

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

**ADD-ON PERFORE ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL BALİSTİK
PERFORMANS ANALİZLERİ**

HAZIRLAYAN

MEHMET TARKU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2023

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

**ADD-ON PERFORE ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL BALİSTİK
PERFORMANS ANALİZLERİ**

HAZIRLAYAN

MEHMET TARKU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. FARUK ELALDI

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans çerçevesinde Mehmet TARKU tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: ... / ... /

Tez Adı: Add-on perfore zırh plakaların deneysel balistik performans analizleri.

Tez Jüri Üyeleri (Unvan, Adı – Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Faruk ELALDI

.....

Prof. Dr. Adem ACIR

.....

Dr. Öğr. Üyesi Cenk BALÇIK

.....

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... /

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mehmet TARKU

Öğrencinin Numarası: 21920014

Anabilim Dalı: Savunma Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Programı: Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı

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

Tez Başlığı: ADD-ON PERFORE ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL BALİSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ

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

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

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

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı

Prof. Dr. Faruk ELALDI

TEŞEKKÜR

Çalışmamın planlanma, yürütme ve sonlandırılmasına kadar tüm aşamalarında bilimsel katkılarıyla ve sonsuz anlayışı ve sabrıyla bana destek olan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Faruk ELALDI'ya,

Malzeme tedarikinde ve balistik test çalışmalarında yardımcı olan Osman SELÇUK ve Ata TEOMAN'a,

Hayatımın her döneminde, her koşulda yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen anneme ve babama ...

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Mehmet TARKU

ADD-ON PERFORE ZIRH PLAKALARIN DENEYSEL BALİSTİK PERFORMANS ANALİZLERİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

2023

Farklı mekanik özelliklere sahip yenilikçi hafif ve çok fonksiyonlu malzemelerin kullanımı, zırhlı aracın hareket kabiliyeti ve performansını tehlikeye atmadan istenen balistik korumayı sağlamak için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Zırhlı bir savaş aracının gövdesine (alüminyum veya zırh çeliği) veya kulesine monte edilen ek plakalardan oluşan ek zırh, son zamanlarda önemli bir zırh adayı olarak kabul edilmektedir. Bu tür bir zırh, farklı teknolojiler ve malzemeler kullanılarak uygulanabilir ve son kullanıcılara balistik tehditlere karşı en yüksek koruma seviyesini sağlamayı amaçlar.

Bu çalışma, farklı perfore zırh plakaları arasındaki mesafe, delik çapları, delikler arasındaki mesafe, zırh plakalarının kalınlığı ve sertliğinin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. MIL-DTL-46100 ve MIL-DTL-32332-CL2'ye göre üretilen yüksek sertlikte zırh çeliğinden yapılmış perfore plakalar, Stanag 4569 standartta dikkate alınarak ve 12.7 x 99 AP zırh delici mermilere (seviye 3+) karşı balistik performansları test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, plakalar arasındaki mesafenin artırılması delinme olasılığını azaltırken, delik çapı ve delikler arasındaki mesafe plakanın delinme ve enerji emme kapasitesi üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Perfore plakalardaki büyük delik çapları onları daha hafif yapar ama delinmeye karşı daha az dirençli hale getirirken, daha küçük delik çapları balistik performansı artırır ancak toplam ağırlığı da artırır. Küçük veya büyük deliklere sahip olsalar da perfore zırh plakaları, mermiyi asimetrik kuvvetler aracılığıyla delmekten kaçınarak, mermi yörüngesinden sapmasına, mermi kırılmasına ve mermi burun erozyonuna neden olur. Daha kalın ve yüksek sertlikteki zırh plakaları, ağırlık maliyeti karşılığında delinmeye karşı çok daha iyi balistik direnç gösterir.

Anahtar Kelimeler: Perfore zırh, Balistik performans, Balistik koruma seviyesi, Stanag 4569

ABSTRACT

Mehmet TARKU

EXPERIMENTAL BALLISTIC PERFORMANCE ANALYSIS OF ADD-ON PERFORATED ARMOR PLATES.

Baskent University Institute of Science and Technology

Department of Defense Systems and Technologies

2023

The use of innovative lightweight and multifunctional materials with different mechanical properties to provide the desired ballistic protection without compromising the armored vehicle's mobility and performance has become an important need. Add-on armor, which is composed of additional plates mounted on the body (aluminum or armor steel) or turret of an armored combat vehicle, is considered an important armor candidate recently. This type of armor can be applied using various technologies and materials to provide end-users with the highest level of protection against ballistic threats.

This study aims to investigate the effect of the distance between two different perforated armor plates, hole diameters, spacing between holes and thickness and hardness of the materials of the perforated armor plates.

Perforated plates made of high-hardness armor steel and manufactured according to MIL-DTL-46100 and MIL-DTL- 32332-CL2, were selected according to Stanag 4569 standards and tested for their ballistic performance against 12.7 x 99 AP armor-piercing ammunition (level 3+). According to the test results, it was found that increasing the distance between plates would reduce the probability of penetration, while the hole diameter and spacing between holes have a serious impact on the penetration and energy absorption capacity of the plate. Large hole diameters in perforated plates make them lighter but less resistant to penetration, while smaller hole diameters increase ballistic performance but also increase the total weight. No matter having small or larger holes, perforated armor plates defeat the penetration by means of asymmetric forces causing the projectile to deviate from incident trajectory, projectile fracture, and projectile nose erosion. Thicker and high hardness armor plates show much better ballistic resistance against penetration on the expense of weight.

Keywords: Perforated armor plate, Ballistic performance, Ballistic Protection level, Stanag 4569

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. AMAÇ	3
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
4. MALZEME VE YÖNTEMLER	13
4.1 Balistik Malzeme Tarihi.....	14
4.2 Hasar Oluşum Mekanizması.....	15
4.3 Gerilme Yayılımı.....	15
4.4 Penetrasyon Mekanizması	17
4.5 Plaka Perforasyonu.....	20
4.6 Bertaraf Etme Mekanizmaları.....	21
5. KÜTLE VERİMLİLİĞİ	22
6. UZAKDURMA MESAFESİ (STAND-OFF DISTANCE)	23
7. ZIRH ÇELİKLERİ	24
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
8.1 Balistik Testler	30
8.2 Kullanılan Penetratör	30
8.3 Test Numuneleri ve Konfigürasyonlar	34
8.3.1. Birinci konfigürasyon.....	35

8.3.2.	İkinci konfigürasyon	36
8.4.2.	Üçüncü konfigürasyon	37
8.4.3.	Dördüncü konfigürasyon	38
8.4	Elde Edilen Veriler ve Değerlendirme	39
8.4.1.	Birinci konfigürasyon.....	39
8.4.2.	İkinci konfigürasyon	42
8.4.3.	Üçüncü konfigürasyon	44
8.4.4.	Dördüncü konfigürasyon	46
9.	SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR.....		50
EKLER		
EK-1: 12.7 X 99 AP MÜHİMMATLARI		

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı zırh kalınlık, alansal yoğunluk, kütle verimliliği ile tanımlayıcı konfigürasyonları	6
Tablo 4.1. Perforasyon sırasında mermi ve hedefte meydana gelen fiziksel olaylar	19
Tablo 5.1. Zırh yapımında kullanılan başlıca malzeme özellikleri	23
Tablo 7.1. Armox grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler	25
Tablo 7.2. Armox grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon	26
Tablo 7.3. Armox grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler	26
Tablo 7.4. Mars grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler	27
Tablo 7.5. Mars grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon	28
Tablo 7.6. Mars grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler	28
Tablo 7.7. Secure Grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler	29
Tablo 7.8. Secure grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon.....	29
Tablo 8.1. Nato Stanag 4569 seviyelere göre kinetik enerji tehditleri	32
Tablo 8.2. 12.7 mm x 99mm Fişek [M2 AP] mühimmatının özellikleri.....	34
Tablo 8.3. Balistik test konfigürasyonu.....	34
Tablo 8.4. Elde edilen veriler	39

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kara araçlarına yönelik zırh konfigürasyonu temsili olarak gösterimi	1
Şekil 1.2. Aplike zırh sisteminin araç üzerindeki görünümü	2
Şekil 1.3. Tek başına zırh araç üzerindeki görünümü	3
Şekil 2.1. Pasif zırh malzemeleri ve tipleri.....	5
Şekil 3.1. Perfore zırh plakalarının endüstriyel uygulamaları	7
Şekil 3.2. 12,7 mm ve 14,5 mm API B32 mermilerle perfore zırh plakaların eğik durumdaki perforasyonunun X-ışını görüntüleri.....	11
Şekil 3.3. Perfore plakadaki mühimmat darbeleri:(a) delik merkezine; (b) delik köşesine; (c) iki delik arası; (d) üç delik arasına	13
Şekil 4.1. Zırh sistemi performanslarının zamana göre gelişimi	14
Şekil 4.2. Hızdan bağımsız teoremin elastik-plastik dalgası için gerinim profili	16
Şekil 4.3. Merminin bir hedef üzerindeki balistik etkisinin şematik diyagramı	18
Şekil 4.4. Perfore plakalarda oluşan kırılma tipleri	20
Şekil 4.5. Sertlik değerine göre çeliğin balistik performansı	22
Şekil 7.1. Armox advance zırhının, platformdan belirli bir mesafede tasarlanmasının şematik halinin gösterimi	25
Şekil 7.2. Balistik numune tasarım kriterleri	29
Şekil 8.1. FNSS balistik test laboratuvarı krokisi.....	30
Şekil 8.2. Ön planda, 14.5 mm Şer Portatif; Arka planda 12.7 mm Zagros silahları.....	33
Şekil 8.3. 12.7 x 99 mm AP mühimmatı	33
Şekil 8.4. Birinci zırh konfigürasyonu şematik görünümü.....	35
Şekil 8.5. İkinci zırh konfigürasyonu şematik görünümü	36
Şekil 8.6. Üçüncü zırh konfigürasyonu şematik görünümü	37
Şekil 8.7. Dördüncü zırh konfigürasyonu şematik görünümü.....	38
Şekil 8.8. Gövde zırhını delen mühimmatın sapma açısı-atış hızı.	39
Şekil 8.9. Birinci zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü	40
Şekil 8.10. Birinci zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü.....	41
Şekil 8.11. İkinci zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü	42
Şekil 8.12. İkinci zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü	43
Şekil 8.13.Üçüncü zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü	44
Şekil 8.14. Üçüncü zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü	45

Şekil 8.15. Dördüncü zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü.....	46
Şekil 8.16. Dördüncü zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü.....	47



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

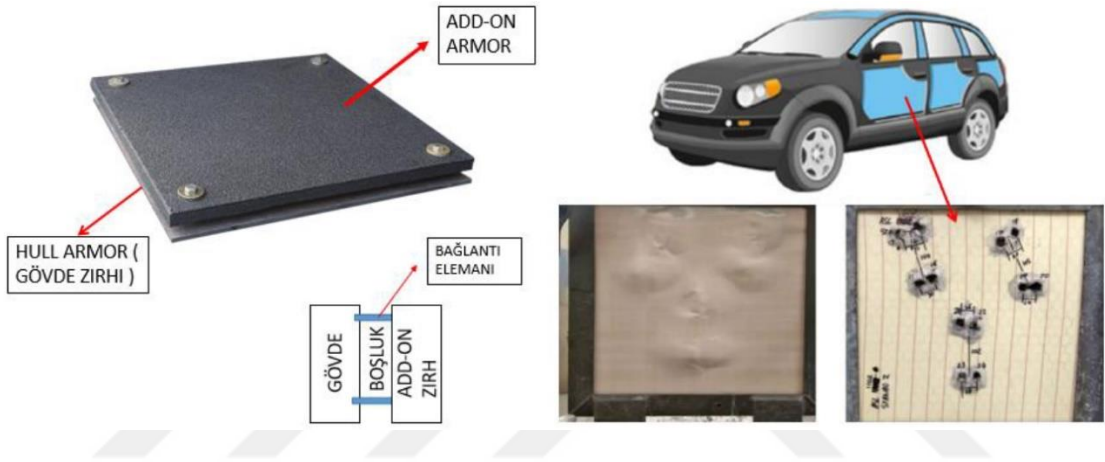
>	Büyüktür
BHN	Brinell hardness number
R	Çap
°	Derece
λ	Dalga boyu
dk	Dakika
E	Elastisite modülü
σ	Gerilim
g	Gram
Γ	Gruneisen parametresi
V	Hacim
HEL	Huginot elastik limit
RHA	Haddelenmiş homojen zırh
W	İş
T	İki delik merkezi arasındaki mesafe
J	Joule
<	Küçüktür
k	Kilo
kg	Kilogram
t	Kalınlık
mm	Milimetre
m	Metre
μ	Mikro
N	Newton
OP	Open area
GAP	Plakalar arası mesafe
ref	Referans
°C	Santigrat derece
cm	Santimetre

s	Saniye
r	Yarıçap
~	Yaklaşık
ρ	Yoğunluk
F	Yük
%	Yüzde
AP	Zırh delici



1. GİRİŞ

Taktik maksatlı kullanılacak askeri araçların yüksek mobilite gereksinimleri nedeniyle, balistik koruma performansını iyileştirmek için zırhın ağırlığındaki artış kabul edilemez olmakla birlikte, operasyonlardan kaynaklanan balistik koruma gereksinimleri tasarım hedeflerini daha yüksek koruma seviyeleri için önemli ölçüde zorlamaktadır. Askeri araçların, taktiksel gereksinimlere göre optimize edilmiş balistik koruma, silahlanma ve mobilite sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kara araçlarına yönelik add-on zırh konfigürasyonu temsili olarak Şekil 1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Kara araçlarına yönelik zırh konfigürasyonu temsili olarak gösterimi

Ayrıca, koruma seviyesi artırılırken mobiliteden de ödün verilmemelidir. Zırhlı araçların ağırlıklarını azaltma ve araç korumasının verimliliğini artırma arayışı, yüksek sertlikteki çelikler, seramikler ve çeşitli fiber kompozitler gibi gelişmiş malzemelerin kombinasyonu kullanılarak çok katmanlı yapılar oluşturularak araç yapılarının tasarımı için yeni konseptlerin geliştirilmesine yol açmıştır.

