ve beton yapıları delebilmek için kullanılırlar.

Performans

7,62 zırh delici mermilerin performansı, tasarımına, kullanılan malzemelere ve atış hızına bağlı olarak değişir. Bu tür mermiler, hedefi etkili bir şekilde delebilen yüksek kinetik enerji sağlayabilir. 7,62 zırh delici mermiler, savunma ve güvenlik alanında önemli bir rol oynar ve zırhlı hedeflere karşı etkili bir şekilde kullanılabilir. Ancak, bu tür mermilerin kullanımı sıkı düzenlemelere tabidir ve sivil kullanımı kısıtlıdır.

Tablo 4.1 : Balistik performans testlerinde kullanılan mühimmat özellikleri

Mühimmat	Maksimum hız, m/s	Ağırlık, g	Tanım ve tarifi
7,62x51mm	854	9,65	Nato Ball FMJ kurşun çekirdek
7,62x39mm	710-740	8	Rus Mermi FMJ. Yumuşak çelik çekirdek
7,62x63mm AP M2	830-868	10,8	Zırh delici M2 FMJ WC çekirdek
7,62x54R LPS	818	12	Rus mermi LPS aerodinamik çelik çekirdek
5,56x45mm SS109	930-1000	4	NATO Ball çelik uçlu
0,308 Win	838-859	9,7	Winchester 7,62x51mm FMJ mermi
0,308 Lapua	860	11	Lağua 7,62x51mm FMJ mermi

Tablo4.1 de değişik kalibredeki silah ve mermilerin özellikleri verilmiştir. Mermi hızları 700-1000m/s arasında değişim göstermektedir. Ağırlık ve çapları ve gerekli barut miktarları bu silahların detaylı özelliklerine bağlıdır.

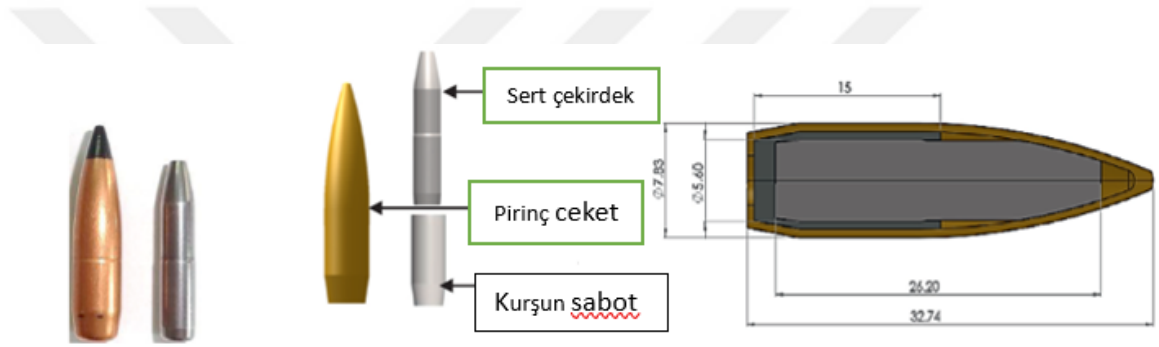
Tablo 4.2 : 7,62x51 mm NATO AP Zırh Delici Mermi teknik özellikleri [91]

MERMİ	
Mermi çekirdek çapı	7,62mm
Mermi çekirdek ağırlığı	9,5 gr
Mermi kovan ağırlığı	11,84 gr
Mermi çekirdek uzunluğu	28,6 mm
Barut Miktarı	3,05 gr

Tablo 4.3 : NIJ standardına göre mermi tanımlaması [91]

Tehdit seviyesi	Kalibre	Mermi Tanımlama	Nominal mermi çapı
III	7,62mm NATO	FMJ-SPIRE BT	7,62 mm

Şekil 4.2. de görülen mermi NIJ standartlarına göre tüfek mermisi görselidir. Tablo 4.2 ve 4.3. geometrik ve fiziksel özellikleri verilen bu mermi, testlerde kullanılan ve standartlarda tehdit seviyesi III olan mermidir. Bu merminin özelliği FMJ yani tam metal ceket olarak tanımlanmış, çekirdek içi daha yumuşak malzemeden olmasına rağmen dışına pirinç veya kurşun giydirilmiş ve zırhdelicici özelliği kazandırılmıştır.



Şekil 4.2 : Mermi testlerinde kullanılan 7.62 mm NATO normal mermi ve çekirdeği [79]

4.2.Mikro ve Makro Yapı Ölçümleri:

4.2.1.SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), yüzey görüntüleme ve analiz yapmak için kullanılan bir mikroskop türüdür. SEM'in çalışma prensibi şu adımlardan oluşur:

Elektron Kaynağı

SEM'de kullanılan temel bileşenlerden biri elektron kaynağıdır. Genellikle termoemiyon prensibi kullanılarak elektronlar üretilir. Elektronlar, elektron tabancası olarak adlandırılan bir cihaz tarafından oluşturulur.

Elektron Işıması: Elektronlar, elektron tabancasından hızlandırılır ve hedeflenen örnek yüzeyine yoğun bir elektron ışını oluşturacak şekilde odaklanır. Elektron ışını, örneğe düşerek örnekle etkileşime girer.

Elektron-Örnek Etkileşimi: Elektronlar, örnekle etkileşime girerken çeşitli etkileşim mekanizmaları gerçekleşir. Bu etkileşimler arasında saçılma, emilme, yavaşlatma ve ikincil elektron üretimi yer alır. Örnekteki farklı malzemeler ve yapılar, elektronlarla etkileşime farklı şekillerde tepki verir.

Sinyal Algılama: SEM, örnekle etkileşime giren elektronlardan kaynaklanan çeşitli sinyalleri algılar. Bu sinyaller arasında saçılan elektronlar, ikincil elektronlar, geriye saçılan elektronlar ve X-ışınları bulunur. Bu sinyaller, örneğin yüzey topografisi, bileşimi ve diğer özellikleri hakkında bilgi sağlar.

Sinyal İşleme ve Görüntüleme: Algılanan sinyaller, elektronik devreler tarafından işlenir ve görüntülenir. Sinyallerin işlenmesi, sinyal şiddetinin amplifikasyonunu, kontrast ayarlarını, odaklama ve tarama hareketini içerir. Sonuç olarak, örneğin yüzey görüntüsü elde edilir. SEM'in çalışma prensibi, elektron ışınının örnekle etkileşimi ve elde edilen sinyallerin algılanması üzerine dayanır. Bu şekilde, yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri elde edilir ve örneklerin detaylı analizi yapılabilir. SEM, geniş bir uygulama alanına sahip olan güçlü bir görüntüleme ve analiz aracıdır.

4.2.2. SEM'in uygulaması

Hazırlık: Öncelikle numunenin SEM analizi için uygun şekilde hazırlanması gerekmektedir. Numune, ince kesitler, yüzeyler veya toz şeklinde olabilir. Numunenin uygun şekilde temizlenmesi, kurutulması ve montajı önemlidir.

Vakum Odası: SEM çalışması vakum altında gerçekleştirilir. Bu nedenle, numune, SEM odasına yerleştirilir ve odanın vakum altında hava geçirmez bir şekilde kapatılması sağlanır. Vakum oluşturulması numunenin üzerindeki gazı çıkarmak ve elektron demetinin serbestçe hareket etmesini sağlamak için önemlidir.

Elektron Işını: SEM, numuneyi incelemek için yüksek enerjili elektron demetini kullanır. Elektron demeti, elektron kaynağından üretilir ve odaklanır. Bu elektron demeti, numunenin yüzeyine yönlendirilir.

Numune İnteraksiyonu: Elektron demeti numunenin yüzeyine çarptığında, numunedeki atomlarla etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda geriye saçılan elektronlar, ikincil elektronlar, geriye saçılan X-ışınları ve karakteristik radyasyonlar gibi çeşitli sinyaller üretilir.

Detektörler ve Görüntüleme: Üretilen sinyaller, SEM tarafından kullanılan detektörler aracılığıyla yakalanır. İkincil elektron detektörü, geriye saçılan elektronları yakalar ve numunenin yüzey topografyasını görsel olarak görüntüler. X-ışını detektörleri, numuneden gelen karakteristik radyasyonları yakalar ve kimyasal analiz için kullanılır.

Görüntü İşleme ve Analiz: Yakalanan sinyaller, bir bilgisayar aracılığıyla işlenir ve görüntülenir. Görüntüler, numunenin yüzey topografyasını, yapısını ve bileşimini incelemek için kullanılır. Görüntü analiz yazılımları, ölçümler, kalibrasyonlar, parçacık sayımları ve diğer analizler için kullanılabilir.

SEM, yüksek çözünürlükte görüntüler sunabilen ve mikro yapı analizi için önemli bir araçtır. Yüzey morfolojisi, parçacık boyutu, tabaka kalınlığı, kaplama homojenliği gibi birçok özelliği değerlendirebilir ve malzeme bilimi, nanoteknoloji, elektronik, tıp ve diğer birçok alanda yaygın olarak kullanılır. Ancak, SEM kullanımı özel eğitim gerektirebilir ve numunenin hazırlığı ve analiz süreci dikkatlice takip edilmelidir.

4.2.3. EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)

Bir numunenin kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. İşte EDS ölçümünün temel adımları:

1. Numune Hazırlığı: EDS ölçümü için numune, uygun şekilde hazırlanmalıdır. Numune yüzeyi temizlenmeli ve düzgün bir şekilde monte edilmelidir. Numunenin elektriksel olarak iletken olması önemlidir, bu nedenle bazı numuneler metal kaplama veya karbon kaplama ile hazırlanabilir.

2. EDS Cihazının Hazırlanması: EDS ölçümü için, numune SEM'e yerleştirildikten sonra EDS cihazı hazırlanmalıdır. Bu adımda, numune ve detektörler arasında doğru hizalama yapılmalı ve detektör parametreleri ayarlanmalıdır.

3. Spektrum Alımı: EDS cihazı, numune üzerinde elektron demeti taraması yaparken, numuneden gelen karakteristik X-ışınları yakalar. Yakalanan X-ışınları enerji dağılım spektrumu şeklinde kaydedilir. Bu spektrum, numunenin kimyasal bileşimini temsil eder.

4. Veri Analizi: Alınan enerji dağılım spektrumu analiz edilir. EDS yazılımı kullanılarak, karakteristik X-ışınlarının enerjileri ve yoğunlukları ölçülür. Bu veriler, numunenin kimyasal elementlerini ve bileşimini belirlemek için kullanılır. Karakteristik piklerin enerji değerleri, referans veritabanıyla karşılaştırılarak tanımlanır.

5. Sonuçların Değerlendirilmesi: EDS analizi sonuçları, numunenin kimyasal bileşimini ve element dağılımını ortaya koyar. Bu veriler, malzeme karakterizasyonu, numune kalitesi kontrolü, kimyasal analiz ve araştırma çalışmalarında kullanılabilir.

EDS ölçümü, SEM ile entegre edildiğinde, numunenin yüzey yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında kapsamlı bilgiler sağlar. Ancak, EDS ölçümlerinin doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için iyi bir hazırlık, kalibrasyon ve analiz süreci gerektirdiği unutulmamalıdır.

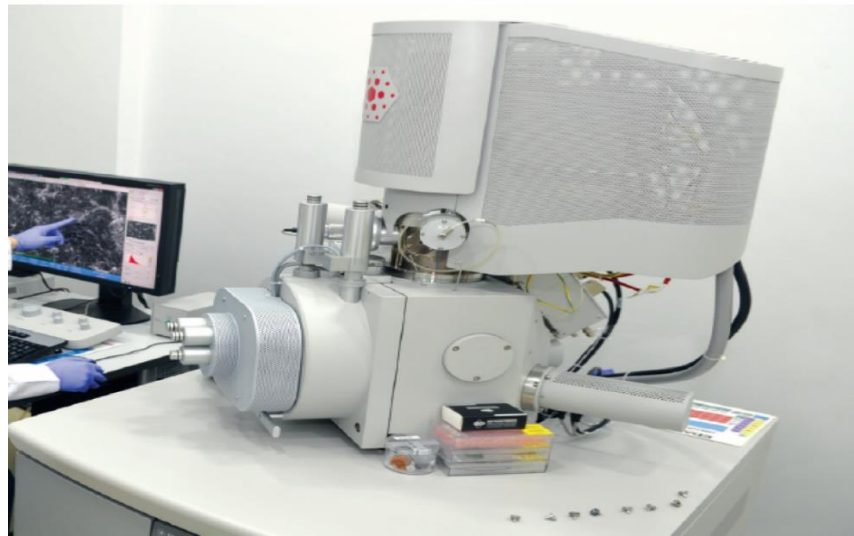
SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), yüzey görüntüleme ve analiz yapmak için kullanılan bir mikroskop türüdür. SEM cihazında kullanılan dedektörler, örnek üzerinde saçılan veya emilen elektronları algılamak ve görüntülemek için tasarlanmıştır.

4.2.4. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM)

Donanım ve Cihaz Bilgileri:

FEI Marka Quanta FEG 450 modelindeki Alan Emisyonlu Taramalı Elektron mikroskopları (FESEM) FEG elektron kaynaklı ve üç görüntüleme moduyla (yüksek vakum, düşük vakum, ESEM) numuneler için en geniş SEM uygulamalarına izin verir. Quanta 450 SEM sistemleri Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS), ve Geri Saçılan Elektron Difraksiyonu (EBSD) gibi analitik sistemler ile donatılmıştır. Ek olarak Alan Emisyonu Tabancalı (FEG) sistemleri WETSTEM dedektörü ile aydınlık alan (BF) ve karanlık alan (DF) örnek görüntülemesi yapabilirler. Donanımın / Cihazın Teknik Özellikleri: FESEM Görüntülemesi: İletken numuneler ve yüksek vakumda çalışmaya

uygun hale getirilmiş (kaplama vs. işlemler ile) yalıtkan numuneler yüksek vakumda iletken olmayan, organik, inorganik numuneler düşük vakumda (LFD Dedektörü) görüntüleme yapılabilir. ESEM Görüntülemesi: Tam ıslak ve hidrate olmuş, kirli ve gaz çıkaran örnekler 4000 Pa'a kadar genişletilebilen vakum koşulları altında ikincil elektron görüntülemesi yapılabilir. Beam Deceleration (Işın Yavaşlaması): Sistem elektron demetine hassas numunelerin incelenmesine olanak sağlayan, tablaya -4 kV'a kadar voltaj uygulayabilen elektron yavaşlatma özelliğine sahiptir. Wet-STEM: Cihaz hem bulk numuneleri hemde nano parçacıkları her türlü nem seviyesinde, ıslak ve sıvı içerisinde STEM modunda incelemeye imkân verip -20°C ve +50°C aralığındaki sıcaklıklarda analiz özelliğine sahiptir. Heating Stage: Numunelerin 1500°C kadar ısıtılıp incelenmesine imkân veren ve hedef sıcaklık 1 °C'lik aralıklarla ayarlanabilir yüksek sıcaklıklarda yüksek kalitede ikincil elektron görüntüleme sistemine sahiptir. EDS Spektrometresi: Sıvı azot gerektirmeyen Peltier soğutmalı 30 mm² aktif alanı bulunan ve Berilyum(Be) elementinden Uranyum (U)'a kadar olan elementleri tespit edebilen bir kapasiteye sahiptir. Kullanılan yazılım elementleri otomatik tespit etmektedir. EBSD/OIM Sistemi: Mega piksel çözünürlüğü minimum 1392(H/Y)x1040 (V/D)x12 bit olan EBSD sistemi ile fazlar, tekstür ölçümleri, tane boyutu, tane sınırı tipleri, kristalografik oryantasyonlar ve oryantasyon kaymalarının analiz edilmesinde kullanılmaktadır. Cihazın okuma hızı 18 MHz den hızlı olup pps'te en az 150 indeksleme yapabilme kabiliyetine sahiptir [91].



Şekil 4.3 : FE-SEM cihazı.

4.3. Çekme Deneyi

Çekme testi, bir malzemenin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir deney yöntemidir. İşte çekme testinin yapılabilmesi için temel adımları şunlardır;

Numune Hazırlığı: Çekme testi için uygun bir numune hazırlanmalıdır. Numune, genellikle standart boyutlarda ve belirli bir şekilde kesilir. Numune şekli ve boyutları, test standartlarına ve belirlenen gereksinimlere uygun olmalıdır.

Numune Montajı: Numune, çekme testi makinesinin kelepçelerine veya penslerine monte edilir. Numune, sabit bir tutma bölgesi ve test bölgesi arasında yerleştirilir. Numunenin doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve tutturulması, güvenilir sonuçlar elde etmek için önemlidir.

Test Makinesinin Ayarlanması: Çekme testi makinesi, uygun yük aralığı ve hızıyla ayarlanır. Bu ayarlar, numunenin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir. Test hızı genellikle belirli bir oranda (örneğin, mm/dakika) kontrol edilir.

Yük Uygulaması: Test başladığında, çekme testi makinesi numuneye yük uygular. Yük, numunenin uzama ve gerilme sürecini oluşturur. Numune, yavaş yavaş gerilmeye başlar ve yük arttıkça uzar. Numunenin gerilme davranışı, yük-uzama eğrisi olarak kaydedilir.

Veri Toplama: Çekme testi sırasında, test makinesi numunenin üzerine uygulanan yükü ve numunenin uzama miktarını ölçer. Bu veriler, gerilme-uzama eğrisini çıkarmak için kullanılır. Gerilme-uzama eğrisi, numunenin gerilme, gerinim, elastik sınır, akma mukavemeti, kopma mukavemeti ve uzama gibi mekanik özelliklerini gösterir.

Analiz ve Sonuçlar: Çekme testinin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler analiz edilir ve sonuçlar çıkarılır. Numunenin gerilme-uzama eğrisi, malzemenin mukavemet, esneklik, kırılma davranışı ve diğer mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlar.

