

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SERAMİK KATMANLI ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL VE
ANALİTİK BALİSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ**

HAZIRLAYAN

GÜNGÖR ORÇUN ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SERAMİK KATMANLI ZİRH PLAKALARIN DENEYSEL VE
ANALİTİK BALİSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ**

HAZIRLAYAN

GÜNGÖR ORÇUN ACAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. Ö.FARUK ELALDI

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Güngör Orçun ACAR tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 19 / 01 / 2021

Tez Adı: Seramik Katmanlı Zırh Plakaların Deneysel Ve Analitik Balistik Performans Analizleri

Tez Jüri �yeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)	�mza
Prof.Dr. Ö.Faruk Elaldı, Başkent Üniversitesi	
Dr. Öğr. Üyesi B. Cenk Balçık, Başkent Üniversitesi	
Doç. Dr. A.Hakan Argeşo, Atılım Üniversitesi	

ONAY

Prof.Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 26 / 01 / 2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: Güngör Orçun Acar

Öğrencinin Numarası: 21710325

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Faruk Elaldı

Tez Başlığı: Seramik Katmanlı Zırh Plakaların Deneysel Ve Analitik Balistik Performans Analizleri

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 92 sayfalık kısmına ilişkin, 26 / 01 / 2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından TURNITIN adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

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

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

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı Prof. Dr. Faruk ELALDI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda ve hayatımın her noktasında yanımda olan sevgili eşim Müge Acar'a, yüksek lisans yapmam için ilk ışığı yakan sevgili annem Birten Acar'a, yüksek lisans kaydından deneylerimi gerçekleştirdiğim güne kadar bana destek veren babam Mehmet Nuri Acar'a, deneylerimi gerçekleştirmeme yardımcı olan eşimin değerli ailesine en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme temini ve balistik testler için bana imkan sağlayan ve çalıştığım kurum olan Savunma Sanayi Başkanlığına, tez çalışmam esnasında görüşleriyle ve bilgisiyle bana her anlamda destek olan değerli hocam Prof. Dr. Faruk Elaldı'ya teşekkür ederim.

ÖZET

Güngör Orçun ACAR

SERAMİK KATMANLI ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL VE ANALİTİK BALİSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Askeri araçlarda kullanılan zırh sistemleri günümüzde büyük bir önem taşımaktadır. Orduların motorize şekilde savaş alanında hızlı hareket etmesi cephenin takviye edilmesi açısından hayati bir önem taşımaktadır. Özellikle zırhlı personel taşıyıcıların cepheye asker sevkiyatı sırasında personeli balistik tehditlere karşı koruması ve hızlı hareket etmesi bu araçların olmazsa olmazlarından. Zırhlı Personel Taşıyıcılarda kullanılan zırhın da aracı balistik tehditlere karşı korurken bir yandan da hareket yeteneğinin azaltmaması gerekmektedir. Bu nedenle zırh sistemleri sürekli olarak geliştirilmektedir. Yapılan tez çalışması zırhlı personel taşıyıcı araçlarda kullanılabilecek Stanag 4569 Seviye-2 koruma seviyesine sahip, farklı malzeme katmanlarından ve farklı katman dizilişlerinde olan ancak alansal yoğunluğu en düşük bir zırh paketlerinin elde edilmesini kapsamaktadır. Ayrıca kullanılan malzeme ve dizilimler için analitik yöntemler kullanılarak yapılan deneyler modellenmiştir. Bu çalışmada özellikle katman sayısının, katman cinsinin ve katman dizilişinin aynı balistik koruma seviyesini sağlamak kaydıyla alansal yoğunluğa etkisi analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda incelenen alternatif zırh paketleri arasından balistik koruma seviyesi en yüksek ancak alansal yoğunluğu en düşük zırh paketi belirlenmiştir. Buna ek olarak, deneysel sonuçlara yakınsayan en iyi analitik model ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Balistik Performans, Balistik Koruma, Seramikler, Alüminyum 6061, Zırh Sistemleri

ABSTRACT

Güngör Orçun ACAR

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL BALLISTIC PERFORMANCE ANALYSIS OF CERAMIC LAYERED ARMOR PLATES

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

2021

Armor systems, which are used in military vehicles, are very important in modern warfare. The rapid movement of the armies on the battlefield in a motorized manner is crucial in terms of reinforcing the front. Especially, Armored Personnel Carriers (APC), which are used for carrying the soldiers to the battlefield, have to act rapidly and protect soldiers from enemy fire. While protecting the troops from enemy fire, the armor used in APCs should not reduce vehicles mobility. Therefore, armor systems are constantly being improved. This thesis covers obtaining armor packages with Stanag 4569 Level-2 protection level that can be used in armored personnel carrier vehicles by means of different material layers, different layer sequences for the lowest areal density. Meanwhile, experimental results were verified by means of analytical models developed for different materials. In this study, the effect of number of layers, layer material and layer arrangement on the areal density were investigated analytically and experimentally. At the end of this study, among the alternative armor packages, which are examined, the lowest areal density and the highest ballistic protection was determined. In addition, the best analytical model that converges to experimental results was determined.

KEY WORDS: Ballistic Performance, Ballistic Protection, Ceramics, Aluminum 6061, armor systems

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. BALİSTİK.....	8
3.1. İç Balistik	8
3.2. Dış Balistik.....	9
3.3. Terminal Balistik	9
3.4. Balistik Standartlar	10
4. ZIRHLAR	12
4.1. Pasif Zırhlar	12
4.1.1. Sıvı zırhlar	13
4.1.2. Metal zırhlar	13
4.1.3. Seramik zırhlar	15
4.1.4. Polimer zırhlar	16
4.2. Reaktif zırhlar	16
4.3. Aktif Zırhlar	16
5. BALİSTİK TEHDİTLER.....	17
5.1. Kinetik Enerjili Balistik Tehditler	17
5.1.1. Küçük kalibreli enerjili mühimmatlar	17
5.1.2. Yüksek kalibreli kinetik enerjili mühimmatlar	18
5.2. Kimyasal Enerjili Balistik Tehditler	19
5.2.1. Çukur imla	19
5.2.2. Patlayıcıyla şekillendirilmiş mühimmat	19
6. ZIRH SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ANALİTİK MODELLER.....	20
6.1. Florence Modeli.....	20
6.2. Değiştirilmiş Florence Modeli.....	21
6.3. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Modeli.....	22
6.4. Pol Modeli	22
6.5. Borvik Modeli.....	23
6.6. Woodward - Cimpoeu Modeli.....	25

6.7.	Thompson Modeli	26
6.8.	Wijk Modeli.....	27
6.9.	Lambert - Jones Modeli	28
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
7.1.	Numunelerin Hazırlanması.....	29
7.2.	Balistik Test Düzenegi	34
7.3.	Deney Numune Kombinasyonları	36
7.4.	Deneyin Yapılışı	36
7.5.	Deneyisel Bulgular	38
7.5.1.	Numune 1	38
7.5.2.	Numune 2	40
7.5.3.	Numune 3	43
7.5.4.	Numune 4	46
7.6.	Deney Sonuçlarının İncelenmesi.....	48
8.	ANALİTİK ÇALIŞMALAR.....	52
8.1.	Numune 1.....	54
8.2.	Numune 2.....	57
8.3.	Numune 3.....	60
8.4.	Numune 4.....	62
9.	DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER.....	65
10.	SONUÇLAR.....	66
	KAYNAKLAR.....	69
	EKLER	
	EK 1: SEVİYE 2 ATIŞ RAPORU	
	EK 2: SEVİYE 3 ATIŞ RAPORU	

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3-1 Stanag 4569 Standardı	11
Tablo 4-1 RHA'nın Kimyasal Birleşimi	14
Tablo 4-2 Yüksek Sertlikteki Çeliklerin Kıyaslamalı Performansı.....	14
Tablo 7-1 Zırh Paketlerinin Konfigürasyonu	36
Tablo 7-2 Deney Sonuçları.....	48
Tablo 7-3 Numunelerin Alansal Yoğunlukları ve Çökme Miktarı.....	51
Tablo 8-1 1 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Çıkan Merminin Hızı	55
Tablo 8-2 2 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Çıkan Merminin Hızı	56
Tablo 8-3 3 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Seramik-Metal Katmana Çarpan Merminin Hızı	56
Tablo 8-4 Numune 2'nin Analitik Modellemesi (Seviye-2)	58
Tablo 8-5 Numune 2'nin Analitik Modellemesi (Seviye-3)	59
Tablo 8-6 Numune 3'ün Analitik Modellemesi	61
Tablo 8-7 Numune 4'ün Analitik Modellemesi	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3-1 Levha Şeklindeki Hedefler için En Yaygın Hasar Mekanizmaları.....	10
Şekil 5-1 Hafif Silah Mühimmatları.....	17
Şekil 5-2 APDS [24].....	18
Şekil 5-3 EFP Tipi Mühimmat [34].....	19
Şekil 7-1 Deneyde Kullanılan Kevlar-Aramid Malzeme	30
Şekil 7-2 Deneyde Kullanılan Reçine	30
Şekil 7-3 Deneyde Kullanılan Sertleştirici	31
Şekil 7-4 Deneyde Kullanılan Metil Etil Keton	31
Şekil 7-5 Seramiklerin Kevlar Malzeme Üzerine Serilmiş Hali	32
Şekil 7-6 Vakum Torbası.....	32
Şekil 7-7 Kevlar Malzemenin Arka Yüzeyi	33
Şekil 7-8 Alüminyum Zırhın Yüzeyi.....	33
Şekil 7-9 Zırh Malzemelerini Yapıştırmakta Kullanılan Yapıştırıcı	34
Şekil 7-10 Zırh Paketinin Atış Öncesi Bağlandığı Mekanizma	34
Şekil 7-11 Atışın Yapılacağı Test Odası	35
Şekil 7-12 Prototipa SN 6958 Marka Namlu.....	35
Şekil 7-13 7.62x39 mm API BZ Tipi Mühimmat	37
Şekil 7-14 7.62x51 AP Tipi Mühimmat	37
Şekil 7-15 Atışlar Sonucu Numune 1'in Ön Yüzeyi	38
Şekil 7-16 Atışlar Sonucu Numune 1'in Arka Yüzeyi	38
Şekil 7-17 Atışlar Sonucu Numune 1'in Kesit Görüntüsü	39
Şekil 7-18 Atışlar Sonucu Numune 1'in Seramik Yüzeyi.....	39
Şekil 7-19 Atışlar Sonucu Numune 1'in Kevlar Yüzeyi	40
Şekil 7-20 Atışlar Sonucu Numune 2'in Ön Yüzeyi	40
Şekil 7-21 Atışlar Sonucu Numune 2'in Arka Yüzeyi	41
Şekil 7-22 Atışlar Sonucu Numune 2'in Kevlar Yüzeyi	42
Şekil 7-23 Atışlar Sonucu Numune 2'nin Parçaladığı Merminin Kalıntıları	42
Şekil 7-24 Atışlar Sonucu Numune 2'in Kesit Görüntüsü	42
Şekil 7-25 Atışlar Sonucu Numune 2'in Seramik Yüzeyi.....	43
Şekil 7-26 Atışlar Sonucu Numune 3'in Ön Yüzeyi	44

Şekil 7-27 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kesit Görüntüsü	44
Şekil 7-28 Atışlar Sonucu Numune 3'in Arka Yüzeyi	45
Şekil 7-29 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kevlar Yüzeyi	45
Şekil 7-30 Atışlar Sonucu Numune 3'in Seramik Yüzeyi.....	46
Şekil 7-31 Atışlar Sonucu Numune 4'in Ön Yüzeyi	46
Şekil 7-32 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kesit Görüntüsü	47
Şekil 7-33 Atışlar Sonucu Numune 3'in Arka Yüzeyi	47
Şekil 7-34 Atışlar Sonucu Numune 3'in Seramik Yüzeyi.....	48
Şekil 8-1 Numune 1'in Şematik Gösterimi	55
Şekil 8-2 Numune 2'nin Şematik Gösterimi	58
Şekil 8-3 Numune 3'ün Şematik Gösterimi	61
Şekil 8-4 Numune 4'ün Şematik Gösterimi	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

a_p :	mermi çekirdeğinin yarıçapı
b_1 :	alüminyum katmanının kalınlığı
b_2 :	seramik katmanının kalınlığı
E :	Young Modülü
h_c :	seramiğin kalınlığı
m_p :	mermi çekirdeğinin kütlesi
ρ_p :	merminin yoğunluğu
ρ_t :	zırh malzemesinin yoğunluğu
σ_s :	gerçek radyal basma gerilimi
W :	yapılan toplam iş
$W_{1,s}$:	merminin zırha nüfuz etme enerjisi
W_b :	bükülme sonucu gerçekleştirilen iş
W_{d1} :	yapılan dinamik iş
W_{d2} :	zırhın bükülmesi sırasında yapılan iş
W_{dhf} :	sünek delik oluşumu esnasında gerçekleştirilen iş
W_p :	plastik deformasyona ait iş
V_{bl} :	balistik limit hız
V_p :	mermi çekirdeğinin hızı
V_r :	merminin zırh katmanından çıkış hızı
Y :	zırh malzemesinin akma gerilimi
φ :	kalibre yarıçapı
σ :	akma dayanımı
σ_1 :	alüminyum katmanının çekme dayanımı
σ_2 :	seramik katmanının çekme dayanımı
ε_2 :	seramik katmanının kırılma uzaması
γ_1 :	alüminyum malzemenin yoğunluğu
γ_2 :	seramik katmanının yoğunluğu

1. GİRİŞ

Birinci Dünya Savaşı'nda yaşanan siper savaşları neticesinde dar bir alana sıkışan harekât esnasında kısa bir mesafe ilerleyebilmek için on binlerce askeri feda etmek gerekmektedir. Makineli tüfeklerin egemen olduğu savaş alanlarında bu egemenliği yıkmak için makineli tüfek yuvalarını yıkmak ve birlikleri hücum anında destekleyecek bir araç ihtiyacı ortaya çıktı. Bu konuda hamle yapan ilk ülke olan Britanya, savaşın sonlarına doğru Somme'da ilk zırhlı muharebe aracını sahaya sürdü. O günden itibaren tanklar savaş alanlarının dominant gücü haline geldi. Zırhlı araçların ortaya çıkışıyla piyadeyi savaş alanında hızlıca intikal ettirebilmek için zırhlı personel taşıyıcılar ve tanklardan daha hızlı olduğu için çevirme harekâtında kullanılabilecek zırhlı muharebe araçları 1950'lerden itibaren içinde tüm dünya ordularının envanterinde yer almaya başlamıştır.

1990 yılında imzalanan Avrupa'da Konvansiyonel Silahlı Kuvvetler Antlaşması ile birlikte NATO ve Varşova Paktı Zırhlı Personel Taşıyıcı ve Zırhlı Muharebe Aracı tanımı netleşmiş oldu. Zırhlı muharebe aracı piyadeyi taşıyan ve bir çatışma durumunda piyadeye doğrudan destek veren ve en az 20 mm'lik silah taşıyan araç olarak tanımlanmıştır. Zırhlı Personel Taşıyıcı ise piyadeyi taşıyan ancak doğrudan piyadeyi desteklemekle yükümlü olmayan ve yine en az 20 mm'lik silah taşıyan araç olarak tanımlanmıştır [1]. Bahse konu iki araç da mobiliteden ödün vermemek adına ağır zırhla korunmamaktadır [2].

Zırhlı muharip araçların ortaya çıkmasıyla zırh delici mermi teknolojisinde de büyük gelişmeler yaşanmıştır. Tungsten ya da çelik çekirdekli mermilerin kullanılmasıyla birlikte ihtiyaç duyulan zırh koruması da artmaya başlamış ancak ağırlaşan zırhlar yakıt tüketimini arttırırken aracın mobilitelerini de oldukça azaltmaktadır. Bu nedenle İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra kullanılmaya başlanan kompozit zırh teknolojisiyle özellikle 7.62 mm ve 12.7 mm'lik tehditlere karşı zırh çeliğinden daha hafif sandviç yapıda zırhlar kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu zırhlar zırh çelikleriyle aynı koruma seviyesinde daha hafif çözümler sunarken, bu yapıdaki zırhların maliyeti zırh çeliğine göre oldukça yüksek kalmaktaydı.

Günümüzde gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte bu zırhların maliyeti düşürülse de zırh çelikleriyle aynı koruma seviyesinde kullanılabilecek hacmi büyütmeyen ve maliyet – etkin çözümler aranmaya devam edilmektedir.

Seramik kompozit zırh sistemleri ya da hibrit sistemler olarak adlandırabileceğimiz yapılar son dönemlerde araştırmalarda da görüldüğü gibi modern zırh sistemleri arasında ön plana çıkmaktadır. Hibrit sistemler farklı noktalarda farklı özellikler gösterebildikleri için mono blok yapıda olan zırh çeliği ya da alüminyum gibi zırhlardan ayrılmaktadır. Seramiklerin ve metallerin özelliklerini aynı anda gösterebilmesi hibrit yapıdaki zırhları tüm rakiplerinden bir adım öne taşımaktadır.

Seramik, metal ve kompozit yapıdaki zırh paketlerinin balistik direncini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Balistik levhaların sıralanması, levhalar arasına boşluk bırakılması, kullanılan levhaların geometrik şekli ve kalınlık yapısı gibi birçok değişken zırhın etkinliğinde önemli rol oynamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında katman sayısının, katman cinsinin ve katman dizilişinin aynı balistik koruma seviyesini sağlamak kaydıyla alansal yoğunluğa etkisi analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Buna ek olarak, analitik modeller ile deneysel verilerek mukayese edilerek deneysel sonuçlara yakınsayan en iyi analitik model ortaya konmuştur. Böylece, zırhlı personel taşıyıcı araçlarda kullanılabilecek Stanag 4569 Seviye-2 koruma seviyesine sahip, farklı malzeme katmanlarından ve farklı katman dizilişlerinde olan ancak, alansal yoğunluğu en düşük bir zırh paketinin elde edilmesi de amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Zaera ve Sanchez – Galvez alümina ve alüminyum plaka ile teorik bir model geliştirerek atışlarla modelin verdiği sonuçları test etmişlerdir. Araştırmada iki farklı kalınlıkta alümina ve alüminyum kullanılmıştır. Woodward ve den Reijer'in penetrasyon formüllerini kullanarak yeni bir model geliştiren araştırmacılar tehdit olarak 20 mm'lik APDS mermiyi tercih etmişlerdir. Mevcut modellerin 7.62 mm ve 12.7 mm mermilere göre başarılı sonuç verdiğini iddia eden Zaera ve Sanchez – Galvez, kendi geliştirdikleri modelde 20 mm'lik bir tehdit için Woodward, den Reijer ve kendi geliştirdikleri analitik modelle deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde den Reijer'in modeli 20 mm'lik bir tehdiye karşı başarısız bir sonuç verirken Woodward'ın modeli %10 hata payı içerisinde kalmıştır. En başarılı sonuç ise araştırmacıların kendilerinin geliştirdiği modeldir ve hata payı %2 civarındadır [3].

Odanoviç ve Bobiç, 2003 yılında gerçekleştirdiği çalışmada alümina, alüminyum ve zırh çeliğini farklı kalınlık ve dizilişlerde kullanarak NIJ 0180.00 ve SNO 1645 standartlarına göre testler gerçekleştirmişlerdir. Testler 40 x 40 x 8 mm, 50 x 50 x 9 ve 50 x 50 x 13 mm boyutlarındaki alümina malzemeyi önce 5 mm ve 8 mm'lik alüminyum plaka ile sonra da 5 ve 6 mm'lik zırh çeliği ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde konfigürasyonların balistik koruma seviyeleri ortaya konmuştur. İkinci aşamada ise yeterli balistik korumayı sağlayan zırh paketlerinin hacim, ağırlık ve maliyet tabloları oluşturularak en optimum korumayı sağlayacak zırh paketleri oluşturulmaya çalışılmıştır [4].

Turhan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alümina ve alüminyum 2024 malzeme kullanarak LS-DYNA programı üzerinden yaptıkları simülasyonları 7.62 mm ve 12.7 mm mermi kullanarak yaptıkları testlerle doğrulamaya çalışmışlardır. Simülasyonda plastik – kinematik model kullanan araştırmacılar alüminanın ve alüminyumun kalınlığını 10 mm olarak belirlemiştir. Seramiğin dağılmasını önlemek amacıyla zırh paketi ince bir alüminyum plakayla test düzeneğine tutturulmuştur. 235 metre uzaklıktan yapılan atışlar neticesinde mermilerin çarpma hızı 838 m/s ile 869 m/s arasında değişmektedir. Yapılan deneylerin sonucu ile simülasyonların sonucu karşılaştırılmıştır.