Bu tez kapsamında geliştirilen zırh çözümleri sadece askeri zırhlı araçlarda değil aynı zamanda zırhlı iş makineleri, kara araçları platformlarında (TTZA, ZPT vs.) ve envanterdeki diğer araçların modernizasyon işlemlerinde kullanım potansiyeli taşımaktadır. Modern zırhlı araçlarda güç/ağırlık oranı 25 ve üstü olması muhabere sahasındaki hız ve manevra kabiliyetini ve bekasını etkileyen önemli bir unsurdur. Muharebe aracında istenen balistik koruma seviyesini sağlamak için aracın ana yapısında kullanılan zırh çelikleri veya üzerine eklenecek olan zırh modüllerinin tasarımında zırh sisteminin araç üzerine getirdiği ilave yükün kısıtlanması arzu edilen güç/ağırlık kriteri sebebiyle önemli bir zorunluluk olmaktadır. Bu maksatla zırhlı aracın hareket kabiliyetinden ve performansından taviz

vermeden arzu edilen balistik koruma için farklı mekanik özellikteki yenilikçi hafif ve çok fonksiyonlu malzemelerin kullanımı ile yeni zırh çözümleri ortaya çıkarmak ciddi bir önem kazanmıştır.

Aplike zırh veya add on zırh, bir zırhlı muharebe aracı gövdesine (alüminyum veya zırh çeliği) veya taretine monte edilmiş ekstra plakalardan oluşur. Son kullanıcılara balistik tehditlere karşı en üst düzeyde koruma sağlamak için çok çeşitli teknolojiler ve malzemeler uygulanabilir. Aplike zırh plakaları aracın gövde çeliği ile tek başına sağladığı balistik dayanımından ödün vermeden aracın gövde malzemesinin dayandığı balistik tehditte dirençli seramik, çelik veya hibrit malzeme grubu ile oluşturulabilir. Aplike/eklenti/aplike zırh sistemleri, zırh çözümüne farklı malzeme türlerini dâhil ederek ve çelik veya alüminyum araç gövdesi gibi mevcut herhangi bir temel zırhı dikkate alarak belirli bir tehdit gereksinimini karşılayacak şekilde özelleştirilir.

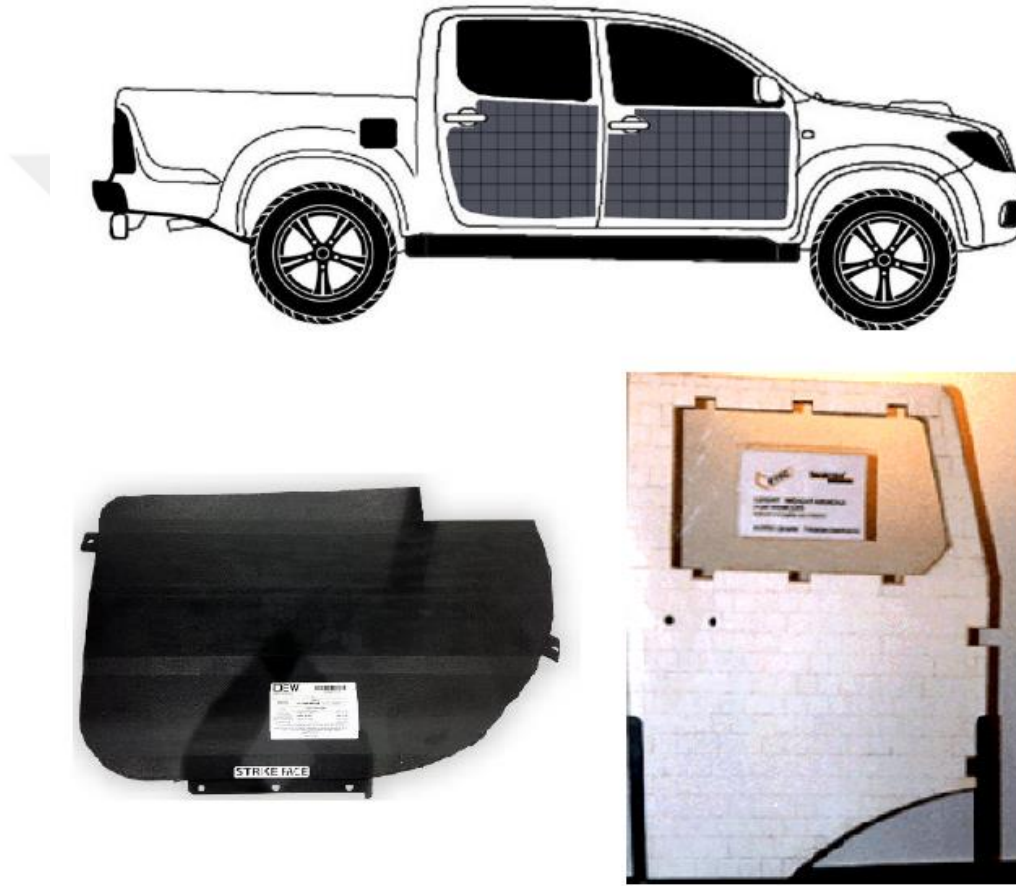
Bu konfigürasyonlarda aplike zırh plakaları ile aracın gövde çeliği arasında koruma seviyesine olumlu yönde etki eden hava boşluğu bulunmaktadır. Aplike zırh, (add-on armor) maksimum koruma sağlarken aynı zamanda araca mümkün olan en az ağırlığı yükleyen hafif bir koruma sistemidir. Aplike zırh, mevcut ve yeni araçların koruma düzeyini etkili bir şekilde artırmak için kullanılabilir. Aplike zırh ile araç üzerindeki ağırlık yükü azaltılabilir, bu da hareket kabiliyetini kaybetmeden üst düzey koruma çözümlerinin uygulanmasını mümkün kılar. Şekil 1.2.'de aplike zırh sisteminin araç üzerindeki görünümü verilmiştir.



Şekil 1.2. Aplike zırh sisteminin araç üzerindeki görünümü

Aplike zırh belirli silah türlerinden ateşlenen mermilere karşı koruma yeteneğine ek olarak, titreşim ve şok da dâhil olmak üzere birçok darbeye dayanabilir. Bu koruyucu zırh UV ışığına (UV light), sıradan kimyasallara (ordinary chemicals) ve kirletici maddelere (decontaminating agents) karşı dayanıklıdır. Ek olarak, araç birden fazla mermi veya parçacık tesirine maruz kaldığında mürettebata olağanüstü derecede koruma sağlayan çoklu vuruş direnç kabiliyetine sahiptir.

Tek başına zırh olan (Stand Alone) patlama esnasında oluşan basıncı ve parçacıkları gövde zırhına zarar gelmeden durdurabilmektedir. (Şekil 1.3.).



Şekil 1.3. Tek başına zırh araç üzerindeki görünümü

2. AMAÇ

Zırh tasarımının temel amacı, en hafif ve en basit yapı ile belirli bir tehdidin korunan nesneye nüfuz etmesini önlemektir. Bu nedenle, bu amaca malzeme özelliklerini optimize ederek veya nesnenin önüne ek zırh (add-on armor) adı verilen başka bir yapı eklenerek ulaşılabilir. Çok katmanlı zırh panellerini tasarlamak için öncelikle yüksek hızlı mühimmatın her katman için nüfuz etme mekanizmasını anlamak gerekmektedir.

Literatürde belirtildiği üzere zırh koruma seviyesinin artırılmasının iki şekilde olabileceği bilinmektedir. Bunlar;

- ✓ Penetrasyonun direncini artırmak için yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılmasıdır.
- ✓ Tehdit ve zırh arasındaki etkileşimde asimetri kullanılmasıdır.

Bu ikinci yöntemde örnek olarak, mermi bir süreksizliğe temas ettiğinde çekirdekte eğilme gerilimi meydana gelir veya en azından mermi ilk yörüngesinden saptırılır. Böylece penetrasyon kapasitesi azalır. Parçalanmış veya sapmış bir mermiyi durdurmak çok daha kolaydır.

Bu tezde temel olarak merminin perfore bir plakaya çarptığı zaman parçalanma ve kararsızlaştırma davranışı incelenmiştir. Perfore plakalarda mermi davranışının simülasyonu çok karmaşık olduğundan, model parametreleri ilk önce monolitik plakalar üzerinde yapılan balistik testler ile doğrulanmıştır. Delik çapı, kalınlık, plakalar arasındaki mesafe gibi çeşitli tasarım parametrelerine sahip çok katmanlı perfore plakaların darbeye karşı davranışı en iyi balistik test yapıları ile anlaşılabileceğinden bu çalışmada deneysel yöntem tercih edilmiştir. Bu nedenle, bu tasarım parametrelerini hafif bir zırh çözümüne sahip olacak şekilde optimize etmek için deneysel bir çalışma hedeflenmiştir.

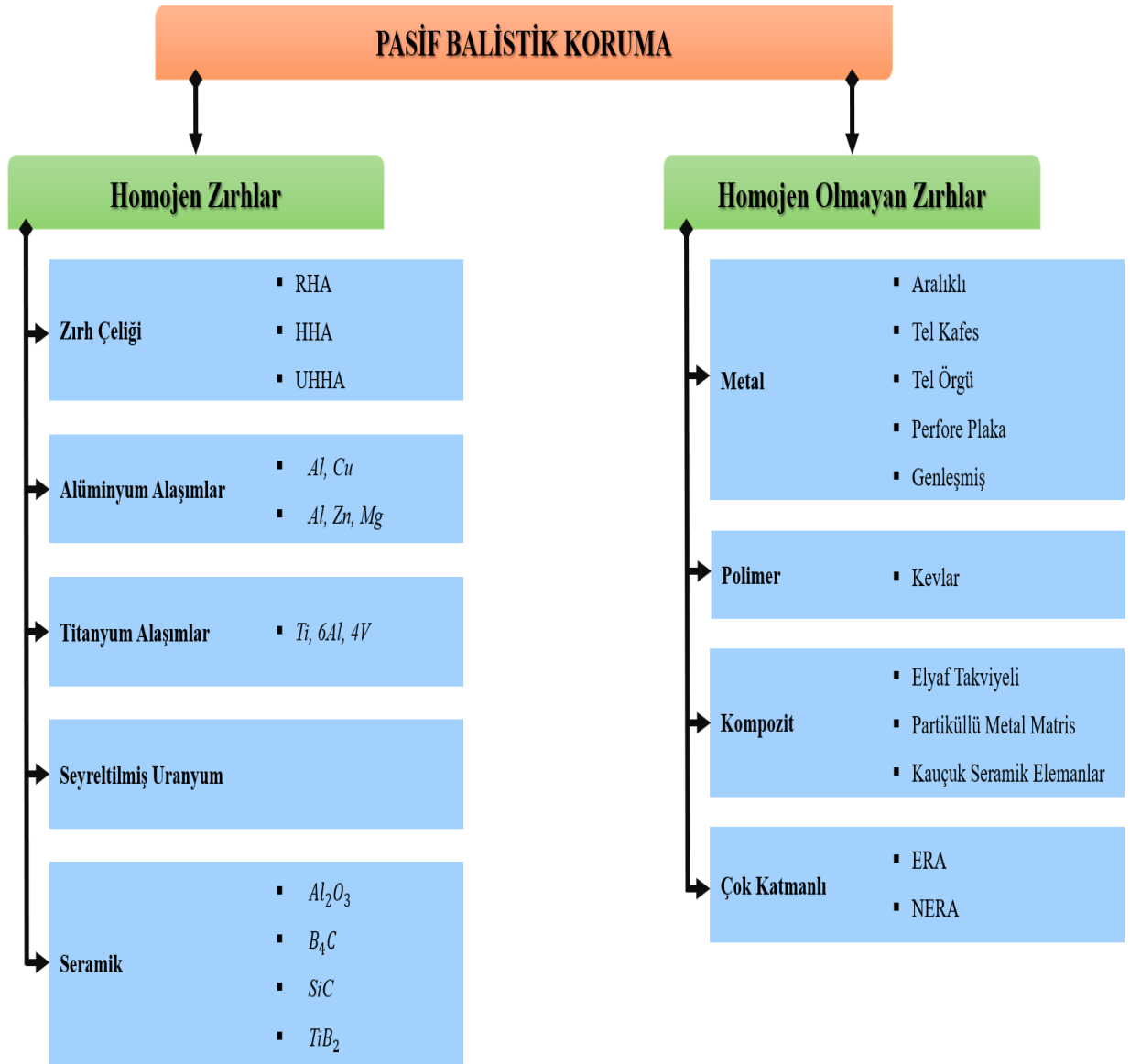
Plakalar arasındaki mesafenin artırılmasının, mühimmat çekirdeğinin perfore zırh plakalarından geçerken parçalanarak daha geniş alana yayılma etkisini ve böylece penetrasyon enerjisinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