Çekme testi, malzeme mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemidir ve malzemelerin tasarımı, kalite kontrolü ve performans değerlendirmesi için önemlidir. Bu elde edilen eğri altındaki kalan alan malzememin tokluk enerjisini verir. Bu enerji miktarı darbe dayanımı için gerekli enerjidir.

4.4. Balistik Performans Deneylerini Belirleyen Değişkenler

4.4.1. Malzeme özellikleri

Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bunların sonucunda balistik özelliğinde iyileştirmeler yapılabilmektedir. Bunlar, metaller için ısıtma işlemi uygulama, sertleştirmek için soğutma hızını kontrol ederek faz dönüşümü metodu ile özellik değiştirme veya haddeme ve dövme gibi plastik şekil verme ile mekanik özellikler artırma olabilmektedir. Metaller için alaşımlandırma ile farklı metal alaşımları ile mekanik özellikler artırılabilir. Sayılan işlemler, malzemenin spesifik özelliklerini dikkate alarak balistik performansını artıracak şekilde seçim yapılır ve uygulanır ve mekanik özelliklerin istenen düzeyde artırılmasını sağlar.

Metal dışı malzemeler için, kompozit oluşturarak iki veya daha fazla malzemenin özelliklerini bir araya getirerek özellik kazandırmak işlemidir. Bunlar metal ve metaldışı bileşenler aynı anda olabilmektedirler. Polimer matrisli kompozit malzemelerde, polimer matrisine takviye malzemesi olarak cam elyafı, karbon elyafı, kevlar gibi lifler eklenerek veya kimyasal bileşimi değiştirilerek mukavemet ve sertlik artışı ile birlikte balistik performans özelliği artırılabilir.

Metal dışı malzemelerde mekanik özellikleri artırılarak balistik performansı artırılabilir. Bu işlemler, metal malzemelerdeki gibi ısıtma işlemi yöntemleri gibi yaygın olmasa da çeşitli teknikler ve işlemlerle gerçekleştirilebilir. İşlemler, malzemenin yapı ve özelliklerini değiştirilerek mukavemet, sertlik, dayanıklılık ve balistik performans özelliğini iyileştirmektedir.

4.4.2. Yapı geometrisi

Hazırlanan hedef yapının, tehdit parçacığını ilk karşılaştığı yüzey yapısı ve yapının geometrisi, merminin ilk enerjisini almak ve hızını karşılamak yönü ile balistik performansı doğrudan etkiler. Zırhın kalınlığı, yekpare levha yapısı, tabakalı ise tabakalar arasındaki boşluk ve/veya ara malzemeler veya ön ve arka destek arasındaki iç yapının şekli balistik performansı direkt etkileyen değişkenlerdir.

Yapı içerisinde tehdit parçacığının penetre olması durumunda içerisinde onu köreltip hızını azaltacak bir engel olması önemlidir. Zırh perfore olarak parçacığın arka desteğinde aşması istenmeyen durumdur. Bu nedenle zırhın içinde engel ve/veya engeller tasarlanmalı bunu kaşılayacak malzemenin pozisyonu, kalınlığı, açısı, yapı geometrisinin değişkenleridir. Balistik performansın artması için bu değişkenlerin optimize edilerek tasarlama işlemi gerçekleştirilmelidir.

4.4.3. Diğer değişkenler

- Mermi geometrisi,
- Mermi malzemesi
- Mermi mekanik özelliği
- Mermi geliş açısı
- Mermi hızı

Mermi, tehdit parçacığının oluşturduğu değişkenler zırh tasarımında, dış parametre olarak kabul edilmiş ve yapı içerisinde gelen merminin yönü değiştirilebileceği teorisinden hareket edilmiştir. Zırh malzemesi seçimi, seçilen malzeme ile yapı geometrisi tasarımı ile bu tasarımın sonucunda, merminin içeride yönünü değiştirmek ve durdurmak ve enerjisini zırh içinde absorp edebilmek hedeflenilmiştir.

4.5. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Balistik yapıların performansını etkileyen değişkenler içinde daha çok yapıların tasarımı ilgi alanında olmaktadır. Mermi hızı, geometrisi, malzemesi, tehdit yönünü dış değişkenler varsayımı ile yapıların güçlendirilmesi gerekli olmaktadır. Ülkemiz makine imalat ve savunma sanayinin dış kaynaklı malzeme tedarikinde sıklıkla tıkanmalar ve güçlükler yaşanmaktadır. Bu doktora çalışması esnasında da bu durum malzeme tedariki esnasında yaşandı.

Bu durum; tablo 4.4. deki malzemelerin seçiminde, yerli ve ulaşılabilir malzemelerin tedarikine ayrıca bu malzemelerin balistik performansını artırmak ile ilgili çalışma alanına yönlendirdi. Ayrıca zırh için kullanılan teknolojik ürün ve malzemeler üzerine araştırmaların yeterliliği de malzeme seçiminde yönlenmeye etkisi oldu. Bu nedenle ulaşılabilir malzemelerin zırh yapısı olarak güçlendirilmesi ve onun yapı geometrisinin değiştirilmesine merminin önce yavaşlatılması sonra köreltilerek parçalanması ve yapı

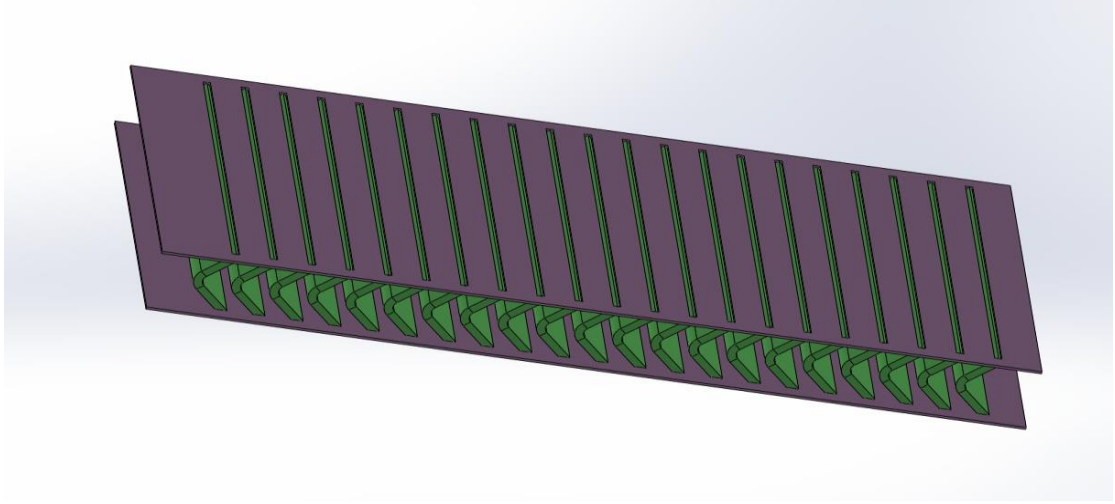
içinde durdurulması hedeflendi. Yani penetrasyona olması durumunda bile perforasyon engellenerek, korunması gereken bina, karakol, kontrol noktası gibi sabit hedefler için bir sağlam yapı oluşturulmaya çaba gösterildi. Çalışmanın daha ileri aşamalarında hareketli sağlam yapı oluşturulmaya çaba gösterildi. Çalışmanın daha ileri aşamalarında hareketli hedeflere uygulanabilmesi de mümkün olacaktır.

Tablo 4.4 : Bazı balistik malzemelerin fiziksel özellikleri

MALZEME	St37	St52	Galvanizli çelik	Al2024-T3	Al5487	Al6013	Al7075-T6
Yoğunluk (g/cm^3)	7,82	7,87	7,85	2,78	2,84	2,7	2,81
Erime noktası (C°)	1490	1480	1520	625	623	620	635
Elastisite Modülü (GPa)	200	200	200	73	70,3	84,1	71,9
Akma Dayanımı (MPa)	265	370	320	310	239	282	503
Kopma Dayanımı (MPa)	400	440	510	448	327	333	572
Kopma uzaması min %	21	15	35	18	28	25	11 %
Sertlik (Vickers)	143	131	140	128	87.6	106	160
Kırılma Tokluğu ($MPa.\sqrt{m}$)	56	58	56	39	117	40	27
Kayma Dayanımı (MPa)	80000	79000	65000	276	31,1	150	331

4.6 Birinci Grup Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Ortamı

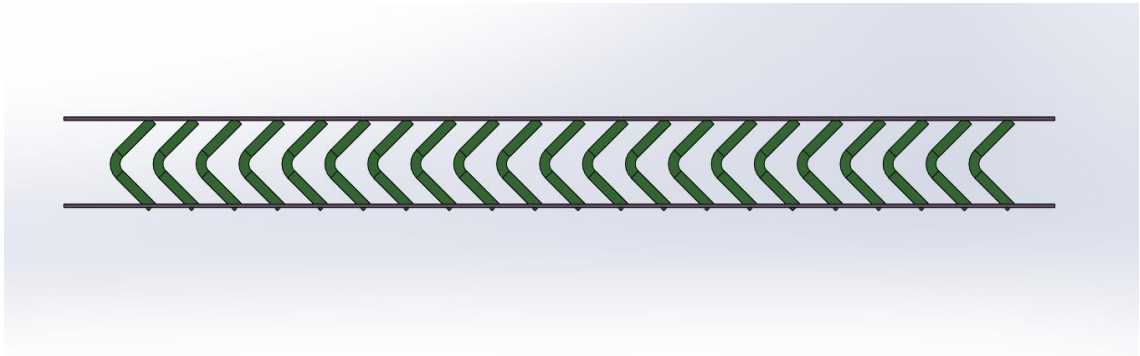
Deney için seçilmiş bazı malzemeler ve mekanik özellikleri Tablo 4.4. de verilmiştir. AutoCAD programı içerisinde deney numuneleri için düşünülen geometrik yapıların resimleri oluşturuldu. Numuneler daha çok metalik malzemelerin balistik davranışı ve balistik enerjilerini ölçmek ve performansını geliştirmek amacıyla yönelik hazırlandı. Deneyler iki grup ve iki ayrı ortamda gerçekleştirildi.



Şekil 4.4 : AutoCAD ile tasarlanmış yapı örneği.

İlk grup deneyler için numunelerin çizilen resimdeki boyutlara uygun kesimler için hizmet alımı yapılarak Endüstri Mamülleri Sanayii (EMS) şirketinde gerçekleştirildi. Şekil 4.4'deki yapının oluşturulabilmesi için, lazer kesim makinesinde istenilen boyutlara getirilen parçalar daha sonra 90° açı elde edilecek şekilde büküldü. Şekil 4.5.deki yapı, kaynaklı birleştirme metodu ile yapıldı ve cıvata somun kullanılarak montajı tamamlandı. Ayrıca numunelerin atış deneyi esnasında sabit kalabilmesi için bir fiksür yapısı oluşturuldu.

Bu grup atışlarda V_{50} deneyi yapıldı bunun için üç deney numunesi hazırlandı numunelere geçer geçmez testi uygulandı ve toplamda 14 (Ek çizelge) atış yapıldı. Bu deney Otokar şirketinin balistik araştırmaları ve deney laboratuvarında gerçekleştirildi



Şekil 4.5 : V saptırcılı içyapı kesiti.

İlk grup deneylerde deney düzeneğinde; bir silah düzeneği, APP 7,62x51 mm mühimmat, mermi hızını ölçen giriş ve çıkış sensörleri (hız kapıları), numune ve sabitleme fikstürü vardır. Ayrıca numuneyi perfore ederek geçen merminin veya parçalarının varlığını anlamak için konulmuş şahit levha vardır. Deney öncesi ısınma atışları yapılarak hız ve gerekli kalibrasyonlar gerçekleştirildi.

İlk atışlarda merminin gerçek hızına ulaşıldı ve hızlarını düşürmek için kovan içindeki barut miktarı azaltıldı. Hızı azaltılan mermi belirli bir seviyeden itibaren yapıyı delemeyi. Dolayısı ile V50 için kritik hız tespit edilmiş oldu. Yapılarda oluşan çökme miktarları ölçüldü. SEM kontrolü yapabilmek amacıyla çökme oluşan bölgelerden tel erozyon ile kesim yapıldı. Hasarlı bölge içyapısının anlaşılması hasar mekanizmasını açıklayan veriler alınması yönü ile önemlidir.

4.7. Birinci Grup Deney Numunelerinin Özellikleri

İlk grup deney yapıları için yapının tasarımı oluşturuldu. AutoCAD ortamında çizimler yapıldı ve hassas kesim için lazer kesim ortamında parçalar ölçülerinde hazırlandı. Bunun için üç yapı düşünüldü. İlkinde içyapı için 3mm kalınlığında St37 çelikten kesimler yapıldı. Bu içyapı parçaları 215x 40 mm ebadında lameller şeklinde kesimler yapıldı, ayrıca abkant büküm makinesinde 90° açı ile şekillendirildi. Şekillendirme boydan bükülerek yapıldı yani 215x40 mm lik levhanın uzun kenarı aynı kalacak şekilde boydan bükülerek 20mm lik kanat genişliği sağlandı Kanatların oturabileceği V şekilli yan çیتالarda lazer kesimde hazırlandı. Bu çیتالara abkant makinesinde hazırlanmış bükülmüş kanatçıklar oturtuldu ve çita ile ilişkilendirmek adına kaynak ile tutturuldu. Bu V kanatçıklı içyapının ön ve arkasına destek levhaları hazırlandı. Bu levhalar 3 mm kalınlığında 215x300 mm büyüklüğünde kenarlarından 7 mm çapında delik açılmış şekilde kesimi yapıldı. Ortaya galvanizli çelikten saptırıcı V şekilli içyapı ön ve arkaya St37 çelik destek levhaları M6 cıvata somun yardımı ile montajı tamamlandı. Deney ortamında atışların yapılması durumunda sabitlemek için fikstür hazırlandı. Yapılar bu fikstür kullanılarak atış anında sabit kalarak mermi enerjisinin tamamını üzerine almakta ve ölçümlerin daha düzenli olmasını sağlamaktadır. Bu gruptaki bütün numunelere V50 balistik limit ölçümü testleri yapılmıştır.

4.7.1.Birinci grup numuneler ve yapılan deney sonuçları

4.7.1.1. Birinci grup 1. numune

Ön katman olarak 0,8 mm kalınlığında Al6013 levhalar ve 2mm kalınlığında St37 çelik levha ortada 3mm kalınlığında St37 den yapılmış ve 90° bükülmüş V saptırıcı kanatçıklar, arka destek levhası ise 4mm kalınlığında St37 çelik levhadan oluşmaktadır. Bu gruptaki bütün numunelere V50 balistik limit ölçümü testleri yapılmıştır. Deney başlamadan önce ısınma atışları yapılmıştır. Bu arada mermi hızları ölçülmüş ve mermi gerçek hızına ulaşılmıştır. Tablo 4.5'deki verilere göre, atılan ilk gerçek hızlı mermi (866m/s) yapıyı delmiştir. Sonraki atışlarda mermi kovanındaki barut miktarları azaltılarak merminin hızı düşürülmüş ve 634-700 m/s arasında hızlara ulaşılmıştır. Bu hızlarda delinme olmamış, mermi yapıya saplanmış ancak arka destek levhasını delememişlerdir.

Bu numunenin en yüksek hızla atılan ancak delinmeyen mermi hızını 700m/s kabul ederek mermi kütlesinin tamamı yapı içerisinde kaldığı varsayımından hareketle enerji hesabı yapılmıştır.

V saptırıcı kanatçıklar, arka destek levhası ise 4mm kalınlığında St37 çelik levhadan oluşmaktadır. Bu gruptaki bütün numunelere V50 balistik limit ölçümü testleri yapılmıştır. Deney başlamadan önce ısınma atışları yapılmıştır. Bu arada mermi hızları ölçülmüş ve mermi gerçek hızına ulaşılmıştır. Tablo 4.6'daki verilere göre, atılan ilk gerçek hızlı mermi (866m/s) yapıyı delmiştir. Sonraki atışlarda mermi kovanındaki barut miktarları azaltılarak merminin hızı düşürülmüş ve 634-700 m/s arasında hızlara ulaşılmıştır. Bu hızlarda delinme olmamış, mermi yapıya saplanmış ancak arka destek levhasını delememişlerdir.

Bu numunenin en yüksek hızla atılan ancak delinmeyen mermi hızını 700m/s kabul ederek mermi kütlesinin tamamı yapı içerisinde kaldığı varsayımından hareketle enerji hesabı yapılmıştır.

Tablo 4.5 : Birinci grup 1. numune özellikleri

1.Grup 1. Numune

Ön Destek: 3x0,8mm Al6013 + 2mm St37

Ortada: 3mm St37'den yapılmış 90° Bükümlü saptırıcı V- kanatçıklar

Arka Destek: 4mm St37

Numunenin Ağırlığı:6650g

Numune Kalınlığı: 32mm

Numune Ebadı: 215mmx300mm

Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	SONUÇ	
		PENETR.	PERFOR.
1	866,84	EVET	EVET
2	634,45	EVET	HAYIR
3	655,35	EVET	HAYIR
4	644,98	EVET	HAYIR
5	700,23	EVET	HAYIR

Çekirdek Ağırlığı: 9,65g

Barut Miktarı: 3,06g

Mermi çarpma açısı: 0°

Kullanılan Mermi: 7.62x51mm M80 NATO

Balistik Enerji (J)

$$E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2) \quad E_k = 2365,93J$$

Numune Görünüşü

4.7.1.2. Birinci grup 2. numune

Bu numune yapısında ilk numuneye göre içyapı malzemesi değiştirildi. Bu değişiklik, alansal ağılıktan kazanarak yapıya mobilite avantajı sağlamak amaçlı yapıldı. Her iki yapının alanları eşit olmasına rağmen ikinci yapı 1800g daha hafif olmuştur. Ön katman 2 mm kalınlığında S37 çelik levha, ortada 1.5 mmlik galvanizli çelikten yapılmış 90° bükülmüş V saptırıcı kanatçıklı yapı ve arka destek levhası 4 mm lik St 37 çelik levhadan olarak montaj edilmiştir. Bu numunede ise, tablo 4.6 da görüldüğü gibi 586 ile 768 m/s arasında değişen hızlar ölçülmüş en düşük hız olan 586m/s hızında delinme görülmemiştir. Delinme görülmeyen bu hız enerji hesaplamasında kullanılmıştır. Diğer hızların hepsinde mermi yapıyı tamamen perfore etmiştir.