Yapılan karşılaştırmalar neticesinde kullanılan simülasyon modelinin gerçek sonuçlarla yakın olduğu ve gelecek araştırmalarda kullanılabileceği belirtilmiştir [5].

Yukarıda yer alan çalışmalarda seramik-metal zırh kombinasyonları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan mermiler ise 7.62 zırh deliciden başlamak üzere yüksek koruma seviyesi gerektiren tehditlerdir. Deney çalışmaları sırasında 20 mm'lik top olarak nitelendirilebilecek tehditler dışında herhangi bir analitik çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Özşahin ve Tolun, alüminyum alaşımı levhalar üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar zırh sistemlerinde sıkça kullanılan alüminyum levhalara, destek katmanı ekleyerek ve değişik alaşımlarla yüzeylerini kaplayarak balistik direncini arttırmaya çalışmışlardır. Alüminyum levhalar önce kaplamasız ve ek katmansız olarak test edilmişlerdir. Ardından kalınlık sabitken iki çeşit (kobalt molibden krom tozu ve zirkonyum oksit tozu) kaplama ile kaplanmış ve aynı test yeniden uygulanmıştır. Son olarak da UHMWPE elyaf kompozitle takviye edilmiş levhalar üzerinde test yapılmıştır. Kaplama ve takviye yapılan levhalar herhangi bir işlem uygulanmamış levhaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Kaplama ve takviye yapılan levhaların balistik değerlerinin ise birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir [6].

Dateraksa ve arkadaşları, 2012 yılında cam elyaf kompozitle desteklenmiş B4C, SiC ve Al₂O₃ üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar seramiklerin arkasına S2-cam takviyeli bir kompozit (GRPC) yerleştirerek seramiklerin limit hızlarını test etmişlerdir. Kullanılan seramikler 100 x 100 mm olup destek olarak kullanılan kompozit malzeme ise 120 x 120 mm ve 13 katmandan oluşmaktadır. Deney neticesinde sabit kalınlıkta kullanılan seramiklerin balistik limit hızları belirlenmiştir. Yapılan deneylerin ardından varılan bir diğer sonuç ise kullanılan kompozitle birlikte en yüksek dayanımı alümina seramiğin gösterdiğiidir [7].

Mei ve arkadaşları seramik ve metal katmandan oluşan bir zırh paketini, kalınlık oranlarını değiştirerek enerji emme kapasitesini ve penetrasyon derinliğini LS-DYNA programı kullanarak simüle etmişlerdir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda seramik olarak alümina modellenirken metal destek katmanı olarak ise zırh çeliği kullanmışlardır. Yapılan simülasyonlar neticesinde seramik katman kırılmadan önce anti-penetrasyon direnci yüksekken, kırılma gerçekleştikten sonra bu direncin oldukça azaldığı sonucuna varılmıştır.

Metal katmanın ise deforme olduktan sonraki anti-penetrasyon direncinin az miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Seramik/metal kalınlık oranları göz önünde bulundurulduğunda ise 0.2, 0.4 ve 0.6 kalınlık oranları arasında en iyi balistik sonucun 0.2 olduğu ortaya konmuştur. 0.2 kalınlık oranında zırhın en az penetrasyon derinliğine sahip olduğu ve en çok enerjiyi emdiği gözlemlenmiştir. Çalışmadaki kalınlık oranı seramik katmanın kalınlığının metal katmanın kalınlığına bölünmesiyle elde edilmiştir [8].

Naik ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ikiden daha fazla katman için analitik bir model önermişlerdir. İteratif bir model geliştiren araştırmacılar enerji denklemlerini kullanmışlardır. Kompozit, alüminyum ve seramik katmanlardan oluşan zırh paketlerini her katman için ayrı ayrı enerji denklemlerini yazarak ve bilgisayar programı kullanarak çözen araştırmacılar merminin zırh yüzeyine dik şekilde çarptığı, merminin elastik – mükemmel plastik şekilde deforme olduğu ve merminin temas boyunca erozyona uğramadığını varsaymışlardır [9].

Yukarıda incelenen literatür çalışmalarında ise seramik-metal katman kalınlığı ve kompozit malzemeyle takviyelenmiş alaşımlar incelenmiştir. Bilgisayar simülasyonlarıyla yapılmış olan modellemelerde genel olarak nüfuz derinliği incelenmiştir.

Nayak ve arkadaşları seramik ve twaron malzeme kullanarak 7.62 mm'lik zırh delici mermilere karşı koruma sağlayacak bir zırh paketi deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyde 4 mm'lik zirkonyumla güçlendirilmiş alümina kullanılan deneyde, seramik malzeme 10 mm ve 15 mm'lik twaron-epoksi ve twaron-polipropilen malzemeler ile desteklenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde kullanılan malzemenin seramiğin dağılmasını engellediği ve birden fazla atışa karşı daha fazla koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Merminin çarptığı seramik parçanın kırıldığı ve komşu seramik parçalarının çarpmadan fazla etkilenmediği görülmüştür. Aynı kalınlıklar göz önünde bulundurulduğunda twaron-polipropilen malzemenin twaron-epoksiye göre daha iyi bir balistik direncinin olduğu ortaya konmuştur [10].

Serjouei ve arkadaşları yaptıkları çalışmada seramik ve alüminyumdan oluşan ikili bir paket zırhın penetrasyon özelliklerini matematiksel olarak modelleyerek simülasyonlarla bu modeli kıyaslamışlardır. Çalışmada alümina, silisyum karbür ve bor karbürün üçüne de uygulanabilecek sadece katsayıların değişeceği bir matematiksel model üzerine çalışılmıştır.

Metal katman olarak ise 4340 elik ve 5083 alüminyum seçilmiştir. Enerji ve momentum denklemleri kullanılarak her seramik ve metal katman için denklemler oluşturulmuş ve bu denklemlerde belirtilen katsayılar, yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak küçük kareler yönteminde zlmştir. Ardından denklemler kesin olarak belirlenmiş ve yeni değerler için simülasyonlarla denklemden elde edilen değerler kıyaslanmıştır [11].

Plonka ve arkadaşları zırh paketlerinde sıklıkla kullanılan seramiklerin arkasında bulunan destek plakalar için farklı alaşımlar üreterek üzerlerinde balistik testler uygulamışlardır. Çalışmada seramik olarak alümina, bor karbür ve silisyum karbür kullanılmıştır. Destek plakalar ise magnezyum, alüminyum, silisyum, nikel ve çinkodan oluşan alaşımlardır. 7.62 mm ve 12.7 mm mermiler kullanılarak yapılan atışlarda en iyi sonuçların nikel, silisyum ve alüminyumdan oluşan alaşımların gösterdiği ortaya konmuştur [12].

Godzimirski ve arkadaşları gerçekleştirdikleri deneyde 2024-T3 alüminyum katmanlar ile alümina ve silisyum karbür seramik katmanlarının arasına farklı kompozit malzemeler yerleştirerek 8 mm’lik elik mermiler karşısında test etmişlerdir. 4 farklı aramid malzeme (Microflex, CT 709, T750 ve XPS102) kullanılan deneyde altıgen seramikler kumaşlara yapıştırıldıktan sonra 2024 serisi plakalarla desteklenmiştir. Bazı numunelerde seramik kompozit malzemeye yapıştırılırken bazı numunelerde 0.3 mm kalınlığındaki alüminyum plakalara yapıştırıldıktan sonra kompozit malzemeye yapıştırılmışlardır. Yapılan atışlar neticesinde 0.3 mm’lik alüminyum plaka kullanılan numuneler balistik açıdan daha iyi sonuç vermiştir. Kompozit malzemelerin arasında ise en iyi balistik sonucu XPS102 kullanılan numuneler vermiştir [13].

Jongparojcosit yaptığı araştırmada seramik/metal zırh paketlerinin şeklinin balistik performansa olan etkisini araştırmıştır. 30 x 30 x 9 mm’lik alümina ile aynı ölçülerde alüminyum plakayla 15 x 9 mm’lik alümina kullanılırken, yine aynı ölçüde ama 6 mm kalınlığında alüminyum plakalar balistik olarak karşılaştırılmıştır. Yapılacak test için 7.62 mm’lik zırh delici mermi kullanılmıştır. 4 kez tekrarlanan deneyler neticesinde %75 oranında altıgen zırh paketinin kare pakete göre daha iyi balistik direnç gösterdiği gözlemlenmiştir [14].

Hedayati ve Vahedi, merminin balistik limitini bulabilmek ve malzemenin emdiği enerjiyi hesaplayabilmek için hidrodinamik bir metot kullanan bir simülasyonu, Rosenberg metoduyla karşılaştırmışlardır. ABAQUS programı kullanarak hidrodinamik modeli simüleden araştırmacılar malzeme olarak 6061-T651 alüminyum malzemeyi tercih etmişlerdir. Rosenberg denklemi ile hidrodinamik metot kullanan simülasyonlar arasındaki farklılıkları ve benzerlikleri ortaya koyan araştırmacılar öncelikle düşük hızlarda iki metot arasındaki hata payının %10'larda olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak çarpışma hızı arttıkça, Rosenberg metodu ve hidrodinamik metot arasındaki fark azalmaya başlamış ve 600 m/s'den itibaren hata payı %1'in altına gerilemiştir. Emilen enerji arasındaki fark ise 850 m/s hıza kadar %1'in altına inmemiştir [15].

Yukarıda yer alan literatür çalışmaları incelendiğinde ise yine seramik-metal katmanlı çalışmalar yapılmıştır. Ancak deneylerde kullanılan metal katmanlar çeşitli malzemelerle takviye edilerek farklı alaşımlar elde edilip kullanılmıştır. Bu işlemlerin balistik dirence olan etkisi incelenmiştir. Bazı çalışmalarda ise seramik katmanın şeklinin mermiyi durdurma direncine olan etkisi incelenmiştir.

Literatür çalışmaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde seramik-metal katman kullanılarak yapılan birçok çalışma olduğu görülmektedir. 7.62 zırh delici mermilerin çoğunlukla kullanıldığı çalışmalar bilgisayar simülasyonlarıyla doğrulanmaya çalışılmıştır. Birkaç çalışmada kullanılmış olan analitik yöntemler ise büyük kalibreli mermiler için kullanılmış ve nüfuz derinliği temelli incelemeler yapılmıştır. Tez çalışmasında ise düşük kalibreli tehditler kullanılmış ve merminin çıkış hızı temelli analitik modellemeler yapılmıştır.

3. BALİSTİK

Balistik bilimi mekaniğin alt dallarından biridir. Balistik genel olarak herhangi bir şeyin fırlatılmasından hedefe varmasına kadar olan sürede oluşan süreçleri incelemektedir. Antik Yunanca’da “atma” anlamına gelen balistik bilimi eski çağlardan beri silahlar üzerinde büyük etkiye sahiptir. Örneğin Roma Ordusundaki “balista” aynı kökenden gelmektedir. Roma lejyonlarının başarısında önemli pay sahibi olan balistalar eğik atış prensibiyle düşmanlarını çok uzak mesafelerden vurabilmekteydi. Balistik bilimindeki en büyük gelişme belki de Newton’un 1687’de kaleme aldığı Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri adlı eseriyle yaşandı. Yer çekimi ve maddelerin hareketiyle alakalı Newton’un öne sürdüğü prensiplerle birlikte balistik biliminde de önemli gelişmeler yaşandı. Artık savaş alanlarının vazgeçilmesi olan topların menzili ve atış gücü Newton’un yasalarından yola çıkarak daha teknolojik bir hale geldi. Ardından Gaetano Marzagaglia’nın 1748’de yayımladığı Del Calcolo Balistico adlı kitabında balistik biliminin temel kuralları ortaya konmuş ve artık balistik mekaniğin bir alt dalı olarak ortaya çıkmıştır.

Günümüzde balistik bilimi genel olarak iç, dış ve terminal balistik olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Ancak kriminal balistikte Ara Balistik ya da Namlu Ağzı Balistiği olarak adlandırılan bir alt sınıflandırma daha bulunmaktadır. Bu alt sınıf mermi çekirdeğinin namluyu terk etmesinden birkaç milisaniye önceyi ve sonrayı incelemektedir. Ancak savunma sistemlerinde kullanılan balistik metotlar üçe ayrılmaktadır.

3.1. İç Balistik

Merminin ateşlenmesiyle namludan çıkışı arasındaki süreci inceleyen balistik dalı İç Balistik olarak adlandırılmaktadır. İç balistik kullanılan barutu ve yanma şeklini, yanma sonucunda ortaya çıkan basıncın kontrolünü, namlu içerisinde ilerleyen merminin hızını, merminin namlu boyunca girdiği dinamik etkileşimlerinin tümünü kapsamaktadır [16].

Tetiğin çekilmesiyle birlikte sevk barutu yanmaya başlar. Sevk barutunun yanmasıyla ortaya çıkan kimyasal enerji ısı enerjisine dönüşür ve bu enerji merminin arka kısmında yer alan namludaki boşluk içerisindeki (yanma odası) basıncı artırır.

Yanma odasındaki basıncın artmasıyla birlikte sıkışan hava mermi üzerinde baskı uygulamaya başlar. Mermi hareket ederek istenilen hıza ulaşır ve namlu eğer yivliyse mermiye dönme hareketi de bu şekilde sağlanmış olur. Böylece sevk barutunun ihtiva ettiği kimyasal enerji mermiye kinetik enerji olarak aktarılmış olur [17].

Tetiğe basılmasının ardından merminin namludan çıkması süresince namlu içindeki sıcaklık oldukça artmaktadır. Özellikle arka arkaya yapılan atışlarda namlunun iç yapısında bozulmalar meydana gelebilmektedir. Namlunun aşınması merminin hareketini bozar ve silahın isabet oranını azaltır. Bu nedenle sevk barutunun içine eser miktarda da olsa namlu yatağını koruyucu kimyasallar konmaktadır [18].

3.2. Dış Balistik

Dış balistik, merminin namluyu terk etmesinin ardından hedefine çarpmasına kadar olan süredeki davranışlarını inceleyen balistiğin alt dalıdır. Merminin izlediği yol, uçuş süresi, hedefe varış noktası, hedefe çarpma açısı ve hedefe çarpma hızı dış balistiğin ilgi alanına giren alt başlıklardır.

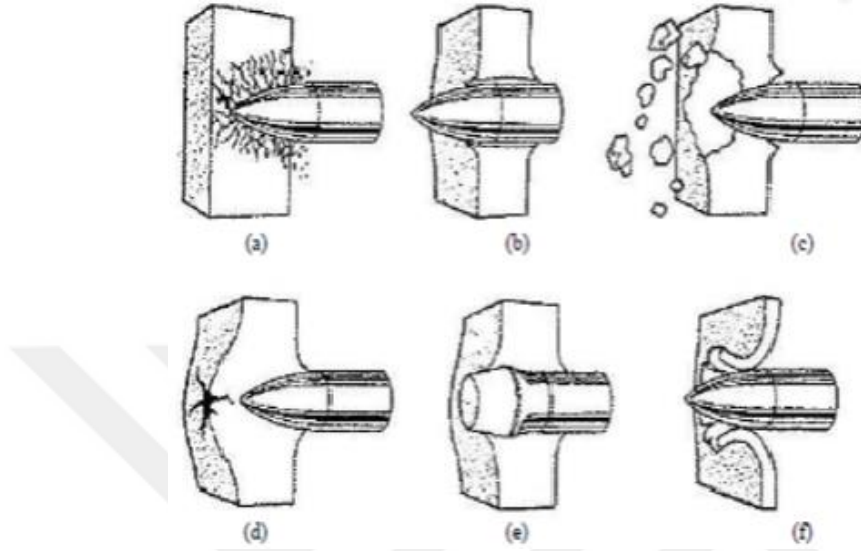
Merminin izlediği yörünge üzerinde ona etki eden iki ana kuvvet bulunmaktadır. Bu kuvvetlerden biri yer çekimi öteki ise hava direncidir. Merminin şekli, hava sıcaklığı, merminin yatayla yaptığı açı gibi etkenler merminin namluyu terk etmesi ve hedefine çarpması arasındaki hareketini belirleyen ana etmenlerdir [19].

3.3. Terminal Balistik

Merminin hedefe çarpmasının ardından ortaya çıkan etkileri inceleyen balistiğin alt dalına terminal balistik denmektedir. Merminin çarparak etkileşime gireceği hedef zırh maddeleri olabildiği gibi canlılar da olabildiği için terminal balistik oldukça önemli bir hal almaktadır.

Hedefe isabet eden mermi hedef üzerinde farklı etkiler bırakır. Hedefin sünekliği ve sertliği isabet aldığı anda oluşacak etki üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sünek malzemelerde genellikle delinme ve parça kopması şeklinde hasar oluşur.

Diğer yandan daha sert malzemelerde radyal çatlak oluşumu gibi bir hasar oluşumu gözlenmektedir. Merminin hedefe isabetinin ardından oluşan tüm hasar mekanizmaları aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 3-1 Levha Şeklindeki Hedefler için En Yaygın Hasar Mekanizmaları

- a) Gerek Kırılma, b) Sünek Delinme, c) Parça Kopması, d) Radyal Çatlak Oluşumu, e) Tıkaç Oluşumu, f) Taç Yaprakları Oluşumu [20]

3.4. Balistik Standartlar

Zırhların sınıflandırılması oldukça önemli bir konudur. Hangi tehdide karşı ne tür koruma sağlanacağı ve zırh ağırlığının getireceği mobilite sorunları tasarımcılar için her zaman önemli bir parametre olmuştur. Bu nedenle bazı standartlar belirlenerek hangi zırh için hangi seviyede koruma istendiği belirlenerek zırh tasarımı bu standartlara göre gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda Avrupa Balistik Standartları (CEN), A.B.D. Ulusal Adalet Kurumu standartları (NIJ), Birleşik Krallık Standartları (HOSDB), Rusya Federasyonu Standartları (GOST) ve NATO Standartları (STANAG) gibi birçok standart bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında bağlı bulunduğumuz dünyanın en büyük askeri ittifakı olan NATO Standartları kullanılacaktır.

NATO'ya üye ülkeler arasında askeri ekipmanlar açısından bir ortaklık sağlamak açısından Standardization Agreement (Standartlaşma Anlaşması) imzalanmıştır. Operasyonel olarak bir NATO askeri birliği başka bir ülkenin topraklarındayken mühimmatları ya da araçları aynı standartlarda üretildiği için rahatça kullanabilmektedir. Standardization Agreement kelimelerinin kısaltılması olan STANAG 4569 standardı NATO'nun Hafif Zırhlı Araçlar için belirlediği standarttır. Tez kapsamında STANAG 4569 Seviye 2 tipi zırh koruması amaçlanmaktadır. Aşağıdaki tabloda STANAG 4569 koruma seviyeleri yer almaktadır.

Tablo 3-1 Stanag 4569 Standardı

Seviye	Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Tehdit Tipi	Mesafe
1	5.56 mm x 45 M193	937	Tüfek: Piriñç Kaplamalı	30 m
1	5.56 mm x 45 NATO	900	Tüfek: Piriñç Kaplamalı	30 m
1	7.62 mm x 51 NATO	833	Tüfek: Piriñç Kaplamalı	30 m
2	7.62 mm x 39 API BZ	695	Tüfek: Zırh Delici Çelik Çekirdek	30 m
3	7.62 mm x 54 R B32 API	854	Tüfek: AP Tungsten Çekirdek	30 m
3	7.62 m x 51 AP	930	Tüfek: AP Tungsten Çekirdek	30 m
4	14.5 mm x 114 API/B32	911	Ağır Makineli Tüfek Zırh Delici Mühimmat	200 m
5	25 mm x 137 APDS-T	1258	Zırh Delici Sabot Mermi	500 m

4. ZIRHLAR

Zırhın tarihi insanlık tarihi kadar eskidir. Antik çağlardan itibaren savaşlarda vücut zırhı kullanılmıştır. Ardından süvari birlikleri ve savaş arabalarının ortaya çıkmasıyla büyük metal plakalarla yapılan zırhlar ortaya çıkmıştır. Zincir zırhın icat edilmesiyle tüm vücudu koruyan fakat oldukça ağır olan zırhlar kullanılmaya başlamıştır.