Plakaların sertlik derecesi ve kalınlık durumuna göre farklı konfigürasyonlarda test edilmesi, balistik performansı etkileyen faktörleri daha ayrıntılı bir şekilde anlamak ve daha etkili balistik koruma sistemleri geliştirmek amacıyla yapılmaktadır. Çalışmamda, plakaların farklı sertlik ve kalınlık kombinasyonlarının balistik performansına olan etkisini belirlemeyi ve optimize edilmiş konfigürasyonlar oluşturmayı hedeflemektedir. Bu sayede, daha etkili ve verimli balistik koruma sistemleri geliştirilebilir ve kullanıcılar için daha güvenli bir ortam sağlanabilir.

Çalışmamda, perfore plakaların kalınlığının balistik performansına olan etkisini deneysel olarak inceleyerek, daha iyi bir anlayış sağlamak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı kalınlıklardaki perfore plakaların balistik testleri yapılarak ve balistik performansları değerlendirilecektir. Elde edilecek sonuçlar, plaka kalınlığı ve balistik performansı arasındaki ilişkiyi belirleyerek, optimum koruma sağlamak için en uygun kalınlığın tespit edilmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, perfore plakaların balistik performansını etkileyen

diğer faktörler de göz önünde bulundurularak, balistik performansı arttırmak için geliştirilebilecek olası çözümler de incelenecektir.

Personel ve araç alt sistemlerini düşman ateşinden korumanın en önemli yolu araç gövdesini penetrasyon direnci yüksek malzemeler ile kaplamaktır. Pasif zırh olarak etkin bir şekilde kullanılabilecek çok çeşitli malzeme ve konfigürasyonlar vardır. Bunlar Şekil 2.1.'de görülmektedir. Zırh çeliği ve alüminyum alaşımları yapısal malzemelerdir, nispeten yüksek kütle verimliliğini iyileştirmek için genellikle diğer zırh türleri ile desteklenir. Kütle etkinliği, bir referans zırhın (RHA) alansal yoğunluğunun deneysel zırhın alansal yoğunluğuna oranıdır. Tablo 2.1.'de zırh malzemelerinin örnekleri, kalınlıkları, alan yoğunlukları ve kütle etkinlikleri ile tanımlayıcı konfigürasyonlar yer almaktadır.



Şekil 2.1. Pasif zırh malzemeleri ve tipleri

Tablo 2.1. Bazı zırh kalınlık, alansal yoğunluk, kütle verimliliği ile tanımlayıcı konfigürasyonları

MALZEME	Alansal Yoğunluk (kg/m^2)	Kütle Verimliliği
380 BHN* (RHA)	322	1.00
500 BHN* (HHA)	283	1.14
Alüminyum Alaşımı 5083	356	0.90
Alüminyum Alaşımı 7019	270	1.19
Alüminyum Alaşımı 7039	253	1.27
Titanyum Alaşımı Ti-6Al-4V	199	1.62
500 BHN* HHA ve Alüminyum Alaşımı 5083	192	1.68
500 BHN* HHA ve Titanyum Alaşımı Ti-6Al-4V	167	1.93
Yüksek Sertlikte Perfore Plaka ve Alüminyum Alaşımı 5083	168	1.92
Al_2O_3 Seramik ve 500 BHN* HHA	152	2.12
Al_2O_3 Seramik ve Alüminyum Alaşımı 5083	146	2.19
Cam Elyafarla güçlendirilmiş Al_2O_3 Seramik Kompozit	141	2.28

*BHN: Brinell Sertlik Numarası

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Perfore zırh plakaları, askeri araçlara aplike zırh olarak yerleştirilerek uzun yıllardır kullanılmaktadır. Böyle bir zırh sisteminin toplam ağırlığı, aynı balistik koruma kapasitesine sahip temel zırhın ağırlığından önemli ölçüde daha azdır. Genellikle delikler mühimmatın çapıyla etkileşime girecek şekilde tasarlanır ve bu tür zırh çözümünün darbe altındaki performansı plakanın malzemesi, deliklerin çapı ve yönü ile belirlenir. Araçların balistik korumasını iyileştirmek için sökülebilir zırh olarak perfore plaka kullanımı savunma sanayinde yaygın bir uygulamadır [1]. Birçok çözüm ticari olarak mevcuttur ve sökülebilir zırh olarak bir uygulama seçimi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Bu zırhlar üretilirken istenilen tasarım amacı, mermi çapından daha küçük deliklere veya obluklara sahip olmasıdır. Her bir deliğin şekli aynı veya farklı olabilir.



Şekil 3.1. Perfore zırh plakalarının endüstriyel uygulamaları

Balistik korumayı artırmak için geometrik perforasyon kullanma fikri birçok kişi tarafından araştırılmış olsa da açık literatürde deneysel veya sayısal simülasyon tabanlı çalışmalar nadirdir. Balos ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [2], balistik uygulama için çeşitli sertlikte perfore çelik plakaların geometrisine ve mekanik özelliklerine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada 50CrV4 ve Hardox 450 çelikleri çeşitli delik çaplarına, plaka kalınlıklarına, perfore ile temel plaka arasındaki mesafeye ve montaj eğimine sahip 12,7 mm M8 AP mühimmatına karşı test edilmiştir ve yapılan bu çalışma sonucunda perfore plaka ile gövde zırhının arasındaki mesafe arttıkça mermi perfore plakaya temas ettikten sonra yönünün değiştiği gözlemlenmiştir. Mishra ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [3,4], bir zırh plakasının performansının, deliklerin bir düzen içerisinde delinerek önemli ölçüde artırılabilirliğini gözlemlenmiştir. Başka bir deneysel çalışmada Radisavljevic ve arkadaşları [5] delik boyutunu ve delikler arasındaki mesafeyi araştırarak etkili bir perfore zırh plakası çözümü tasarlamışlardır. Perfore plakalar üzerinde yapılan bu tür balistik testler yeni bir konu değildir ve birçok araştırmacının son yıllarda yayınlanmış değerli çalışmaları vardır. Penetrasyon esnasında yüksek deformasyon,

erozyon, yüksek gerinim hızına bağlı doğrusal olmayan malzeme davranışı ve parçalanmalar oluşur. Bu sebeple, yukarıdaki olaylar hesaba katıldığı durumlarda penetrasyonun mekanik davranışını modellemek önemlidir. Borvik tarafından yapılan çalışmada [6], 300 m/s'ye kadar küt burunlu silindirik mermilerden etkilenen Weldox 460 E çelik plakalarının davranışı incelenmiştir ve çalışma sonucunda çelik zırh plakasının küt burunlu mermilere karşı dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Buchar [7], 7.62 mm zırh AP mühimmata karşı çelik zırhın balistik performansını araştırmıştır. Bu makalenin önemli özelliklerinden biri, sertleştirilmiş çelik çekirdekli mermi için verilen Johnson-Cook malzeme mukavemet modelidir. Borvik tarafından yapılan çalışmada [8], izotropik sertleşmeye sahip elastik plastik gerinim oranından bağımsız malzeme ile zırh plakası üretilmiştir. Ls-Dyna üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar ile mühimmatın, zırh malzemesine karşı etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda oluşturulan plakanın mermiye karşı dayanımının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Khodarahmi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [9], deforme olabilen merminin yarı sonsuz hedefe nüfuz etmesi için bir analitik model geliştirilmiş ve sonuçları 3D Ls-Dyna simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Ls-Dyna'nın özellikle 750 m/s'den yüksek hızlarda iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Teng [10] tarafından, çift katmanlı çeliklerin düşük hızlarda çarpan mermilere karşı balistik performansını değerlendirilmiş ve katmanlı yapı oluşturularak balistik limitin %25'e kadar iyileştirilebileceği bulunmuştur. Rosenberg ve Dekel tarafından yapılan çalışmada [11], 2D Autodyn simülasyonları ile keskin uçlu sert mermilere karşı zırh çeliklerinin balistik penetrasyon derinliği incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda daha derin penetrasyonlar için mermi üzerindeki kuvvetin sabit olduğunu gözlemlenmiştir. Balistik simülasyonla ilgili önemli çalışmalardan biri olan Borvik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [12], 600 ile 1700 MPa arasında değişen çekme gerilmesine sahip beş farklı çelik alaşımının balistik penetrasyon performansını göz önünde bulundurarak, deneysel ve sayısal çalışmaların balistik limit hızın belirlenmesinde makul bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre, balistik limit hızı ile çekme gerilmesi arasında neredeyse doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Simülasyon metodolojisindeki önemli ilerlemelerden biri mermi modellemesi üzerinde odaklanmıştır. Bu çalışmaya kadar mermi ağırlıklı olarak çelik çekirdek malzeme modeli ile simüle edilmiş ve ceket, dolgu maddeleri çıkarılmıştır. Sonraki çalışmalar için, sayısal sonuçlar yapılan deneysel testlerle uyumlu olmamasına rağmen, Lagrange formülasyonu ile elde edilen sonuçlar ve mermi modelinin artan karmaşıklığı ile kritik sorunların yaşanmaması önemlidir. Flores-Johnson tarafından [13] 775-950 m/s aralığında 7.62 mm zırh delici mühimmat ile yapılan atışta çok katmanlı plakaların balistik performansı