Tablo 4.6 : Birinci grup 2. numune özellikleri.

1.Grup 2.Numune

Ön Destek: 2mm St37

Ortada: 1,5mm Galvanizli Çelik ten 90° Bükümlü saptırıcı V- kanatçıklar

Arka Destek: 4mm St37

Numunenin Ağırlığı:4850g

Numune Kalınlığı: 28mm

Numune Ebadı: 215mmx300mm

Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	SONUÇ	
		PENETR.	PERFOR.
1	768,68	EVET	EVET
2	728,78	EVET	EVET
3	692,55	EVET	EVET
4	678,17	EVET	EVET
5	586,38	EVET	HAYIR

Çekirdek Ağırlığı: 9,65g

Barut Miktarı: 3,06g

Mermi çarpma açısı: 0°

Kullanılan Mermi: 7,62x51mm M80 NATO

Balistik Enerji (J) $E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$ $E_k = 1659,03J$

Numune Görünüşü



4.7.1.3 Birinci grup 3.numune

Bu numunede değişiklik ön ve arka katmalar eşit kalınlıkta ve içyapı geoterisi ve malzemesi 2. Numune ile aynıdır. Burada diğer numuneye göre ön destek levhası 1mm daha kalın seçilmiş ve giren merminin ön katmanda enerjisinin daha fazla sönümlenmesi hedeflenmiştir. Ön destek katmanı kalınlığı 3mm olan St37 çelik levha ortada 1,5 mm kalınlığında galvanizli çelikten yapılmış, 90° bükülmüş V şekilli saptırıcı yapı, arka katmanda yine öndeki levhanın özdeş özelliğinde destek levhası montaj ile birleştirilmiştir.

Tablo 4.7 : Birinci grup 3. Numune özellikleri.

1.Grup 3. Numune

Ön Destek: 3mm St37

Ortada: 3mm St37'den yapılmış 90° Bükümlü saptırıcı V- kanatçıklar

Arka Destek: 3mm St37

Numunenin Ağırlığı:4900g

Numune Kalınlığı: 28mm

Numune Ebadi: 215mmx300mm

Atış No	Çarpma	Sonuç	Numune Görünüşü
	Hızı (m/s)	PENETR. PERFOR.	
1	611,06	EVET HAYIR	
2	647,72	EVET HAYIR	
3	649,93	EVET HAYIR	
4	653,34	EVET HAYIR	
5	660,87	EVET HAYIR	
6	675,83	EVET EVET	

Çekirdek Ağırlığı: 9,65g

Barut Miktarı: 3,06g, Mermi çarpma açısı: 0°

Kullanılan Mermi: 7,62x51mm M80 NATO

Balistik Enerji (J)

$E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$

$E_k = 2107,31J$

Tablo 4.7'den de anlaşılabileceği gibi, numuneye 610-675 m/s aralığında altı atış yapılmış ve numune en yüksek hız (675 m/s) haricindeki diğer hızlarda penetre olmuş ancak perfore olmamıştır. Burada da 675 m/s lik hız, delinme olmayan en yüksek hız kabul edilerek enerji hesabı yapılması için gerekli hız değeri olarak alınmıştır.

Bu üç numunenin testi gerçekleştirilirken, laboratuvar sıcaklığı normal idi. Mermi özelliği tehdit seviyesi III olan 7,62mmx51 M80 Nato Ball kullanılmıştır.

4.8. İkinci Grup Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Test Ortamı

İkinci grup deneyler için hem geometrik alternatifler hem de malzeme alternatifleri değerlendirildi. Malzeme tedarikinden sonra, bilgisayar ortamında AutoCAD tasarımları gerçekleştirildi. Bu ebat ve ölçülerde kesim için lazer kesim cihazı kullanıldı. Bu grupta 9 değişik yapı alternatifi incelemeye alındı.

Dört değişik malzeme alternatifi:

A. St52 çelik: üç değişik varyasyon

- ◆ 90° bükümlü V saptırcılı içyapı,
- ◆ 120° bükümlü V saptırcılı içyapı
- ◆ Aralıklı sıralanmış levhalar

B. Al 5457 – 2 değişik varyasyon

- ◆ 90° bükümlü V saptırcılı içyapı,
- ◆ 120° bükümlü V saptırcılı içyapı

C. Al 2024- 2 değişik varyasyon

- ◆ 90° bükümlü V saptırcılı içyapı,
- ◆ 120° bükümlü V saptırcılı içyapı

D. Al 7075- 2 değişik varyasyon

- ◆ 90° bükümlü V saptırcılı içyapı
- ◆ 120° bükümlü V saptırcılı içyapı

4.9. İkinci Grup Deney Numunelerinin Özellikleri

Bu gruptaki numunelerde yapı içinde farklı açılı bükümleri ile elde edildi. Malzemelerin bir kısmını 90° bir kısmını da 120° açılı ile V-büküm yapıldı. Bir diğer alternatifte de arası boşluklu tabakalı varyasyon hazırlanmıştır. Kaynaklı birleştirmeler ile yapılar oluşturuldu ve cıvata ile ön ve arka destek levhaları monte edildi. Yine bu grup yapılar için rijit test ortamı sağlamak maksatlı fişstür oluşturularak deney esnasında kullanıldı.

Bu grup numunelerin balistik performans ölçümü; balistik yapıların herbirine ikişer mermi artışı gerçekleştirilerek oluşturulmuş ve saptırcı kanat açılarının değişmesi merminin yön değiştirme etkisini ve yapı içinde mermi ucunu köreltebilmesini sağlayıp sağlayamadığını gözlemlemek şeklinde olmuştur. Ayrıca, yapıların balistik enerji absorbe performans değeri hesaplanmıştır.



a



b

Şekil 4.6 : a) ve b) İçyapı değişik varyasyonları için hazırlanmış V şekilli bükümler ve montaj yan çerçeveleri

Numunelere ikişer mermi atılmasının nedeni birinin mermi çarpma noktasının yapı içinde kanat uçlarına diğeri ise, kanatın bükümüne yakın noktaya hizalanarak önündeki engel rijitliğinin değişimini sağlamak ve sonuçlarını gözlemlemektir.

Bu grup numunelerin balistik deneyleri, APP 7,62x52mm mermilerle gerçek hızında (yaklaşık 860m/s) gerçekleştirildi. Deneyler ROKETSAN balistik deney laboratuvarında gerçekleştirildi. İkinci grup deneylerde deney düzeneğinde; bir silah düzeneği, APP 7,62x51 mm mühimmat, mermi hızını ölçen giriş ve çıkış sensörleri (hız kapıları), numune ve sabitleme fikstürü vardır. Ayrıca numuneyi perfore ederek geçen merminin veya parçalarının varlığını ve hızını ölçmek için saniyede 40000 fotoğraf çekimi yapabilen hızlı kamera düzeni çalıştırılmıştır. Deney öncesi ısınma atışları yapılarak hız ve gerekli kalibrasyonlar gerçekleştirildi.

İlk beş atışta merminin gerçek hızına ulaşabilmek için ısınma atışları yapıldı. Numunenin yüzeyine merminin tam dik gelmesi için gerekli ölçüm ve ayarlamalar yapıldı. Deneyler başlamadan ısınma atışları atılarak mermi gerçek hızına ulaşıldı. Her numune yapıya en az iki atış yapıldı. Merminin yapıyı perfore etmesi durumunda mermi çıkış hızlarını hızlı kamera yardımı ile ölçüldü.

Numunelerde yapılarda oluşan göçme ve hasar değerleri ölçüldü. Bu hasarlı bölgelerden tel erozyon yolu ile küçük parçalar çıkarılarak SEM kontrolleri yapılarak hasarlı bölge içyapılarında oluşan değişiklikler hakkında bir fikir elde edildi. Son olarak numerik analiz yapılarak hasar mekanizması anlaşıldı.

4.9.1. İkinci grup deney numuneleri ve yapılan deney sonuçları

4.9.1.1 İkinci grup 1. numune

Bu yapı 2,5 mm kalınlığındaki St52 malzemesi kullanılarak oluşturulmuş ve içyapı olarak 16 adet 90° saptırıcı V kanatçılar kaynak edilmiştir. Ön ve arka destek levhaları 2,5 mm kalınlığındaki levhalardan oluşturulmuş ve cıvata somun yardımı ile montaj edilmiştir. Tablo 4.8 de mermi çarpma hızları verilmiştir. Bu yapıya mermi nüfuz etmiş penetre olmuş ancak içinden çıkamamıştır.

Bu yapı 2,5 mm kalınlığındaki St52 malzemesi kullanılarak oluşturulmuş ve içyapı olarak 16 adet 90° saptırıcı V kanatçılar kaynak edilmiştir. Ön ve arka destek levhaları 2,5 mm kalınlığındaki levhalardan oluşturulmuş ve cıvata somun yardımı ile montaj edilmiştir. Tablo 4.8 de mermi çarpma hızları verilmiştir. Bu yapıya mermi nüfuz etmiş penetre olmuş ancak içinden çıkamamıştır.

Tablo 4.8 : İkinci grup 1. Numune özellikleri.

İkinci grup 1. Numune	
Ön destek	2,5mm St52 (190x190mm)
İçyapı	2,5mm St52 den yapılmış 90° Bükümlü
Arka destek	2,5mm St52 (190x190mm)
Ağırlık	4284 g
Kalınlık	40 mm
Tehdit parçacığı özelliği	
Çekirdek Ağırlığı	9,65g
Barut Miktarı	3,06g
Mermi çarpma açısı	0°
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO
Test sonucu	
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)
1.	851,37
2.	852,06

Penetrasyon	Perforasyon
EVET	HAYIR
EVET	HAYIR



4.9.1.2 İkinci grup 2. numune

Bu test numunesi, tablo 4.9. da verilen özelliklere göre, 2,5 mm kalınlıkta St52 den kesilerek bükülmüş 120° lik V saptırıcı içyapısı olan ve ön ile arka destek levhaları olarak ise 190x190mm ebatında kesilmiş 2,5 mm kalınlığındaki St52 çelikle tamamlanmış

yapıdır. Bu mumuneyede iki adet atış yapılmış ve içyapı kanatçık açılarının değişiminin enerji absorp etme özelliğine etkisi gözlemlenmek hedeflenmiştir. Bu numunede de iki atış yapılmış memiler yapıya penetre olmuş ancak çıkış (perforasyon) gözlemlenmemiştir.

Tablo 4.9 : İkinci grup 2. numune özellikleri

İkinci grup 2. Numune	
Ön destek	2,5mm St52 (190x190mm)
İçyapı	2,5mm St52 den yapılmış 120° Bükümlü
Arka destek	2,5mm St52 (190x190mm)
Ağırlık	4436 g
Kalınlık	40 mm
Tehdit parçacığı özelliği	
Çekirdek Ağırlığı	9,65g
Barut Miktarı	3,06g
Mermi çarpma açısı	0°
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO
Test sonucu	
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)
1.	860
2.	849,98

Penetrasyon	Perforasyon
EVET	HAYIR
EVET	HAYIR



4.9.1.2 İkinci grup 2. numune

Bu test numunesi, tablo 4.9. da verilen özelliklere göre, 2,5 mm kalınlıkta St52 den kesilerek bükülmüş 120° lik V saptırıcı içyapısı olan ve ön ile arka destek levhaları olarak ise 190x190mm ebatında kesilmiş 2,5 mm kalınlığındaki St52 çelikle tamamlanmış yapıdır. Bu mumuneyede iki adet atış yapılmış ve içyapı kanatçık açılarının değişiminin enerji absorp etme özelliğine etkisi gözlemlenmek hedeflenmiştir. Bu numunede de iki atış yapılmış memiler yapıya penetre olmuş ancak çıkış (perforasyon) gözlemlenmemiştir.

4.9.1.3 İkinci grup 3. numune

Bu test numunesi malzeme olarak ilk iki numune ile aynıdır. Ancak numune yapısı tamamen farklıdır. Tablo 4.10 da görüldüğü gibi, 2,5 mm kalınlığındaki St52 çelik levhadan 190x190 mm ebatında 5 adet hazırlanmış ve montaj için 6 adet 7mm çapında delikler açılmıştır. Civatalar ilk levhadan geçirilmiş ve hemen arkasına somun sıkıştırılmış ve birsonraki levha geçirilmeden önde somunların üzerine ikişer adet pul yerleştirildi.

Tablo 4.10 : İkinci grup 3. numune özellikleri.

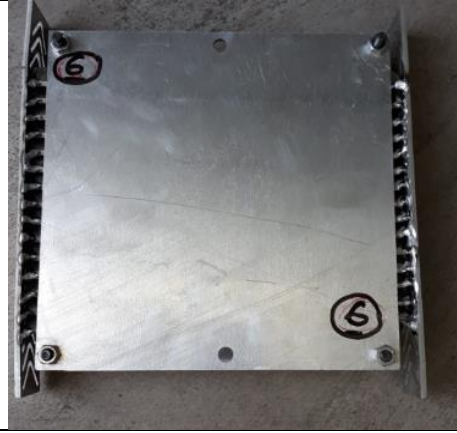
İkinci grup 3.Numune			
Ön destek	2,5mm St52 (190x190mm)		
	toplam 5 adet arka arkaya		
İçyapı	2,5mm St52 (190x190mm)		
Arka destek	2,5mm St52 (190x190mm)		
Ağırlık	3550 g		
Kalınlık	50 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	852,36	EVET	HAYIR
2.	857,42	EVET	HAYIR

Bunun nedeni iki levha arasındaki boşluğun artırılmasıdır. Bu numunede oryantasyon değişiliğinin nedeni lamine levha sıralamasına ara boşluğun katkısını ve enerji değişimini gözlemlemek olmuştur. Ancak bu yapıda da mermiler ilk üç levha geçmişler dördüncü levhada belirgin bir göçme oluşturmuşlar ancak beşinci ve son levhaya bir etki edememişlerdir. Bu numune, malzemesi aynı önceki iki yapıdan 800-1000g daha hafiftir.

4.9.1.4. İkinci grup 4. numune

Tablo 4.11. de görüldüğü gibi bu numunede malzeme Al5754 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 90° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 15 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozulmadan yapıdan çıkmışlar ve perfore olmuşlardır. Ağırlığı 1700 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır.

Tablo 4.11 : İkinci grup 4. Numune özellikleri

İkinci grup 4.Numune			
Ön destek	3 mm Al5754 (190x190mm)		
İçyapı	3 mm Al5754 den yapılmış 90° Bükümlü V kanatçıklar		
Arka destek	3 mm Al5754 (190x190mm)		
Ağırlık	1743 g		
Kalınlık	40 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	863,77	EVET	EVET
2.	852,66	EVET	EVET

4.9.1.5 İkinci grup 5. numune

Tablo 4.12. de görüldüğü gibi bu numunede de malzeme Al5754 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 120° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 17 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozulmadan yapıdan çıkmışlar ve perfore olmuşlardır. Ağırlığı 1880 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır. Burada kanatçıkların 120° açılı yapılmasının nedeni bir önceki numunedeki (90° V kanatçık) yapısına göre dilim açısındaki değişikliğin enerji absorbe etme etkisini gözlemlemek ve farkı incelemek nedeni ile yapılmıştır.

Tablo 4.12 : İkinci grup 5. numune özellikleri.

İkinci grup 5.Numune			
Ön destek	3 mm Al5754 (190x190mm)		
İçyapı	3 mm Al5754 den yapılmış 120° Bükümlü V kanatçıklar		
Arka destek	3 mm Al5754 (190x190mm)		
Ağırlık	1882 g		
Kalınlık	40 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	850,18	EVET	EVET
2.	851,66	EVET	EVET



4.9.1.6 İkinci grup 6. numune

Tablo 4.13. de görüldüğü gibi bu numunede de malzeme Al2024 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 120° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 13 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozularak yapıdan çıkmışlar ve perfore etmişlerdir. Bu parçacıkların yapı arkasından çıkış hızları tespit edilmiş ve bu artık hızlar kullanılarak yapının balistik enerji değeri hesap edilmiştir. Ağırlığı 1750 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır. Malzemenin sertliğinin yüksek olması ve bu uygulamalarda kullanılmış olması seçiminde etkili olmuştur.

Tablo 4.13 : İkinci grup 6. Numune özellikleri

İkinci grup 6.Numune			
Ön destek	3 mm Al2024 (190x190mm)		
İçyapı	3 mm Al2024 den yapılmış 120° Bükümlü V kanatçıklar		
Arka destek	3 mm Al2024 (190x190mm)		
Ağırlık	1750 g		
Kalınlık	40 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	858,81	EVET	EVET
2.	862,19	EVET	EVET

4.9.1.7 İkinci grup 7. numune

Tablo 4.14. de görüldüğü gibi bu numunede de malzeme Al2024 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 90° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 19 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozularak yapıdan çıkmışlar ve perfore etmişlerdir. Bu parçacıkların yapı arkasından çıkış hızları tespit edilmiş ve bu artık hızlar kullanılarak yapının balistik enerji değeri hesap edilmiştir. 6. Numunede V büküm açısının değiştirilmesi (120°) kanatçık açısının değişiminin merminin yapı içinde hareketine etkisinin olup olmamasını görmek ve enerji değerleri arasında farkı gözlemlemektir. Ağırlığı 1750 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır. Malzemenin sertliğinin yüksek olması ve bu uygulamalarda kullanılmış olması seçiminde etkili olmuştur.

Tablo 4.14 : İkinci grup 7. numune özellikleri.