Malzeme biliminde yaşanan gelişmelerle birlikte zırhlar giderek hafiflemiş ve sağlamlaşmıştır. Havyan derileri dahi zırhları hafifletebilmek adına kullanılan malzemelerden olmuştur. Geçmişte olduğu gibi günümüzde de yaşanan tüm çatışmalarda kullanılan zırh büyük önem taşımaktadır. Koruma ve mobilite gibi ters orantılı iki parametreye sahip olan zırh teknolojisinde kompozit ve seramik malzemelerin kullanılmasıyla bu iki parametreye bir de alansal yoğunluk eklenmiştir. Seramikler ve kompozitler çok daha hafif zırh çözümleri sunarken metallere göre daha büyük alan kapladıkları için hedefin vurulma olasılığını da arttırmaktadır. Ancak mobilite parametresi de düşünüldüğünde tüm zırh malzemeleri kendine kullanım alanı bulmaktadır. Zırh tercihlerindeki belki de en önemli parametre ise maliyet-etkinliktir.

4.1. Pasif Zırhlar

Pasif zırh terminolojisinin ortaya çıkması zırhın tarihine göre oldukça yeni sayılabilir. 70'li yıllarda ortaya çıkan reaktif zırh teknolojisi ile birlikte o tarihe kadar kullanılan zırhlar artık pasif zırhlar olarak adlandırılmışlardır. Çünkü o tarihe kadar kullanılan zırhlar balistik tehdidin hedefi vurmasının ardından sertlik ve kalınlıklarıyla bir koruma sağlamayı hedeflemektedir. Sıvı, metal, seramik ve kompozit malzemelerden oluşturulan pasif zırhlar tekil olarak tercih edilebildikleri gibi kendi aralarında ardışık olarak da kullanılarak kompozit yapıda da kombine edilerek kullanılmaktadır.

4.1.1. Sıvı Zırhlar

Newton'un vizkozite kanununa uymayan sıvı maddeler Newtonsal olmayan sıvılar olarak adlandırılırlar. Newton'un vizkozite kanununda malzemenin akışmazlığı (vizkozitesi) üzerine uygulanan basınçtan bağımsızken Newtonsal olmayan sıvılarda bu durum tam tersidir. Düşük ya da orta seviye basınçlarda Newtonsal bir sıvı olarak davranırlar da yüksek basınca maruz kaldıklarında Newtonsal olmayan sıvılar katı maddelere yakın bir davranış sergilerler. Sıvı zırhlar da Newtonsal olmayan sıvılar kullanılarak üretilirler.

2003 yılında MIT ve Dalaware Üniversiteleri tarafından patentlenen iki farklı sıvı zırh tasarımı bulunmaktadır [21] [22]. İlk patentler ABD'deki üniversitelerden alınmış olsa da İngiltere ve İsrail'de de benzer çalışmalar yürütülmektedir. Sıvı zırhın iki farklı şekli bulunmaktadır. İlk sıvı zırhlar Newtonsal olmayan sıvıların Kevlar'a emdirilmesiyle üretilmiştir. Bu sıvılar polietilen glikol ve silisyumdan oluşan bileşiklerdir. Ancak ilerleyen dönemde sıvı zırhlarda magnetoreolojik sıvılar kullanılmaktadır. Akıllı sıvılar sınıfında yer alan magnetolojik sıvılar tanecikli yapıda bulunurlar (çoğunlukla demir) ve bir taşıyıcının içinde yer alırlar (çoğunlukla yağ). Bu sıvılar manyetik alana maruz kaldıklarında çok yüksek vizkoziteye sahip gibi davranmaya başlarlar. Ve bu tepki manyetik alanın artmasıyla artmaktadır. BAE System'ın başlattığı Iron Man (demir adam) Projesinde silikonla takviye edilmiş magnetoreolojik sıvılar kullanılarak 300 m/s hızındaki mermilere karşı koruma sağlayabilen zırhlar geliştirilmiştir [23].

4.1.2. Metal Zırhlar

Antik çağlardan günümüze kadar metal zırhlar en çok kullanılan zırh türü olmuştur. Metal zırhların temel avantajı yapısal ve yorulma kaynaklı yükleri taşıırken diğer yandan da etkili bir koruma sağlamasıdır. Ayrıca benzer sertlikteki birçok maddeye göre ucuz olması da tercih edilmesindeki etkenlerden biridir.

En çok kullanılan metal tipi çeliktir. Tokluk, sertlik, yorulma dayanımı, üretim ve maliyeti nedeniyle metaller arasında öne çıkan çelik malzemeler özellikle araçların gövdelerinde kullanılmaktadır. Çelik zırhların haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA), yüksek sertlikte çelik (HHA), değişken sertlikte çelik (VHS) gibi tipleri bulunmaktadır [24].

RHA zırh kullanımanın yanı sıra zırh testlerinde de kullanılmaktadır. Farklı zırh sistemleri test edilirken şahit plaka olarak RHA kullanılmaktadır. RHA'nın kimyasal birleşimi aşağıdaki gibidir [25].

Tablo 4-1 RHA'nın Kimyasal Birleşimi

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P
0.18-0.32	0.60-1.50	0.05-0.95	0.00-0.90	0.30-0.60	0.015 (maks.)	0.015 (maks.)

Değişken sertlikteki çelikler (VHS) ise kompozit zırhlara benzer özellik göstermektedir. Zırhın bir yüzü daha sert ve düşük karbonlu çelikten oluşmaktadır [26]. Zırhın arka kısmı ise nispeten daha güçsüz ve sünek bir çelikten meydana gelmektedir. Böylece zırhın ön kısmı tehdidi parçalarken arka kısmı ise dağılan parçaların daha esnek bir şekilde zırhın içerisinde kalmasını sağlamaktadır.

Yüksek sertlikteki çelikler ise (HHA) homojen bir yapıya sahiptir ve sertlik seviyeleri 430 BHN'nin üzerindedir. Çift haddelenmiş çelik olarak adlandırılan DHA ise hadde işlemi esnasında iki tip çeliğin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Üç tip çeliğin 7.62 mm zırh delici mermiyle yapılan V_{50} testindeki performansları aşağıdaki tablodadır [27].

Tablo 4-2 Yüksek Sertlikteki Çeliklerin Kıyaslamalı Performansı

Zırh Çeliği	Yoğunluk (kg/m^3)	Kalınlık (mm)	Alansal Yoğunluk (kg/m^2)
RHA (380 BHN)	7830	14.6	114
HHA (550 BHN)	7850	12.5	98
DHA (440-600 BHN)	7850	8.1	64

Alüminyum da günümüzde oldukça sık kullanılan metal zırhlardandır. Alüminyumun en önemli avantajı çeliğe göre yoğunluğunun düşük olmasıdır. Alüminyumla zırhlandırılan bir araç çelik zırhlı araçlara göre çok daha seri hareket edebilmektedir. Ayrıca çekme mukavemeti 60 ile 600 MPa arasında değişen alüminyum özellikle kinetik enerjili tehditlere karşı etkili bir koruma sağlayabilmektedir.

Diğer yandan alüminyum zırh malzemeleriyle alakalı bazı dezavantajlar da mevcuttur. Örneğin alüminyum zırh alaşımları korozyon çatlakları oluşturma eğilimindedirler. Özellikle çekmeye maruz kalan alüminyum malzemelerde korozyon çatlakları diğer metallere göre daha sık görülmektedir. Korozyon çatlakları malzemenin çekme mukavemetini düşürmekte böylece de balistik koruma kapasitesini azaltmaktadır. Ayrıca alüminyum zırhlar ufalanmaya karşı da dayanıksız olduğu için araç içerisinde parça tesirinden koruma katmanı (spal liner) kullanılmasını zorunlu kılarlar.

Titanyum zırh da çelik ve alüminyuma alternatif olarak kullanılabilen malzemelerdendir. Düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet ve sertliğiyle (900 – 1300 MPa çekme mukavemeti, BHN 300-350 sertliği) diğer metaller arasında ön plana çıkan titanyum maliyeti nedeniyle kullanılamamaktadır [28].

4.1.3. Seramik Zırhlar

Balistik korumada kullanılan seramikler oldukça sert ve kırılğan yapıda malzemelerdir. Balistikte seramiklerin kullanılma amacı merminin ucunu kırarak deformasyon etkisini azaltmaktır. Özellikle zırh delici tehditlere karşı kullanılan seramik zırhlar penetrasyonu engellemektedir. Ayrıca tüm metallerden daha düşük yoğunlukta olmaları da mobilite açısından önem taşımaktadır. Diğer yandan seramikler gevrek malzemeler olduğu için zırh delici mermileri durdurabilmek için metalik zırhların ön yüzüne eklenerek kullanılırlar.

Balistik amaçla kullanılan birkaç tip seramik bulunmaktadır. Bu tipler arasında en çok kullanılan balistik seramiklerden biri alüminyum oksittir (alümina). Ancak kullanılan diğer seramikler ağırlık olarak daha avantajlı olmalarına rağmen maliyetleri daha yüksektir. Bu nedenle zırh tasarımında ağırlık ve maliyet büyük önem taşımaktadır. Bor karbür seramikler arasındaki en sert ve en pahalı malzemedir. En yüksek korumanın tercih edildiği mahallerde kullanılır. Silisyum karbür ise performans, maliyet ve ağırlık olarak alümina ve bor karbürün arasında yer almaktadır [29].

4.1.4. Polimer Zırhlar

60'lı yıllardan itibaren gelişen polimer malzeme teknolojisi etkisini balistik bilimi üzerinde de göndermiş ve ortaya balistik polimerler çıkmıştır. Bunun ilk örneği DuPont firmasının ürettiği kevlar'dır. Kevlar düşük yoğunluğu, yüksek sertliği ve mukavemetiyle öne çıkan bir malzemedir. Diğer polimer malzemeler gibi zırh çeliğine göre çok daha düşük ağırlıklarda düşük koruma seviyesi istenen noktalarda tercih edilmektedir. Özellikle vücut zırhlarında balistik kumaşlar hafifliğinden dolayı tercih edilmektedir. Kompozit zırhlarda ise ağırlığı azalmak amacıyla seramik ve metalik zırhlarla birlikte kullanılmaktadır.

4.2. Reaktif Zırhlar

Metal plakalar arasına sıkıştırılarak ana zırhın üzerine yapıştırılarak kullanılan reaktif zırhlar, tehdidin yüzeye çarpmasının ardından tehdit yönünün aksine bir reaksiyon göstererek tehdidin ana zırha olan etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu teknoloji ilk kez 1982 İsrail – Lübnan Savaşında muharebe alanına kullanılmış ve başarılı sonuçlar vermiştir. Doğu Bloku ülkelerinin orduları tarafından da sıkça kullanılan reaktif zırh, “tuğla” şeklinde ana zırhın üzerine yerleştirildiği için isabet alan tuğlanın değiştirilmesiyle birlikte kısa sürede tamir edilebilmektedir. Diğer yandan reaktif zırh engelini aşabilmek için tandem harp başlığı teknolojisi geliştirilmiştir [30]. Tandem teknolojisinde harp başlığının bir ucuna reaktif zırhı tetikleyecek bir patlayıcı yerleştirilerek reaktif zırhın harekete geçmesi amaçlanırken savaş başlığının arkasında yer alan ve daha etkili olan patlayıcı ile ana zırhı vurmak hedeflenmektedir [31].

4.3. Aktif Zırhlar

Aktif zırhlar günümüzde kullanılan en yeni zırh teknolojisidir. Aktif zırhlar, pasif ve reaktif zırhların aksine tehdit hedefine varmadan önce harekete geçmektedirler. Aktif zırhların soft kill ve hard kill denilen iki farklı tipi bulunmaktadır.

Soft kill aktif zırhlar tehdidi yok etmek yerine başka yere yönlendirmeye çalışmaktadır. Hard kill aktif zırhlar ise tehdidi hedefe ulaşmadan önce yok etmektedirler. Aktif zırhlar oldukça pahalı sistemler olmakla birlikte üzerine takıldıkları aracın ağırlığını azalttığı için muharebe alanlarında çok yaygın olarak kullanılmaları beklenmektedir.

5. BALİSTİK TEHDİTLER

Bir tehdit ve ona hız veren tüm malzemeler mühimmat olarak adlandırılır. Savaş alanlarında birçok farklı mühimmat tipi kullanılmaktadır. Nükleer tehditler dışında en geniş tanımla iki farklı balistik tehdit tipi bulunmaktadır. Bunlardan biri kinetik enerjili balistik tehditlerdir öteki ise kimyasal enerjili tehditlerdir.

5.1. Kinetik Enerjili Balistik Tehditler

Kinetik enerjili balistik tehditler hedeflerini delip geçmek üzerine tasarlanmışlardır. Kinetik enerjili tehditler kendi aralarında iki ana gruba ayrılmaktadır.

5.1.1. Küçük Kalibreli Enerjili Mühimmatlar

Küçük kalibreli ve sahadaki askerin fizik gücüyle taşıyıp ateşlenebilecek bir silahta kullanılan mühimmatlar hafif silah mühimmatı olarak adlandırılmaktadır. Mühimmatların sınıflandırmasında kalibresinden ziyade mermi çapı ve uzunluğu değerlendirilmektedir [32]. Hafif silah mühimmatlarının temsili gösterimi aşağıda yer alan şekil 5-1’de yer almaktadır.



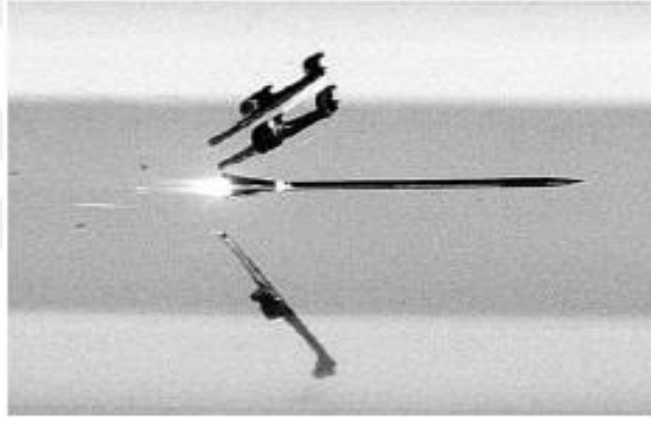
Şekil 5-1 Hafif Silah Mühimmatları

Hafif silah mühimmatları beş farklı yapıdan oluşmaktadır. Bunlar kapsül, kovan, patlayıcı, barut ambalajı ve mermidir. Bu beş yapının bileşkesine ise fişek adı verilmektedir. Tabancanın içerisindeki iğnenin fişeğe çarparak fişegi harekete geçirir. Bu esnada iğnenin çarparak sevk barutunun yanmasını sağlayan bölüm kapsül olarak adlandırılır. Kapsül, barut ve mermiyi bir arada tutan bölüm ise kovan olarak adlandırılır.

Kovanlar genel olarak pirinç malzemeden üretilmektedir. Mermi ise ateşleme gerçekleştikten sonra hedefe doğru ilerleyen parçanın adıdır.

5.1.2. Yüksek Kalibreli Kinetik Enerjili Mühimmatlar

Yüksek kalibreli kinetik enerjili mühimmatlar ismi ile paralel diğer mühimmatlara göre daha büyük hacme sahiplerdir. İki farklı tipi bulunan bu tip mühimmatların düşük kalibreli mühimmatlara göre daha gelişmiş bir yapıda olduğu söylenebilir. Uzun bir namludan ateşlenen bu mühimmatlar bir dart oku şeklinde namluyu terk ederler ve ardından sabot ayrılarak delici çubuğu hedefe yönlendirirler. Bu tipteki mühimmatların namlu çıkış hızları 1400-1900 m/s aralığında değişmektedir. Kinetik enerjileri de 10^6 J civarındadır.



Şekil 5-2 APDS [24]

Yüksek kalibreli mühimmatların iki farklı tipi bulunmaktadır. Bunlardan biri APDS (Armor Piercing Discarding Sabot), diğeri ise APFSDS (Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot) olarak adlandırılır. APDS genellikle tungsten karbürden bir çekirdeğe sahiptir. Oldukça yüksek yoğunluklu olan bu çekirdek barındırdığı yüksek kinetik enerji sayesinde kalın zırhları delebilmeye kapasitesine sahiptir. APDS tipi mühimmatın hedefine isabet etmeden önceki görüntüsü şekil 5-2’de yer almaktadır. Ancak günümüzde APDS yerini APFSDS tipi mühimmata bırakmıştır. APFSDS tipi mühimmatta çelik, tungsten ya da seyreltilmiş uranyum bulunan bir çekirdek bulunmaktadır. APDS’nin boy/çap oranı 6-7 arasındayken APFSDS’lerin boy/çap oranı 15 ile 25 arasında değişmektedir.

5.2. Kimyasal Enerjili Balistik Tehditler

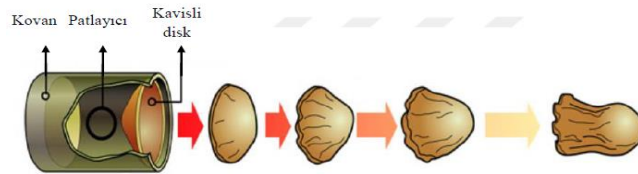
Kimyasal enerjili balistik tehditler hedefe çarptıkları anda patlayarak hedefe nüfuz edebilmek için üretilmiş mühimmatlardır. Yüksek sıcaklıkla ya da patlama etkisiyle hedefin zırhına nüfuz eden bu mühimmatlar iki şekilde sınıflandırılmaktadır.

5.2.1. Çukur İmla

Mühimmat hedefine çarptıktan sonra çok yüksek sıcaklığa ve hıza sahip bir jet oluşturur. Mühimmatın çekirdeği (genellikle bakırdan üretilmektedir) mili saniyeler içerisinde çok kalın zırhları eriterek içeriye nüfuz edebilmektedir. Çukur imla ise adını jetin oluşum şeklinden almaktadır. Diğer bir adı da şekillendirilmiş patlayıcı olan bu mühimmat, hedefe çarpmasının ardından oluşan patlamayı lineer doğrultuda odaklayarak 5-10 km/s hızla zırha erimiş bakırı püskürtür. Bu teknoloji ilk olarak İkinci Dünya Savaşında Alman ordusunun 1940 yılında yaptığı Belçika ile Eben Emael’de yaptığı muharebede kullanılmıştır [33]. Betona karşı da yüksek başarı sağlayan bu mühimmat günümüzde özellikle anti-tank silahlarında (HEAT) kullanılmaktadır.

5.2.2. Patlayıcıyla Şekillendirilmiş Mühimmat

Patlayıcıyla şekillendirilmiş mühimmatlar EFP (Explosively Formed Projectile) ya da SFF (Self Forging Fragment) olarak adlandırılırlar. Bu tarz mühimmatlarda koniye benzer bir yapıda bulunan metal diskin arkasında bir patlayıcı yer alır. Bu patlayıcı ateşlendikten sonra disk merkez eksene doğru çöker ve hedefe ilerlemeye başlar. Çukur imla kullanan HEAT tipi mühimmatlarla patlayıcıyla şekillendirilmiş mühimmatlar arasındaki fark patlama sonrası oluşan yapı ile alakalıdır. HEAT tipi mühimmatta jet oluşurken EFP ya da SFF tipi mühimmatlar şekillendirilmiş mermiye benzer bir yapıya dönüşmektedir. EFP tipi mühimmatın çalışma prensibinin teslimi gösterimi şekil 5-3’te yer almaktadır.



Şekil 5-3 EFP Tipi Mühimmat [34]

6. ZIRH SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ANALİTİK MODELLER

Çeliğin gemilerde kullanılmasıyla birlikte 18. yüzyılın sonlarına doğru zırh sistemlerinin analitik modellenmesi için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu modellerin çoğu enerjinin ve momentumun korunumu yasası üzerinden geliştirilmiştir. 20. yy içerisinde geliştirilen formüllerde ise kırılma mekaniği ile alakalı denklemler de ele alınarak analitik metotlar geliştirilmiştir. Tez çalışmasında seramik ve metaller ile alakalı denklemler kombine edilerek kullanılmıştır.