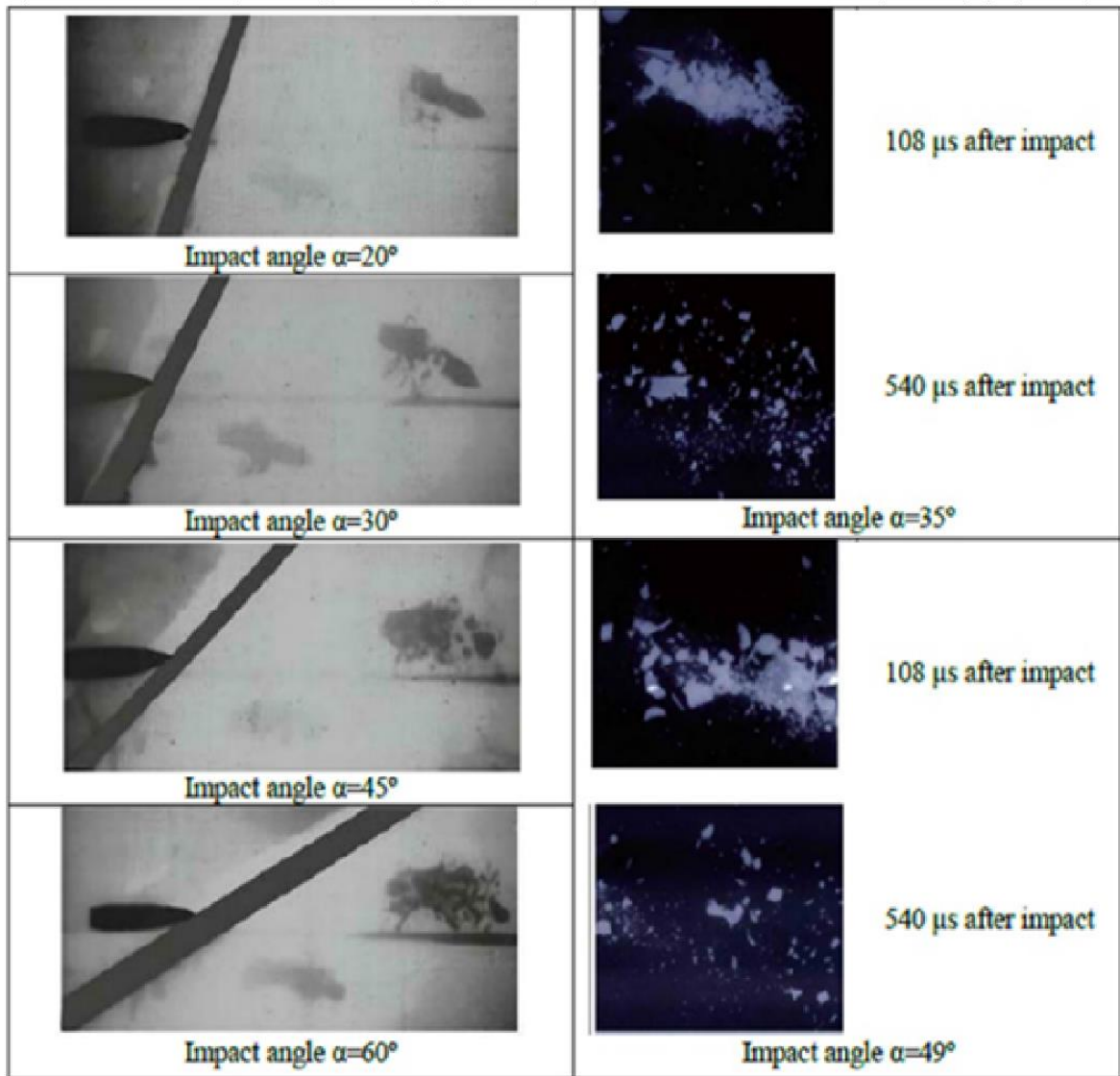
hakkında bir çalışma yapılmıştır. Weldox 700E için yekpare levhaların, 800 m/s darbe hızında daha belirgin olan üç katmanlı levhalara göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Namık KILIÇ ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [14], 7.62 x 54 mm AP mühimmatı kullanılarak, mermiyi yörüngesinden saptıran asimetrik kuvvetleri, mermi çekirdeğinin kırılması ve mermi çekirdeği deformasyonuna neden olan perfore zırh plakasına karşı penetrasyonu durdurma mekanizması incelenmiştir. Simülasyon ve malzeme modeli parametrelerinin aslına uygunluğunu doğrulamak için 9 ve 20 mm kalınlığındaki monolitik zırh plakaları üzerinde balistik testler yapılmıştır. Ls-Dyna simülasyonları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum sağlandığı tespit edilmiştir ve perfore plakaların penetrasyonu durdurma mekanizması açıkça gösterilmiştir. R. A. Howell ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [15] balistik testler, sertleştirilmiş mangan ve östenitik çelik üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu hafif çelikler, şu anda kara muharebe sistemlerinde kullanılan P900 perfore zırhta uygulama için MIL-PRF-32269 çelik alaşımlarına alternatif olarak araştırılmıştır. Ağırlık yüzdesi Fe-30Mn-9Al-1Si-0.9C-0.5Mo olan iki çelik levha, V50 için 7.62 mm ve 12.7 mm AP mühimmatlarına karşı değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda 7.62 mm AP mühimmatı 206 ve 165 m/sn ve 12.7 mm AP mühimmatı 279 m/sn hız ile yapılan atışların çelik zırh plakasını deldiği gözlemlenmiştir. Tianning Cui ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [16], amorf alaşım kaplama ve perfore metal alt tabaka plakasından oluşan amorf alaşımla güçlendirilmiş perfore zırh yapılmıştır. Bu zırh plakasının balistik performansı sayısal olarak incelenmiş ve mermilerin başarısızlık modları belirlenmiştir. Amorf alaşım kaplamanın, AP mühimmatını ciddi şekilde aşındırarak ve kırarak hedefin balistik performansını arttırmaya yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. Hedefin balistik performansı için kaplama kalınlığının, ilk çarpma hızının ve çarpma açısının etkileri de çalışılmıştır ve kaplama kalınlığı arttıkça plakanın dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Mubashar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [17], perfore zırh plakasının 12,7 mm zırh delici mermiye karşı balistik direnci araştırılmıştır. Hem tek başına gövde zırh (Hull Armor) plakası hem de perfore ek zırh plakası ile deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış olup, çoklu atış durumuna karşı perfore ve gövde zırh plakalarının kombinasyonu zırh delici mühimmatının penetrasyonunu durdurduğu gözlemlenmiştir. Perfore ve gövde zırh plakası kombinasyonunun penetrasyonu durdurma mekanizmasını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir sayısal model geliştirilmiştir. Perfore plaka, bir mermi çekirdeğinin gövde zırh plakasına nüfuz edemeden parçalara ayrılmasına sebep olmuştur. Zherui Guo ve Wainong Chen tarafından yapılan bir çalışmada [18], alüminyum alaşımlı levhaların zırh delici mermilere karşı balistik performansını tahmin

etmek için iki boyutsuz parametre önerilmiştir. Bu boyutsuz parametreler, geometriye bağlı ayrı ampirik sabitlere ihtiyaç duymadan balistik limit hızlarının tahminine olanak tanımaktadır. AP M2 ve bir adet BS 41 mühimmatına karşı çeşitli alüminyum alaşımları için yapılan deneylerde elde edilen tahminler ve veriler, önerilen parametreler kullanılarak iyi bir uyum sağlamıştır. Teresa Fras ve Norbert Faderl tarafından yapılan çalışmada [19], farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip 4 mm kalınlığında perfore plakaların düşük kalibreli mermilere karşı penetrasyonu incelenmiştir. Çelik perfore plakalarda delik deseni, plaka ile mermiler arasındaki asimetrik temas olasılığını artırır, bu da merminin çarpma pozisyonuna bağlı olarak dönmeye veya parçalanmaya neden olabilir. Test edilmiş üç zırh konfigürasyonu, 4 x 12 mm boyutlarında obluk şeklinde delikler açılmış beynitik yüksek sertlikte Pavise™ SBS 600P zırh çeliği plakalarını (ilk konfigürasyon), dairesel delik şeklinde delinmiş martensitik Mars® 300P çelik plakalarını içermektedir. İkinci konfigürasyonda 5 mm çapında dikdörtgen şeklinde ve üçüncü konfigürasyonda, 10 mm çapında dairesel şeklinde delikler açılmış martensitik Mars® 300 perfore plakaları kullanılmıştır. Balistik testler, test edilen aplike plakaların 7.62 x 51 .308 (Win P80) zırh delici (AP) mermilerine karşı yüksek koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Wojciech Burian ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [20], modern ultra yüksek sertlikte nano yapılı beynitik çelikten yapılmış perfore plakaların balistik özellikleri incelenmiştir. Darbe olgusunun balistik testleri ve sonlu eleman modellemesi dahil edilmiştir. Analizlerde 7.62mm x 54R B-32 API ve 7.62mm x 39 API BZ mühimmatları kullanılmıştır. Hem deneysel hem de sayısal çalışmaların sonuçları, uygun şekilde tasarlanmış delik düzeninin, aynı koruma kapasitesine sahip deliksiz plakalara kıyasla zırhın ağırlığını %40'a kadar azaltılabileceğini gözlemlenmiştir. Sonlu eleman modellemesinin, delik dağılımının geliştirilmiş olasılıksal optimizasyon modeli ile, perfore zırh sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için parametrik çalışmalarda kullanılabilecek hızlı, sağlam ve etkili bir araç olduğu gözlemlenmiştir.

Ramizer Gil ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [21], maliyeti ve üretim avantajları nedeniyle perfore zırh plakası kullanılmıştır. Tasarlanan plakalar sayısal ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. Balistik darbe testleri NIJ 0108.01 standardına göre yapılmıştır ve sonuçlar deney tasarımı kullanılarak analiz edilmiştir. Plakalardaki hasarı ölçmek için çeşitli tahribatsız testler uygulanmıştır. Bunların sonucunda, topoloji optimize edilmiş tasarımların ve zırh plakasının performansı istatistiksel olarak eşdeğer olduğunu, perfore plakalara ise kısmen nüfuz edildiğini gözlemlenmiştir.

Chao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, perfore plakaların önemli ancak nispeten basit bir kullanımı gösterilmiştir. 500 BHN sertlikte, 4, 5 ve 6 mm kalınlığında, Ø5 ve 6 mm çapında, delik merkezleri arasındaki mesafe 10 ve 12 mm aralıklı perfore plakalar, 7,62 mm 54R mm B32 API mühimmatına karşı test edilmiştir. Çarpma istikametine göre 76 derece açı yapacak şekilde konumlandırıldığında hem perfore plakanın hem de deliksiz plakanın mühimmatın yönünün değişmesini sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada deliksiz plakaya karşı perfore plaka uygulaması ile %26,24 ağırlık azalması sağlanmıştır. [22].

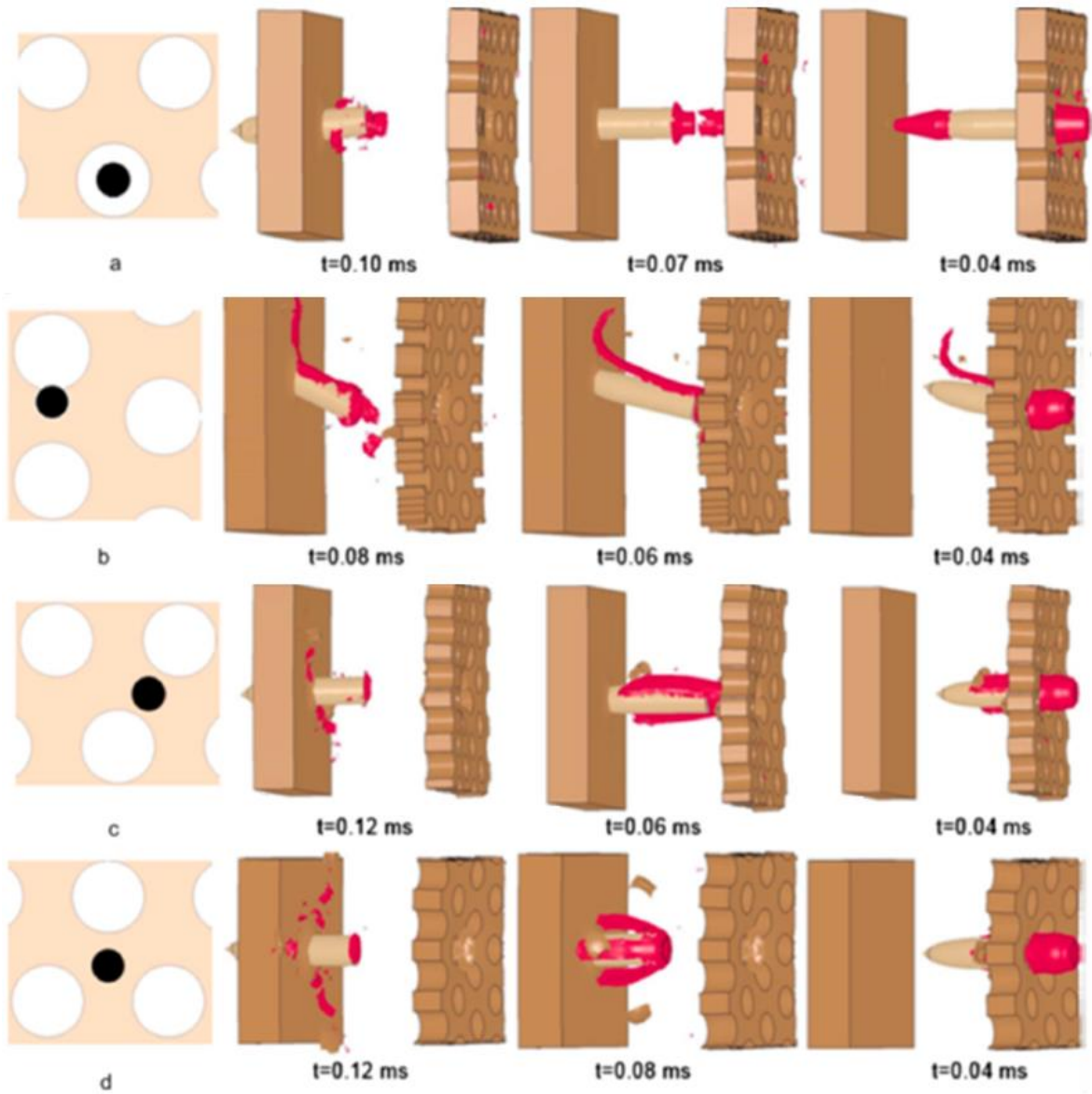
12.7 ve 14.5 mm AP B-32 mermilerle test edilen perfore zırh plakaların perforasyonunun X-ışını görüntüleri Şekil 3.2.'de gösterilmektedir [11, 23].