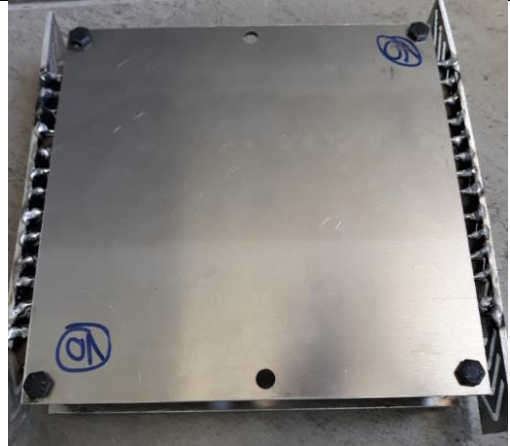
İkinci grup 7. Numune			
Ön destek	3 mm Al2024 (190x190mm)		
İçyapı	3 mm Al2024 den yapılmış 90° Bükümlü V kanatçıklar		
Arka destek	3 mm Al2024 (190x190mm)		
Ağırlık	1750 g		
Kalınlık	40 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	862,19	EVET	EVET
2.	854,05	EVET	EVET

4.9.1.8 İkinci grup 8. numune

Tablo 4.15. de görüldüğü gibi bu numunede de malzeme Al7075 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 90° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 13 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar 190x190 mm ebatında kesilmiş ve cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozularak yapıdan çıkmışlar ve perfore etmişlerdir. Bu parçacıkların yapı arkasından çıkış hızları tespit edilmiş ve bu artık hızlar kullanılarak yapının balistik enerji değeri hesap edilmiştir. Ağırlığı 1680 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır. Malzemenin sertliğinin yüksek olması ve bu tür uygulamalarda farklı yapı düzeni ile kullanılmış olması seçimde etkili olmuştur.

Tablo 4.15 : İkinci grup 8. Numune özellikleri

İkinci grup 8. Numune			
Ön destek	3 mm Al7075 (190x190mm)		
İçyapı	3 mm Al7075 den yapılmış 90° Bükümlü V kanatçıklar		
Arka destek	3 mm Al7075 (190x190mm)		
Ağırlık	1680 g		
Kalınlık	40 mm		
Tehdit parçacığı özelliği			
Çekirdek Ağırlığı	9,65g		
Barut Miktarı	3,06g		
Mermi çarpma açısı	0°		
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO		
Test sonucu			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Penetrasyon	Perforasyon
1.	857,52	EVET	EVET
2.	854,94	EVET	EVET



4.9.1.6 İkinci grup 9. numune

Tablo 4.16. de görüldüğü gibi bu numunede de malzeme Al7075 seçilmiştir. Burada kullanılan alüminyum 3 mm kalınlığındadır. 120° V büküm yapılmış ve yan çerçeveler arasına bu bükülmüş levhalardan 13 adet yerleştirilmiş ve kaynakla montajları sağlanmıştır. Ön ve arka levhalar 190x190 mm ebatında kesilmiş ve cıvata somun yardımıyla sabitlenmiş ve deney ortamında iki atış gerçekleştirilmiştir. Atışlar yapıya girmiş ve mermi bütünlüğü bozularak yapıdan çıkmışlar ve perfore etmişlerdir. Bu parçacıkların yapı arkasından çıkış hızları tespit edilmiş ve bu artık hızlar kullanılarak yapının balistik enerji değeri hesap edilmiştir. Ağırlığı 1960 g olması nedeni ile oldukça hafif bir yapıdır. Ancak mermilerin hızını kesmek ve enerji absorbe etmek yönü ile başarısızdır. Malzemenin sertliğinin yüksek olması ve bu tür uygulamalarda farklı yapı düzeni ile kullanılmış olması seçimde etkili olmuştur. Bu numunede iç V sapıcı açılarının değiştirilmesinin nedeni önceki (90°) açı değerine göre mermilerin sapmasının ve enerji değerindeki değişikliğin incelenmesi nedeni ile.

Tablo 4.16 : İkinci grup 9. numune özellikleri.

İkinci grup 9.Numune	
Ön destek	3 mm Al7075 (190x190mm)
İçyapı	3 mm Al7075 den yapılmış 120° Bükümlü V kanatçıklar
Arka destek	3 mm Al7075 (190x190mm)
Ağırlık	1961 g
Kalınlık	40 mm
Tehdit parçacığı özelliği	
Çekirdek Ağırlığı	9,65g
Barut Miktarı	3,06g
Mermi çarpma açısı	0°
Kullanılan Mermi	7,62x51mm M80 NATO

Test sonucu				
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)		Penetrasyon	Perforasyon
1.	861,59		EVET	EVET
2.	858,68		EVET	EVET

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ANALİZLER

5.1 Hasar Mekanizmaları ve Katmanlı Yapıların Etkisi

5.1.1. Hasar mekanizmaları incelemesinde gerekli faktörler

Balistik Enerji: Çarpan cismin veya merminin kinetik enerjisi, çarpmanın şiddetini belirler. Balistik enerjisi, çarpan cismin veya merminin kütlesi ve hızı tarafından belirlenir. Hasar analizinde, merminin enerjisinin büyüklüğü ve etkisi değerlendirilir. Balistik enerjiyi temel kinetik enerji formülünden hesap edebiliriz;

$$E_K = \frac{1}{2} \times m \times (v_i^2 - v_f^2) \quad (5.1)$$

Burada:

E_K :Joule cinsinden, balistik enerji

m : gram cinsinden tehdit parçacığının kütlesini

v_i : m/s olarak merminin hedefe çarpma hızını

v_f : m/s olarak merminin hedefi terkettiği hızını belirtir.

Çarpma noktası: Merminin veya çarpan cismin hedefe çarptığı nokta veya bölge inceleme yönü ile önemlidir. O noktadaki kırılma deformasyon ve malzemelerdeki değişimler analiz yapılırken önem taşımaktadır. Bu deformasyon ve değişimler incelenir ve hasar tipi yönünden anlamaya çalışılmaktadır.

Hasar Şekli: Terminal balistikte, merminin çarpması sonucunda meydana gelen hasarın türü ve şekli belirlenir. Bu hasar tipleri arasında delinme, kırılma, çatlamlar, yüzey deformasyonu, çökmeler bulunabilir. Hasar tipine bağlı olarak, malzeme veya yapı üzerindeki etkiler ve sonuçlar analiz edilir.

Hasar ve Deformasyon Miktarı: Çarpma sonucunda malzemede meydana gelen deformasyon miktarı değerlendirilir. Bu, malzemenin orijinal şekline kıyasla nasıl değiştiğini ve ne kadar enerji absorbe ettiğini gösterir.

Gerilme ve bükülme: Çarpma sonucunda malzeme üzerindeki gerilme ve bükülme analiz edilir. Bu, malzemenin dayanıklılığı ve mukavemeti hakkında bilgi verir.

Enerji Emilimi: Balistik çarpma esnasında malzeme veya yapı tarafından absorbe edilen enerji miktarı önemlidir. Enerji Emilimi, malzemenin çarpma sonucunda nasıl davrandığını ve çarpan cismi veya projeyi yavaşlattığını gösterir.

Yüzey hasarı: Balistik çarpma sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan hasarlar değerlendirilir. Bunlar arasında çizikler, delikler, çatlamlar, yüzey deformasyonları vb. bulunabilir.

Hasar analizi, balistik çarpma sonucunda malzeme veya yapı üzerinde meydana gelen değişiklikleri anlamak, tasarımları optimize etmek ve daha etkili balistik koruma sistemleri geliştirmek için önemlidir. Bu analizler, malzeme seçimi, yapısal düzenlemeler ve tasarım optimizasyonunda rehberlik eder.

5.1.2. Deney numunelerinde ilk katman- ön destek

Terminal balistikte, zırh oluşturma'nın genel amacı ve koruma seviyeleri yavaşlat, parçala ve durdur hipotezi ile gerçekleşmektedir. Tehdit parçacığının hızını yavaşlatma buna bağımlı olarak ön enerji sönüm katmanıdır. Malzeme sertlik ve tokluk kritik eşiklerini aşan mermi enerjisi bu levhayı penetre eder ve kalınlığına bağımlı olarak arka tarafa geçerek perfore eder. Bu esnada merminin uç geometrisi sivrilmesini kaybeder, geldiği ilk hız durumuna göre daha küresel ve küt uçlu olarak arka tarafa geçer. Mermi zırh delici ucundan dolayı ve kendi eksenini etrafında dönme hareketi yaptığından dolayı kendi çapı büyüklüğüne yakın bir delik açar, bununla birlikte malzeme içinde hareketi ucunun sivrilmesini kaybetmesine yol açar. Bu arada enerjisinin bir bölümünü ön katman malzemenin mekanik delme işleminde kuvvet-yol, bir kısmını da sürtünmeden dolayı ısı enerjisi olarak kaybeder. Bu işlemleri hızının yüksekliğinden kaynaklı olarak mili saniye içinde gerçekleştirir. Etki- tepki nedeni ile kurşun büyük bir kuvvetle çarptığında levha malzemesi aşağıya çöküntü yapmak yerine çevresel yığılma yapar ve bu malzemenin bir kısmı öne doğru ters çöküntü şeklinde görülür. Malzemenin sünek olması durumunda katmanın önüne bir miktar malzeme yığını oluşur. Delik dairesel ve iç yüzeyi parlaktır. Malzeme seramik gibi kırılgan olması durumunda majör çatlama için enerji olarak hızının bir kısmını kaybeder. Bazı durumlarda mermi hız basıncının yüksek olması nedeniyle

kırılğan metali pul koparma formunda delik açar. Ön tarafı dairesel arka tarafı konikdir. Hızına bağlı olarak malzeme arkaya göçme yapar. Bu oluşan koninin boyutuda hasar miktarı olarak önemlidir.

5.1.3. Deney numunelerinde ikinci katman- V deflektor içyapı

Yavaşlat, parçala ve durdur hipotezi gereği ilk katmanda tehdit parçacığının hızı bir miktar azaltılmış ve uç geometrisi küt formuna dönüşmüştür. Bu doktora tezinde, içyapıda merminin tamamen durdurulabilmesi için içyapıya V form verilerek gelen merminin karşısına açılı bir engel çıkarıldı. Mermi ilk destek levhasını geçmesi durumunda içyapıdaki V kanatlara çarpması kanattaki açısı nedeniyle malzemenin durumuna bağımlı olarak ya yön değiştirecek ya da kanatçıklara hasar vererek orada enerjisinin tamamını ya da büyük kısmını bırakacaktır. Buda merminin içyapıda durdurulması anlamına gelmektedir. Merminin içyapıda açılı karşılanması durumunda deforme edeceği yol uzamaktadır. Bu durum mermi enerjisinin yapı tarafından karşılanması anlamına gelmektedir. Eğer mermi kanatçığı delmek yerine yön değiştirirse önüne dizilmiş diğer kanatçıklar çıkar ve mermi yoluna devam edemez. Genellikle mermi parçalanıp küçük kütleler halinde yola devam durumunda kalmaktadır. Kütlenin azalması kinetik enerjinin azalmasına neden olmakta ve arka destek levhasına olan baskı azalmaktadır.

5.2.4. Deney numunelerinde üçüncü katman- arka destek

Yavaşlat, parçala ve durdur hipotezinde, durdurma aşaması bu katmanda sağlanmaktadır. İçyapının mermi enerjisini alması ve aynı anda deformasyon ve kırılmaların gerçekleşmesi, merminde ufak parçalara ayrılması ve kütle olarak küçük parçalara bölünerek kinetik enerjinin azalmasına neden olur. Ancak hızdan kaynaklı ahala bir basınç bulunmaktadır. Bu da arka destek levhasına baskı olarak etki yapmaktadır. Arka destek levhasının mekanik özelliklerine bağlı olarak iç yüzeyinde mermi parçalarının hareketi sonlanacaktır. Bu basıncın büyüklüğüne bağlı olarak levhada genel bükülme oluşur. Bu bükülmenin önüne ara bağlayıcı elemanlarla geçilebilir. Bazı durumlarda merminin hızı ve basıncı içyapıda yeterli oranda azalma sağlanamaz ise adiyabatik kaymalar nedeniyle arka destek levhası yırtılır ve ön destek levhasına göre büyük bir deformasyon oluşturarak arka destek levhasını dolayısı ile zırh yapısını terk eder.

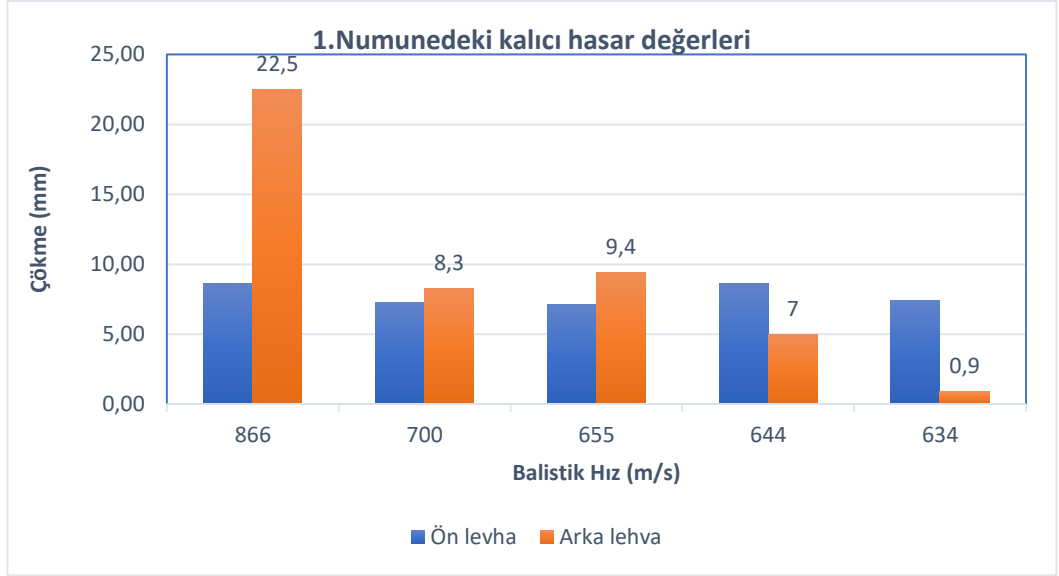
5.2. İlk Grup Deney Sonuçları

Tablo 5.1 : Birinci grup 1. Numune balistik test sonuçları.

BİRİNCİ GRUP 1. NUMUNE BALİSTİK TEST SONUÇLARI						
MALZEME: Ön destek: 3X0,8mm Al6013+2mm St37 İç yapı: 3mm St37 90° V saptırıcı						
Arka Destek: 4 mm St37						
Atış No:	Çapma hızı v_1 (m/s)	Kısmi Delinme (KD) Tam Delinme (TD)	Çatlak Durumu	Arkadan Kopma	Mermi Artık Hızı, v_s (m/s)	Balistik Enerji (J) Çekirdek Ağırlığı, $m=9,65g$ $E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$
1.	866,84	TD	VAR	VAR	DELİNDİ	Delinmeyen en yüksek hızın balistik performans olarak kabul edilerek: $E_k = 2365,80 J$
2	700,23	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
3.	655,35	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
4.	644,98	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
5.	634,45	TD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	

5.2.1. Birinci numune

Ön katman olarak Al levhalar ve 2mm lik St37 çelik levha ortada 3mm kalınlığında St37 den yapılmış V kanatçıklar, arka destek levhası ise 4mm lik St37 çelik levhadan oluşmaktadır. Bu gruptaki bütün numunelere V₅₀ balistik limit ölçümü testleri yapılmıştır. Deney başlamadan önce ısınma atışları yapılmıştır. Bu arada mermi hızları ölçülmüş ve mermi gerçek hızına ulaşılmıştır. Tablo5.1 de verilen ölçümlerde görüldüğü gibi, atılan ilk gerçek hızlı mermi yapıyı delmiştir. Sonraki atışlarda mermi kovanındaki barut miktarları azaltılarak merminin hızı düşürülmüş ve 634-700 m/s arasında hızlara ulaşılmıştır. Bu hızlarda delinme olmamış, mermi yapıya saplanmış ancak arka destek levhasını delememişlerdir. Mermi özelliği tehdit seviyesi III olan 7,62mmx51 M80 Nato Ball kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : İlk numune için ön ve arka levhalarda oluşan kalıcı hasar ölçümleri.

Birinci numunedeki atışlarda ilk atış gerçek hızda (866m/s) gerçekleştirilmiş ve tam delinme yani perforasyon görülmüştür. Mermiyi ilk karşılayan levhalar Al6013 tür. Bu levhada delinme tam olmuş delikler dairesel olmuştur. Öne doğru malzeme kabarma sı görülmüş ve mermi alttaki çelik levhaya doğru devam etmiştir. Çelik levha ilk hız ve enerjisini almak açısından önemlidir. Bu nedenle ön levhada içeriye doğru 8.6 mm çökme



Şekil 5.2 : Birinci numunede görülen hasarlar

olmuş ancak merminin hızını bir miktar kesmiştir. Deflektör iç yapıda kurşun kanatçıklar tarafından köreltilmiş ancak enerjisinin tamamını absorbe edememiştir. Arka levhada mermi ucunun körelmesi ile basınç alanı genişlediği için çökme alanı geniş ve çökme

derinliği büyük olmuştur. Bu nedenle en büyük çökme miktarı bu numunede 22.5 mm görülmüştür.