6.1. Florence Modeli

Florence 1969 yılında yayımladığı makalesiyle seramik katmanlı zırhların analitik modellenmesi konusunda bir öncü olmuştur. Florence, mermi çekirdeğini kısa bir silindir katı cisim olarak varsaymıştır.

$$\varepsilon_r = 1.82 * f(a) * \frac{K}{S} \quad (6.1)$$

Maksimum gerinim olarak Florence 6.1’de yer alan denklemi elde etmiştir. Bu denklemdeki ε_r maksimum gerinimi ifade etmektedir.

$$K = \frac{1}{2} * M_p * V_p^2 \quad (6.2)$$

Denklem 6.2’de K mermi çekirdeğinin kinetik enerjisini, M_p (kg) çekirdeğin kütlesini, V_p (m/s) çekirdeğin hızını ifade etmektedir.

$$S = \sigma * h_m \quad (6.3)$$

Denklem 6.3’de S sabit gerilmeyi ifade etmektedir. Zırhın arka katmanının akma dayanımı σ (Pa) ile, arka katmanın kalınlığı ise h_m (m) ile gösterilmektedir.

$$f(a) = \frac{M_p}{[M_p + (m_c + m_m)\pi a^2]\pi a^2} \quad (6.4)$$

$$a = a_p + 2 * h_c \quad (6.5)$$

Denklem 6.5'te yer alan a (m) koniklik yarıçapını göstermektedir. a_p (m) mermi çekirdeğinin yarıçapını, h_c (m) ise seramiğin kalınlığını ifade etmektedir.

$$V_p = \left(\frac{\varepsilon_r * S}{0.91 * M_p * f(a)} \right)^{0.5} \quad (6.6)$$

Denklemler 6.1-6.5 bir araya getirildiğinde Florence Modeline göre seramik-metal katmanlı bir zırhın tehdide karşı koruma sağlayabileceği maksimum hız (balistik limit) denklem 6.6'te yer almaktadır.

6.2. Değiştirilmiş Florence Modeli

Florence modeli, yapılan çalışmalarda başarılı sonuç vermiş olsa da zırh plakalarının akma dayanımı ve sertlik gibi bazı mekanik özellikleri taşımadığı için her zaman gerçeğe uygun neticeler vermemekteydi. Bu nedenle Florence'nin modeli üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte malzemenin sertliği de bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır.

$$u = \frac{1}{20} * \ln H \quad (6.7)$$

Denklem 6.6'da ifade edilen balistik limit hesaplamasına denklem 6.7'de verilen düzeltme katsayısı olarak adlandırabileceğimiz “ u ” parametresinin eklenmesiyle, balistik limit hesaplanması Değiştirilmiş Florence Modeli olarak adlandırılır ve denklem 6.8'de gösterilmiştir. Denklem 6.7'de yer alan H (kgf/mm²) malzemenin Brinell cinsinden sertliğini ifade etmektedir.

$$V_p = \left(\frac{u * \varepsilon_r * S}{0.91 * M_p * f(a)} \right)^{0.5} \quad (6.8)$$

6.3. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Modeli

Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Florence modeline seramik malzemenin mekanik özelliklerini ve kırılma esnasındaki enerji kayıplarını ekleyerek Denklem 6.9’da verilen modeli çıkarmışlardır.

Denklemde V_{bl} (m/s) balistik limit hız, m (kg) mermi kütlesi, R (m) merminin yarıçapı, b_1 (m) alüminyum katmanın, b_2 (m) ise seramik katmanın kalınlığı, σ_1 (Pa) alüminyum katmanın çekme dayanımı, σ_2 (Pa) ise seramik katmanın çekme dayanımını, ε_2 seramik katmanın kırılma uzamasını, γ_1 (kg/m³) alüminyum malzemenin yoğunluğunu, γ_2 (kg/m³) de seramik katmanın yoğunluğunu göstermektedir. α ise deneysel veriler kullanılarak bulunan deneysel katsayıdır [34].

$$V_{bl}^2 = \frac{\alpha * \varepsilon_2 * \sigma_2 * b_2 * z * [(\gamma_1 * b_1 + \gamma_2 * b_2) * z + m]}{0.91 * m^2} \quad (6.9)$$

$$z = \pi(R + 2 * b_1)^2 \quad (6.10)$$

6.4. Pol Modeli

Pol ince metalik zırh katmanları için bir model geliştirmiştir. Pol Modelinde plakanın balistik limiti hesaplanabilmektedir. Pol Modelinde enerji değişimi ile yapılan işi birbirine eşitleyerek bir model ortaya koymuştur.

$$V_{bl}^2 = \frac{2 * W}{m_p} \quad (6.11)$$

Denklem 6.11’de yer alan eşitlikte V_{bl} (m/s) plakanın balistik limitini, W (J) yapılan toplam işi, m_p (kg) ise merminin kütlesini göstermektedir.

$$W = W_p + W_d + W_b \quad (6.12)$$

Yukarıda yer alan denklem 6.12’de Pol’ün hesapladığı toplam iş gösterilmektedir. Denklemdeki W_p (J) plastik deformasyona ait işi, W_{d1} (J) yapılan dinamik işi, W_b (J) ise bükülme sonucu gerçekleştirilen işi göstermektedir.

$$W_p = \frac{\pi}{2} * b^2 * Y * t \quad (6.13)$$

Denklem 6.13’te plastik deformasyon sonucu gerçekleşen işin formülü belirtilmiştir. Denklemdeki b (m) mermi yarıçapını, Y (Pa) malzemenin akma dayanımını, t (m) ise malzemenin kalınlığını göstermektedir.

$$W_{d1} = \frac{2 * \pi * \rho_t * V_0^2 * b^4 * t^2}{3 * L^2} \quad (6.14)$$

Denklem 6.14’te ise merminin yaptığı dinamik işin formülü gösterilmektedir. Denklemde yer alan ρ_t (kg/m³) zırh malzemesinin yoğunluğunu, V_0 (m/s) merminin zırha çarpma hızını göstermektedir.

$$W_b = \frac{\pi^2 * b * Y * t^2}{4} \quad (6.15)$$

Merminin yaptığı işe ait son denklem 6.15’te verilmiştir. Bükme sonucu gerçekleşen işin formülü yukarıdaki denklemde yer almaktadır. Denklemler 6.12-15 kullanılarak denklem 6.11’de belirtilen balistik limit hesaplanmaktadır [35].

6.5. Borvik Modeli

Borvik 2008 yılında ortaya koyduğu modelde, mermide oluşan erozyonu ihmal ederek silindirik kavitasyon kuvvetlerini kullanarak kinetik enerji-iş bağıntısı üzerinden metalik zırhlarda balistik limit ve çıkış hızı formülü hesaplamıştır.

$$V_{bl}^2 = 2 * \frac{h}{L+k_1*l} * \frac{\sigma_s}{\rho_p} \quad (6.16)$$

Denklem 6.16’da Borvik’in hesapladığı balistik limit yer almaktadır. Denklemde yer alan h (m) metalik plakanın kalınlığını, l (m) merminin uzunluğunu, ρ_p (kg/m³) merminin yoğunluğunu, k_1 bağıntısı aşağıda verilecek olan deneysel bir sabiti, σ_s (Pa) ise gerçek radyal basma gerilimini göstermektedir.

$$V_r^2 = V_{bl}^2 * \left(\frac{V_s^2}{V_{bl}^2} - 1 \right) \quad (6.17)$$

Borvik denklem 6.16’yı ve Recht-Ipson modelini kullanarak denklem 6.17’de yer alan çıkış hızı denklemini ortaya koymuştur. Denklemde yer alan V_s (m/s) merminin giriş hızını, V_r (m/s) ise merminin çıkış hızını göstermektedir.

$$\sigma_s = \frac{Y}{\sqrt{3}} * \left[1 + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) * \frac{E}{Y} \right] \quad (6.18)$$

Borvik’in denklemlerinde yer alan gerçek radyal basma geriliminin formülü denklem 6.18’de yer almaktadır. Formüldeki Y (Pa) zırh malzemesinin akma gerilimini, E (Pa) ise malzemenin Young Modülünü göstermektedir.

$$k_1 = \left(4 * \varphi^2 - \frac{4*\varphi}{3} + \frac{1}{3} \right) - \frac{4*\varphi^2(2*\varphi-1)}{\sqrt{4*\varphi-1}} * \sin^{-1} \frac{\sqrt{4*\varphi-1}}{2*\varphi} \quad (6.19)$$

Denklem 6.19’da Borvik’in kullandığı ve mermiye göre bir değer alan k_1 gösterilmektedir. Yukarıdaki denklemde yer alan φ , Borvik tarafından “kalibre yarıçapı” olarak ifade edilmiştir ve hesaplanması için gerekli formül aşağıda yer alan denklem 6.20’de bulunmaktadır.

$$\varphi = \frac{1}{4} * \left[\left(\frac{l}{a} \right)^2 + 1 \right] \quad (6.20)$$

Borvik'in kullandığı ve kalibre yarıçapı olarak adlandırdığı değer, denklem 6.20 aracılığıyla hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan l (m) merminin uzunluğunu, a (m) ise gövde yarıçapını göstermektedir [36].

6.6. Woodward - Cimpoeu Modeli

Woodward ve Cimpoeu sünek delik oluşumunu da göz önünde bulundurarak bir balistik limit ortaya koymuşlardır. Denklem 6.21'de yer alan model ince metalik levhalar için balistik limit hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$V_{bl}^2 = \frac{2*W}{m} \quad (6.21)$$

Denklemde yer alan V_{bl} (m/s) balistik limiti, W (J) yapılan toplam işi, m (kg) ise merminin kütlesini ifade etmektedir.

$$W = W_{d2} + W_{dhf} + W_{1,s} \quad (6.22)$$

Woodward ve Cimpoeu toplam işi ise denklem 6.22 ile hesaplamaktadırlar. Denklemde yer alan W_{d2} (J) zırhın bükülmesi sırasında yapılan işi, W_{dhf} (J) sünek delik oluşumu esnasında gerçekleştirilen işi, $W_{1,s}$ (J) ise merminin zırha nüfuz etme enerjisini göstermektedir.

$$W_{1,s} = W_1 + W_s \quad (6.23)$$

Önerilen modelde nüfuz etme enerjisi denklem 6.23'te yer alan iki farklı işin toplamıyla hesaplanmaktadır.

$$W_1 = \frac{\pi*D^2*K*Y*(h_0-1.17D)}{4} \quad (6.24)$$

Denklem 6.24'te nüfuz etme enerjisinin iki parametresinden biri olan itirme enerjisi bulunmaktadır.

Bu enerji zırh üzerinde tıkaç oluşumuna kadar olan süredeki merminin yaptığı iştir. Denklemdaki D (m) mermi çapını, K ampirik bir katsayıyı, Y (Pa) zırhın akma gerilimini, h_o (m) zırh kalınlığını göstermektedir.

$$W_s = \frac{\pi * h_o^2 * D * Y}{2\sqrt{3}} \quad (6.25)$$

Malzemede tıkaç oluşumunun ardından yapılan iş denklem 6.25'te bulunmaktadır.

$$W_{d2} = \frac{\pi * D * Y * h_o * (D + 2 * \pi * h_o^2)}{8} \quad (6.26)$$

Zırhın bükülmesi sırasında yapılan iş ise yukarıda bulunan denklem 6.26 ile hesaplanmaktadır. Aşağıda yer alan denklem 6.27 ile ise sünek delik oluşumu sırasındaki iş gösterilmektedir [37].

$$W_{dhf} = \pi * D^2 * h_o * \frac{Y}{2} \quad (6.27)$$

6.7.Thompson Modeli

Thompson ortaya koyduğu modelde 6.6.'da yer alan Woodward-Cimpoeru modelini esas alarak bir model ortaya koymuştur. Thompson alüminyum malzemeler için bir çıkış hızı hesaplamıştır. Bu model aşağıda yer alan denklem 6.28'de gösterilmektedir.

$$V_r^2 = V_0^2 - \frac{4 * \pi * r_p^2 * h_o}{m_p} * \left[\frac{\sigma_y}{2} + \frac{V_0^2}{3} \right] \quad (6.28)$$

Denklem 6.28'de yer alan V_r (m/s) çıkış hızını, V_o (m/s) merminin çarpma hızını, r_p (m) mermi yarıçapını, h_o (m) zırh kalınlığını, m_p (kg) mermi kütlesini, σ_y (Pa) zırh malzemesinin akma gerilimini göstermektedir [38].

6.8. Wijk Modeli

Wijk enerjinin korunumu kanununu kullanarak metalik zırhlar için bir analitik model geliştirmiştir. Wijk'in hesapladığı çıkış hızının bulunmasında kullanılan formül aşağıdaki denklem 6.29'da gösterilmektedir.

$$V_r^2 = \frac{m_p * V_o^2 - 2 * W_p}{m_p + m_t} \quad (6.29)$$

Denklem 6.29'da bulunan V_r (m/s) çıkış hızını, V_o (m/s) merminin çarpma hızını, W_p (J) merminin nüfuz enerjisini, m_p (kg) merminin kütesini, m_t (kg) ise zırhın deformasyona uğrayan kısmının kütesini göstermektedir.

$$m_t = \frac{\pi}{4} * d_p^2 * t_t * \rho_t \quad (6.30)$$

Denklem 6.30'da merminin çarpması sonucunda zırhta deforme olan bölgenin kütesi gösterilmektedir. Denklemdaki d_p (m) mermi çapını, t_t (m) zırh kalınlığını, ρ_t (kg/m³) ise zırh malzemesinin yoğunluğunu göstermektedir.

Wijk Modelinde nüfuz etme enerjisini hesaplarken “eşdeğer kalınlık” olarak ifade edilen bir parametre öne çıkmaktadır. Bu parametre t^* ile gösterilmektedir ve aşağıda yer alan denklem 6.31 ile hesaplanmaktadır.

$$t^* = \frac{d_p}{2 * \pi} * (2 * \beta - \gamma) \quad (6.31)$$

Denklem 6.31'de yer alan β, γ birer deneye dayalı bir katsayıdır. β zırhın nüfuz direnci olarak ifade edilmektedir ve mevcut modelde alüminyum malzemeler için 5 olarak kullanılmaktadır. γ ise merminin sivrilik değişkenidir ve 7.62'lik mermiler için 1 olarak kabul edilmektedir. Denklem 6.31 hesaplandıktan sonra eğer eşdeğer kalınlık gerçek kalınlıktan küçükse denklem 6.32, büyükse denklem 6.33 kullanılmaktadır [39].

$$W_p = \frac{\pi}{8} * d_p * t * (\pi * t + \gamma * d_p) * Y_T \quad (6.32)$$

$$W_p = \frac{\pi}{4} * (t - t^*) * d_p^2 * \beta * Y_T + \frac{\pi}{8} * d_p * t^* * (\pi * t^* + \gamma * d_p) * Y_T \quad (6.33)$$

6.9. Lambert - Jones Modeli

Recht – Ipson modelinin modifiye edilmesiyle ortaya çıkan Lambert – Jones Modeli, merminin zırhı deldikten sonraki çıkış hızının hesaplanmasında kullanılan en genel formüllerden biridir. Modelin en genel gösterimi aşağıda yer alan denklem 6.34'te gösterilmektedir.

$$V_r = a * (V^p - V_{bl}^p)^{\frac{1}{p}} \quad (6.34)$$

Aşağıda yer alan denklem 6.35'te a 'nın hesaplanması için gerekli formül gösterilmektedir. Formüldeki m_p (kg) merminin kütlesini, m' (kg) ise zırhın deforme olan bölümünün kütlesini ifade etmektedir. Söz konusu m' hesaplanırken denklem 6.36 kullanılmaktadır.

$$a = \frac{m_p}{m_p + m'} \quad (6.35)$$

$$m' = \pi * r^2 * \rho_t * h_t \quad (6.36)$$

Denklem 6.36'da gösterilen r (m) mermi yarıçapını, ρ_t (kg/m³) zırhın yoğunluğunu, h_t ise zırhın kalınlığını ifade etmektedir. Lambert – Jones modelinde yer alan en önemli deneye dayalı bir katsayı p 'dir. Bu katsayının hesaplanması için de modelde mermi, zırh kalınlığı ve çarpma açısı (β) (rad) ile ilgili formüller denklemler 6.37-38'de verilmiştir [40].

$$p = 2 + \frac{z}{3} \quad (6.37)$$

$$z = \frac{h_t}{d} * \sec(\beta)^{0.75} \quad (6.38)$$

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar Stanag 4569 standartlarına uygun biçimde test yapılabilen özel bir savunma sanayii firmasında gerçekleştirilmiştir. Test panellerinde kullanılacak malzemeler tedarik edilirken savunma sanayiinde iş yapan firmalar tercih edilmiştir. Alüminyum malzemeler PMS Alüminyumdan, seramik malzemeler ise Nurol Teknoloji'den tedarik edilmiştir. Seramiklerin bir arada durabilmesi için kullanılan sırtlık katman olan kevlar epoksi malzeme ise Başkent Üniversitesi malzeme laboratuvarından kullanılmıştır. Elde edilen numunelerin imkânlar dâhilinde balistik standartlara uygun olarak hazırlanmasına ve test edilmesine önem verilmiştir.

7.1. Numunelerin Hazırlanması

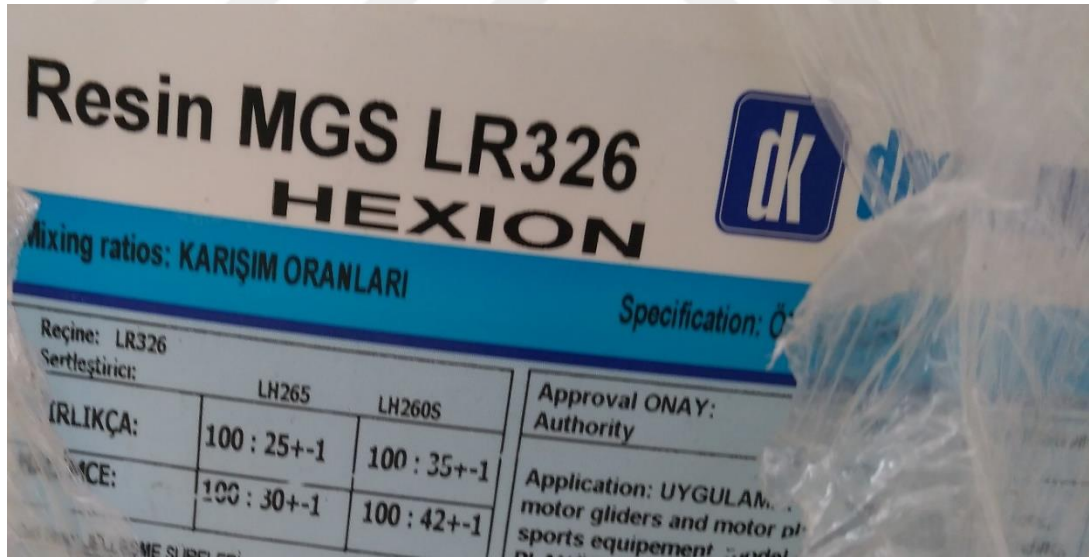
Deneysel çalışmalara test panellerini oluşturan katmanların temin edilmesiyle başlanmıştır. PMS Alüminyumdan alüminyum zırhlarda da kullanılan 6061 T-6 serisi alüminyum temin edilmiştir. Alüminyumlar 15x15cm kare şeklinde ve 4 mm kalınlığındadır. Nurol Teknoloji'den temin edilen seramikler ise 5x5 cm kare şeklinde ve 10 mm kalınlığındadır. Nurol Teknoloji'den temin edilen seramikler 30 adet 5x5 kare biçiminde alümina (Al_2O_3) ve 10 adet 5x5 kare biçiminde bor karbürdür(B_4C). Bu malzemelerden 15x15 cm ölçülerinde dört farklı zırh konfigürasyon paketi elde edilmiştir.

İlk olarak seramiklerden oluşan bir katmanda seramiklerin bir araya getirilmesi için Başkent Üniversitesi'nden alınan ve şekil 7-1'de gösterilen kumaş tipi kuru kevlar(aramid) malzeme ve epoksi reçine kullanılarak Ernes Kompozit A.Ş.'ye ait tesiste kür işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7-1 Deneyde Kullanılan Kevlar-Aramid Malzeme

Kevlar malzeme dört farklı seramik yapıyı da kapsayacak ve üç kat olacak şekilde kesilmiştir. Deneyde kullanılan kevlar malzemenin amacı balistik koruma sağlamak değil seramiklerin düzgün şekilde sırtlık ile bir araya gelmesidir. Bu nedenle balistik etkileri varsa göz ardı edilecektir. Seramiklerin kevlara yapışması için kullanılan reçine ve sertleştirici aşağıdaki şekil 7-2 ve 7-3'te görülmektedir.