Şekil 3.2. 12,7 mm ve 14,5 mm API B32 mermilerle perfore zırh plakaların eğik durumdaki perforasyonunun X-ışını görüntüleri

Bir Lagrange ağının her sonlu elemanının her zaman aynı malzeme parçacıklarını içermesi gerçeği, özellikle geçmişe bağlı davranışa sahip malzemeleri içeren problemlerde, hesaplama açısından önemli bir avantajı temsil eder. Bununla birlikte, büyük malzeme deformasyonları meydana geldiğinde, Lagrange algoritmaları malzemeye bağlı hesaplama ağının bozulmaları nedeniyle hesaplamayı sonuçlandıramayabilir [24].

Namık Kılıç ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, perfore plakaların deneysel değerlendirmesi için sonlu elemanlar yöntemi (Lagrange ve LS-Dyna) kullanılmıştır. Çalışmada, mühimmatın ilk yörüngesinden sapmasına neden olan asimetrik kuvvetleri, çekirdeğin kırılması ve erozyonu, mühimmatın perfore plaka üzerindeki farklı yerlerine penetre olma durumları incelenmiştir. En olası çarpmanın Şekil 3.3'de b bölümünde gösterilmiştir. Merminin delik merkezine ve üç delik arasındaki geometrik alana çarptığı durumlar, yanal kuvvetler olmadığı için gövde plakasının delinmesine neden olur. Bu sonuçlar, 7,62 mm 54R mm mühimmat, 6 mm perfore plaka ve 9 mm gövde plakası, 500 BHN sertliğine göre uygulanarak deneysel araştırma ile doğrulanmıştır. Mühimmat Perfore plakadan geçtikten sonra, gövde plakasına çarpmanın sadece 1.8 mm'lik bir girinti ile sonuçlandığı ve gövde plakası kalınlığının kullanılandan önemli ölçüde daha düşük olabileceğini doğruladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu tür hasar, referans olarak kullanılan 15 mm 500 BHN zırh plakasının hasarına kıyasla düşük olduğu gözlemlenmiştir. Gövde zırh plakasına penetre olamamıştır, merminin burnunun aşınmış veya kırıldığı anlamına gelmektedir. Kütle etkinliğinin azaltılması için 6 mm'den daha ince bir perfore plakanın uygulanabileceği sonucuna varılmıştır [14].



Şekil 3.3. Perfore plakadaki mühimmat darbeleri:(a) delik merkezine; (b) delik köşesine; (c) iki delik arası; (d) üç delik arasına

4. MALZEME VE YÖNTEMLER

Darbe dinamiği, yarı statik koşullar altında katı veya deforme olabilen cisimlerin klasik mekanikinin geleneksel disiplinlerinden ayıran iki önemli özelliğe sahiptir.

- ✓ Birincisi, temel korunum yasalarına dayanan tüm yönetim denklemlerinde dikkate alınması gereken atalet etkisidir.
- ✓ İkincisi, problemlerin analizinde meydana gelen stres dalgası yayılımıdır.

Zırh geliştirmedeki darbe problemlerinin çoğu, kararlı durum koşullarının olmadığı geçici olayları göstermektedir.

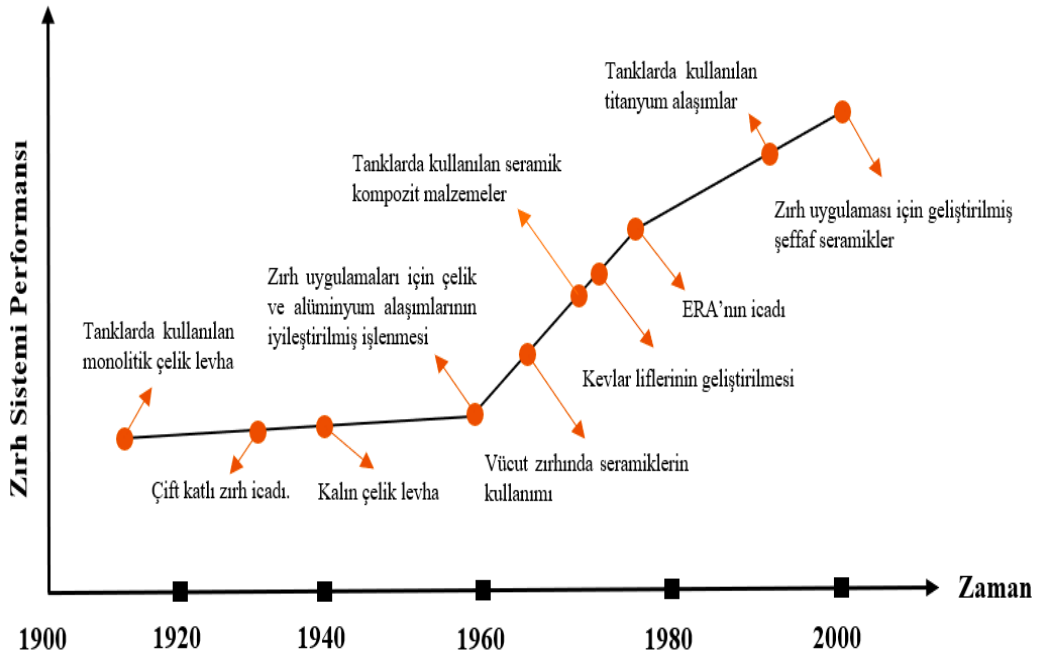
Malzemelerde darbe ve dalga yayılımı bilgisi, balistik yükleme koşulları altında malzemelerin penetrasyon ve arıza mekanizmalarının çeşitli yönlerini anlamak için gereklidir. Bu bölümün ilk kısımlarında ağırlıklı olarak yapıların çarpma, nüfuz etme ve bertaraf etme mekanizmalarının temel prensipleri verilecektir.

Plaka sabit veya mermiden çok daha düşük hızda hareket etmektedir. Ayrıca, hedef genellikle mermiden çok daha büyük bir kütleye sahiptir. Hedefe çarptığında mermi hedefe zarar verir ve aynı zamanda kendisi de bu süreçte hasara uğrar.

Balistik etki bölgesel bir olaydır. Hedefin tepkisi, çarpmanın yakınındaki küçük bir bölgenin performansına bağlıdır. Malzeme özellikleri ve bölgesel zırh konfigürasyonu, mermi enerjisinin emiliminde anahtar bir rol oynamalıdır.

4.1 Balistik Malzeme Tarihi

Dünya Savaşları sırasında muharebe sahasında insan hayatı daha önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Yeni silah sistemlerinin geliştirilmesiyle, insan ve araç korumasını iyileştirmek için eski zırh teknolojisinin yenilenmesi gerekmiştir. Performansın iyileştirilmesi için, penetrasyon mekanizmasının detaylı incelenmesi gerektiği kanaati oluşmuştur. Terminal balistiğinin gelişmesiyle birlikte mermilerin özellikleri ve parçalanmaları araştırılmaya başlanmıştır. Şekil 4.1.'de zırh sisteminin performansları zamana göre gelişimini göstermektedir [25].



Şekil 4.1. Zırh sistemi performanslarının zamana göre gelişimi

Zırh tasarımları pasif ve reaktif olarak ikiye ayrılır. Reaktif zırh, balistik tehdide karşı koymak için kinetik enerji kullanır. Pasif zırh, darbe kinetik enerjisini dağıtmak için malzeme özelliklerini kullanır.

4.2 Hasar Oluşum Mekanizması

Kütlesi düşük, yüksek hızlı balistik darbelerde, hasar mekanizması çarpma alanının yakınında gözlenir. Temel olarak, zırh malzemelerinin beklenen özelliğinin, yüksek hızlı zırh delici (AP) mühimmatın darbe enerjisini emmesi olduğu söylenebilir. Hedefte görülen hasar;

- ✓ Çarpma hızı,
- ✓ Mermi şekli,
- ✓ Mermi yörüngesi,
- ✓ Malzeme özellikleri ve
- ✓ Atış ortamı koşullarına bağlı olarak değişir.

Zırh malzemelerinin zırh delme mekanizmaları, hedef ve tehdit özelliklerine bağlı olarak üç farklı aralıkta gruplandırılabilir:

1. **Penetrasyon:** Merminin hedefi delip hızını sıfırlayarak kısmen arkadan çıktığı durum: Balistik çalışmalar, merminin malzemeyi terk etme hızının ölçümüyle alakalıdır. Bu çıkış hızı sıfır ise, hedef merminin tüm enerjisini soğuruyorsa, malzemenin kaçınılmaz olarak merminin ilk hızında delineceği yorumlanır.
2. **Perforasyon:** Merminin malzemeyi delip, kalan enerjisi kadar belirli bir hızla çıkması durumunda; Malzemenin emebileceği enerji miktarının mühimmatın enerjisinden daha az olduğu anlaşılmaktadır.
3. **Kısmi Penetrasyon:** Merminin hedefte kalması veya malzemenin arkasında çıkıntı oluşturup oluşturmada malzeme içinde kaldığı durumlarda; Malzemenin enerji emme seviyesinin mühimmatın enerjisinden daha büyük olduğu söylenebilir.

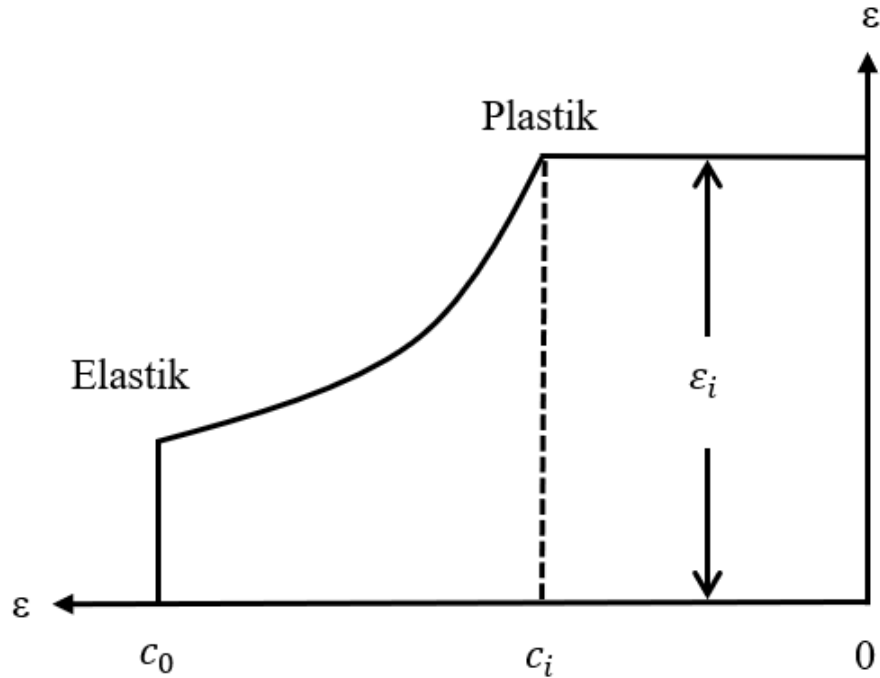
4.3 Gerilme Yayılımı

Balistik çarpma sırasında darbe noktasında dalgalar oluşur ve her yönde yayılır. Bu dalgalar, dalgaların yayılma yönüne ve parçacıkların hareketine bağlı olarak uzunlamasına veya kayma (shear) yönüne doğrudur. Oluşan gerilmeye bağlı olarak, bu dalgalar basma, çekme ve kayma gerilmesi dalgaları olarak sınıflandırılabilir.

Konfigürasyonundaki çeşitli özelliklerden dolayı seramik-kompozit zırh içerisinde ara yüzler mevcuttur. Kalınlık boyunca ara yüzler, farklı malzeme katmanlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Düzlem içi ara yüzler, seramik karoların veya plakaların sınırlı büyüklüğü nedeniyle oluşmaktadır. Dalgaların iletimi ve yansıması bu ara yüzler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Yansıma miktarı, ara yüze bitişik malzemelerin empedans oranına bağlıdır. Bu tipik olarak iki bitişik seramik karo veya zırh paneli arasındaki sınırdır. Bu tipteki her ara yüzde dalga yayılımı değişmektedir. Bu durum zırhın farklı kısımlarının maruz kaldığı gerilmeleri ve dolayısıyla hasarı ve performansını etkilemektedir.