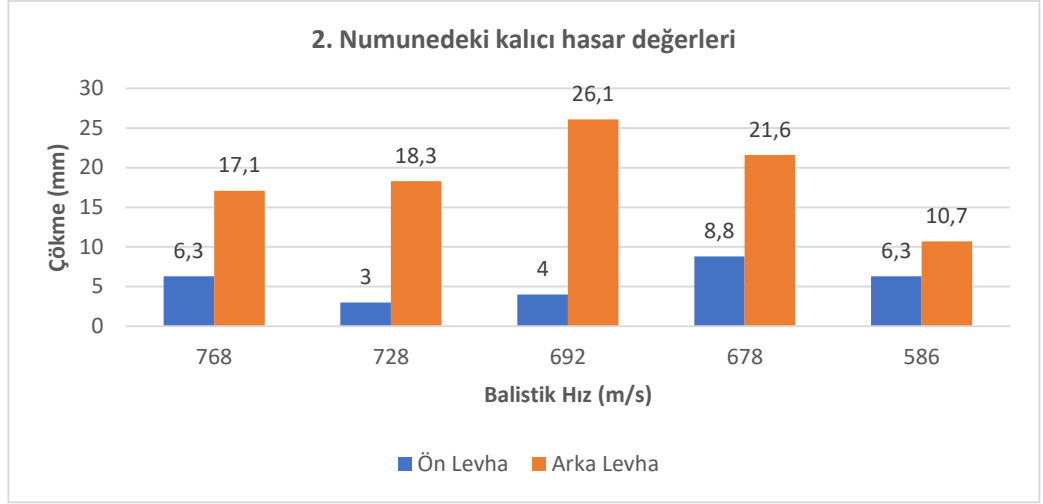
Tablo 5.2 : Birinci grup 2. numune deney sonuçları.

BİRİNCİ GRUP 2. NUMUNE BALİSTİK TEST SONUÇLARI						
MALZEME: Ön destek: 2 mm St37			İç yapı: 1,5 mm Galvanizli çelik, 90° V deflektör			
Arka Destek: 4 mm St37						
Atış No:	Çapma hızı v_1 (m/s)	Kısmi Delinme (KD) Tam Delinme (TD)	Çatlak Durumu	Arkadan Kopma	Mermi Artık Hızı, v_s (m /s)	Balistik Enerji (J) Çekirdek Ağırlığı, m=9.65g $E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$
1.	768,68	TD	VAR	VAR	DELİNDİ	Delinmeyen en yüksek hızın balistik performans olarak kabul edilerek: E_k = 1659 J
2.	586,38	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
3.	728,8	TD	YOK	VAR	DELİNDİ	
4.	692,55	TD	YOK	VAR	DELİNDİ	
5.	678,17	TD	YOK	VAR	DELİNDİ	

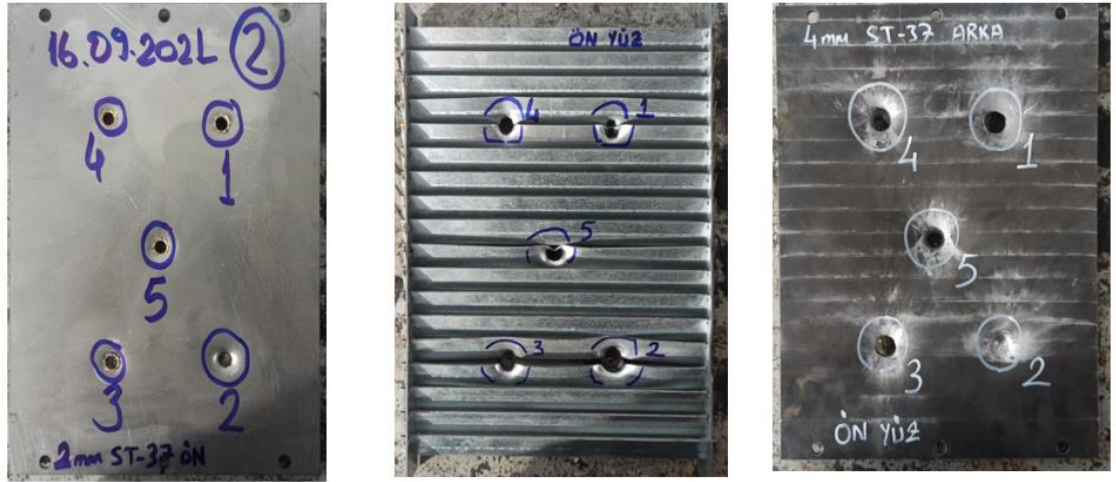
5.2.2 İkinci numune

Ön katman 2 mm lik S37 çelik levha, ortada 1.5 mmlık galvanizli çelikten yapılmış V kanatçıklı yapı ve arka destek levhası 4mm lik St 37 çelik levhadan olarak montaj edilmiştir. Bu numunede ise, tablo 5.2 de görüldüğü gibi 586 ile 768m/s arasında değişen hızlar ölçülmüş en düşük hız olan 586m/s hızında delinme görülmemiştir. Diğer hızların hepsinde mermi yapıyı tamamen perfor etmiştir. Mermi özelliği tehdit seviyesi III olan 7,62mmx51 M80 Nato Ball kullanılmıştır.

Bu test numunesinde önde 2 mm lik çelik destek levhası gelen bütün hızlara karşı koyamamış ve mermiler tarafından delinmiştir. Ortada galvanizli çelik V yapı mermi hızlarını bir miktar azaltmış ama en önemlisi merminin delici ucu köreltmeye devam etmiştir. Hızı azaltılmış olan mermilerden sadece 586 m/s hız arka destekten geçememiştir. Bu yapı için merminin geçemediği en yüksek hız bu kabul edilirse tabloda hesaplanan 1659 Joule değeri balistik enerji değeri olarak hesaplanmıştır. 692 m/s lik 4. atışta arka destek levhasında en derin göçme olmuştur.



Şekil 5.2 : Birinci grup 2. numunenin hasar ölçümleri



Şekil 5.4 : İkinci numunede görülen hasarlar.

Kurşun arka destek levhasına girerken kaplama gibi delik çevresine sıvanmıştır. Hasar tipi sünek malzeme tipi gibi gerçekleşmiştir. Yırtık ve delik çevresi 1,3,5 nolu atışta düzenli kesik yapısında oluşmuştur.

Galvanizli çelik dilimler 1.5 mm bu tehdit seviyesinin zayıf kalmıştır. Gelen merminin sahip olduğu çarpma hızından dolayı dilimlerde öteleme kırılma görülmemiş ve delinme hasarı oluşmuştur. 2 nolu atışta (barut miktarı) hızın düşüklüğü nedeniyle mermi, yapı içinde dilime takılı kalmıştır. Yapının arka tarafında sünek hasar görüntüsü oluşmuştur. Çökme miktarları ortalaması arka destek levhasında ölçüldüğü gibidir. Ölçme işlemi

hasar bölgesinde homojen geometrik göçme olmadığından düzenli ölçülememiştir. Göçme hasar büyüklükleri ortalama değerdir.

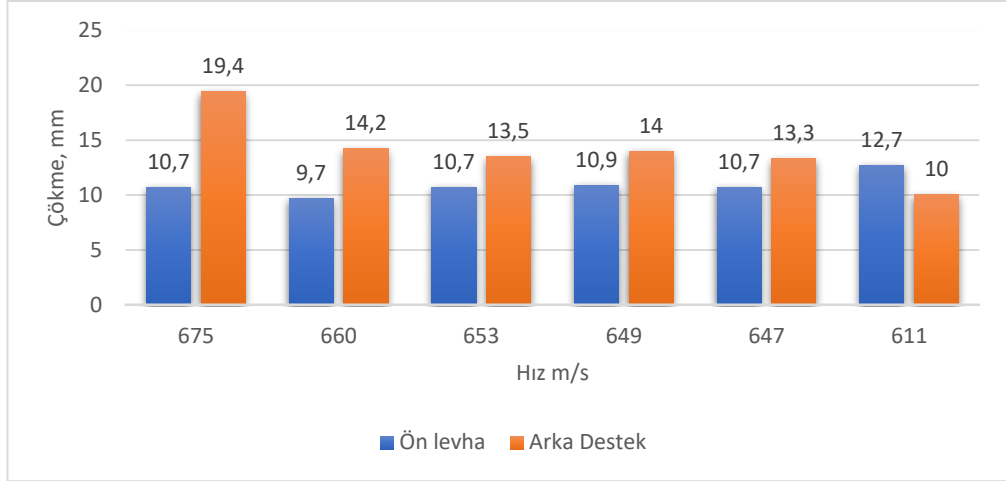
Tablo 5. 3: Birinci grup 3. Numune balistik test sonuçları

BİRİNCİ GRUP 3. NUMUNE BALİSTİK TEST SONUÇLARI						
MALZEME: Ön destek: 3mm St37 İç yapı: 1,5 mm Galvanizli çelik, 90° V saptırıcı						
Arka Destek: 3mm St37						
Atış No:	Çapma hızı v_1 (m/s)	Kısmi Delinme (KD) Tam Delinme (TD)	Çatlak Durumu	Arkadan Kopma	Mermi Artık Hızı, v_s (m/s)	Balistik Enerji (J) Çekirdek Ağırlığı, $m=9.65g$ $E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$
1.	675,3	TD	VAR	VAR	DELİNDİ	Delinmeyen en yüksek hızın balistik performans olarak kabul edilerek:
2.	660,87	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
3.	653,34	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
4.	649,93	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
5.	647,72	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	
6.	611,06	KD	YOK	YOK	DELİNMEDİ	E_k = 2107,31 J

5.2.3 Üçüncü numune

Ön katman 3mm lik St37 çelik levha ortada 1,5 mm kalınlığında galvanizli çelikten yapılmış V şekilli saptırıcı yapı arka katmanda yine öndeki levhanın özdeş özelliğinde destek levhası montaj ile birleştirilmiştir. Tablo 5.3 te görüldüğü gibi bu numunede 610-675m/s aralığında altı atış yapılmış ve numune en yüksek hız (675m/s) haricindeki hızların hepsinde de perfore olmamıştır.

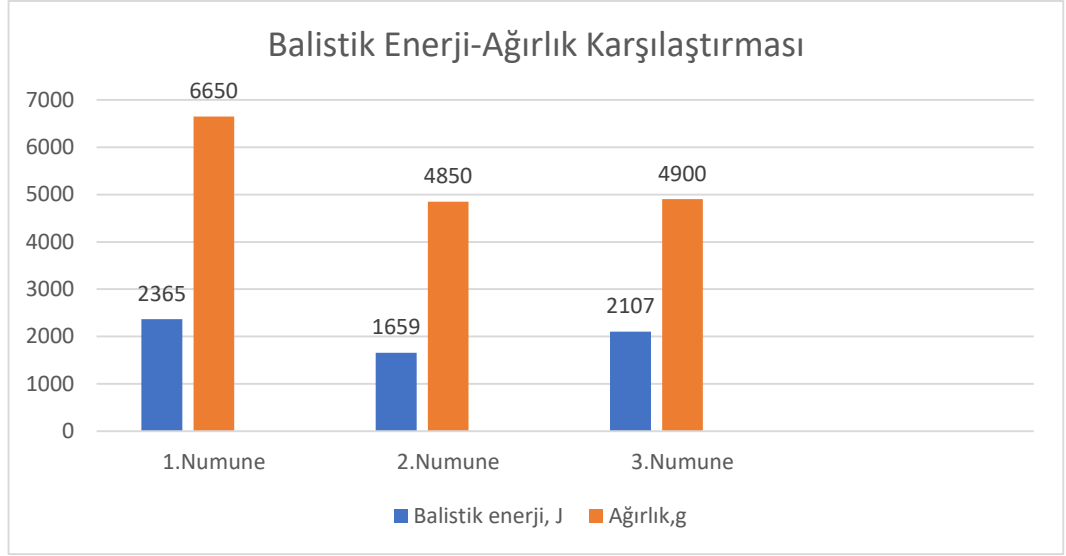
Bu üç numunenin deneyi normal laboratuvar sıcaklığında yapılmıştır. Mermi özelliği tehdit seviyesi III olan 7,62mmx51 M80 Nato Ball kullanılmıştır. Bu test de balistik performans değerinin tespit edilebilmesi için mermi kovani içerisindeki barut miktarı artırılarak mermi hızının artırılması sağlanmış delindiği hızdan sonra test sonlandırılmıştır.



Şekil 5.3 :Birinci grup 3.numunenin ön ve arka levhalarda oluşan kalıcı hasar ölçümleri.

Bu testteki atışlar sonunda hasar değerleri birbirine yakın oluşmuştur. Ön ve arka destek levhanın özdeş olması yapıyı geçemeyen perfore edemeyen mermi hızlarının birbirine yakın olması hasar büyüklüklerinin birbirine yakın olmasını getirmiştir. Bunun nedeni yapıya giren ve hızı azalan ve deflektör yapı nedeniyle körelen uç alanı genişleyen merminin arka destek levhasına eş enerji ile ulaşmış, geniş alanlı baskı yapmış ve her durumda sertliği ve mekanik özelliği homojen olan engelle karşılaşmıştır. Bu da hasar oranlarında pek büyük bir fark oluşturmamıştır ve birbirine yakın olmasını getirmiştir.

Bunun nedeni yapıya giren ve hızı azalan ve deflektör yapı nedeniyle körelen uç alanı genişleyen merminin arka destek levhasına eş enerji ile ulaşmış, geniş alanlı baskı yapmış ve her durumda sertliği ve mekanik özelliği homojen olan engelle karşılaşmıştır. Bu da hasar oranlarında pek büyük bir fark oluşturmamıştır.



Şekil 5.4 : Balistik enerjinin alansal yoğunluğu ile etkileşimi

Grafikte görülen değişkenler zırh total ağırlığı ile bunları perfore edemeyen mermi hızlarından yola çıkılarak hesaplanan enerji absorbe etme miktarlarıdır. Şekil 5.5'te ilk numunenin alansal yoğunluğunun büyük olması enerji absorbe performansının yüksek olmasına neden olmuştur. Bu yapıda içyapıdaki v kanatçıklar 3 mm kalınlığındaki St37 den olması merminin içyapıda parçalanmasını getirmiş ve mermi enerjisinin büyük kısmını azaltmıştır. Diğer iki numunede yakın enerji değerleri hesaplanmıştır. Bunun nedeni de içyapıda kullanılan 1,5 mm kalınlığındaki galvanizli çelik dilimlerin zayıf kalması merminin içyapıda parçalanmasına yeterli katkıda bulunamamasıdır. Ağırlıklarının birbirine yakın olmasına rağmen enerji değerlerinde büyük fark oluşmasının nedeni ikinci numunede perfore olmayan hızı bulurken büyük bir hız farkı oluştu. 678 m/s de delerken delmeyen hız olarak 586 m/s bulunmuş buda arada büyük bir hız farkı oluşturmuştur. Bu perfore olunmayan hız bulunurken üçüncü numunedeki gibi birbirine yakın atış hızı değerleri elde edilmeli ve sonucunda hesaplama yapılırken enerji değerlerine birbirine yakın olacaktır.

5.3. İkinci Grup Deney Sonuçları

5.3.1 İkinci grup 1. numune hasar analizi

Ön Destek Levhası

Her iki delikte de düzgün dairesel delik oluşmuştur. Ön tarafa doğru 2 mm kadar malzeme yığılması olmuş, arka tarafa doğru 5 mm lik malzeme sarkması olmuştur. Konik yapı görülmemiştir. Hasar tipi sünek malzeme davranışı göstermiştir.

V deflektör yapı

Ön mermi giriş tarafında bir dilimi tahrip etmiş yan komşu dilimleri eğerek deforme etmiştir. Mermi içerde yön değiştirmiş ve girdiği noktanın doğrultu eksenini kaybederek V dilimler tarafından yönlendirilmiştir. İçeriye doğru eğdiği dilimleri 10 mm eğerken arka taraftan saplanıp kaldığı mermi parçaları nedeniyle 8 mm civarında bir sarkma oluşmuştur. Bu sarkmada 1 nolu yapının arka destek levhasının arkasında sönümlenmiştir ve mermi yapıyı terk edememiştir.

Arka Destek Levhası

Deflektör içyapıdaki eğilmeden dolayı oluşan baskı, destek levhasında bir miktar bükümüştür. Kurşun içyapıdan çıkamadığı için arka destek levhası arkasında dairesel çıkıntı izi oluşmuştur. Çıkıntı boyu 5 mm oluşmuştur. Levha genelinde toplam bükülme yaklaşık 4mm dir.

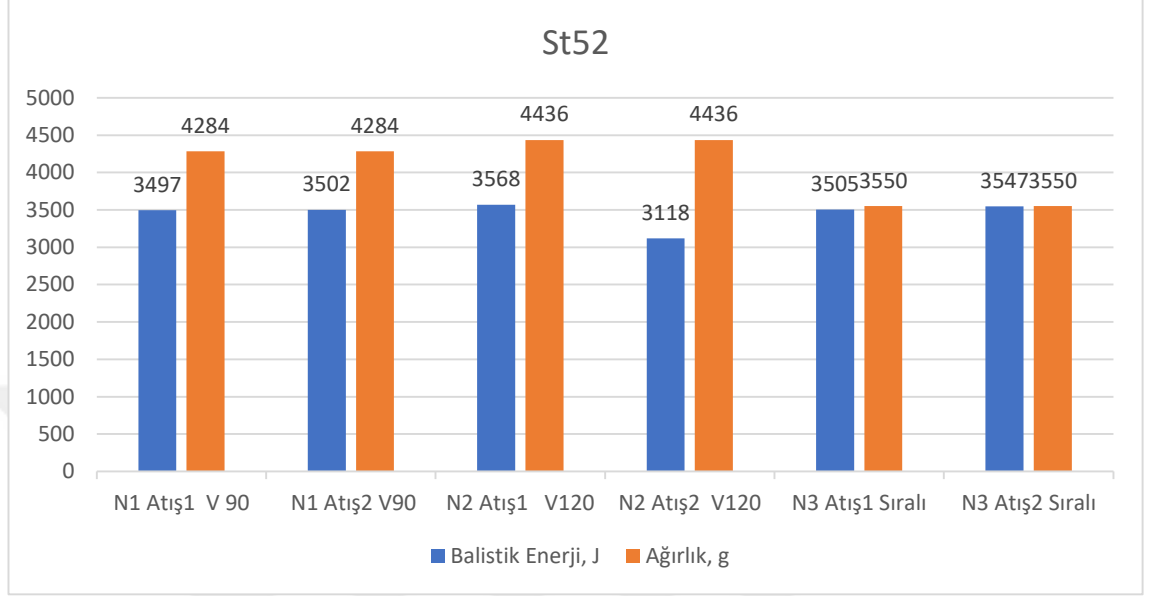
5.3.2. İkinci grup 2. Numune, V deflektör yapı (120 °) da hasar analizi

Her iki merminin de girişlerinde 2 adet V dilimi etkilemiştir. Hem arkaya doğru bükülme hem de diagonal açıyla deformasyon oluşmuştur. Arkaya ulaşınca kadar mermi enerjisinin sönümlendiği ve hızını azalttığı için arkada deforme ve bükülme oldukça az miktarda oluşmuştur. Arka destek levhasına kadar dilimlerde dilimler de 5 mm lik bir bozulma durumu görülmüştür.