Şekil 7-2 Deneyde Kullanılan Reçine



Şekil 7-5 Seramiklerin Kevlar Malzeme Üzerine Serilmiş Hali

Yukarıdaki şekil 7-5’te görüleceği şekilde üç kat olacak şekilde hazırlanan seramik-kevlar malzeme Ernes Kompozitin kullandığı fırınlarda kür işlemi öncesi yapışması için bir süre bekletilmiştir. Ardından üzerleri şekil 7-6’da yer alan vakum torbası ile kapatılarak vakumlanan malzemeler fırına konularak kürleme işlemine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 7-6 Vakum Torbası

Seramik malzemelerin krlenmesinin ardından dört farklı, seramik ile kaplanmış katman su ile kesilerek istenilen ölçülere getirmiştir. Bu işlemlerin ardından zırh paketlerini oluşturacak alüminyum metal katmanlar ile alümina ve bor karbür içeren katmanlar önceden belirlenmiş olan şekilde diziliş sırasına göre hazır hale getirilmiştir. Yüzeylerin birbirlerine daha iyi yapışabilmeleri için malzeme yüzeylerinde maket bıçağı ile küçük çizikler atılmıştır. şekil 7-7 ve 7-8’de birbirlerine yapıştırılacak yüzeyler ve küçük çizikler görülmektedir. Alüminyum ile seramikleri yapıştırmak için havacılık sanayinde de kullanılan ve şekil 7-9’da bulunan Selsil marka bir yapıştırıcı kullanılmıştır.



şekil 7-7 Kevlar Malzemenin Arka Yüzeyi



şekil 7-8 Alüminyum Zırhın Yüzeyi



Şekil 7-9 Zırh Malzemelerini Yapıştırmakta Kullanılan Yapıştırıcı

7.2. Balistik Test Düzeneği

Ankara’da yer alan özel bir savunma sanayii firmasının poligonunda yapılan testler 23.3°C sıcaklıkta %45.4 nem oranında ve 906 mBar basınç altında bulunan standart ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Stanag 4569’a göre test yapılacak ortamın oda sıcaklıklarında ve standart koşullarda olması gerekmektedir.



Şekil 7-10 Zırh Paketinin Atış Öncesi Bağlandığı Mekanizma



Şekil 7-11 Atışın Yapılacağı Test Odası

Numune hedef bölgesine şekil 7-10’da görüldüğü gibi yerleştirildikten sonra şekil 7-11’de yer alan mermi hızını ölçecek kronografların kalibrasyonu yapılmış ve atışlı teste hazır hale getirilmiştir. Kronograflar, namlu ve hedef arasındaki mesafe Ek-1’de yer alan deney sonuç raporunda ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir. Deney sırasında kullanılan namlu şekil 7.12’de yer almaktadır. Yapılan doğrulama işlemlerinin ardından kontrol odasına geçilerek atışlı test işlemine başlanmıştır.



Şekil 7-12 Prototipa SN 6958 Marka Namlu

7.3. Deney Numune Kombinasyonları

Yapılan deneylerde dört farklı konfigürasyonda numune kullanılmıştır. Alümina, bor karbür ve alüminyum plakalardan oluşan zırh bileşenleri farklı diziliş ve kalınlıklarda kullanılarak oluşan zırhların balistik özelliklerindeki değişimin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra üzerlerine numune numaraları yazılmıştır. Oluşturulan numune kombinasyonları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Merminin giriş yaptığı kısım ön katman olarak tanımlanmıştır. Orta ve arka katmanlar ise sırasıyla soldan sağa olarak kullanılan malzemelerden oluşmaktadır.

Tablo 7-1 Zırh Paketlerinin Konfigürasyonu

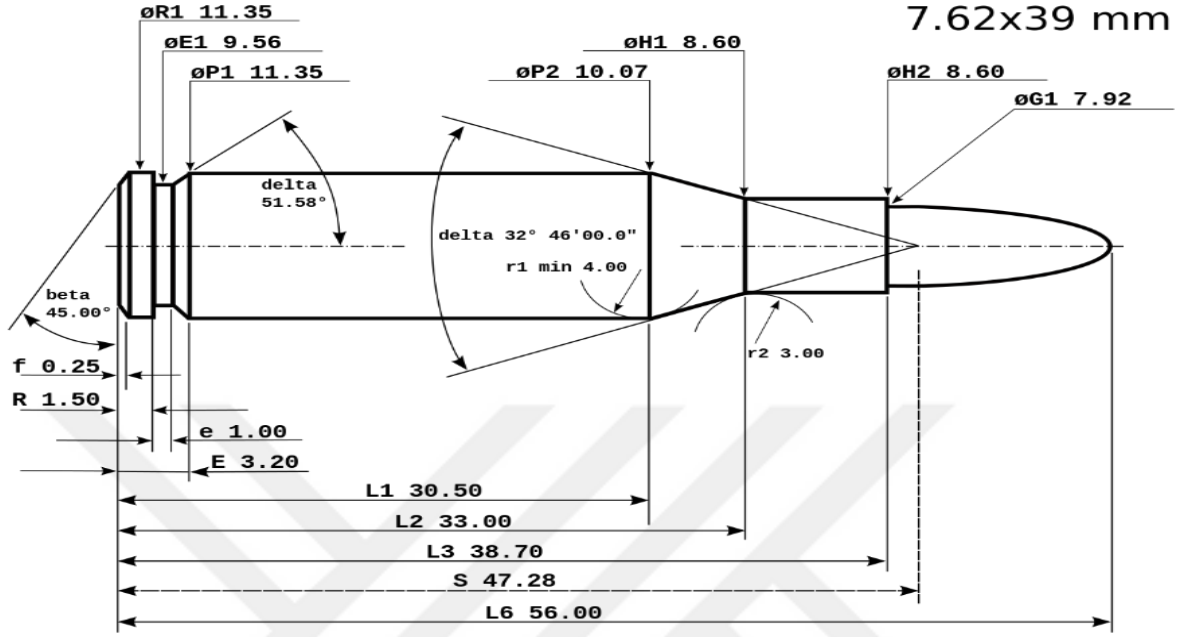
Numune Numarası	Ön Katman	Orta Katman	Arka Katman
1	3 adet 4 mm Al	10 mm Al ₂ O ₃	1 adet 4 mm Al
2	1 adet 4 mm Al	10 mm Al ₂ O ₃	3 adet 4 mm Al
3	1 adet 4 mm Al	10 mm B ₄ C	2 adet 4 mm Al
4	1 adet 4 mm Al	10 mm Al ₂ O ₃	2 adet 4 mm Al

7.4. Deneyin Yapılışı

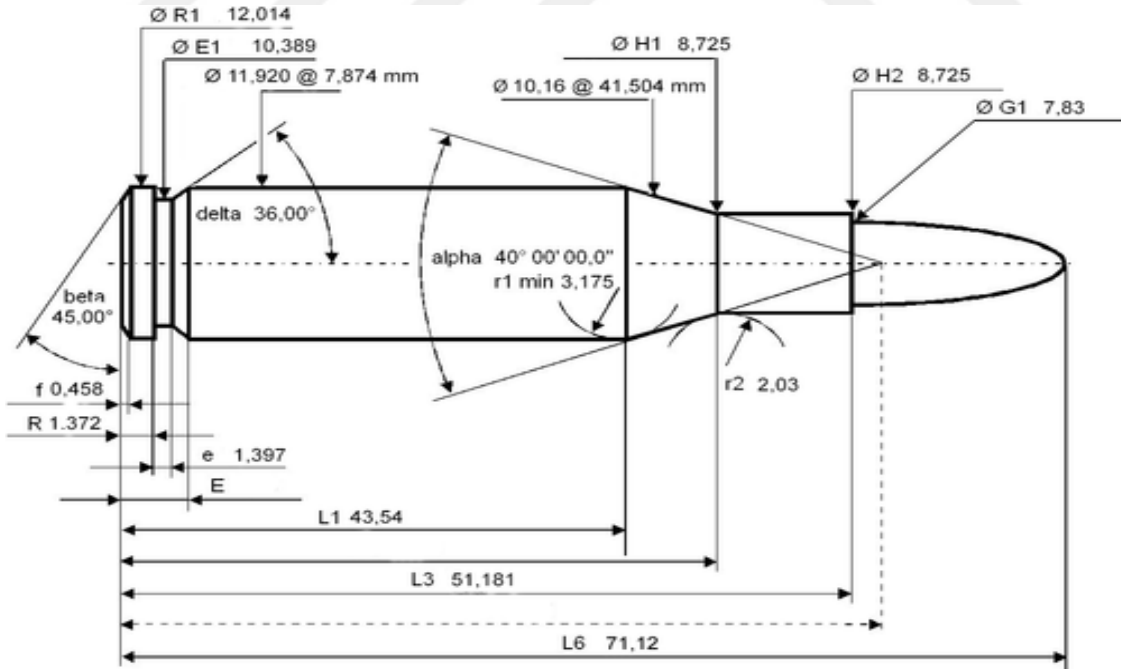
Yapılan deneylerde numunelerin Stanag 4569 standardına göre seviye 2'yi sağlaması hedeflenmiştir. Sadece bir numune için söz konusu standartta belirtilen seviye 3 test koşulları denenmiştir. Her numuneye iki farklı atış yapılmıştır. Mermiler numunelere dik açıyla çarpmışlardır. Numunelerin başarılı sayılabilmesi için tehdidi tam olarak durdurmaları ve delinmemeleri gerekmektedir. Bu nedenle kullanılan numunelerin tamamen delinmemiş olması (non-perforation) başarı kriteri olarak belirlenmiştir. Seviye 2 atışlarda 28 inç Kriger Barrels BT20500 namı ve 7.62 AP BZ39 tipi mermi kullanılmıştır. Seviye 3 atışında ise Prototypa SN6958 tipi namı kullanılırken mermi olarak da 7.62 AP WC kullanılmıştır. Mermilerin teknik özellikleri şekil 7-13 ve 7-14'te yer almaktadır. Her iki seviyedeki testte MKE'nin ürettiği yerli barut kullanılmıştır.

Deney için ilk başta deneme atışları gerçekleştirilmiştir. Deneme atışlarında kullanılacak barut miktarı ve mermi hızı ölçüldükten sonra seviye 2 atışlar gerçekleştirilmiştir.

Her numuneye ikişer adet atış yapılmıştır. Numune 3'e ise bir adet seviye 3 denemesi yapılmıştır. Atış sonuçları ve teknik detaylar Ek-1 ve Ek-2'de yer almaktadır.



Şekil 7-13 7.62x39 mm API BZ Tipi Mühimmat

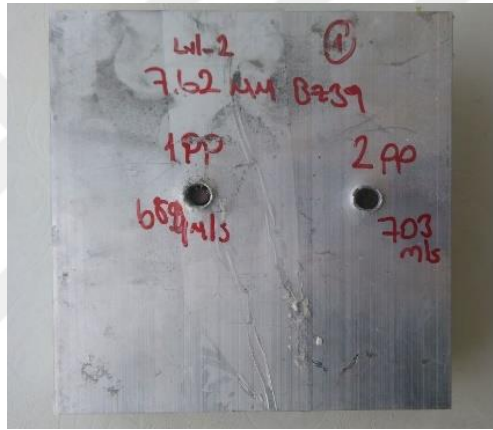


Şekil 7-14 7.62x51 AP Tipi Mühimmat

7.5.Deneysel Bulgular

7.5.1. Numune 1

Numune 1'in ön yüzeyinde 3 adet 4 mm'lik alüminyum katman bulunmaktadır. Numune 1'de alümina seramik kullanılmış ve seramik katman 4 mm'lik alüminyumla desteklenmiştir. Şekil 7-15'te Numune 1'e ait mermilerin giriş yerleri gözükmemektedir. Test edilen seviye ve mermilerin giriş hızları numunenin üzerine kırmızı kalemle yazılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere ön yüzeyde bulunan alüminyum plakaların tümünde sünek delik oluşumu görülmektedir. Ön yüzeydeki alüminyum malzemelerde herhangi bir çatlama görülmemektedir.



Şekil 7-15 Atışlar Sonucu Numune 1'in Ön Yüzeyi

Şekil 7-16'da ise numune 1'in atış sonrasındaki arka yüzeyi görülmektedir. Her iki atış neticesinde de arka katmandaki alüminyum malzemede çökme görülmektedir. İlk atış sonrası 5.1 mm, ikinci atış sonrası ise 6.4 mm çökme meydana gelmiştir.



Şekil 7-16 Atışlar Sonucu Numune 1'in Arka Yüzeyi



Şekil 7-17 Atışlar Sonucu Numune 1'in Kesit Görüntüsü

Şekil 7-17 ise numune 1'in atışlı test sonundaki kesit görüntüsüdür. Bu görüntüde numuneyi oluşturan malzemelerde delaminasyon görülmektedir. Arka yüzeydeki alüminyum parçanın neredeyse zırhın tamamından ayrıldığı görülmektedir. Ancak atışlar sonrası numune test düzeneğinden çıkarıldığında şekle göre alt kısımdaki seramik bağlantısının kopmadığı ve az da olsa bir arada kaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 7-18 Atışlar Sonucu Numune 1'in Seramik Yüzeyi

Yukarıda yer alan şekil 7-18'de ise mermilerin seramikler üzerindeki etkisi görülmektedir. Orta yüzeyde yer alan seramikler tamamen parçalanırken üst ve alt yüzeydeki seramiklerde derin çatlaklar meydana gelmiştir. Ayrıca en ortada yer alan seramik parçanın üzerinde radyal çatlaklar gözlemlenmektedir.

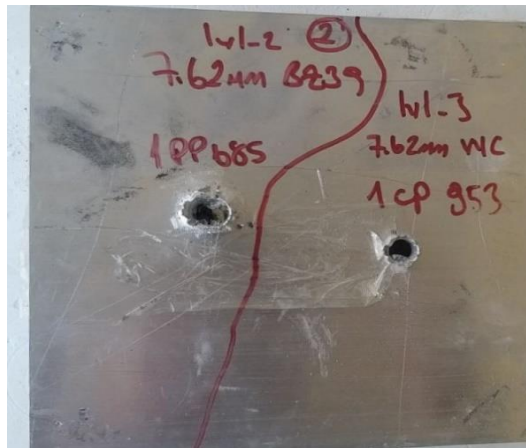
Aşağıda yer alan şekil 7-19'da ise numune 1'de bulunan kevlar-epoksi katman yüzeyinde oluşan deformasyon görülmektedir. Mermiler ön yüzeyi ve seramik katmanını deldikten sonra kevlar kompozit yüzey üzerinde tüm hızlarını kaybetmişlerdir. İlk atış sonrası kevlar yüzeyde neredeyse bir deformasyon görülmezken ikinci atış sonrası delaminasyon ve kevlar yüzeyde az da olsa deformasyon meydana gelmiştir. Ancak herhangi bir delinme meydana gelmemiştir.



Şekil 7-19 Atışlar Sonucu Numune 1'in Kevlar Yüzeyi

7.5.2. Numune 2

Numune 2'nin ön yüzeyinde bir adet 4 mm'lik alüminyum malzeme bulunurken, orta katmanda alümina, arka yüzeyinde ise 3 adet 4mm'lik alüminyum bulunmaktadır.



Şekil 7-20 Atışlar Sonucu Numune 2'in Ön Yüzeyi

Şekil 7-20’de ön yüzeyi görülen numuneye iki farklı seviyede atış yapılmıştır. İlk atış seviye 2 düzeyinde, ikinci atış ise seviye 3 düzeyinde gerçekleştirilmiştir. İki atış neticesinde ön yüzeyde sünek delik oluşumu gözlemlenmiştir.

Testler neticesinde seviye 2 atışı zırh tarafından tutulurken seviye 3 atışında ise kısmi delinme gözlemlenmiştir. Şekil 7-21’de görüleceği üzere seviye 3 atışı zırhın en arka yüzeyini de deldiği görülmektedir.



Şekil 7-21 Atışlar Sonucu Numune 2’in Arka Yüzeyi

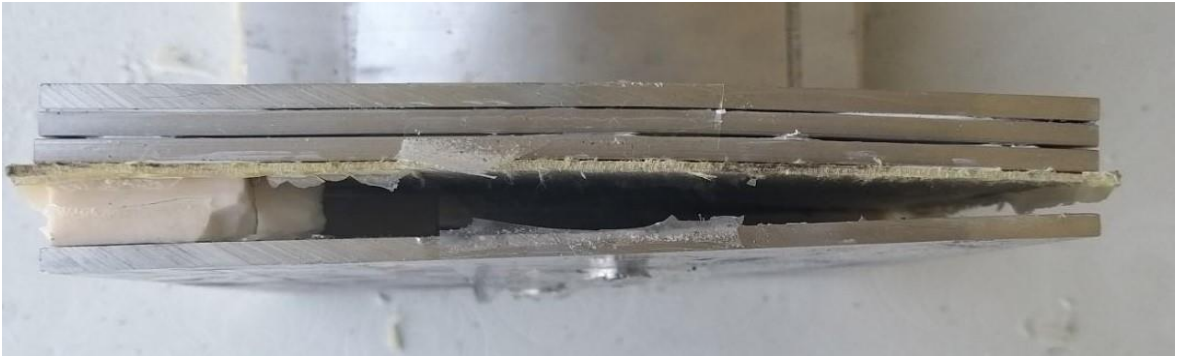
Zırh paketi incelendiğinde ise seviye 3 atışın zırh paketine tamamen nüfuz etmediği ortaya çıkmıştır. Zırh paketini oluşturan katmanların birbirinden ayrılması ile yapılan incelemede ön alüminyum ve orta seramik katmanı geçen mermi en arka yüzeyde bulunan alüminyum parçanın içinde kısmen kalmıştır. Şekil 7-22 ve 7-23’te görüleceği üzere merminin çekirdeği seramik katman tarafından kırılmış ve kısmı olarak zırhın arka yüzeyini delerken kısmi olarak da zırh katmanlarının arasında kalmıştır. Diğer yandan seviye 2 atış sonrasında mermi çekirdeği seramik katmanın ardından kevlar kompozit katmana nüfuz edememiştir.



Şekil 7-22 Atışlar Sonucu Numune 2'in Kevlar Yüzeyi



Şekil 7-23 Atışlar Sonucu Numune 2'nin Parçaladığı Merminin Kalıntıları



Şekil 7-24 Atışlar Sonucu Numune 2'in Kesit Görüntüsü

Şekil 7-24'te yer alan numune 2'nin kesitinden çekilen fotoğrafta görüleceği üzere zırh paketinde bir delaminasyon görülmemiştir. Tüm alüminyum katmanlar düzlemselliğini korumuş ve herhangi bir şişme - çökme gözlemlenmemiştir. Diğer yandan şekilden anlaşılabacağı üzere seramik katmanın çoğunun kırıldığı görülmektedir. Bu nedenle ön yüzeyde bulunan alüminyum parça düzlemselliğini korumakla birlikte seramiklerin kırılması nedeniyle arka kısma yaklaşmıştır. Ancak zırhtan tamamen ayrılmamıştır.

Aşağıdaki şekil 7-25'te yer alan zırhın seramik yüzeyinin neredeyse tamamının parçalandığı gözlemlenmiştir. Seviye-2 atışın vurduğu kısımda üst ve alt seramikler neredeyse hiç zarar görmezken, seviye-3 atışın geldiği noktalardaki tüm seramikler parçalanmıştır. Ayrıca seviye-3 atışın seramiğin alüminyuma giriş yaptığı kısımda daha dar bir deformasyona yol açtığı, seviye-2 atışın ise daha geniş çaplı bir deformasyon yarattığı görülmektedir. Diğer yandan seviye 3 atışın vurduğu noktanın çaprazında yer alan seramiklerin neredeyse hiç hasar almadığı görülmektedir. Bu zırh paketinin seviye-3 atışa karşı enerji emme kapasitesinin düşüklüğünü göstermektedir. Merminin enerjisi zırhın içinde dağılmadan kısmen de olsa zırhlı delip geçmeyi başarmıştır.



Şekil 7-25 Atışlar Sonucu Numune 2'in Seramik Yüzeyi

7.5.3. Numune 3

Numune 3'ün ön yüzeyi 4 mm'lik alüminyum, orta katman bor karbür ve en arka katmanda 2 adet 4 mm alüminyum olacak şekilde konfigüre edilmiştir.