Darbe durumunun incelenmesi, malzeme ve yapılarda gerilim dalgalarının yayılmasına odaklanır. Darbe hızı düşük olduğunda gerilim genellikle malzemenin akma dayanımının altındadır, bu nedenle sadece elastik gerilim dalgaları üretilir [26]. Darbe hızı yüksek olduğunda, gerilme akma mukavemetini aşarak plastik gerilme dalgaları oluşacaktır [26, 27].

Elastik sınırların ötesine geçen plastik dalga yayılım problemini açıklamak için iki ana teori türetilir [26]. Bunlar hıza bağımlı ve hızdan bağımsız teorilerdir. Plastik dalga teorisi hızdan bağımsız teori olarak adlandırılır ve yapısal davranışın malzemenin gerilme-gerinim eğrisi ile temsil edildiğini varsayılmaktadır. Yarı sonsuz bir çubuğun bir ucunda uygulanan çarpma hızı durumunda, Şekil 4.2'de gösterilen dalga profili için kapalı formda bir çözüm elde edilebilir [26].

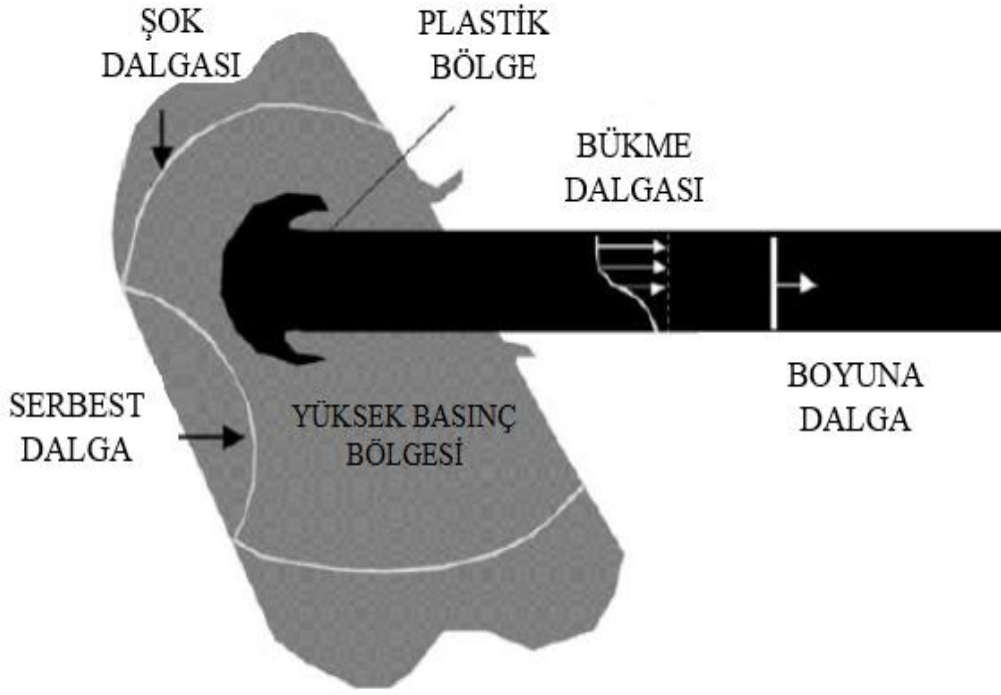


Şekil 4.2. Hızdan bağımsız teorelin elastik-plastik dalgası için gerinim profili

Zırh tasarımı için dalga yayılımını anlamak çok önemlidir. Tipik seramik kompozit zırh, mermiyi karşılayan seramik bir tabaka kullanılarak yapılır. Seramik katman, bir kompozit katmanla desteklenir. Etkili bir darbe seramik tabaka üzerinde basma yönlü gerilme dalgaları oluşturur. Bu dalgaların bir kısmı, kalınlık yönü boyunca seramik-kompozit ara yüzünde çekme yönlü gerilme dalgaları olarak geri yansıtılır. Kalan kısım kompozit katmana iletilir. İki katmanın empedans oranı, yansıtılan ve iletilen gerilim miktarını tanımlamaktadır. İletilen gerilme seviyesi, kompozit katmanda meydana gelebilecek hasarı tanımlamaktadır. Seramikler çekme yönünde zayıf mukavemet göstermektedirler. Çekme gerilme dalgaları olarak yansıtılan basma yönlü gerilim dalgalarının miktarı, seramiklerde çekme hasarını başlatmaktadır. Bu gerilme hasarı nedeniyle, delici mermi hasarlı ve sağlam olmayan malzeme ile karşılaşmaktadır. Sonuç olarak, nüfuziyet derinliği artmaktadır. Bu nedenle, seramik-kompozit ara yüzünün yeri ve doğal yapısı, zırh performansında önemli bir rol oynamaktadır. Seramik karoların kenarlarında düzlem içi yüzeylerde benzer yansımalar meydana gelmektedir. Bu nedenle, karonun boyutu da zırh performansını etkilemektedir. Kayma dalgalarının zırh düzleminde hareket ettiği son durum, koni oluşumunun içeriğine göre belirlenir.

4.4 Penetrasyon Mekaniği

Mermi, hedefi delmek için kinetik enerjisini kullanır. Şekil 4.3'te kinetik enerji penetrasyon sürecinin şematik görünüşü tanımlanmaktadır. Çarpma sonucunda penetratör ve hedef malzemesi içinde basma gerilmesi meydana gelir. Yüzeye dik gelen (normal) çarpmalarda, meydana gelen basma gerilmesi iki boyutludur. Hedef yüzeyine belli bir açı ile gelen çarpmalarda asimetrik bükülme dalgalarını içeren üç boyutlu gerilme durumları meydana gelir. Çarpma hızı arttıkça mermi plastik deformasyonu lokalize olur ve mermi ucu mantar şeklinde deforme olur [27].



Şekil 4.3. Merminin bir hedef üzerindeki balistik etkisinin şematik diyagramı

Darbe olayı, çarpma açısına, hedef ve merminin geometrik ve malzeme özelliklerine, çarpma hızına, gerinim hızına veya bunların bazı kombinasyonlarına göre çeşitli şekillerde karakterize edilebilir. Genel olarak, etki süreci dört rejimden oluşur:

- ✓ Geçiş fazı
- ✓ Denge durumu penetrasyonu
- ✓ Oyuk oluşumu
- ✓ Geri kazanım

Geçiş Fazı

Temastan sonra, serbest yüzey ve malzeme ara yüzlerinden gelen serbest dalgalarının reaksiyon verecek zamanı olmadığından, bir boyutlu gerilme durumunu temsil eden ara yüzde bir basınç üretilir.

$$P_H = \rho u_s u_p \quad (4.1)$$

Burada u_s şok hızını, u_p parçacık hızını temsil eder. Geçiş fazı son derece kısadır. Düz uçlu mermiler için nanosaniye kadar küçük olabilir [26].

Denge Durumu Penetrasyonu

Bu aşamada şok dalgaları temas yüzeyinden hem mermiye hem de hedefe doğru yayılır. Düşük hızlı darbeler için, ilk şok genliği ihmal edilebilir seviyeye kadar zayıflatılır. Mermideki deforme olan bölgedeki basınç noktadan noktaya değişecektir ancak kabaca şu şekilde tahmin edilebilir:

$$P = \frac{1}{2} \rho u_p^2 \quad (4.2)$$

Oyuk Oluşumu

Mermi tamamen aşındıktan sonra, hedef malzemede hapsolan enerjinin bir sonucu olarak krater genişlemeye devam eder. Bu aşama, şok dalgasının arkasındaki enerji yoğunluğu malzemenin mukavemetinin üstesinden gelemeyecek kadar küçük olana kadar devam eder. Bu noktada şok dalgası, sıkışan enerji dağılana kadar hedefte ilerlemeye devam eden elastik veya plastik dalgaya indirgenmiştir.

Geri Kazanım

Kraterin yüzeyindeki parçalanma ve kraterin altındaki alanda metalin yeniden kristalleşmesi bu aşamada meydana gelen tipik olaylardır. Penetrasyon ve perforasyon sürecinde hedefte gözlenen etkilerin bir özeti Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Perforasyon sırasında mermi ve hedefte meydana gelen fiziksel olaylar

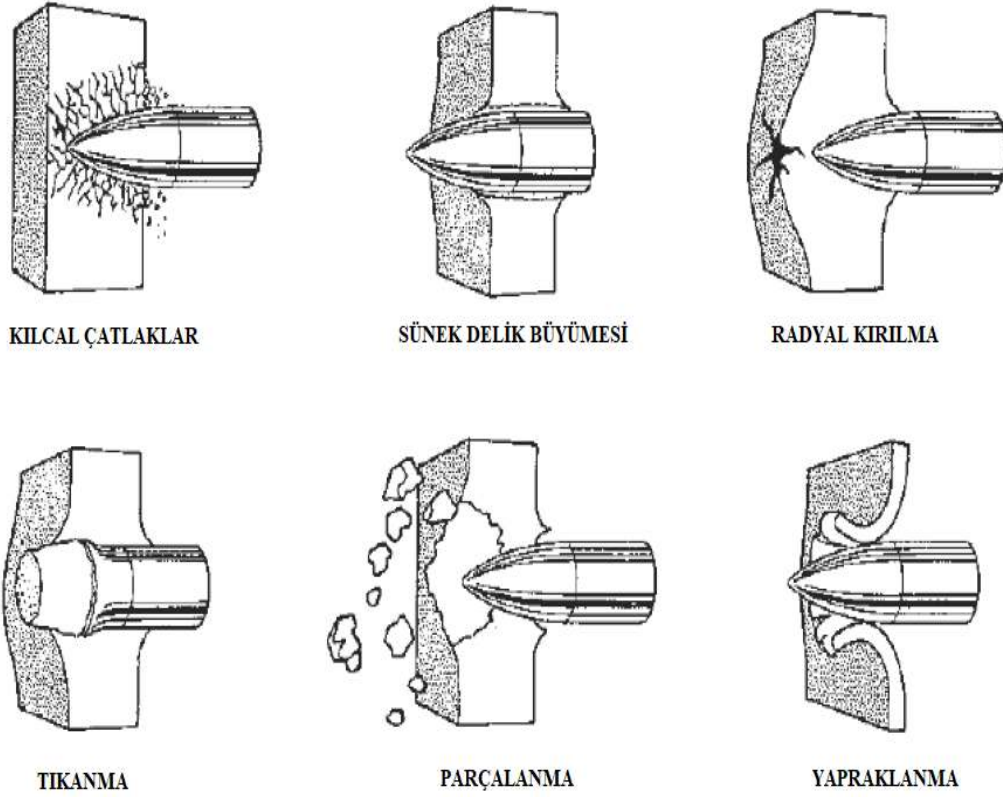
Hedefte Gözlenen Olaylar	Mermide Gözlenen Olaylar
▪ Dalga yayılımı (elastik, plastik, hidrodinamik) ▪ Normal, eğilme, kayma, hidrostatik gerilmeleri ▪ Çatlak ▪ Parçalanma ▪ Sürtünme etkileri ▪ Faz değişiklikleri	▪ Dalga yayılımı ▪ Kalıcı deformasyon ▪ Çatlama ▪ Parçalanma ▪ Isıtma

Darbe yükü altındaki deformasyon, darbe hızına ek olarak birçok ek parametreye bağlı olduğundan, bu geçişler olağanüstü esnek olduğundan, darbe hızı aralıkları yalnızca referans olarak kabul edilmelidir.

4.5 Plaka Perforasyonu

Plaka perforasyonu, zırh tasarımlarının ağırlığını ve maliyetini optimize etmeye çalışan balistik mühendisleri için en önemli konudur. Bu konu, belirli bir mermi/plaka kombinasyonu için balistik limit hızı ve merminin çarpma hızının bir fonksiyonu olarak artık hız ve kütlesi üzerinde yoğunlaşan çok sayıda çalışmanın odak noktası olmuştur. Perforasyon süreci hedefin arka yüzeyinden etkilenir, bu da çarpma yüzeyi ile delme sırasında mermi üzerinde zamanla değişen bir kuvvete neden olur [28]. Farklı perforasyon modları mümkündür ve özellikle proses tek bir moddan fazlasını içerdiğinde, enerji absorbe kapasitelerinin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Kalın zırh plakaların perforasyonu sırasında, parçalanma, çukur oluşumu gibi çeşitli sorunlar meydana gelebilir. Bu sorunlar, çarpma hızı, plaka malzemesinin özellikleri, plaka kalınlığı, mermi çapı ve burun şekli gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Perfore plakalarda oluşan kırılma tipleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sünük metalik plakaların AP mermilerle delinmesi, sözde sünük delik büyütme mekanizması ile elde edildiğinden, analitik modelleme için en basit işlemdir [29].