5.3.3. İkinci grup 3. numunede (St52 levhalar arka arkaya sıralı) hasar analizi

Arka destek ön kısım 10 mm konik şişme olmuş yırtılma olmamış son levhada 3mm lik eğilme görülmüştür. Beş levha artarda sıralanmış ilk levhada penetrasyon gerçekleşmiş

ve düzgün daire şeklinde delinme olmuştur. Sonraki levhalardan 4.olanına büyük bir çökme oluşmuş ancak 5. Ve son katmanda ise delinememiş az bir miktar eğilme olmuştur. Bu yapı bu balistik ortamda tehdit parçacığını durdurmayı başarmıştır.



Şekil 5.5 : İkinci grup ilk üç numune için enerji ağırlık karşılaştırılması

Tablo 5.1 : İkinci Grup Numunelerde Balistik Sonuçlar

Atış No:	Çapma hızı v_1 (m/s)	Kısmi Delinme (KD) Tam Delinme (TD)	Çatlak Durumu	Arkadan Kopma	Mermi Artık Hızı, v_s (m/s)	Balistik Enerji (J) Çekirdek Ağırlığı, $m=9,65g$	Ağırlık gram
						$E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_s^2)$	
MALZEME: 2.5mm kalınlıkta ST52							
1. Numune: 2,5 mm St52+ 90° V saptırıcı+ 2.5 mm St52							
1.	851,37	KD	YOK	YOK	0	3497,30 J	4284
2	852,06	KD	YOK	YOK	0	3502,98J	4284
2. Numune: 2,5 mm St52+ 120° V saptırıcı+ 2.5 mm St52							
1.	860,00	KD	YOK	YOK	0	3568,57J	4436
2.	849,98	TD	VAR	YOK	276	3118,34J	4436
3. Numune: 5 adet 2,5 mm St52 aralıklı ard arda sıralı							
1.	852,36	KD	YOK	YOK	0	3505,44J	3550
2.	857,42	KD	YOK	YOK	0	3547,19J	3550
MALZEME: 3mm kalınlıkta Al 5754							
4. Numune: 3 mm Al5754+ 90° V saptırıcı+ 3 mm Al5754							
1.	863,77	TD	YOK	VAR	805.9	466,20J	1743
2	852,66	TD	YOK	VAR	789.78	498,30J	1743
5. Numune: 3 mm Al5754+ 120° V saptırıcı+ 3 mm Al5754							
1.	850,18	TD	YOK	VAR	714.12	1026,94J	1882
2.	852,66	TD	YOK	VAR	757.35	740,39J	1882
MALZEME: 3mm kalınlıkta Al 2024							
6. Numune: 3 mm Al2024+ 90° V saptırıcı+ 3 mm Al2024							
1.	858,81	TD	YOK	VAR	528.34	2211,83J	1750
2	862,19	TD	YOK	VAR	672.32	1405,79J	1750
7. Numune: 3 mm Al2024+ 120° V saptırıcı+ 3 mm Al2024							
1.	862,19	TD	YOK	VAR	701.56	1211,96J	1750
2.	854,05	TD	YOK	VAR	666.83	1373,86J	1750
MALZEME: 3mm kalınlıkta Al 7075							
8. Numune: 3 mm kalınlıkta Al7075+ 90° V saptırıcı+ 3 mm kalınlıkta Al7075							
1.	857,52	TD	VAR	VAR	712.55	1098,23J	1680
2	854,94	TD	VAR	VAR	657.00	1443,99J	1680
9. Numune: 3 mm kalınlıkta Al7075+ 120° V saptırıcı+ 3 mm kalınlıkta Al7075							
1.	861,59	TD	VAR	VAR	414.29	2753,63J	1961
2.	858,68	TD	VAR	VAR	411.45	2740,79J	1961

Grafik 5.5'te, Çeliğin yoğunluğunun büyük olması nedeniyle balistik enerji absorbe yeteneğinin fazlalığı görülmüştür. Aynı numunede farklı enerji miktarı bulunmasının nedeni merminin V dilim kanatçığına geliş konumuna bağlıdır. Örneğin N3 deki sıralı yapıda enerji değerleri neredeyse denk çıkmıştır. Çünkü yapı homojendir. Yani aynı yüzeye iki defa ateş edilmiş ve fark iki atışın hızları arasındaki hız farkından kaynaklanmıştır.

St52 numuneler bu tehdit seviyesindeki mermileri durdurmayı başarmışlardır. Alansal yoğunluğu en düşük olan üçüncü numunenin enerji absorbe kapasitesi en yüksek çıkmıştır. Merminin yönderilmesi hipotezi ilk iki numunede gerçekleşmiştir. Mermi hareket ekseninden sapmış ve yapı içinde yönlenmiştir. Buda hipoteze uygun düşmektedir. Merminin açılı deflektörler yardımı ile yapı içinde tutabilmektir. Balistik enerji sonuçları ortalaması için herüç yapı içinde birbirine yakındır ve değerlerde büyük bir sapma yoktur. Bunun anlamı mermiler yapıyı penetre etmiş ancak perfore edememişlerdir. Deliklerin görüntüsü sünek malzeme şeklindedir. Ve ön desteklerde arkaya çökme yoktur. Merminin burun geometrisi değiştikçe ve hızı azaldıkça iç yapı ve katmanlardaki deformasyon görüntüsü farklılık kazanmaktadır.

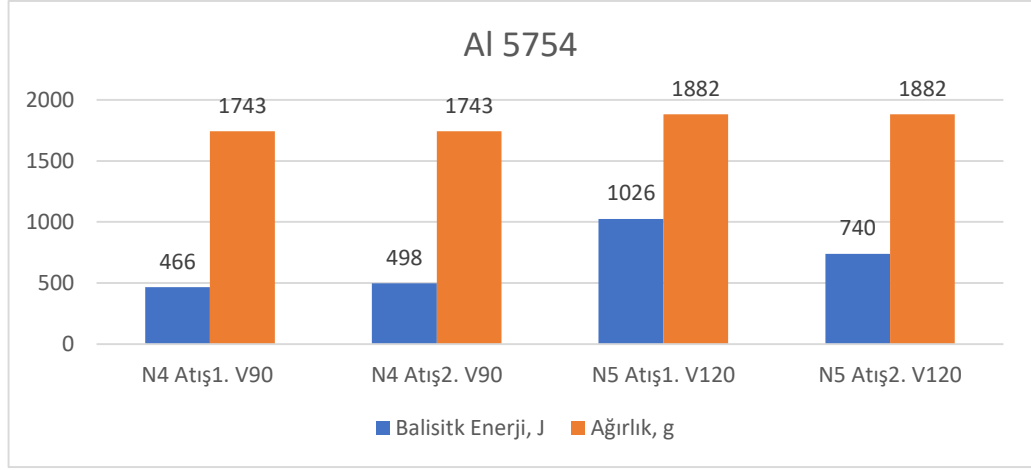
5.3.4 İkinci grup 4.ve 5. numunelerde hasar analizi

Bu numuneler alüminyum mekanik özellikleri en zayıf olanıdır. Sonuçlar birbirine yakın hasar benzer özelliklerdedir ancak V deflektörlerin açıları farklıdır.

Ön Destek Levhası: Girişte mermi öne doğru malzeme yığmış delik çapı 7mm düzgül daire formunda oluşmuştur. Arka yüzeyinde 5mm lik çıkıntı oluşmuş, malzeme ötelemesi olmuş ancak kopma görülmemiştir. Sünek deformasyon özelliği taşımaktadır.

V deflektör yapı: Mermi doğrusal yönünü değiştirmeden ve eğik düzlemler yönünü değiştirmeden geçmiş. Herhangi bir malzeme sarkması ve kopması görülmemiştir. Delik 10mm çapında ve V kanatçığının heriki kanadında delmiştir.

Arka Destek Levhası: Arkaya doğru düzgün çökme oluşmuş. Çökme nin ağız genişliği 15 mm civarında ölçülmüştür. Çökme konisinin taban çapı genişliği 22 mm dir. Sünek hasar görüntüsü olacak şekilde dairesel açılma oluşmuştur.



Şekil 5.6 : Al 5754 için balistik enerji gösterimi

Malzemenin mekanik zayıflığı nedeniyle mermi hızını yavaşlatamamış, içyapı mermi yönünü değiştirememiştir. Mermi bütünlüğünü korumuş hipotezdeki yavaşlat, parçala ve durdur, gerçekleşmemiştir. 120° açılı içyapı enerji absorbe performansı daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, mermi V kanatçık kesitine dik gelmesi orada biraz daha fazla enerji kaybetmesine yol açmıştır.

5.3.5 İkinci grup 6. numunede görülen hasarlar

Ön destek levhası

Delikler düzgün dairesel oluşmuştur. Öne doğru malzeme kabarması var arka tarafında 5 mm malzeme şişmesi mevcut. Düzenli açılma kırılma karakterli gerçekleşmiştir.

Arka destek levhası

İlk kurşun arka taraftan 50x25mm lik bir yırtık oluşturmuştur. Ayrıca büyük oranda göçme olmuş ve malzeme yırtılarak açılmıştır. Levhada basınç etkisi ile 15mm lik yay gibi eğilme görülmüştür. Bunun nedeni olarak, önden giren mermi ucu henüz sivri ve delicidir ancak içerideki yapının varlığı kurşunun uç geometrisinin körelmesi daha geniş alanlı olarak baskıya devam etmesini sağlamıştır. Bu baskı nedeni ile geniş yüzeyli yırtılma olayı gerçekleşmiştir. Ayrıca yapıdaki levhanın montajının daha sıkı ve cıvata sayısının artırılması kopmanın düzenli olmasını sağlayabilirdi.

5.3.6 İkinci grup 7. numunede görülen hasarlar

Ön destek levhası

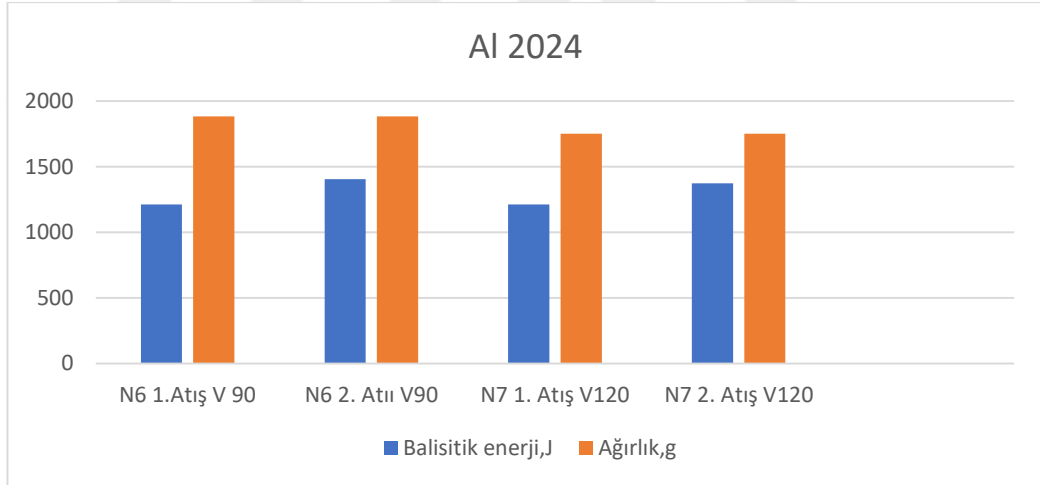
Delik daireleri düzenli ve 8mm çapında ölçülmüştür. Arkaya doğru yırtılarak genişlemiş. Yani 3mm lik levha kalınlığında bile konik görünüş oluşmuş. Kopma düzenli şekilde oluşmuştur.

V deflektör yapı

Kurşun giriş yönünde dilim arkaya doğru eğrilmiş çıkış tarafında eğerek ve malzeme yığarak konik çökme oluşturmuş.

Arka destek levhası

V deflektör yapı mermi enerjisini azaltamamış ve arkaya doğru eğilme nedeniyle destek levhasının 11mm yay şeklinde bükülme oluşmuştur. Kurşun çıkışları 20mm lik geniş daireden malzemeyi yırtmış koparmış ve deliği genişletmiştir.



Şekil 5.7 : Numune 6 ve 7 (Al 2024) İçin balistik enerj- ağırlık grafik gösterimi

Al2024 sertlik değerinin yüksek olması ayrıca temperlenmiş olması nedeniyle balistik enerji değeri diğer alüminyuma göre yüksek çıkmıştır. Ancak hasar özellikleri çok kırılkan yapı özelliği göstermektedir. Ancak Mermi girişi deliği ön taraftan düzgün dairesel şekilde ama arka çıkışlarda hem düzensiz kırılma hem de çökme görülmüştür. Burada 90° lik V- saptırıcılı yapının enerji absorbe miktarı 120° nin balistik enerji miktarından biraz aşağıda kalmıştır. Bu da kanatçıklar arasından merminin yoluna devam

etmesi parçalanmış ve geniş yüzeye sahip baskı alanının arka destek levhasında hasarın geniş yüzeyli olmasını getirmiştir.

5.3.7 İkinci grup 8. numunede görülen hasarlar

Ön destek levhası: Ön giriş düzenli dairesel delinmiş arkasında malzeme yığılması görülmemiştir. Presle malzeme koparılması tarzında arka tarafta malzeme kopması var. Kırılgan malzeme hasarı görülmüştür.

V deflektör içyapı: V dilimlerde kırılmalar görülmüştür. Mermi geçerken düzgün delik açarak geçmiş ama malzemeyi kenara yığarak değil kopmayı düzgün dairesel delik açarak gerçekleştirmiştir.

Arka destek levhası: Çıkışta 20mm lik düzensiz dairesel kopma görülmüştür. Levha ortadan kırılmıştır. Geriye doğru bir miktar bükülmede oluşmuştur. Mermi çıkış deliğinde 20 mm geriye malzeme sarkması oluşmuştur.

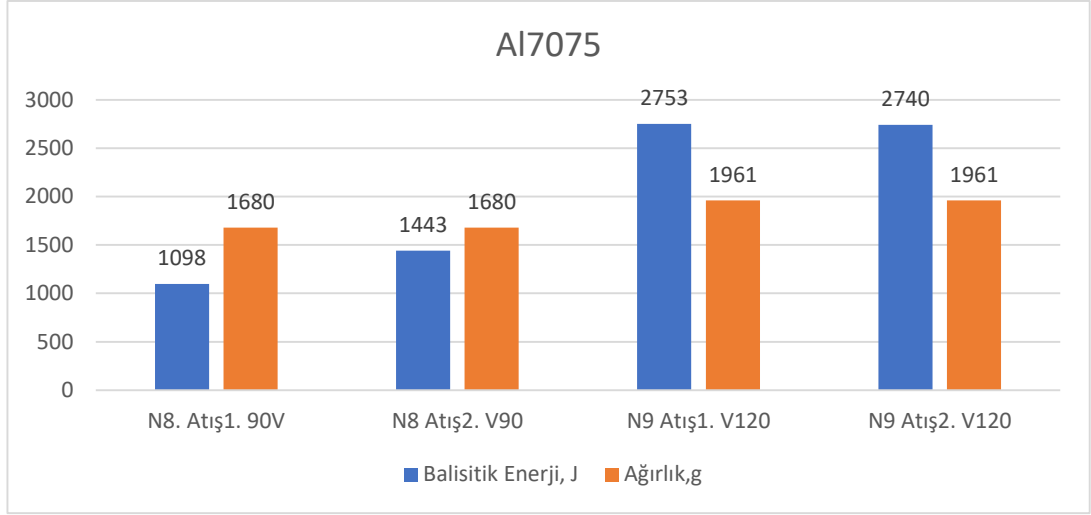
5.3.8 İkinci grup 9. numunede görülen hasarlar

Ön destek Levhası: delik düzenli ve tam dairesel şekilde oluşmuş. Levhada majör bükülme görülmemiştir.

V deflektör içyapı: İç dilimler bükülmüş. Dilimlerde hem delinme hem de bükülme mevcut. Dilimler rijit kalamamışlar. Konstruksiyon eksikliğine bağlı majör bükülmemeler mevcut.

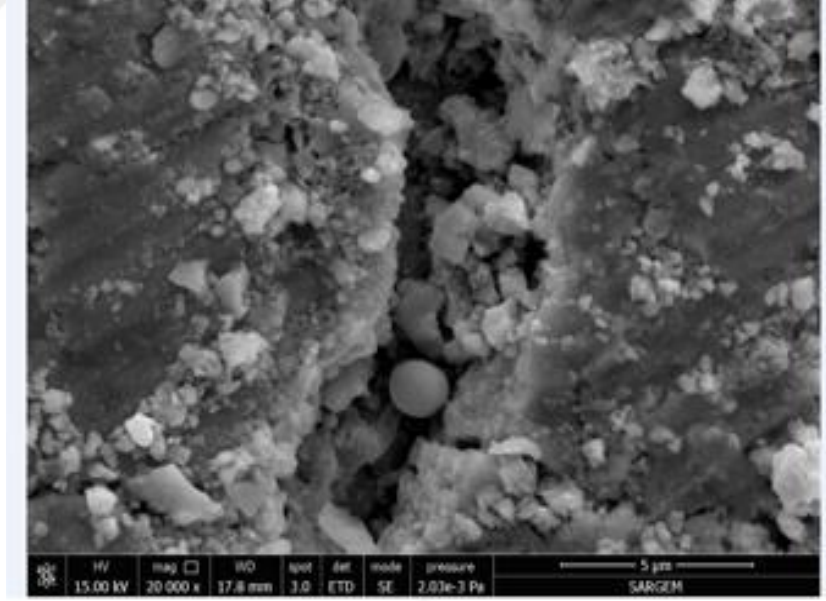
Arka destek levhası: Boydan komple kırılma görülmüştür. Mermi çıkışındaki 10x20mm genişliğinde bir alanda geriye doğru hem delinme hemde bükülme mevcut.