Numune 3, üzerine yapılan iki adet seviye 2 atışı da durdurmakta başarılı olmuştur. Şekil 7-26'da zırhın ön yüzeyi görülmektedir. Mermilerin giriş noktalarında sünek delinme gözlenmektedir.



Şekil 7-26 Atışlar Sonucu Numune 3'in Ön Yüzeyi

Zırhın yan yüzeyleri incelendiğinde, numunenin orta kısmında çökme gözlemlenirken yüzeylerin eğilmesine rağmen birbirlerinden ayrılmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum aşağıda bulunan şekil 7-24'te görülmektedir. Yapılan ilk atış neticesinde herhangi bir çökme görülmezken, ikinci atış neticesinde ise 3.6 mm derinliğinde çökme görülmektedir.



Şekil 7-27 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kesit Görüntüsü

Numunenin arka yüzeyinin yer aldığı şekil 7-28 incelendiğinde mermilerin zırhın arka katmanında yarattığı çökme görülmekte birlikte zırh paketinde herhangi bir penetrasyon yaratamadığı da gözlemlenmektedir.



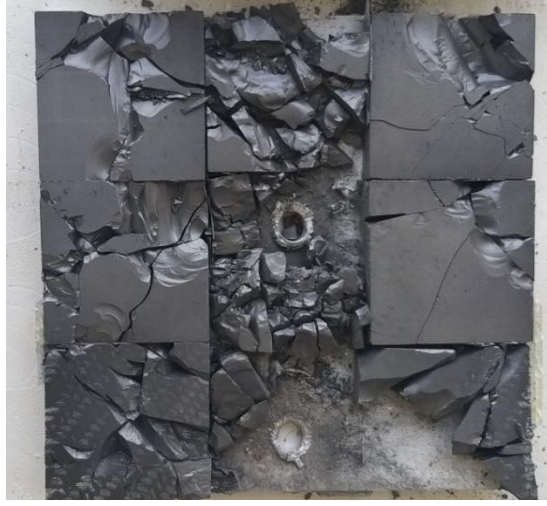
Şekil 7-28 Atışlar Sonucu Numune 3'in Arka Yüzeyi

Yapılan ilk atışın seramik katmandan sonra kevlar kısma nüfuz etmediği gözlemlenmiştir. Şekil 7-29'da görüleceği gibi yapılan ikinci atış kevlar kısma nüfuz etmiş ancak zırh paketinin arka alüminyum katmanında durdurulmuştur.



Şekil 7-29 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kevlar Yüzeyi

Şekil 7-30'da ise yapılan atışların seramik üzerindeki etkisi gözlemlenmektedir. Orta kısımdaki seramikler tamamen kırılıp ufalanmışken alt kısımdaki seramikler ise nispeten daha büyük parçalar halinde kırılmışlar ve zırha entegre şekilde kalmışlardır. Yapılan kenar atış neticesinde şekil 7-30'un alt kısmında görüleceği üzere o bölgedeki seramikler daha fazla kırılmışken şeklin ortasında ve yukarısında kalan seramikler daha büyük parçalar halinde kalmış ve zırhtan ayrılmamıştır. Yapılan ilk atış deney düzeneğinden kaynaklanan bir hata nedeniyle bir kenar atış özelliği taşımaktadır. Bu nedenle yapılan atış kenar seramikleri üzerinde daha yıkıcı bir etki bırakmıştır.



Şekil 7-30 Atışlar Sonucu Numune 3'in Seramik Yüzeyi

7.5.4. Numune 4

Numune 4'ün ön yüzeyi 4 mm'lik alüminyum, orta katman alümina ve en arka katmanda 2 adet 4 mm alüminyum olacak şekilde paketlenmiştir. Dördüncü numuneye yapılan atışlarda da zırh paketinin seviye-2 koruma sağladığı görülmüştür. Şekil 7-31'de yapılan atışların zırh paketinin ön yüzeyine yaptığı etki görülmektedir. İki atış neticesinde de alüminyum malzemede sünek delinme görülmektedir.



Şekil 7-31 Atışlar Sonucu Numune 4'in Ön Yüzeyi

Zırh paketinin yukarıdan görünümü olan ve aşağıda yer alan Şekil 7-32 incelendiğinde zırh paketinde delaminasyon görülmemektedir. En arka katmanda bir çökme oluşmuştur. Bu çökmenin miktarı 1.1 mm'dir. Diğer yandan orta kısımda yer alan seramiklerin kırıldığı görülmektedir.



Şekil 7-32 Atışlar Sonucu Numune 3'in Kesit Görüntüsü

Zırh paketinin arka kısmının görüldüğü Şekil 7-33 incelendiğinde yapılan iki atışında arka katmanda durdurulduğu görülmektedir. En arka alüminyum katmanda herhangi bir penetrasyon izine rastlanmamıştır. Ayrıca atışlar neticesinde arka plakada oluşan çökme de şekilde görülmektedir.



Şekil 7-33 Atışlar Sonucu Numune 3'in Arka Yüzeyi

Şekil 7-34'te ise zırh paketinin ayrılmasıyla atışların seramik üzerinde yarattığı etki görülmektedir. Şekil 8-20'de de görüldüğü üzere seramik katmanda orta sırada yer alan tüm seramikler kırılmıştır. Sol üst seramiğin de tamamen kırıldığı gözlemlenmektedir. İlk atış şeklin sağ kısmına yapılmıştır. İkinci atış da şeklin solunda yer almaktadır. Burada görüleceği üzere ikinci atışın seramikler üzerinde yarattığı tahribat daha fazladır. İlk atış neticesinde kırılan seramik katman zırh paketinin enerji sönmüleme kabiliyetini azaltmıştır.

Ancak buna rağmen zırh paketi başarılı şekilde ikinci atışı da durdurmayı başarmıştır. Yapılan iki atış da kevlar katmana nüfuz etmeden durdurulmuştur.



Şekil 7-34 Atışlar Sonucu Numune 3'in Seramik Yüzeyi

7.6. Deney Sonuçlarının İncelenmesi

Hazırlanan dört farklı numuneye yapılan toplam sekiz atış neticesinde ulaşılan sonuçlar ve deney özeti Tablo 7-2'de yer almaktadır. Hazırlanan tabloda KP kısmi penetrasyon (nüfuziyet), TP ise tam penetrasyon (nüfuziyet) anlamına gelmektedir.

Tablo 7-2 Deney Sonuçları

Panel No	Atış No	Panel Konfigürasyonu	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Hız (m/s)	STANAG 4569 Koruma Seviyesi/Enerji	DeneySEL Sonuç
P1	1	4+4+4 mm Al + 10 mm Alümina + 4 mm Al	82.7	692	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP

P1	2	4+4+4 mm Al + 10 mm Alümina + 4 mm Al	82.7	712	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP
P2	1	4 mm Al + 10 mm Alümina + 4+4+4 mm Al	82.7	694	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP
P2	2	4 mm Al + 10 mm Alümina + 4+4+4 mm Al	82.7	958	3 (3,647 Joules) 7.62mm x 54R B32	TP
P3	1	4 mm Al + 10 mm Bor Karbür + 4+4 mm Al	57.6	671	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP
P3	2	4 mm Al + 10 mm Bor Karbür + 4+4 mm Al	57.6	735	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP
P4	1	4 mm Al + 10 mm Alümina + 4+4 mm Al	71.8	713	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP

P4	2	4 mm Al + 10 mm Alümina + 4+4 mm Al	71.8	687	2 (1,877 Joules) 7.62 mm x 39 API BZ	KP
----	---	---	------	-----	---	----

- Dört numune de STANAG 4569 Seviye 2 tipi atışları durdurmayı başarmıştır.
- STANAG 4569 Seviye 3 tipi yalnızca bir atış numune-2 üzerinde gerçekleştirilmiş ve tam penetrasyon gözlemlenmiştir.
- Numune-1 ve numune-2 üzerine yapılan atışlar kıyaslandığında numune-2'deki balistik direncin daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerin dizilimleri ele alındığında, merminin seramik katmana çarpmasından sonra hızını büyük ölçüde kaybettiği bu nedenle penetrasyon kabiliyetini azalttığı ortaya çıkmıştır. Aynı katmanlar kullanılmasına rağmen ön yüzeyinde daha çok alüminyum katman bulunduran numune-1 mermiyi durdurmakta numune-2'ye göre yarattığı deformasyon açısından daha başarısız olmuştur.
- Kullanılan katman sayısı aynı ancak seramik katmanı farklı olan numune-3 ve numune-4 incelendiğinde ise seramik katman olarak bor karbür (B_4C) kullanılan numune-3'ün balistik direncinin numune-4'e göre daha fazla olduğu görülmüştür. Numune 3'e yapılan ilk atış zırhın kenarına gelmiş olmasına rağmen ilk atış sonrası yapılan inceleme neticesinde zırh üzerinde herhangi bir çökme gözlemlenmemiştir. Mermi ince kevlar tabaka üzerinde kalmış ve yere düşmüştür. Ancak seramik katman olarak alümina (Al_2O_3) kullanılan numune-4'e yapılan atışların ikisi de arka katmanda çökme meydana getirmiştir.
- Numune 1 atışların ardından 5.1 mm çökmüştür. Numune 2'de iki atış neticesinde de çökme gözlemlenirken, Numune 3 üzerine yapılan ilk atışta çökme meydana gelmemiş ancak ikinci atış neticesinde 3.6 mm çökme meydana gelmiştir. Numune 4'e yapılan atışlarda ise 1.1 mm'lik bir çökme meydana gelmiştir.
- Aşağıdaki tabloda dört numuneye ait alansal yoğunluklar belirtilmiştir.

Tablo 7-3 Numunelerin Alansal Yoğunlukları ve Çökme Miktarı

Numune Numarası	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Maksimum Çökme Miktarı (mm)
1	82.7	5.1 mm
2	82.7	-
3	57.6	-
4	71.8	1.1 mm

Numune 1 ve 2 aynı malzemeler kullanılıp farklı sıralamada konfigüre edildiği için iki numunenin de alansal yoğunluğu aynıdır. Numune 3'te bor karbür seramik malzeme ve 3 adet 4 mm Al Plaka kullanıldığı için en düşük alansal yoğunluğa sahip numune olmuştur.

Numune 4 ise alansal yoğunluk sıralamasında 2. sırada yer almaktadır. Dört numune de seviye-2 atışlara karşı koruma sağlamıştır. Ancak alansal yoğunlukları değerlendirildiğinde en başarılı numune-3 olmuştur. Alansal yoğunlukları aynı olsa da numune-1 ile numune-2 kıyaslandığında, numune-2'nin göstermiş olduğu balistik direnç açısından seramik katmanın mümkün olduğunca balistik çarpmayı erken fazda yaşaması merminin enerjisini önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Dolayısı ile seramik katmanın balistik tasarımlarda mümkün olduğunca öne konulması önerilmektedir. Seramik katman cinsi açısından bakıldığında ise bor karbür seramik katmanın alümina seramik katmana kıyasla daha başarılı olduğu ve alansal yoğunluk açısından da en iyi konfigürasyonu verdiği görülmektedir.

8. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında faydalanılan analitik modeller üç yapıda sınıflandırılmaktadır. Florence, Değiştirilmiş Florence ve Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin modelleri seramik-metal kompozit zırhlar için balistik limit hesaplanmasında kullanılmaktadır. Deneylerdeki tüm konfigürasyonlarda kullanılan 10 mm'lik seramik katman ve hemen arkasında bulunan 4 mm'lik alüminyum katmanın balistik limiti bu üç model ile hesaplanmıştır. Kullanılan modeller seramik ve alüminyumun balistik limitini birleşik olarak hesaplamaktadır. Söz konusu üç model üzerinden elde edilen balistik limit hız diğer modellerden elde edilen çıkış hızı ile karşılaştırılarak zırh paketinin mermiyi durdurup durduramayacağı belirlenmiştir.

Ön yüzeyde bulunan alüminyum malzemelere çarpan merminin çıkış hızı Borvik, Thompson, Wijk, Pol, Woodward – Cimporeu ve Lambert – Jones modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu modellerden elde edilen çıkış hızı ile Florence, Değiştirilmiş Florence ve Ben-Dor – Dubinsky – Elperin modellerinden elde edilen balistik limit kıyaslanmıştır. Elde edilen çıkış hızlarının, seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limitinden düşük veya eşit olması halinde penetrasyon (nüfuziyet) olmayacağı sonucuna varılacaktır.

Borvik, Thompson ve Wijk modelleri metaller için çıkış hızı hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu modeller ek bir denkleme ihtiyaç duymadan, ince bir metal zırha çarpma hızı bilinen bir merminin çıkış hızının hesaplanması için uygundur. Pol ve Woodward-Cimporeu modelleri ise metaller için yalnızca balistik limit hesabında kullanılmaktadır. Özetle bu modeller kendi başlarına çıkış hızı hesaplanmasında kullanılamamaktadır. Bu nedenle analitik hesaplamalarda Pol ve Woodward - Cimporeu modelleri balistik limiti bilinen malzemeler için çıkış hızı hesaplamakta kullanılan Lambert-Jones Modeli ile birlikte kullanılmıştır. Lambert – Jones modeli, balistik limit hızı bilinen metal malzemeler için çıkış hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Pol, Borvik, Woodward-Cimpoeru, Thompson ve Wijk modellerinden elde edilen çıkış hızları Florence, Değiştirilmiş Florence ve Ben-Dor – Dubinsky – Elperin modelleri kullanılarak hesaplanan balistik limitlerle kıyaslanarak zırhların performansı kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar dört numune için de ayrı ayrı hesaplandıktan sonra tablo haline getirilerek sunulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan merminin ilk katmana çarpma hızı için yapılan atışların ortalaması alınarak kullanılmıştır. Numune-2 için atış yapılan balistik seviyeler farklı olduğu için her atış için ayrı modelleme yapılmıştır.

Analitik çalışmalara örnek olması açısından numune 1 için Pol ve Lambert-Jones modelinin hesaplanma şekli aşağıdadır.

$$W_p = \frac{\pi}{2} * b^2 * Y * t = \frac{\pi}{2} * 0.00396^2 * 276 * 10^6 * 0.004 = 27.18 J \quad (8.1)$$

Denklem 8.1’de yer alan plastik işin hesaplanması sırasında mermi yarıçapı 0.00396 m, metalin akma dayanımı 276 GPa ve kalınlığı 0.004 m olarak alınmıştır.

$$W_{d1} = \frac{2 * \pi * \rho_t * V_0^2 * b^4 * t^2}{3 * L^2} = \frac{2 * \pi * 2700 * 702^2 * 0.00396^2 * 0.004^2}{3 * 0.026^2} = 0.02 J \quad (8.2)$$

Denklem 8.2’de yer alan dinamik işin hesaplanması sırasında metalin yoğunluğu 2700 kg/m³ ve merminin çarpma hızı 702 m/s olarak kullanılmıştır.

$$W_b = \frac{\pi^2 * b * Y * t^2}{4} = \frac{\pi^2 * 0.00396 * 276 * 10^6 * 0.004^2}{4} = 43.10 J \quad (8.3)$$

Denklem 8.3’te hesaplanmış olan bükülme esnasında yapılan işle 8.1 ve 8.2’de hesaplanan işler aşağıda yer alan denklem 8.4’te toplanarak yapılan toplam iş bulunmuştur.

$$W = W_p + W_d + W_b = 27.18 + 0.02 + 43.10 = 70.30 J \quad (8.4)$$

Yapılan toplam iş hesaplandıktan sonra aşağıda yer alan denklem 8.5’te yerine konularak numune 1 için alüminyum katmanın balistik limiti hesaplanmıştır.

$$V_{bl} = \sqrt{\frac{2 * W}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 * 70.30}{0.0079}} = 133.41 m/s \quad (8.5)$$

Metal katmanın balistik limitinin belirlenmesinin ardından katmanı delerek arka katmana geçecek olan merminin hızını belirlemek için Lambert-Jones modeli kullanılacaktır. Numune 1 için ilk katmandan çıkış hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$z = \frac{h_t}{d} * \sec(\beta)^{0.75} = \frac{0.004}{0.00792} * \sec(0)^{0.75} = 0.505 \quad (8.6)$$

Denklem 8.6’da zırh kalınlığı olarak 0.004 m, mermi çapı 0.00792 m ve merminin çarpma açısı 0° olarak alınmıştır.

$$p = 2 + \frac{z}{3} = 2 + \frac{0.505}{3} = 2.184 \quad (8.7)$$

Denklem 8.6 kullanılarak denklem 8.7’deki “p” değeri elde edilmektedir. Çıkış hızını hesaplayabilmek için hesaplanması gereken diğer katsayılar denklem 8.8 ve 8.9’da hesaplanmıştır. Mermi kütlesi olarak 0.0079 kg, metal zırhın yoğunluğu olarak 2700 kg/m³ kullanılmıştır.

$$m' = \pi * r^2 * \rho_t * h_t = \pi * 0.00396^2 * 2700 * 0.004 = 0.0005 \text{ kg} \quad (8.8)$$

$$a = \frac{m_p}{m_p + m'} = \frac{0.0079}{0.0079 + 0.000532} = 0.937 \quad (8.9)$$

Tüm denklemler kullanılarak numune 1 için ilk metal katmandan çıkış hızı aşağıdaki denklem 8.10’la hesaplanmaktadır.

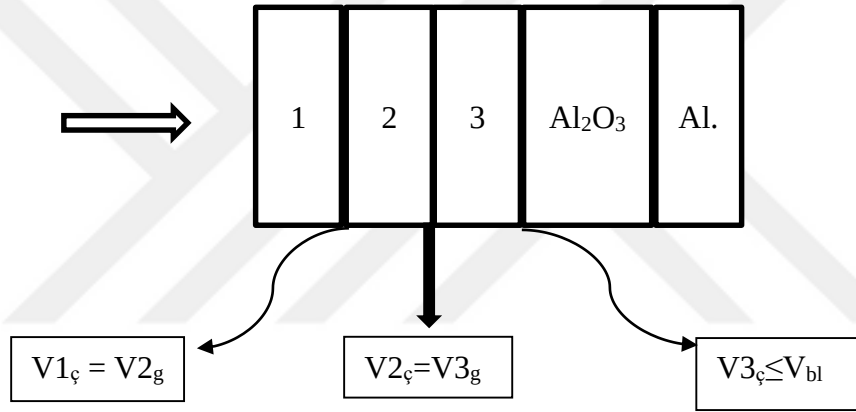
$$V_r = a * (V^p - V_{bl}^p)^{\frac{1}{p}} = 0.937 * (702^{2.184} - 133.41^{2.184})^{\frac{1}{2.184}} = 649.38 \text{ m/s} \quad (8.10)$$

8.1.Numune 1

Numune 1 için hazırlanan tablolarda kullanılan modele göre değişen çıkış hızları ve balistik limitler bulunmaktadır. Metallere giren merminin çıkış hızının hesaplanmasında kullanacak modeller, Numune 1’in ön katmanında bulunan üç farklı alüminyum için sırasıyla uygulanmıştır. Zırh paketinin en önünde bulunan ilk alüminyum katmana çarpan merminin çıkış hızı hesaplanarak, arka katmanlardaki alüminyum katmanların giriş hızı olarak kullanılmıştır. Zırh konfigürasyonunun ön katmanında yer alan üç adet alüminyum katmanı delen merminin hesaplanan çıkış hızı, seramik-metal zırhların balistik limitiyle kıyaslanmıştır. Alüminyum katmandan çıkarak seramik-alüminyum katmana girecek olan merminin hızı Thompson modeli haricinde düşük olarak hesaplanmıştır. Yani alüminyum katmanları aşan mermi seramik-alüminyum katmana penetre edemeyecektir.

Nitekim deneyler sonucunda da mermi en arka katmana nüfuz edememiştir. Hesaplanan mermi çıkış hızı ve balistik limit arasında en yakın sonucu Borvik, Ben-Dor, Dubinsky-Elperin modeli verirken en farklı sonucu da Woodward-Cimporeu/LambertJones, Ben-Dor-Dubinsky-Elperin modeli vermiştir.

Şekil 8-1’de şematik olarak gösterilen Numune 1 zırh paketine çarpan merminin yönünü şeklin solunda kalan ok temsil etmektedir. Şekilde yer alan 1, 2 ve 3 numaralı kısımlar zırhın ön katmanında bulunan alüminyumları göstermektedir. Diğer katmanlar sırasıyla seramik ve alüminyum malzemeyi göstermektedir. Şeklin altında yer alan alt indislerden $V_{\dot{c}}$ çıkış hızını, V_g giriş hızını göstermektedir, V_{bl} ise analitik metotlarla hesaplanmış olan seramik – alüminyum katmanın balistik limitini sembolize etmektedir.