Şekil 4.4. Perfore plakalarda oluşan kırılma tipleri

4.6 Bertaraf Etme Mekanizmaları

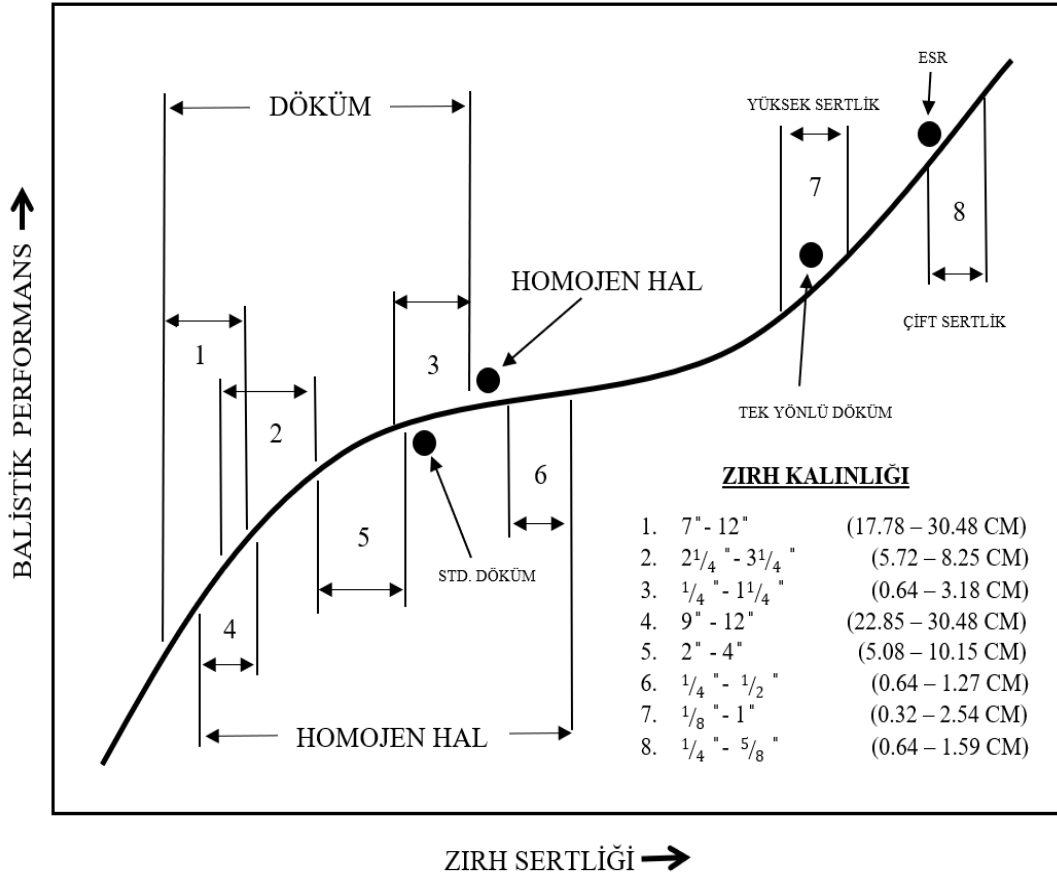
Zırh geliştiricilerin amacı, zırhın tehditlere karşı korumasını sağlarken aynı zamanda en hafif ve en basit yapıda zırh oluşturmaktır. Bu amaca, korunan nesnenin malzeme özelliklerini optimize ederek veya nesnenin önüne aplike zırh adı verilen başka bir yapı ekleyerek ulaşılabilir. Verimli aplike zırhlar yapmak için, tehdidin etkinliğini azaltacak bazı iyi tanımlanmış bertaraf mekanizmalarını optimize edilmelidir.

Zırh tasarımında bertaraf mekanizmalarının yakından incelendiğinde iki basit prensibe dayandığını gözlemlenmiştir. Bunlar;

1. Zırhın direnci arttırmak için, tercihen düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı,
2. Eğim verilerek tehdit ve zırh arasındaki etkileşimde asimetri kullanımı.

Zırhın belirli bir tehdide karşı koruma kapasitesi çeşitli yöntemlerle değerlendirilebilir. Bunlardan biri, belirli hedef-tehdit çiftinin balistik limit hızıdır. Açıkçası, zırh geliştiricisinin amacı, ağırlığını arttırmadan balistik limit hız değerini arttırmaktır. Zırh ağırlığının ilgili ölçüsü, koruyucu yapının yoğunluğunun kalınlığıyla çarpımı olan kg/m^2 biriminde verilen alansal yoğunluktur. Zırhın balistik etkinliği, belirli bir tehdidi yenmek için gerekli olan referans hedefin performans etkinliği ile karşılaştırıldığında alansal yoğunluğu ile ifade edilir. Belirli bir tehdidi yenmenin daha pratik yollarından biri, korunan nesnenin önüne nispeten hafif bir yapı eklemektir. Bu aplike zırh yapısı, etkili bir bertaraf etme mekanizması aracılığıyla belirli bir tehdidin nüfuz etme kabiliyetini önemli ölçüde azaltabilir.

Merminin mukavemeti, penetrasyon derinliğini belirlemede en önemli fiziksel parametredir [30]. Balistik verimlilik yaklaşık 370 Brinell sertliğine kadar artar. Yaklaşık 450 Brinell sertlik değerindeki çelikler (HHS) AP mühimmatını çarpma anında parçalayacak kadar mukavim olduğundan balistik verimlilik artar. Mukavemet ve kırılabilirliğin çelişen etkileri için şematik bir açıklama Şekil 4.5'te gösterilmektedir [31].



Şekil 4.5. Sertlik değerine göre çeliğin balistik performansı

AP mühimmatlarının üzerindeki asimetrik kuvvetler ya mermi çekirdeğini kırar ya da yolunu saptırır. Bu söz konusu aplike perfore plakalar, AP mühimmatının penetrasyon kabiliyetini azaltmada çok etkilidir. Bu plakaların yüksek balistik verimliliğine ek olarak, performanslarında herhangi bir kayıp olmaksızın mükemmel çoklu atış kabiliyeti sergilemektedirler.

5. KÜTLE VERİMLİLİĞİ

Bir zırh sisteminin kütle verimliliği, aynı tehdidi durdurmak için gereken Haddelenmiş Homojen Zırh çeliği (RHA) gibi geleneksel zırha göre, belirli bir tehdidi durdurmak için gereken zırhın birim alanı başına kütlenin karşılaştırmalı bir ölçüsüdür. Burada kütle verimliliği şu şekilde tanımlanır:

$$E_m = \frac{t_{ref} \cdot \rho_{ref}}{t \cdot \rho} \quad (5.3)$$

Burada t kalınlık, ρ hacimsel yoğunluk ve ref referans malzemesi, burada RHA'yı belirtir.

Amerika askeri standartlarının bir parçası olan MIL-A-12560H ve MIL-A46100D'ye göre homojen olarak haddelenmiş zırh çeliklerinin birim alan başına kütle verim değeri "bir" olarak kabul edilir. Alüminyum, kompozit ve seramik malzemelerden yapılan zırhların kütle verim değerlerinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Titanyum alaşımları, çelik ve alüminyum alaşımlı zırhlardan daha yüksek kütle etkinliğine sahiptir. Çoklu atışlara karşı balistik performansı iyidir. Mukavemet ağırlık oranına ve mükemmel korozyon direncine sahiptirler.

Yeni malzeme arayışı için savunma sanayide kullanılan başlıca malzemeler Tablo 5.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. RHA zırh çeliği, zırh sistemlerinde kütle verimliliği ve balistik verimlilik açısından önemli parametredir.

Tablo 5.1. Zırh yapımında kullanılan başlıca malzeme özellikleri

MALZEME	FİYAT SIRASI	YOĞUNLUK (g/cm^3)	SERTLİK (VHN)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (GPa)	ERİME NOKTASI ($^{\circ}C$)
Zırh Çeliği (RHA)	1	7.9	<670	180	1600
Alumina (Al_2O_3)	2	3.9	2000	350	1800
Bor Karbür (B_4C)	3	2.5	3700	450	2450
Silisyum Karbür (SiC)	4	3.2	2600	390	2100
Titanyum Diborür (TiB_2)	5	4.5	2600	575	2980

6. UZAKDURMA MESAFESİ (STAND-OFF DISTANCE)

Homojen olmayan aplike zırhlar, gövde zırhından (hull armour) belirli bir mesafede yerleştirildiğinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu boşluk (air gap), yeterli bir sapmanın elde edilmesi veya gövde zırhını tam koruma sağlaması ve penetrasyonun bozulması için kırılan çekirdek parçalarının yeterli bir şekilde ayrılmasına izin vermek için gereklidir. Ancak bunun, hareketlilik üzerinde sistem tasarımına olumsuz bir etkisi olabilir, diğer bir deyişle araç boyutları artabilir anlamına gelir. Ayrıca, bir savaş aracında atış için pencereler

mevcutsa, bu boşluk balistik pencereler üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir ve bu da onları teorik olarak kentsel ortamda daha az etkili hale getirir. Bu sorunların üstesinden gelmek için, aplike ve gövde zırhı arasındaki boşluğun azaltılması arzu edilir.

Ben-Dor ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [32], dar alan etkileşim modelini (Localized Interaction Model) kullanarak, gövde zırhından uzak durma mesafesinin artırılmasını ve plakaların balistik dayanıklılık değerlerini, malzemelerinin mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi gözlemlenmiştir. Elek ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [33], monolitik ve çok katmanlı ince metalik plakalar için bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, monolitik plakanın katmanlar arasındaki mesafesi ve eşdeğer toplam kütlesi, çok katmanlı plakaya göre daha büyük bir dirence sahip olacağını öngörülmüştür.

7. ZIRH ÇELİKLERİ

Armox 500 T

Yüksek toklukta yüksek sertliğe sahiptir. Armox® 500T, birçok yerde kullanım için nominal 500 HBW sertliğine sahip dünyanın en sağlam koruma plakaları arasında yer almaktadır [34]. Armox 500T zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.1’de, kimyasal özellikleri Tablo 7.2’de ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.3’te verilmiştir.

Armox 600 T

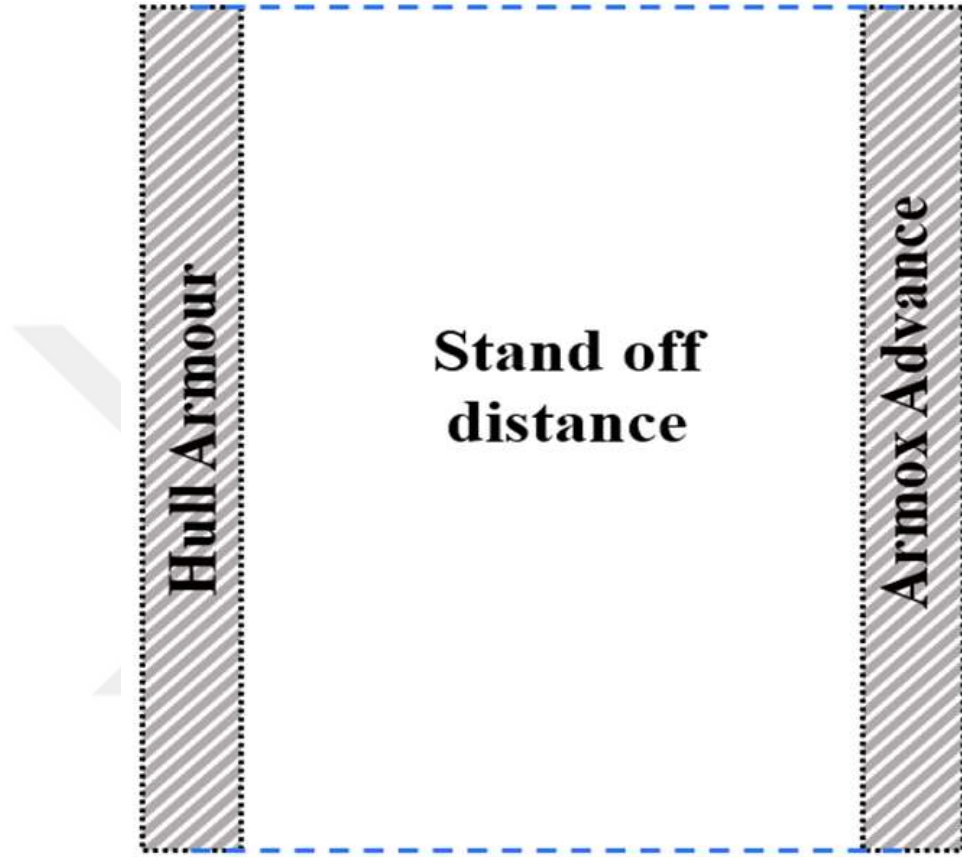
Kinetik enerjili tehditlere karşı çok iyi direnç gösteren ekstra yüksek sertliktedir. Armox 600T, aplike zırh plakası olarak veya ağırlığın kritik olduğu yerlerde kullanılır. Armox 600T, 570-640 HBW sertlik aralığı ile 4-20 mm arasındaki kalınlıklarda mevcuttur. Mükemmel sertlik/tokluk dengesi sayesinde hem kinetik enerjili tehditlere karşı hemde patlama tehditlerine karşı koruması sağlamaktadır [35]. Armox 600T zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.1’de, kimyasal özellikleri Tablo 7.2’de ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.3’te verilmiştir.