Bu grafikte, Çeliğin yoğunluğunun büyük olması nedeniyle balistik enerji absorbe yeteneğinin fazlalığı görülmüştür. Aynı numunede farklı enerji miktarı bulunmasının nedeni merminin V dilim kanatçığına geliş konumuna bağlıdır. Örneğin N3 deki sıralı yapıda enerji değerleri neredeyse denk çıkmıştır. Çünkü yapı homojendir. Yani aynı yüzeye iki defa ateş edilmiş ve fark iki atışın hızları arasındaki hız farkından kaynaklanmıştır.



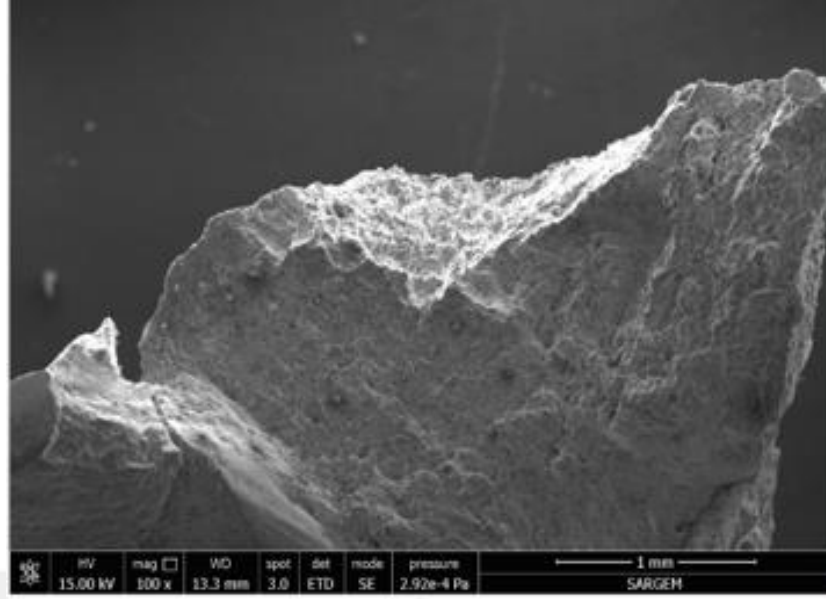
Şekil 5.8 : Al7075 İçin balistik enerji- ağırlık ilişkisini gösteren grafik.

Al7075 numulerindeki balistik enerji absorbe etme seviyesi 90 ° lik bükümlerde 120° lik bükümlerden aşağıda kalmıştır. Bunun nedenide merminin ön destek levhasını geçtikten sonra V kanatçıklara temas noktasının kanatçığa dik gelmesi olabilir. İmalat sürecinde 120° bükümlerde deformasyon sertleşmesi ortaya çıkardığı için bu açıdaki büküm daha fazla enerji absorbe etmiştir.



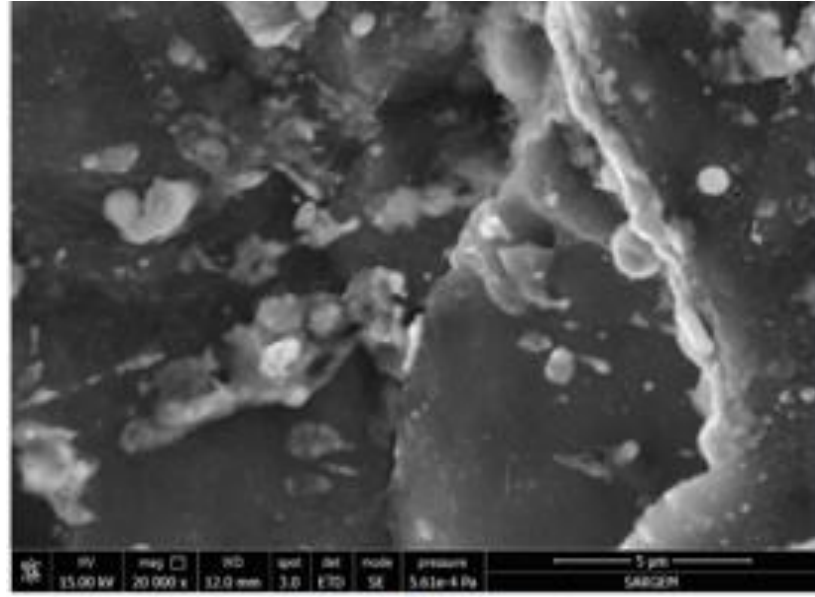
Şekil 5.9 : Malzeme St52 için SEM görüntüsü

Sünek hasar: Hasar sünek kırılma karakteristiğini göstermektedir. Tepecikler, malzeme içerinden mermi geçerken iri parçacıklar kopardığı için bu da mazmenin sünekliğini göstermektedir.



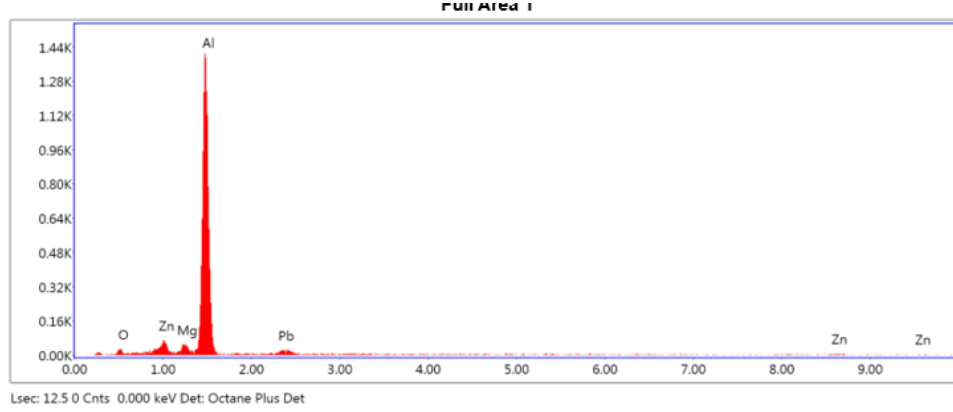
Şekil 5.10 : Malzeme Al 2024 için SEM görüntüsü

Numune arkası fotoğraflarında da katman formunda kopmalar görülmüştür. Kırılma karakteristiği temper özelliğinden dolayı seramik gibi olmasına rağmen malzeme işlem geçirirmeden önceki durumu sünektir. Sünek hasar: Kırılma yüzeyinin düz olmaması malzemenin sünekliliğini gösterir.



Şekil 5.11 : Malzeme Al 7075 için SEM görüntüsü

Al7075 te görülen kopma daha çok seramik benzeri parçalamayı göstermektedir. SEM fotoğrafında da kırılma bir yapı görüntüsü elde edilmiştir. EDS analizinde bir miktar çinkonun alaşım bileşenlerinden olduğu için bunun 7075 olduğunu ispatlamaktadır.



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	2.70	4.80	8.74
ZnL	5.83	2.54	26.79
MgK	2.70	3.17	28.11
AlK	84.17	88.86	867.67
PbM	4.60	0.63	11.95

Şekil 5.12 : Al 7075 ten alınan EDS analizi

Belirli oranda çinkonun varlığı bu alaşımın Al7075 olduğunu ispatlamaktadır. EDS analizi sonucunda belirli oranlarda magnezyum, çinko ve kurşun elementleri tesbit edilmiştir.

BÖLÜM 6. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında gerekli araştırmalar yapılmış ve malzeme çeşitliği ile kontrüksiyonla elde edilebilecek yapı çeşitliliği tartışılmıştır. Terminal balistikte merminin hedefe ulaşması ve hedefte oluşan etkileri tartışılmıştır. Merminin hedefe ulaşması hedefte ilk karşılaşması hedef içine penetre olması kaçınılmaz gözükmekle birlikte sahip olduğu enerjiyi hedef yapıya bırakarak etkisini kaybetmesi ve perfore etmemesi asıl amaç olmuştur. Mermi veya zırh delicilerin hedefte önce yavaşlatılması, sonra parçalanmasını sağlamak ve finalinde de durarak içinde kalmasını sağlamak bu çalışmanın ana fikri olmuştur. Bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır.

- İki farklı malzeme grubunda benzer yapı geometrisi kullanılmıştır.
- İlk grup ölçümleri üç ayrı yapının balistik performans deneyi V50 test yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.
- İlk grup testlerinde herbir yapıya farklı mermi hızlarında atışlar yapılmış ve hasar durumları gözlemlenmiştir.
- Bu grupta en başarılı yapı ilk numunenin olduğu görülmüştür. Bu yapıda 610-860m/s hızla atışlar yapılmış ve enyüksek hızda tam delinme görülmüştür. İkinci ve üçüncü test numunesinde kullanılan malzemelerin ve içyapı malzemesi galvanizli çelik yetersiz kalmış ve bu tehdit seviyesi gerektirmelerini karşılamamıştır.
- İlk numune St37 den olduğu için malzeme özellikleri balistik performans için uygundur, ancak malzeme alansal yoğunluğu yüksek olduğu için mobilite ve taşınabilirlik yönünden zayıf özellik taşımaktadır.
- İkinci grup numunelerde yapıların ebatı küçültülmüş ve daha hafif yapılar elde edilmiştir. Bunlarda mermi artık hızları ölçülecek ortam da test edilmişlerdir.
- İkinci grup numunelerde de çelik malzemenin kullanıldığı St52 den yapılan numuneler daha başarılı sonuçlar vermiştir.

- İkinci grup numunelerin alüminyum malzemedan oluşan numunelerde Al2024 ve Al7075 olanlarda enerji absorbe etme özelliği yüksek çıkmıştır.
- Alüminyum malzemeler, temperlenmiş olması nedeniyle boyuna ve major kırılma karakteri göstermiştir.
- Yine bu grup yapılar bu balistik tehdit seviyesi korumasını sağlamamış ancak içyapının kanatçıkları ile merminin tamamen parçalanması sağlanmıştır.
- Hızlı kamera çekimlerinde test numune arkasından mermi parçacıkları çıkışı olmuştur.
- Tam mermi çıkışı sadece Al5457 alüminyum numunesinde gerçekleşmiştir.
- Genel olarak malzemelerin sertliği arttıkça balistik enerji absorbe özelliği artmıştır.

Bu değerlendirmelerden sonra gelecekte yapılabilecek araştırmalar şu yönde olabilir:

- Diğer malzeme alternatiflerinin (titanyum alaşımları, zırh çelikleri, kompozitler, v.b.) kullanılması,
- Deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması,
- Malzemelerin güçlendirilmesi (kaplama, nano teknikle yüzey sertleştirilmesi, ısıtma işlemiyle sertleştirme vb.)
- Çeliklere Yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi
- İçyapı geometrisinde güçlendirici değişiklik yapılması.
- Enerji hesaplamaları yapılırken merminin penetrasyonu esnasında oluşan ısı kaybı, merminin parçalanarak kütle kaybı gibi değişkenler göz ardı edilmştir. Termal ölçüm yöntemi ile bu ısı kaybının hesaplanarak enerji absorbe performansı gözden geçirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Deniz, H. (2009). *Çift Fazlı Bir Çeliğin 7, 62mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Yavaş, M. O. (2009). *Hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı kompozit malzeme tasarımı ve balistik dayanımı* (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [3] Evci, C. (2009). *Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi*. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] Deniz, T. (2011). *Ballistic penetration of hardened steel plates* (Master's Thesis), Middle East Technical University, Ankara.
- [5] Yolaçan, G. (2013). *Katlı E-Cam/ Polyester dokuma kumaş kompozitlerin dikişli ve nano-katkılı formlarının mekanik ve balistik özelliklerinin deneysel belirlenmesi*. (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [6] Kılıç, N. (2014). *Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulation and Ballistic Tests* (Doctoral Dissertation), Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [7] Danış, F. (2014). *Development of interior ballistic simulation software* (Master's Thesis), Middle East Technical University, Ankara.
- [8] Derelioğlu, Z. (2010). *Al₂O₃ ve Al₂O₃-ZrO₂ kaplı seramik plakaların balistik dayanımının incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Arslan, K. (2014). *Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş plakalar ile takviyelendirilmiş bal peteği sandviç yapıların balistik performansının incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [10] Barut, C. (2015). *Aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik performanslarının ve mekanik davranışlarının incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [11] Durmaz, T. (2017). *Development of high strength aluminum matrix composite backing plates for ballistic armor*. (Master's Thesis), Middle East Technical University, Ankara.
- [12] Şenyılmaz, H.K. (2018). *Dilatant Malzemelerin Balistik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması*. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [13] David, N. V., Gao, X. L., & Zheng, J. Q. (2009). Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Applied Mechanics Reviews*, 62 (5).
- [14] Shiue, Y. Y. M. (2014). *Design and Optimization of Hybrid Ballistic Protection Systems* (Doctoral dissertation), McGill University, Montreal, Canada.
- [15] Tambvekar, A. A. (2013). *Development and characterization of light weight laminated composite under impact loading* (Doctoral dissertation), University of Missouri-Columbia, USA.
- [16] Ünal, E. (2005). *Development and chracterization of light-weight armor materials*. (Doctoral dissertation), İzmir Institute of Technology, İzmir.
- [17] Flores-Johnson, E. A., Saleh, M., & Edwards, L. (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, 38(12), 1022-1032.
- [18] Özgültekin, S. E. (2012). *Balistik zırhlarda kullanılan kompozit malzeme kombinasyonlarının incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [19] Übeyli, M., Yıldırım, R. O. & Ögel, B. (2007). On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors. *Materials & design*, 28(4), 1257-1262.
- [20] Chai, G. B., & Manikandan, P. (2014). Low velocity impact response of fibre-metal laminates—A review. *Composite Structures*, 107, 363-381.
- [21] Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R., & Bhatnagar, N. (2016). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89, 1-13.
- [22] Übeyli, M., Yıldırım, R. O., & Ögel, B. (2008). Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂₀₂₄ laminated composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3), 356-364.
- [23] Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 36(7), 2103-2115.
- [24] Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A., & Güden, M. (2014). Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 63, 427-438.
- [25] Jena, P. K., Ramanjeneyulu, K., Kumar, K. S., & Bhat, T. B. (2009). Ballistic studies on layered structures. *Materials & Design*, 30(6), 1922-1929.
- [26] Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S., & Malo, K. A. (1999). Ballistic penetration of steel plates. *International journal of impact engineering*, 22(9-10), 855-886.

- [27] Santiago, R., Cantwell, W., & Alves, M. (2017). Impact on thermoplastic fibre-metal laminates: Experimental observations. *Composite structures*, 159, 800-817.
- [28] Yunfei, D., Wei, Z., Yonggang, Y., & Lizhong, S. (2014). Experimental investigation on the ballistic performance of double-layered plates subjected to impact by projectile of high strength. *International Journal of Impact Engineering*, 70, 38-49.
- [29] Kolopp, A., Rivallant, S., & Bouvet, C. (2013). Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 61, 24-35.
- [30] Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112-121.
- [31] Sadighi, M., Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. (2012). Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 77-90.
- [32] Kpenyigba, K. M., Jankowiak, T., Rusinek, A., Pesci, R., & Wang, B. (2015). Effect of projectile nose shape on ballistic resistance of interstitial-free steel sheets. *International Journal of Impact Engineering*, 79, 83-94.
- [33] Aktaş, M., Atas, C., İçten, B. M., & Karakuzu, R. (2009). An experimental investigation of the impact response of composite laminates. *Composite Structures*, 87(4), 307-313.
- [34] Sonnenfeld, C., Mendil-Jakani, H., Agogué, R., Nunez, P., & Beauchêne, P. (2017). Thermoplastic/thermoset multilayer composites: A way to improve the impact damage tolerance of thermosetting resin matrix composites. *Composite Structures*, 171, 298-305.
- [35] Boria, S., Scattina, A., & Belingardi, G. (2017). Impact behavior of a fully thermoplastic composite. *Composite Structures*, 167, 63-75.
- [36] Allen, E. J. (2018). Approximate ballistics formulas for spherical pellets in free flight. *Defence technology*, 14(1), 1-11.
- [37] Gilioli, A., Manes, A., Giglio, M., & Wierzbicki, T. (2015). Predicting ballistic impact failure of aluminium 6061-T6 with the rate-independent Bao–Wierzbicki fracture model. *International Journal of impact engineering*, 76, 207-220.
- [38] Camcı, E., Findik, F. (2019). Ballistic impact performance of laminated composite structures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 7(3), 1329-1344.
- [39] Pandya, K. S., & Naik, N. K. (2015). Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of carbon nanotube dispersed resin. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 49-59.