Şekil 8-1 Numune 1’in Şematik Gösterimi

Zırh paketinin ön katmanı olan ilk alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin analitik olarak hesaplanan hızları Tablo 8-1’de yer almaktadır.

Tablo 8-1 1 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Çıkan Merminin Hızı

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 1. Katmana Çarpma Hızı (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Merminin 1. Katmandan Çıkış Hızı $V_{1\dot{c}}$ (m/s)
Borvik	702	185,67	677,00
Thompson	702	-	692,11
Wijk	702	-	667,12
Pol ve Lambert - Jones	702	133,41	649,38
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	702	79,25	655,04

Zırh paketinin ön katmanında bulunan ikinci alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin analitik olarak hesaplanan hızları Tablo 8-2’de yer almaktadır.

Tablo 8-2 2 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Çıkan Merminin Hızı

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 2. Katmana Çarpma Hızı $V_{1ç}=V_{2g}$ (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Merminin 2. Katmandan Çıkış Hızı $V_{2ç}$ (m/s)
Borvik	677,00	185,67	651,04
Thompson	692,11	-	682,08
Wijk	667,12	-	632,69
Pol ve Lambert - Jones	649,38	133,41	599,27
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	655,04	79,25	513,04

Zırh paketinin ön katmanında bulunan üçüncü alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin hızı, zırh paketinin arka katmanında yer alan seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limit hızı Tablo 8-3’de yer almaktadır.

Tablo 8-3 3 Numaralı Alüminyum Katmana Giren Ve Seramik-Metal Katmana Çarpan Merminin Hızı

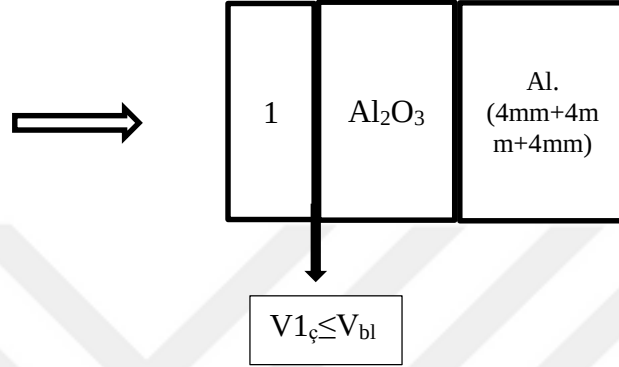
Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 3. Katmana Çarpma Hızı $V_{2ç}=V_{3g}$ (m/s)	Merminin 3.Katmandan Çıkış Hızı $V_{3ç}$ (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Seramik – Al. Katman İçin Kullanılan Model	Seramik – Al Katmanının Balistik Limiti (m/s)
Borvik	651,04	624,01	185,67	Florence	644,57
Borvik	651,04	624,01	185,67	Değiştirilmiş Florence	618,59
Borvik	651,04	624,01	185,67	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Thompson	682,08	671,91	-	Florence	644,57

Thompson	682,08	671,91	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Thompson	682,08	671,91	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Wijk	632,69	598,65	-	Florence	644,57
Wijk	632,69	598,65	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Wijk	632,69	598,65	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Pol ve Lambert - Jones	599,27	551,41	133,41	Florence	644,57
Pol ve Lambert - Jones	599,27	551,41	133,41	Değiştirilmiş Florence	618,59
Pol ve Lambert - Jones	599,27	551,41	133,41	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	513,04	400,23	79,25	Florence	644,57
Woodward - Cimporeu ve Lambert - Jones	513,04	400,23	79,25	Değiştirilmiş Florence	618,59
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	513,04	400,23	79,25	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85

8.2. Numune 2

Numune 2 için elde edilen analitik modeller değerlendirildiğinde Borvik, Thompson ve Wijk modellerinin hesapladığı çıkış hızı ile Florence, Değiştirilmiş Florence ve Ben-Dor-Dubinsky-Elperin modellerinin hesapladığı balistik limitler birbirini tutmamaktadır. Bu modeller ışığında zırhın seramik-alüminyum yüzeyinin mermiyi durduramayacağı ve merminin arka katmanlara da nüfuz edeceği sonucu çıkmaktadır. Ancak yapılan deneyler sonucunda seramik-alüminyum katmanın mermiyi durdurmakta başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçların ışığında yapılan değerlendirme neticesinde görülmektedir ki Pol, Woodward-Cimporeu modelleri Numune 2 için başarılı sonuç vermiştir.

Şekil 8-2’de şematik olarak gösterilen Numune 2 zırh paketine çarpan merminin yönünü şeklin solunda kalan ok temsil etmektedir. Şekilde yer alan 1 numaralı kısım zırhın ön katmanında bulunan alüminyumı göstermektedir. Diğer bölümler sırasıyla seramik ve alüminyum malzemeyi göstermektedir. Şeklin altında yer alan alt indislerden $V_{1\phi}$ alüminyum katmandan çıkan merminin hızını, V_{bl} ise analitik metotlarla hesaplanmış olan seramik-metal balistik limiti sembolize etmektedir.



Şekil 8-2 Numune 2’nin Şematik Gösterimi

Zırh paketinin ön katmanında bulunan alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin hızı, zırh paketinin arka katmanında yer alan seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limit hızı Tablo 8-4’de yer almaktadır.

Tablo 8-4 Numune 2’nin Analitik Modellemesi (Seviye-2)

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 1.Katmana Çarpma Hızı (m/s)	Merminin 1. Katmandan Çıkış Hızı $V_{1\phi}$ (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Seramik – Al. Katman İçin Kullanılan Model	Seramik – Al Katmanın Balistik Limiti (m/s)
Borvik	694	668,71	185,67	Florence	644,57
Borvik	694	668,71	185,67	Değiştirilmiş Florence	618,59
Borvik	694	668,71	185,67	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Thompson	694	684,01	-	Florence	644,57
Thompson	694	684,01	-	Değiştirilmiş Florence	618,59

Thompson	694	684,01	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Wijk	694	659,23	-	Florence	644,57
Wijk	694	659,23	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Wijk	694	659,23	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Pol ve Lambert - Jones	694	641,77	133,41	Florence	644,57
Pol ve Lambert - Jones	694	641,77	133,41	Değiştirilmiş Florence	618,59
Pol ve Lambert - Jones	694	641,77	133,41	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	694	526,37	79,25	Florence	644,57
Woodward - Cimporeu ve Lambert - Jones	694	526,37	79,25	Değiştirilmiş Florence	618,59
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	694	526,37	79,25	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85

Tablo 8-5 Numune 2'nin Analitik Modellemesi (Seviye-3)

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 1.Katmana Çarpma Hızı (m/s)	Merminin 1. Katmandan Çıkış Hızı V1ç (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Seramik – Al. Katman İçin Kullanılan Model	Seramik – Al Katmanın Balistik Limiti (m/s)
Borvik	958	939,8	185,67	Florence	644,57
Borvik	958	939,8	185,67	Değiştirilmiş Florence	618,59
Borvik	958	939,8	185,67	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Thompson	958	950,77	-	Florence	644,57
Thompson	958	950,77	-	Değiştirilmiş Florence	618,59

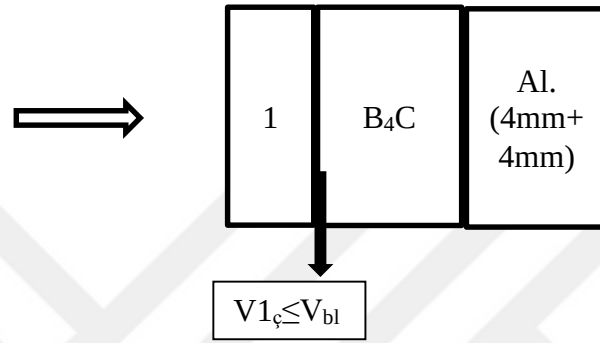
Thompson	958	950,77	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Wijk	958	918,26	-	Florence	644,57
Wijk	958	918,26	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Wijk	958	918,26	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Pol ve Lambert - Jones	958	891,79	133,41	Florence	644,57
Pol ve Lambert - Jones	958	891,79	133,41	Değiştirilmiş Florence	618,59
Pol ve Lambert - Jones	958	891,79	133,41	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	958	752,76	79,25	Florence	644,57
Woodward - Cimporeu ve Lambert - Jones	958	752,76	79,25	Değiştirilmiş Florence	618,59
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	958	752,76	79,25	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85

Zırh paketinin ön katmanında bulunan alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin hızı, zırh paketinin arka katmanında yer alan seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limit hızı seviye-3 atış için Tablo 8-5’de yer almaktadır.

8.3. Numune 3

Numune 3’te hesaplanan tüm çıkış hızları ile balistik limitler birbiriyle uyumlu sonuçlar vermektedir. Kullanılan seramiğin bor karbür olarak değiştirilmesi hesaplanan balistik limitleri oldukça yukarıya taşımıştır. Bu nedenle çıkış hızlarının hesaplandığı tüm modeller için balistik limit tutmakta yani mermi seramik-alüminyum katmanı geçememektedir. Bu durum yapılan atışlı deneyle de örtüşmektedir.

Şekil 8-3'te şematik olarak gösterilen Numune 3 zırh paketine çarpan merminin yönünü şeklin solunda kalan ok temsil etmektedir. Şekilde yer alan 1 numaralı kısım zırhın ön katmanında bulunan alüminyum göstermektedir. Diğer bölümler sırasıyla seramik ve alüminyum malzemeyi (4 mm + 4 mm) göstermektedir. Şeklin altında yer alan alt indislerden $V_{1ç}$ alüminyum katmandan çıkan merminin hızını, V_{bl} ise analitik metotlarla hesaplanmış olan seramik-metal balistik limiti sembolize etmektedir.



Şekil 8-3 Numune 3'ün Şematik Gösterimi

Zırh paketinin ön katmanında bulunan alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin hızı, zırh paketinin arka katmanında yer alan seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limit hızı Tablo 8-6'de yer almaktadır.

Tablo 8-6 Numune 3'ün Analitik Modellemesi

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 1.Katmana Çarpma Hızı (m/s)	Merminin 1.Katmandan Çıkış Hızı $V_{1ç}$ (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Seramik – Al. Katman İçin Kullanılan Model	Seramik – Al Katmanın Balistik Limiti (m/s)
Borvik	703	678,04	185,67	Florence	744,23
Borvik	703	678,04	185,67	Değiştirilmiş Florence	766,11
Borvik	703	678,04	185,67	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	783,07
Thompson	703	693,13	-	Florence	744,23
Thompson	703	693,13	-	Değiştirilmiş Florence	766,11

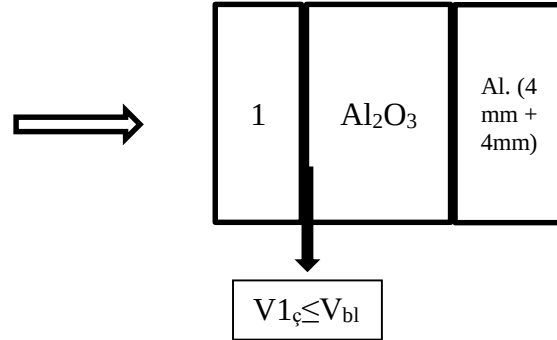
Thompson	703	693,13	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	783,07
Wijk	703	668,11	-	Florence	744,23
Wijk	703	668,11	-	Değiştirilmiş Florence	766,11
Wijk	703	668,11	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	783,07
Pol ve Lambert - Jones	703	650,33	133,41	Florence	744,23
Pol ve Lambert - Jones	703	650,33	133,41	Değiştirilmiş Florence	766,11
Pol ve Lambert - Jones	703	650,33	133,41	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	783,07
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	703	553,76	79,25	Florence	744,23
Woodward - Cimporeu ve Lambert - Jones	703	553,76	79,25	Değiştirilmiş Florence	766,11
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	703	553,76	79,25	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	783,07

8.4. Numune 4

Numune 4 için yapılan analitik hesaplamalar incelendiğinde Borvik ve Thompson modeli haricinde diğer modellerin uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Wijk modeli ise %10'luk hata payı içerisinde doğru sonuç vermektedir. Pol ve Woodward modelleri ise balistik limitlere daha yakın çıkış hızları ortaya koymuştur.

Şekil 8-4'te şematik olarak gösterilen Numune 4 zırh paketine çarpan merminin yönünü şeklin solunda kalan ok temsil etmektedir. Şekilde yer alan 1 numaralı kısım zırhın ön katmanında bulunan alüminyumu göstermektedir. Diğer bölümler sırasıyla seramik ve alüminyum malzemeyi göstermektedir. Şeklin altında yer alan alt indislerden V1ç

alüminyum katmandan çıkan merminin hızını, $V_{1\phi}$ ise analitik metotlarla hesaplanmış olan seramik-alüminyum katmanın balistik limitini sembolize etmektedir.



Şekil 8-4 Numune 4'ün Şematik Gösterimi

Zırh paketinin ön katmanında bulunan alüminyum plakaya giren ve çıkan merminin hızı, zırh paketinin arka katmanında yer alan seramik-alüminyum katmanın hesaplanan balistik limit hızı Tablo 8-7'de yer almaktadır.

Tablo 8-7 Numune 4'ün Analitik Modellemesi

Metal Katman İçin Kullanılan Model	Merminin 1.Katmana Çarpma Hızı (m/s)	Merminin 1.Katmandan Çıkış Hızı $V_{1\phi}$ (m/s)	Metal Katman İçin Hesaplanan Balistik Limit	Seramik – Al. Katman İçin Kullanılan Model	Seramik – Al. Katmanın Balistik Limiti (m/s)
Borvik	700	674,93	185,67	Florence	644,57
Borvik	700	674,93	185,67	Değiştirilmiş Florence	618,59
Borvik	700	674,93	185,67	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Thompson	700	690,09	-	Florence	644,57
Thompson	700	690,09	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Thompson	700	690,09	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Wijk	700	665,15	-	Florence	644,57

Wijk	700	665,15	-	Değiştirilmiş Florence	618,59
Wijk	700	665,15	-	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Pol ve Lambert - Jones	700	635,11	133,41	Florence	644,57
Pol ve Lambert - Jones	700	635,11	133,41	Değiştirilmiş Florence	618,59
Pol ve Lambert - Jones	700	635,11	133,41	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	700	531,29	79,25	Florence	644,57
Woodward - Cimporeu ve Lambert - Jones	700	531,29	79,25	Değiştirilmiş Florence	618,59
Woodward – Cimporeu ve Lambert - Jones	700	531,29	79,25	Ben-Dor, Dubinsky - Elperin	635,85

9. DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışması kapsamında dört farklı numuneye toplamda sekiz atış gerçekleştirilmiş ve bu atışlar analitik olarak modellenerek zırh paketlerinin koruma seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler ve analitik modellemeler kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- Borvik modeli numune 1 ve 3 için deney sonuçlarına uyumlu analitik çözüm sunmuştur. Borvik modeli numune 1 ve 3 için kısmi penetrasyon olacağını ve merminin seramik-alüminyum katmanda durdurulacağını göstermiştir. Ancak numune 2 ve 4 için Borvik modeli tam penetrasyon öngörmüştür ve deney sonuçlarıyla çelişmiştir. Diğer yandan numune 2 ve 4 için hesaplanan sonuçlar %10 hata payı içerisinde deney sonuçlarıyla örtüşebilmektedir.
- Thompson modeli kullanılarak yapılan hesaplamalar ve deney sonuçları kıyaslandığında, Thompson modelinin yalnızca numune 3 için başarılı olduğu görülmektedir. Diğer numuneler için %10'luk hata payının da dışında kalan bu modelin, tez kapsamındaki zırh paketlerinin analitik olarak modellenmesinde uygun olmayacağı görülmüştür.
- Wijk modeli deneysel verilerle kıyaslandığında Borvik modeline benzer sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Wijk modeli numune 1 ve 3 için deney sonuçlarıyla uyumlu çözümler ortaya koyarken numune 2 ve numune 4 üzerine yapılacak atışların zırh paketini tamamen deleceğini hesaplamıştır. Wijk modelinin yaklaşık %10'luk hata payı içerisinde deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar vereceği görülmektedir.
- Pol - Lambert-Jones - Florence modeli tüm numuneler için deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Söz konusu model tüm numunelere yapılan atışlar için kısmi penetrasyon olacağını ortaya koymuştur ve deney sonuçları da bu durumu doğrulamıştır. Tez kapsamındaki zırh paketlerinin analitik modellenmesinde Pol - Lambert-Jones - Florence modelinin kullanılabileceği görülmektedir.
- Woodward – Cimporeu ve Lambert-Jones modelinin de Pol ve Lambert-Jones modeli gibi tüm numuneler için deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak bahse konu model kullanılarak hesaplanan çıkış hızı ile diğer modeller kullanılarak hesaplanan çıkış hızları arasında büyük bir fark olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum Woodward – Cimporeu modeli kullanılarak hesaplanan çıkış hızlarının güvenilirliğinin sorgulanmasına neden olmaktadır. Woodward – Cimporeu modelinin analitik çözümler için uygun olup olmadığı ile alakalı daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

10.SONUÇLAR

Tankların savaş sahnesine çıktığı günden itibaren zırhlı araçlar muharebe alanlarında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. İkinci Dünya Savaşında motorize birliklerin savaş alanında yarattığı yenilikle birlikte sadece tanklarda değil birliklerin intikali sırasında zırhlı personel taşıyıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Bu araçlar için en yaygın ve ihtimali yüksek tehdidin piyade tüfeğinin menzili içerisindeki atışlar olarak değerlendirilmekte ve bu nedenle zırhlı personel ya da silah taşıyıcı araçlarda en az Stanag 4569 seviye-2 zırh koruması sıklıkla kullanılmaktadır. Burada önemli olan husus hedeflenen koruma seviyesine ulaşacak en düşük alansal yoğunluğu elde etmektedir. Zira, araca zırh korumasının getireceği ilave ağırlık güç/ağırlık oranını düşürecek ya da daha güçlü bir güç paketi (motor+transmisyon) ihtiyacını ortaya koyacaktır. Aracın savaş sahnesinde beka özelliği artırılırken mobilitesi azaltılmamalıdır. Bu nedenle zırhlarda koruma seviyesi kadar önemli olan diğer bir husus da alansal yoğunluktur.

Tez çalışmasında alüminyum ve seramik malzemeler farklı sıralamalarda dizilerek seviye-2 atışlı testler gerçekleştirilmiştir. Testler neticesinde elde edilen veriler tez kapsamında hesaplanan analitik verilerle kıyaslanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir:

- Testler neticesinde dört farklı numune de Stanag-4569 seviye-2 atışları durdurmakta başarılı olmuştur.
- Yapılan atışların zırh paketleri üzerinde yarattığı etki incelendiğinde en başarılı zırh numune-3 olarak ortaya çıkmaktadır. Numune-3 üzerine yapılan atış neticesinde neredeyse hiçbir çökme meydana gelmemiştir. Diğer yandan numune-2 üzerine yapılan seviye-2 atışında da herhangi bir çökme gözlemlenmemiştir. Ancak alansal yoğunluk açısından numune-3 daha hafif olduğu için balistik açıdan en başarılı zırh numune-3 olarak gözükmektedir. Fiyat olarak numune-3'te kullanılan bor karbür (B_4C), alüminaya göre daha maliyetlidir. Ayrıca zırh tasarımında maliyet etkinlik de önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle aynı seviyede koruma sağlamak için daha ağır olmasına karşın maliyet etkin olacak şekilde numune-4 tercih edilebilecektir.
- Dört adet numune de yapılan seviye-2 atışlara karşı başarılı olmakla birlikte bazılarında çökme meydana gelmiştir. Numune 1 en çok çökme meydana gelen numune olmuştur.

Bu bağlamda mermiyi durdururken en çok zorlanan numunenin numune 1 olduğu söylenebilir. Numune 1'in dizilimi göz önüne alındığında ve diğer konfigürasyonlarla kıyaslandığında merminin seramik katmana ne kadar erken çarparsa penetrasyon etkisini o derecede kaybettiği gözlemlenmiştir. Zira merminin seramik katmana en geç çarptığı numune 1'dir ve en kötü performansı bu numune göstermiştir.