- [40] Phoenix, S. L., & Porwal, P. K. (2003). A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems. *International Journal of Solids and Structures*, 40(24), 6723-6765.
- [41] Fang, H., Gutowski, M., DiSogra, M., & Wang, Q. (2016). A numerical and experimental study of woven fabric material under ballistic impacts. *Advances in Engineering Software*, 96, 14-28.
- [42] Crouch, I. G., Appleby-Thomas, G., & Hazell, P. J. (2015). A study of the penetration behaviour of mild-steel-cored ammunition against boron carbide ceramic armours. *International Journal of Impact Engineering*, 80, 203-211.
- [43] Sun, D., Jiang, J., Zhang, M., & Wang, Z. (2016). Ballistic experiments on the mechanism of protective layer against domino effect caused by projectiles. *Journal of loss prevention in the process industries*, 40, 17-28.
- [44] Rahman, N. A., Abdullah, S. H. A. H. R. U. M., Zamri, W. F. H., Abdullah, M. F., Omar, M. Z., & Sajuri, Z. A. I. N. U. D. D. I. N. (2016). Ballistic limit of high-strength steel and Al7075-T6 multi-layered plates under 7.62-mm armour piercing projectile impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 1658-1676.
- [45] Garcia-Avila, M., Portanova, M., & Rabiei, A. (2014). Ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system. *Procedia Materials Science*, 4, 151-156.
- [46] Muñoz, R., Martínez-Hergueta, F., Gálvez, F., González, C., & LLorca, J. (2015). Ballistic performance of hybrid 3D woven composites: Experiments and simulations. *Composite Structures*, 127, 141-151.
- [47] Pandya, K. S., Pothnis, J. R., Ravikumar, G., & Naik, N. K. (2013). Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 44, 128-135.
- [48] Šháněl, V., & Španiel, M. (2014). Ballistic impact experiments and modelling of sandwich armor for numerical simulations. *Procedia Engineering*, 79, 230-237.
- [49] Tham, C. Y., Tan, V. B. C., & Lee, H. P. (2008). Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 35(5), 304-318.
- [50] Palleti, H. K. T., Gurusamy, S., Kumar, S., Soni, R., John, B., Vaidya, R., ... & Naik, N. K. (2012). Ballistic impact performance of metallic targets. *Materials & Design*, 39, 253-263.
- [51] O'masta, M. R., Compton, B. G., Gamble, E. A., Zok, F. W., Deshpande, V. S., & Wadley, H. N. G. (2015). Ballistic impact response of an UHMWPE fiber reinforced laminate encasing of an aluminum-alumina hybrid panel. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 131-144.
- [52] Sorrentino, L., Bellini, C., Corrado, A., Polini, W., & Aricò, R. (2014). Ballistic performance evaluation of composite laminates in kevlar 29. *Procedia Engineering*, 88, 255-262.
- [53] Srivathsa, B., & Ramakrishnan, N. (1999). Ballistic performance maps for thick metallic armour. *Journal of Materials Processing Technology*, 96(1-3), 81-91.

- [54] Garcia-Avila, M., Portanova, M., & Rabiei, A. (2015). Ballistic performance of composite metal foams. *Composite Structures*, 125, 202-211.
- [55] Chen, H. C., Chen, Y. L., & Shen, B. C. (2012). Ballistic resistance analysis of double-layered composite material structures. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 62, 15-25.
- [56] Kılıç, N., & Ekici, B. (2013). Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition. *Materials & Design*, 44, 35-48.
- [57] Rosenberg, Z., & Kositski, R. (2017). Deep indentation and terminal ballistics of polycarbonate. *International Journal of Impact Engineering*, 103, 225-230.
- [58] Ansari, M. M., & Chakrabarti, A. (2016). Progressive damage of GFRP composite plate under ballistic impact: experimental and numerical study. *Polymers and Polymer Composites*, 24(7), 579-586.
- [59] Holmen, J. K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O. S., & Børvik, T. (2013). Effects of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 119-133.
- [60] Reddy, P. R. S., Reddy, T. S., Madhu, V., Gogia, A. K., & Rao, K. V. (2015). Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact. *Materials & Design*, 84, 79-86.
- [61] Gamache, R. M., Giller, C. B., Montella, G., Fragiadakis, D., & Roland, C. M. (2016). Elastomer-metal laminate armor. *Materials & Design*, 111, 362-368.
- [62] Manero II, A., Gibson, J., Freihofer, G., Gou, J., & Raghavan, S. (2015). Evaluating the effect of nano-particle additives in Kevlar® 29 impact resistant composites. *Composites Science and Technology*, 116, 41-49.
- [63] Gama, B. A., & Gillespie Jr, J. W. (2011). Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. *International Journal of Impact Engineering*, 38(4), 181-197.
- [64] Balos, S., Grabulov, V., Sidjanin, L., Pantic, M., & Radisavljevic, I. (2010). Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application. *Materials & Design*, 31(6), 2916-2924.
- [65] Karagöz, Ş., & Atapek, H. (2007). Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı. 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, 186-196.
- [66] Jindal, P., Pande, S., Sharma, P., Mangla, V., Chaudhury, A., Patel, D., ... & Goyal, M. (2013). High strain rate behavior of multi-walled carbon nanotubes–polycarbonate composites. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 417-422.
- [67] Ryan, S., Li, H., Edgerton, M., Gallardy, D., & Cimpoeu, S. J. (2016). The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel: An experimental investigation. *International journal of impact engineering*, 94, 60-73.
- [68] Candan, C. (2007). Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMW-PE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik

- [69] Gamble, E. A., Compton, B. G., & Zok, F. W. (2013). Impact response of layered steel–alumina targets. *Mechanics of Materials*, 60, 80-92.
- [70] Shim, G. I., Kim, S. H., Eom, H. W., Ahn, D. L., Park, J. K., & Choi, S. Y. (2015). Improvement in ballistic impact resistance of a transparent bulletproof material laminated with strengthened soda-lime silicate glass. *Composites Part B: Engineering*, 77, 169-178.
- [71] Holmen, J. K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O. S., & Børvik, T. (2013). Effects of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 119-133.
- [72] Demir, T., Übeyli, M., & Yıldırım, R. O. (2008). Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 29(10), 2009-2016.
- [73] Ćwik, T. K., Iannucci, L., Curtis, P., & Pope, D. (2016). Investigation of the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite panels. *Composite Structures*, 149, 197-212.
- [74] Zhou, Y., & Chen, X. (2016). Numerical investigations into the response of fabrics subjected to ballistic impact. *Journal of Industrial Textiles*, 45(6), 1530-1547.
- [75] O'Masta, M. R., Crayton, D. H., Deshpande, V. S., & Wadley, H. N. G. (2015). Mechanisms of penetration in polyethylene reinforced cross-ply laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 249-264.
- [76] Tria, D. E., & Trębiński, R. (2017). Methodology for experimental verification of steel armour impact modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 102-116.
- [77] Rao, M. P., Duan, Y., Keefe, M., Powers, B. M., & Bogetti, T. A. (2009). Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric. *Composite Structures*, 89(4), 556-566.
- [78] Del Rosso, S., Iannucci, L., & Curtis, P. T. (2016). On the ballistic impact response of microbraid reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 137, 70-84.
- [79] Børvik, T., Forrestal, M. J., & Warren, T. L. (2010). Perforation of 5083-H116 aluminum armor plates with ogive-nose rods and 7.62 mm APM2 bullets. *Experimental Mechanics*, 50(7), 969-978.
- [80] Forrestal, M. J., Warren, T. L., Børvik, T., & Chen, W. (2015). Perforation of 6082-T651 aluminum plates with 7.62 mm APM2 bullets at normal and oblique impacts. In *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1* (pp. 389-402). Springer, Cham.
- [81] Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O., & Keleş, Ö. (2014). The ballistic performance of SiC–AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 31-36.

- [82] Hazell, P. J., Roberson, C. J., & Moutinho, M. (2008). The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. *Materials & Design*, 29(8), 1497-1503.
- [83] Nguyen, L. H., Ryan, S., Cimpoeu, S. J., Mouritz, A. P., & Orifici, A. C. (2015). The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 174-183.
- [84] Findik, F., & Tarim, N. (2003). Ballistic impact efficiency of polymer composites. *Composite structures*, 61(3), 187-192.
- [85] Gömeç, G. (2004). *Zırh çeliklerinin balistik özelliklerinin deneysel ve bilgisayar destekli incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri enstitüsü, Sakarya.
- [86] Camcı, E. (2020). Metal Esaslı Sandviç Kompozitlerin Balistik Performansının İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1454-1469.
- [87] Shih, C. H., You, J. L., Lee, Y. L., Cheng, A. Y., Chang, C. P., Liu, Y. M., & Ger, M. D. (2022). Design and Ballistic Performance of Hybrid Plates Manufactured from Aramid Composites for Developing Multilayered Armor Systems. *Polymers*, 14(22), 5026.
- [88] Tepeduzu, B., & Karakuzu, R. (2019). Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*, 45(2), 1651-1660.
- [89] Sözen, E., Gündüz, G. ve İmren, E. (2016). Balistik panel ve koruyucu zırh parçaları kullanılan lif ve kompozit malzemeler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18 (2), 194-204.
- [90] Url-1 <<https://www.ankarametal.com.tr/urunler/aluminyum/teknik-bilgiler/aluminyum-alasimlari/>>, erişim tarihi: 11.05.2023.
- [91] Url-2 <<https://sargem.sakarya.edu.tr/tr/icerik/16367/83771/katalog>>, erişim tarihi: 20.03.2023.
- [92] Adalet Programları Ofisi. (2008). *Vücut Zırhının Balistik Direnci*. NIJ Standardı-0101.06. Washington DC.
- [93] Url-3 <https://www.detel.com.tr/St37_nedir/>, erişim tarihi: 25.04.2023.

EKLER

EK A: Otokar tarafından düzenlenen İlk grup numune atış hızları ve sonuçları

EK B: Roketsan A.Ş. tarafından hazırlanan ikinci grup atış hızları ve sonuçları



EK A

NUMUNE NO 1 : 3x0,8 mm AL + 2 mm St 37 + 3 mm St 37 Kanatçık + 4 mm St 37			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Mühimmat	Sonuç
1	866,84	7.62 mm x 51 M80 Nato Ball	Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
2	634,45		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
3	655,35		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
4	644,98		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
5	700,23		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
Numune Ağırlığı : 6,65 kg		Numune Kalınlığı : 32 mm	Numune Ebadı : 215 mm x 300 mm
NUMUNE NO 2 : 2 mm St 37 + 1,5 mm Galvanizli Çelik Kanatçık + 4 mm St 37			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Mühimmat	Sonuç
1	768,68	7.62 mm x 51 M80 Nato Ball	Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
2	586,38		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
3	728,78		Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
4	692,55		Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
5	678,17		Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
Numune Ağırlığı : 4,85 kg		Numune Kalınlığı : 28 mm	Numune Ebadı : 215 mm x 300 mm
NUMUNE NO 3 : 3 mm St 37 + 1,5 mm Galvanizli Çelik Kanatçık + 3 mm St 37			
Atış No	Çarpma Hızı (m/s)	Mühimmat	Sonuç
1	649,93	7.62 mm x 51 M80 Nato Ball	Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
2	653,34		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
3	660,87		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
4	647,72		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
5	611,06		Numune Delinmedi Şahit Folyo Delinmedi
6	675,83		Numune Delindi Şahit Folyo Delindi
Numune Ağırlığı : 4,90 kg		Numune Kalınlığı : 28 mm	Numune Ebadı : 215 mm x 300 mm

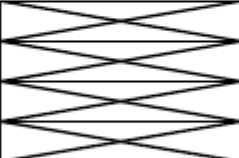
Şekil A1 : Otokar tarafından düzenlenen İlk grup numune atış hızları ve sonuçları

EK B

EK-A BALİSTİK TEST VERİ KAYIT FORMU									
 KAPALI BALİSTİK TEST LABORATUVARI		BALİSTİK TEST VERİ KAYIT FORMU							
Proje Kodu / Test Talep No		90972/159			Test Tarihi		10.05.2022		
R8 Test Sonuç Raporu No		RT-XXX			Referans Standart		MIL-PRF-46103E/MIL-STD-662/AEP-55 Vol1 Ed2		
Testin Tanımı		Üniversite/Roketsan Zırh Çalışmaları Balistik Test			Referans Prosedür		DOC-00043729		
Test Edilecek Malzeme	Cins	Açık Konfigürasyona Sahip Zırh Çözümleri			Test İçin Kullanılan	Namlu Kalibre/No		7,62x51 M80 NATO Balı	
	No/Adet	14				Mühimmat Tipi	Stok No	MU1059	
	Parti No	U/D					Kabül Raporu No	U/D	
	Boyutları(mm)	200x200					Kafile No	LOT 69-ALM-69	
	Kalınlığı(mm)	U/D				Barut Tipi	Stok No	MU1059	
	Müşteriye Gönderilecek	Evet:	X	Hayır:			Kabül Raporu No	U/D	
	Saklanacak	Evet:	Hayır: X	Yer:			Kafile No	LOT 69-ALM-69	
Şartlandırma		Evet:	X	Hayır:	Hedef-Namlu Mesafesi (mm)		15,04 m		
		Sıcaklık(°C): 21	Nem(%): U/D		Hız Ekranlarının Hedefe Olan Mesafesi (mm)		L8021: 8 m	L8023: 8 m	
		Şartlandırma Baş. (Tarih/Saat)	U/D		Şahit Plaka		0,5 mm 2024 T3 Al Plaka	0,5 mm 2024 T3 Al Plaka	
		Şartlandırma Bit. (Tarih/Saat)	U/D		Laboratuvar Ortamı		Sıcaklık(°C): 19,6	Nem(%): 28,7	
ÖLÇÜM CİHAZLARI/ALETLERİ-KALİBRASYON KOD NO.									
Terazi		BTU-009							
Yalpa Ölçme Cihazı		BTG-007-01							
Ağı Ölçer		QTU-314							
Hız Ekranları		1. BTU-017-01 2. BTU-017-02							
Lazer Mesafe Ölçme Cihazı		BTU-015							
Sıcaklık Ölçer		QTU-282-01,02,03							
Kumpas/Mikrometre		BTU-004							
Şeritmetre		BTU-028							
Şartlandırma Kabini		U/D							
AÇIKLAMALAR									
DOC-00043729 Test Hazırlık Raporuna göre gerçekleştirilmiş zırh testidir. Testler sırasında numuneyi terk eden mermi çekirdeğinin hızını ölçmek amacıyla 1024x788 çözünürlükte 40000 fps hızlı kamera verisi alınmıştır. Testler sırasında yaklaşık 3 m boyutunda aydınlanma sağlayan ışık kaynakları 7-10 m mesafeler ile konumlandırılmıştır. Işık kaynaklarına tetik sinyali namluya 2 m mesafede yer alan acoustic trigger ile sağlanmıştır.									
EKLER									

QL_29_Rev.1 V50 Balistik Test Kayıt Formu

Şekil B1 : Roketsan A.Ş. tarafından hazırlanan ikinci grup atış hızları ve sonuçları

 roket san KAPALI BALİSTİK TEST LABORATUVARI		BALİSTİK TEST VERİ KAYIT FORMU									
TEST SONUÇLARI											
Atış No	Barut Miktarı (gr)	Çekirdek Ağırlığı (gr)	Çarpma Hızı (m/s)	Hedef Eğim Açısı (0°-90°)	Yalpa Açısı (55°)	Vuruş Noktası 2 (İki mermi çapı,mm.)	Geçerli - Geçersiz	Kısmi Delinme (KD) Tam Delinme(TD)	Çatlak Durumu (variyok)	Arkadan Kopma (variyok)	Açıklamalar
1	3,00	9,66	554,65	0,00	U/D	Evet	Geçersiz	U/D	U/D	U/D	ısıtma
2	3,00	9,59	562,56	0,00	U/D	Evet	Geçersiz	U/D	U/D	U/D	ısıtma
3	2,80	9,65	515,15	0,00	U/D	Evet	Geçersiz	U/D	U/D	U/D	ısıtma
4	3,06	9,65	846,11	0,00	U/D	Evet	Geçerli	U/D	U/D	U/D	ısıtma
5	3,06	9,65	857,32	0,00	U/D	Evet	Geçerli	U/D	U/D	U/D	ısıtma
1	3,06	9,65	851,37	0,30	0,50	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-1
2	3,06	9,65	852,06	0,30	0,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-1
1	3,06	9,65	850,67	0,30	0,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-2
2	3,06	9,65	849,68	0,30	1,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-2
1	3,06	9,65	860,00	0,20	0,50	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-3
2	3,06	9,65	849,98	0,20	0,00	Evet	Geçerli	TD	VAR	YOK	159-3
1	3,06	9,65	859,61	0,30	0,50	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-4
2	3,06	9,65	854,25	0,30	1,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-4
1	3,06	9,65	852,36	0,20	1,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-5
2	3,06	9,65	857,42	0,20	0,00	Evet	Geçerli	KD	YOK	YOK	159-5
1	3,06	9,65	863,77	0,20	0,00	Evet	Geçerli	TD	YOK	VAR	159-6
2	3,06	9,65	852,66	0,20	0,00	Evet	Geçerli	TD	YOK	VAR	159-6
1	3,06	9,65	850,18	0,50	0,00	Evet	Geçerli	TD	YOK	VAR	159-7
2	3,06	9,65	852,66	0,50	0,00	Evet	Geçerli	TD	YOK	VAR	159-7
1	3,06	9,65	858,81	0,50	0,00	Evet	Geçerli	TD	YOK	VAR	159-8
BALİSTİK SONUÇ						AÇIKLAMALAR					
V50 Ballistik Limit (m/s)						14 farklı zırh çözümüne ballistik test atışları gerçekleştirilmiş ve delinme olması durumunda numunenin arka yüzeyinden çıkan projektli parçasının hızı yüksek hızlı kamera görüntüsü ile analiz edilmiştir.					
En Yüksek KD Çarpma Hızı (m/s)											
En Düşük TD Çarpma Hızı (m/s)											
İstenilen Minimum Ballistik Limit (m/s)											
TESTİ İCRA EDEN											
TEKNİSYEN			TEKNİSYEN				TEST AMİRİ				
Deniz ÇETİN Hakan Okay GENÇTÜRK			Abdulkadir ÖZDEMİR				Kublay ÖZGÜR				

Q_29_Rew.1 V50 Ballistik Test Kayıt Formu

Şekil B1 (devam) : Roketsan A.Ş. tarafından hazırlanan ikinci grup atış hızları ve sonuçları