- Analitik modeller kıyaslandığında dört numune için de doğru sonuç veren iki model bulunmaktadır. Pol ve Woodward-Cimporeu modelleri tüm numuneler için hesaplanan balistik limit hıza uygun sonuçlar ortaya koymuşlardır. Ancak Woodward-Cimporeu modeli çoklu atışlarda diğer modellere göre oldukça düşük sonuç vermektedir. Diğer yandan Pol modelinde hesaplanan balistik limit ve Lambert-Jones modeli kullanılarak hesaplanan çıkış hızı diğer modellere göre en doğru sonucu veren analitik model olmuştur. Pol - Lambert-Jones - Florence modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile uyumludur.
- Analitik modellerin geliştirilmesi için malzeme karakterizasyonu yapılması gerekmektedir. Malzeme özellikleri üreticilerden alınan bilgiler ışığında kullanılmıştır. Ancak analitik modellerde hassas değerlere ihtiyaç bulunduğundan özellikle kullanım alanı oldukça geniş olan ve mekanik özellikleri açık kaynaklarda da bulunan alüminyumlar için malzeme karakterizasyonu yapılmadan analitik modellerde kullanılması belili bir hata oranını beraberinde getirmektedir. Alüminyumlar için mekanik özellikler belirli aralıklarda olduğunda ticari kullanım açısından uygun bulunmaktadır. Ancak balistik anlamda kullanılacak alüminyumların malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılan seramikler için de malzeme karakterizasyonu önemli bir parametredir.
- Analitik modellerin gerçeğe daha yakın sonuçlar verebilmesi için yapılabilecek değişikliklerden bir diğeri deneye dayalı parametrelerin daha hassas belirlenmesidir. Tez kapsamında belirlenen parametreler tüm numuneler için aynı değerde kullanılmıştır. Ancak sonuçlardan görüleceği üzere analitik modeller farklı dizilimler söz konusu olduğunda yanlış sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle aynı dizilimde fazla sayıda test yapılarak o dizilim için gerçeğe daha uygun sonuç verecek deneye dayalı katsayı belirlenmelidir. Bu işlem her numune için tekrarlandığı takdirde hata miktarının azalması beklenmektedir.
- Tez kapsamının dışında testi gerçekleştirilen seviye-3 atış zırha kısmen nüfuz etmiştir. Tungsten kaplamalı zırh delici merminin bir kısmı zırh içerisinde kalırken bir kısmı ise

son katman zırhı delmeyi başarmıştır. Seviye-2 tipi atışlarda çelik çekirdekli 7.62 mm x 39 API BZ (1.877 Joules) kullanılırken seviye-3'te tungsten kaplamalı zırh delici 7.62 mm x 54R B32 (3.647 Joule)s mermiler kullanılmaktadır. Tungsten malzeme çelikten daha sert olduğu için zırhı deforme etme kapasitesi daha yüksektir. Bu nedenle seviye-3 koruma sağlamak için zırh paketlerinde modifikasyonlar yapmak gerekmektedir.

- Çok sayıda test numunesi ile deneysel ve analitik çalışma yapılmamış olsa da seramik katmanlı bir zırhın başarılı olabilmesi için tehdit objenin erken fazda seramik ile karşılaştırılmasının balistik koruma ve perforasyonu önlemek açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.
- Analitik ve deneysel sonuçlar birlikte incelendiğinde tüm konfigürasyonlardaki zırh paketlerinin seviye-2 tipi atışlara karşı koruma sağladığı görülmektedir. Alansal yoğunluk dikkate alındığında bor karbürlü (B_4C) konfigürasyonun (numune-3) en başarılı, maliyet-etkinlik açısından ve alansal yoğunluk birlikte ele alındığında ise alüminalı (Al_2O_3) dördüncü konfigürasyonun (numune-4) daha başarılı olduğu ifade edilebilir. Yapılacak analitik çalışmalar ve malzeme karakterizasyonu ile seviye-3 tipi koruma sağlayacak dizilimlere ulaşılabileceği görülmektedir. Diğer yandan boşluklu zırh çalışmaları da yapılarak koruma seviyesinin arttırılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Osce, “Treaty On Conventional Armed Forces In Europe,” 10 Ocak 1989. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.osce.org/library/14087>. [Erişildi: 2 Mayıs 2019].
- [2] R. Coffey, Doctrinal Orphan or Active Partner A History of US Mechanized Infantry Doctrine, Fort Leavenworth: United States Army Command and General Staff College, 2018.
- [3] R. Zaera ve V. Sanches-Galves, “Modelling of Fracture Processes in the Ballistic Impact on Ceramic Armours,” *Journal de Physique IV Colloque*, pp. 667-674, 1997.
- [4] B. Bobiç ve Z. Odanoviç, “Ballistic Protection Efficiency of Composite Ceramics/Metal Armours.,” *Technical Review*, pp. 30-38, 2003.
- [5] L. Turhan, Ö. Eksik, E. Yalçın, A. Demirural ve T. Baykara, “Computational Simulations and Ballistic Verification Tests For 7.62mm AP and 12.7 mm AP Bullet,” *Structures Under Shock and Impact X*, pp. 379-388, 2008.
- [6] E. Özşahin ve S. Tolun, “Yüzey Kaplaması ve Destek Katman İlavesinin Alüminyum Levhalam Balistik Performansına Etkileri,” *Havacılık ve Uzay teknolojileri Dergisi*, pp. 41-50, 2010.
- [7] K. Dateraksa, K. Sujirrote, R. McCuiston ve D. Atong, “Ballistic Performance of Ceramic/S2 - Glass Composite Armor,” *Journal of Metals, Materials and Minerals*, pp. 33-39, 2012.
- [8] H. Mei, Y. Wang, X. Liu, D. Cao ve L. Liu, “Numerical Investigation on Anti-Penetration Behaviour of Ceramic/Metal Target Under Ballistic Impact,” *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 419-426, 2012.

- [9] N. Naik, S. Kumar, D. Ratnaveer, M. Joshi ve K. Akella, “An Energy-Based Model For Ballistic Impact Analysis of Ceramic - Composite Armors,” *International Journal of Damage Mechanics*, pp. 145-188, 2012.
- [10] N. Nayak, A. Banerjee ve P. Sivaraman, “Ballistic Impact Response of Ceramic - Faced Aramid Laminated Composites Against 7.62 mm Armour Piercing Projectiles,” *Defences Science Journal*, pp. 369-375, 2013.
- [11] A. Serjouei, R. Chi, I. Sridhar ve G. Tan, “An Empirical Model For The Ballistic Limit of Bi-Layer Ceramic/Metal Armour,” *Procedia Engineering*, pp. 14-18, 2014.
- [12] B. Plonka, K. Remsak, M. Rajda ve J. Wilczewski, “Light Metal Alloys in Multilayer Passive Armours For Military Vehicles,” *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*, p. 38, 2015.
- [13] J. Godzimirski, J. Janiszewski, M. Roskowicz ve Z. Surma, “Ballistic Resistance Tests of Multi-Layer Protective Panels,” *Maintenance and Reliability*, pp. 416-422, 2015.
- [14] N. Jongpaiboonjit, “Influence of Boundary Conditions on Ceramic/ Metal Plates Under Ballistic Loads,” *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, pp. 97-101, 2015.
- [15] E. Hedayati ve M. Vahedi, “Evaluating Impact Resistance of Aluminum 6061- T651 Plate Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method,” *Defence Science Journal*, pp. 251-259, 2018.
- [16] D. Carlucci ve S. Jacobson, *Ballistics; Theory and Design of Guns and Ammunition*, New York: Taylor & Francis Group, 2008.
- [17] E. Lowry, *Interior Ballistics*, New York: Doubleday & Company, 1968.

- [18] T. Hayes, Elements of Ordnance; A Text Book for Use of Cadets of the United States Military Academy, New York: John Wiley & Sons, 1938.
- [19] L. Robert, Modern Exterior Ballistics, Schiffer Publishind,Ltd., 2012.
- [20] H. Deniz, Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği., Gazi Üniversitesi., Ankara, Türkiye, 2009.
- [21] S. Deshmukh ve G. McKinley.ABD Patent: US20040173422A1, 2003.
- [22] N. Wagner ve E. Wetzel.ABD Patent: US20060234577A1, 2003.
- [23] “Liquid Defences,” Ağustos 2 2010. [Çevrimiçi]. Available: https://www.economist.com/technology-quarterly/2010/08/02/fluid-defences?story_id=16731563.
- [24] T. Deniz, Ballistic Penetration of Hardened Steel Plates, Makine Mühendisliği., ODTÜ., Ankara, Türkiye, 2010.
- [25] G. Moss, D. Leeming ve C. Farrar, Military Ballistics A Basic Manual, Brassey's Land Warfare, 1995.
- [26] P. Hazell, Ceramic Armour: Design And Defeat Mechanisms., Argos Press, 2006.
- [27] I.G. Crouch, The Science Of Armour Materials, İngiltere: Woodhead Publishing, 2017.
- [28] W. Gooch, “An Overview Of Ceramic Armor Applications,” *Ceramic Transections*, pp. 3-21, 2002.
- [29] C. Roberson, “Ceramic materials for Lightweight Armour Applications,” %1 içinde *In Proceedings Of The Combat Vehicle Survivability Symposium*, İngiltere, 2004.

- [30] C. Jones ve T. T. Peterson, *Israel's Clandestine Diplomacies*, New York: Oxford University Press, 2013.
- [31] “BAE's L-ROD Cage Armor,” 17 ağustos 2012. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.defenseindustrydaily.com/baes-lrod-cage-armor-03473>.
- [32] M.L.Bekci, Ramor 500 ve Ramor 550 Zırh Çeliklerinin Balistik Performanlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği., Karadeniz Teknik Üniversitesi., Trabzon, Türkiye, 2019.
- [33] G. O. Acar, II. Dünya Savaşı'nda Alman Tankları, Yüksek Lisans Tezi, Tarih Bölümü., Hacettepe Üniversitesi., Ankara, Türkiye, 2017.
- [34] G. Ben-Dor, A. Dubinsky ve T. Elperin, “Optimization Of two-Component Composite Armor Against Ballistic Impact,” *Composite Structures*, pp. 89-94, 2004.
- [35] M.Pol, A.Bidi, A.Hoseini ve G. Liaghat, “Analysis Of Normal Penetration Of Ogive-Nose Projectiles Into Thin Metallic Plates,” *World Academy Of Science, Engineering And Technology*, pp.235-238, 2009.
- [36] T. Borvik, M. Forrestal, O. Hopperstad, T. Warren ve M. Langseth , “Perforation of AA5083-H116 Aluminium Plates With Conical-Nose Steel Projectiles-Calculations,” *International Journal of Impact Engineering*, cilt 36, no. 3, pp. 426-437, 2009.
- [37] R. Woodward ve s. Cimpoeu, “A Study Of The Perforation Of Aluminium Laminate Targets,” *International Journal Of Impact Engineering*, pp. 117-131, 1998.
- [38] W. Thompson, “An Aproximate Theory Of Armour Penetration,” *International Journal Of Applied Physics*, pp. 80-82, 1995.

[39] G. Wijk, M. Hartmann ve A. Tyrberg, “A Model For Rigid Projectile Penetration And Perforation Of Hard Steel And Metallic Targets,” FOI Swedish Defence Research Agency, 2005.

[40] J. Lambert ve G. Jonas, “Towards Standardization Of In Terminal Ballistic Testing: Velocity Representation,” Ballistic Research Laboratory, İngiltere, 1976.



EKLER

EK 1: SEVİYE 2 ATIŞ RAPORU

TEST PARAMETRELERİ (Test Parameters)

1. GENEL BİLGİLER (General Information)	
Test Tipi : (Test Type)	SEVİYE TESTİ
Müşteri : (Customer)	BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Alt Sistem Üreticisi : Sub-system Manufacturer	BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Sipariş / Sözleşme : (PO/Contract)	
Test Spesifikasyonu : (Test Specification)	STANAG 4569 LEVEL-2

2. TEST NUMUNESİ (Test Sample)	3. ÇEVRE KOŞULLARI (Environmental Conditions)
Malzeme Tanımı : (Material)	Sıcaklık (°C) : (Temperature)
Toplam Numune : (Total Number of Sample)	Nem (%) : (Humidity)
Numune Kifle No : (Sample Number)	Basınç (mBar) : (Pressure)
Numune Boyutları (Sample Dimensions)	
Uzunluk (mm.) : (Length)	
Genişlik (mm.) : (Width)	
Kalınlık (mm.) : (Thickness)	

4. MERMİ ve NAMLU BİLGİLERİ (Ammunition and Barrel Information)	
Namlu Tipi : (Barrel Type)	28 inch Kriger Barrels [BT20500]
Mermi Tipi : (Ammunition Type)	7,62 mm AP BZ39
Barut : (Gun Powder)	MKE
Çekirdek Ağırlığı (grain) : (Core Weight)	120
Mermi Atış Açısı (derece) : (Obliquity)	0,0
Mermi Çapı (inç) : (Bullet Diameter)	0,300

5. TEST DÜZENİĞİ (Test Scheme)	
Namlu — 1. Hız Sensörü arası (m) : (Distance between Barrel — First Sensor)	
1. — 2. Hız Sensörleri arası (m) : Distance between First Sensor — Second Sensor	1
3. — 4. Hız Sensörleri arası (m) : Distance between Third Sensor — Fourth Sensor	1
Hız Perdeleri arası (m) : Distance between Velocity Screens	5,62
Hedef Ortalama mesafesi (m) : Distance from centre of velocity screens to target	4,94

Numune boyutları:
(Sample Dimensions)

0 x 0

Et Kalınlığı:
(Thickness)

0 mm

NAMLU
(Barrel)

0 m

1 m

4,62 m

4,94 m

HEDEF
(Target)

TEST SONUÇLARI (Test Results)

ATIŞ DEĞERLERİ (Shooting Data)

Atış No. (Shoot Number)	Barut Miktarı (gr.) (Gun Powder)	Sensör - 1 (Velocity Screen - 1)		Sensör - 2 (Velocity Screen - 2)		Ortalama Hız (m/s) (Average Velocity)	Sıcaklık (°C) (Temperature)	Basınç (mBar) (Pressure)	Nem (%) (Humidity)	Hız Kaybı (m/s) (Velocity Loss)	Yaw Açısı (Yaw Angle)	Çarpma Hızı (m/s) (Strike Velocity)	Sonuç - PP (Delmedi) - CP (Deldi) (Result)
		Zaman (µs) (Time)	Hız (m/s) (Velocity)	Zaman (µs) (Time)	Hız (m/s) (Velocity)								
DNM	2,40	1355	738	1369	730	734	23,4	906,1	45,1	7		728	DNM
DNM	2,35	1476	678	1490	671	674	23,4	906,1	45,3	6		669	DNM
DNM	2,38	1398	715	1411	709	712	23,4	906,0	45,1	6		706	DNM
1. NUMUNE													
1	2,37	1446	692	1458	686	689	23,3	906,1	45,0	5	0,5	684	PP
2	2,38	1405	712	1417	706	709	23,3	906,1	45,3	5	0,5	703	PP
2. NUMUNE													
1	2,38	1441	694	1455	687	691	23,3	906,1	45,3	6	0,5	685	PP
3. NUMUNE													
1	2,39	1490	671	1506	664	668	23,2	906,2	45,4	6	0,5	661	PP
2	2,41	1361	735	1374	728	731	23,2	906,1	45,1	6	0,5	725	PP
4. NUMUNE													
1	2,39	1402	713	1414	707	710	23,2	906,2	45,5	5	0,5	705	PP
2	2,39	1456	687	1471	680	683	23,2	906,2	45,0	6	0,5	677	PP

Balistik Sonuçlar (Ballistic Results)

AÇIKLAMALAR (Remarks)

V (50) BL(P) (Ballistik limit) (m/s) :
[V (50) BL(P) (Ballistic limit)]En yüksek delmeyen hız (m/s) :
[Highest Partial Penetration Velocity]Sonuç aralığı (m/s) :
[Velocity Spread]En düşük delen hız (m/s) :
[Lowest Complete Penetration Velocity]İstenen V50 Balistik Limit (m/s) :
[Minimum Required V50 Ballistic Limit]

695±20

NOT: Test sonuçları yukarıda adı ve kayıt numarası yazan numuneye aittir.

Note: The test results belong to the sample whose name and registration number is written above.

EK 2: SEVİYE 3 ATIŞ RAPORU

TEST PARAMETRELERİ (Test Parameters)

1. GENEL BİLGİLER (General Information)	
Test Tipi : (Test Type)	SEVİYE TESTİ
Müşteri : (Customer)	BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Alt Sistem Üreticisi : Sub-system Manufacturer	BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
Sipariş / Sözleşme : (PO/Contract)	
Test Spesifikasyonu : (Test Specification)	STANAG 4569 LEVEL-3

2. TEST NUMUNESİ (Test Sample)	3. ÇEVRE KOŞULLARI (Environmental Conditions)
Malzeme Tanımı : (Material)	Sıcaklık (°C) : (Temperature)
Toplam Numune : (Total Number of Sample)	Nem (%) : (Humidity)
Numune Kafiye No : (Sample Number)	Basınç (mBar) : (Pressure)
Numune Boyutları (Sample Dimensions)	
Uzunluk (mm.) : (Length)	
Genişlik (mm.) : (Width)	
Kalınlık (mm.) : (Thickness)	

4. MERMİ ve NAMLU BİLGİLERİ (Ammunition and Barrel Information)	
Namlu Tipi : (Barrel Type)	Prototipa [SN 6958] 650cm
Mermi Tipi : (Ammunition Type)	7,62 mm AP WC (TUNGSTEN)
Barut : (Gun Powder)	MKE
Çekirdek Ağırlığı (grain) : (Core Weight)	131
Mermi Atış Açısı (derece) : (Obliquity)	0,0
Mermi Çapı (inç) : (Bullet Diameter)	0,300

5. TEST DÜZENİ (Test Scheme)	
Namlu — 1. Hız Sensörü arası (m) : (Distance between Barrel — First Sensor)	
1. — 2. Hız Sensörleri arası (m) : Distance between First Sensor — Second Sensor	1
3. — 4. Hız Sensörleri arası (m) : Distance between Third Sensor — Fourth Sensor	1
Hız Perdeleri arası (m) : Distance between Velocity Screens	5,62
Hedef Ortalama mesafesi (m) : Distance from centre of velocity screens to target	4,94

Numune boyutları :
(Sample Dimensions)

0 x 0

Et Kalınlığı :
(Thickness)

0 mm

NAMLU
(Barrel)

0 m

1 m

4,62 m

1 m

4,94 m

HEDEF
(Target)

TEST SONUÇLARI (Test Results)

ATIŞ DEĞERLERİ (Shooting Data)													
Atış No. (Shoot Number)	Barut Miktarı (gr.) (Gun Powder)	Sensör - 1 (Velocity Screen - 1)		Sensör - 2 (Velocity Screen - 2)		Ortalama Hız (m/s) (Average Velocity)	Sıcaklık (°C) (Temperature)	Basınç (mBar) (Pressure)	Nem (%) (Humidity)	Hız Kaybı (m/s) (Velocity Loss)	Yaw Açısı (Yaw Angle)	Çarpma Hızı (m/s) (Strike Velocity)	Sonuç - PP (Delmedi) - CP (Reldi) (Result)
		Zaman (µs) (Time)	Hız (m/s) (Velocity)	Zaman (µs) (Time)	Hız (m/s) (Velocity)								
DNM	3,00	1052	951	1056	947	949	23,3	906,2	45,7	3		946	DNM
2. NUMUNE													
1	3,00	1044	958	1048	954	956	23,2	906,2	45,0	3	0,5	953	CP

Balistik Sonuçlar (Ballistic Results)	AÇIKLAMALAR (Remarks)
V (50) BL(P) (Balistik limit) (m/s) : [V (50) BL(P) (Ballistic limit)]	
En yüksek delmeyen hız (m/s) : [Highest Partial Penetration Velocity]	
Sonuç aralığı (m/s) : [Velocity Spread]	
En düşük delen hız (m/s) : [Lowest Complete Penetration Velocity]	
İstenen V50 Balistik Limit (m/s) : [Minimum Required V50 Ballistic Limit]	
	930±20

NOT: Test sonuçları yukarıda adı ve kayıt numarası yazan numuneye aittir.
Note: The test results belong to the sample whose name and registration number is written above.