Armox Advance

Ultra sert koruma plakası olarak karşımıza çıkmaktadır. Armox Advance, zırhın alansal yoğunluğunun azaltılmasının gerekli olduğu yerlerde kullanılmak amacıyla üretilmiştir [36]. Armox Advance zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.1’de, kimyasal özellikleri Tablo 7.2’de ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.3’te verilmiştir.

Ultra yüksek sert (650 HB) çeliği, ağırlık azaltmanın gerekli olduğu durumlarda aplike zırh olarak kullanım için tavizsiz balistik direnç performansı sunar.

Armox advance, platformdan belirli bir mesafede apliede zırh olarak da kullanılabilir (Şekil 7.1). Gelen mermiler, delik kenarlarına veya aradaki sert malzemeye darbelerin neden olduğu mukavemet nedeniyle kırılma eğilimindedir. Zırhın üzerindeki delikler, plakanın alansal yoğunluğunu azaltır ve ayrıca armox advance olağanüstü bir çoklu vuruş yeteneği kazandıran olası çatlakların yayılmasını sınırlar.



Şekil 7.1. Armox advance zırhının, platformdan belirli bir mesafede tasarlanmasının şematik halinin gösterimi

Tablo 7.1. Armox grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler

Zırh Çelikleri	Kalınlık (mm)	Sertlik (HBW)	Akma Mukavemeti Rp0.2 (min. MPa)	Çekme Mukavemeti Rm (MPa)	Uzama A5 (min. %)	Uzama A50 (min. %)
Armox 500T	3-80	480-540	1250	1450-1750	8	10
Armox 600 T	4-20	570-640	1500	2000	7	-
Armox Advance	4-7.9	58-63 HRC	1600	2250	9	-

Tablo 7.2. Armox grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon

Zırh Çelikleri	C (max%)	Si (max%)	Mn (max%)	P (max%)	S (max%)	Cr (max%)	Ni (max%)	Mo (max%)	B (max%)
Armox 500 T	0.32	0.4	1.2	0.015	0.010	1.01	1.81	0.7	0.005
Armox 600 T	0.47	0.7	1.0	0.010	0.003	1.5	3	0.7	0.005
Armox Advance	0.47	0.7	1.0	0.010	0.005	1.5	3	0.7	0.005

Tablo 7.3. Armox grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler

Zırh Çelikleri	Balistik Standart Tehdit Seviyesi	Mühimmat	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)
Armox 500 T	Nato Stanag 4569 Seviye 3	7.62x51 mm AP (WC core)	173
Armox 500 T	Nato Stanag 4569 Seviye 3	7.62x51 mm AP (100 Cr6-61 HRC core)	114
Armox Advance	Nato Stanag 4569 Seviye 3	7.62x51 mm AP (100 Cr6-61 HRC core)	71
Armox 600 T	Nato Stanag 4569 Seviye 3	7.62x51 mm AP (100 Cr6-61 HRC core)	94
Armox 600 T	Nato Stanag 4569 Seviye 3	7.62x51 mm AP (WC core)	165

Ramor 500

Sertliği yüksek balistik zırh çeliğidir. Ramor 500, 2-30 mm kalınlıklarda ve 490-560 HBW sertliklerde mevcut, yüksek sertlikte bir balistik koruma çeliğidir [37].

Ramor 550

Ekstra yüksek sertliğe sahip balistik koruma çeliğidir. Ramor 550, 3-15 mm kalınlıklarda ve 540-600 HBW arasında sertliklerde mevcut, ekstra yüksek sertlikte bir balistik koruma çeliğidir [38].

Ramor 600

3-6 mm kalınlıklarda ve 600 HBW nominal sertlikte sunulan ekstra yüksek sertlikte bir balistik koruma çeliğidir [39].

Mars 500

Balistik direnç ve işlenebilirlik kombinasyonunu sunan yüksek sertlikte zırh çeliğidir [40]. Mars 500 zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.4'te, kimyasal özellikleri Tablo 7.5'te ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.6'de verilmiştir.

Mars 600

Yüksek tokluk, 500HB'ye yakın bir işlenebilirlik ve çoklu darbelere karşı direnç açısından etkileyici bir balistik davranışa sahip çok amaçlı ultra yüksek sert zırh çeliğidir [41]. Mars 600 zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.4'te, kimyasal özellikleri Tablo 7.5'de ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.6'de verilmiştir.

Mars 650

Ağırlık azaltmanın gerekli olduğu durumlarda balistik performanstan ödün vermeden aplike zırh konfigürasyonlarda kullanım için ultra yüksek sert bir zırh çeliğidir. Çeşitli malzemeler ve kompozit çözümlere kolay entegrasyonu ile öne çıkmaktadır [42]. Mars 650 zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.4'te, kimyasal özellikleri Tablo 7.5'te ve balistik korumaya yönelik örnekler Tablo 7.6'de verilmiştir.

Tablo 7.4. Mars grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler

Zırh Çelikleri	Kalınlık (mm)	Sertlik (HBW)	Akma Mukavemeti Rp0.2 (min. MPa)	Çekme Mukavemeti Rm (MPa)	Uzama A5 (min. %)	Uzama A50 (min. %)
Mars 500	4-50.8	500	1250	1700	12	-
Mars 600	4-50.8	601	1450	2150	10	-
Mars 650	4-20	650	-	-	-	-

Tablo 7.5. Mars grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon

Zırh Çelikleri	C (max %)	S (max %)	P (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	Ni (max %)	Cr (max %)	Mo (max %)	B (max %)
Mars 500	0.31	0.002	0.010	0.5	1.0	1.8	1.6	0.6	0.003
Mars 600	0.45	0.002	0.010	1.0	1.0	2.4	0.5	0.5	0.003
Mars 650	0.5	0.002	0.010	1.0	0.7	2.4	0.4	0.5	0.003

Tablo 7.6. Mars grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler

Zırh Çelikleri	Balistik Standart Tehdit Seviyesi	Mühimmat	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)
Mars 500	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	133
Mars 600	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	110
Mars 650	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	102

Secure 500

Balistik uygulamalarda, sivil araçlarda kullanılmaktadır [43]. Secure 500 zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.7’de, kimyasal özellikleri Tablo 7.8’de verilmiştir.

Secure 600

Balistik uygulamalarda, sivil araçlarda kullanılmaktadır. Ağırlık kriterinin önem teşkil ettiği yerlerde aplike zırh konfigürasyonlarında kullanılmaktadır [44]. Secure 500 zırh çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 7.7’de, kimyasal özellikleri Tablo 7.8’de verilmiştir.

Tablo 7.7. Secure Grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler

Zırh Çelikleri	Kalınlık (mm)	Sertlik (HBW)	Akma Mukavemeti Rp0.2 (min. MPa)	Çekme Mukavemeti Rm (MPa)	Uzama (min. %)
Secure 500	3-90	480-530	1300	1600	9
Secure 600	4-40	570-640	1500	2000	8

Tablo 7.8. Secure grubu zırh çeliklerine ait kimyasal kompozisyon

Zırh Çelikleri	C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Mo (max %)	Al (max %)	B (max %)
Secure 500	≤0.32	≤0.4	≤1.00	≤0.015	≤0.005	≤0.50	≤0.7	≤0.110	-
Secure 600	≤0.4	≤0.8	≤1.5	≤0.025	≤0.010	≤0.50	≤1.5	-	≤0.32

Zırh tasarım sürecinde bilgi toplanırken belirlenen hedeflerin ve bu hedeflere ulaşmak için önerilen alternatiflerin değerlendirilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında Şekil 7.2' te gösterildiği gibi amaçlanan numune konfigürasyonu oluşturma kriterleri gösterilmiştir.



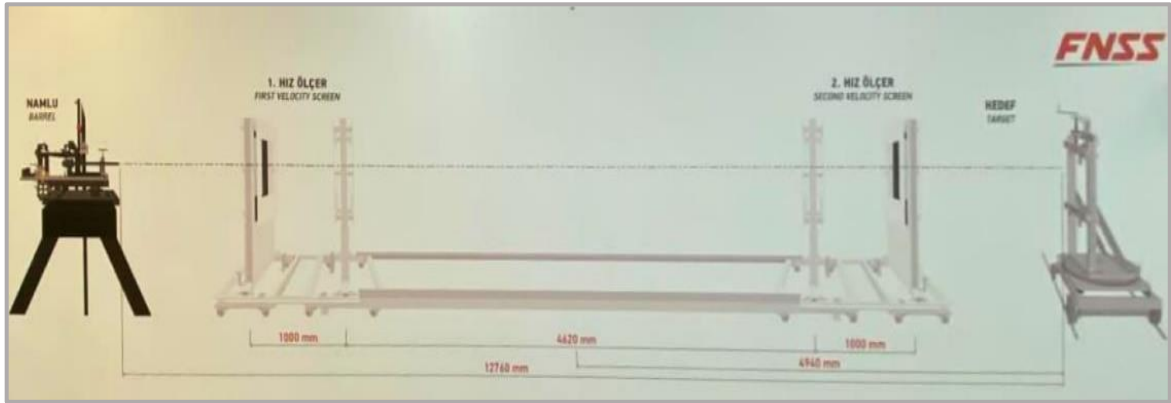
Şekil 7.2. Balistik numune tasarım kriterleri

Bu tez çalışmasında kullanılan perfore zırh plakalarının malzemeleri yurt dışından ithal edilen malzemelerdir. Bu plakalar yurt dışındaki firmalar ile veya ülkemizdeki aracı firmalarla iletişime geçilerek temin edilebilmektedir. Yapılmış olan balistik testlerden ortaya çıkan sonuçlara bakılırsa bazı atışlarda perfore plakanın tehdidi durdurabildiği, ancak çoklu atış sırasında tam koruma sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Taktik maksatlı askeri araçların yüksek mobilite gereksinimleri nedeniyle, balistik koruma performansını iyileştirmek için zırh ağırlığındaki artış kabul edilemez olmakla birlikte, operasyon gereksinimleri tasarım hedeflerini daha yüksek koruma seviyeleri için önemli ölçüde zorlamaktadır. Ayrıca, koruma seviyesinin artırılması için mobiliteden ödün verilmemelidir. Perfore zırh plakaların diğer çelik zırhlarla kıyas edildiğinde üzerine açılan delikler sayesinde daha hafif olacağı açıktır. Askeri araçlar, taktiksel gereksinimlere göre optimize edilmiş balistik koruma, silahlanma ve mobilite sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu plakalar seri imalat halinde üretilebilmektedir. Perfore plakalar normal çelik plakalara göre yapılan su jeti ile kesim işleminden dolayı üretimin maliyetteki etkisi diğer plakalara göre daha fazladır.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1 Balistik Testler

Bu çalışmada balistik test FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'nin test laboratuvarında yapılmıştır. Bu laboratuvarın test düzeneği şematik olarak Şekil 8.1'de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. FNSS balistik test laboratuvarı krokisi

8.2 Kullanılan Penetratör

Bu tez çalışmasında MIL-DTL-32332-CL2 ve MIL-DTL-46100 iki farklı zırh çeliği kullanılmıştır. Bu çeliklerin mekanik ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir:

MIL-DTL-32332-CL2 (RAMOR 500 HB)

Mekanik Özellikler:

Yüksek darbe dayanımına sahip bir çeliktir. Bu özellik, çelik plakaların aşınma ve yıpranmaya karşı dayanıklı olmasını sağlar.

Yüksek sertlik ve mukavemet özellikleri gösterir. Bu özellikler, çelik plakaların çeşitli hasarlara karşı dayanıklı olmasını sağlar.

Kimyasal Özellikler:

Yüksek mukavemetli bir çeliktir. Bu çelik, karbon, silikon, mangan, krom, molibden ve nikel gibi çeşitli elementlerin bir araya gelmesiyle üretilir.

İyi kaynaklanabilen bir çeliktir. Bu özellik, çelik plakaların birbirine kaynaklanarak büyük boyutlu zırh panelleri oluşturulmasını sağlar.

Yüksek aşınma direncine sahip bir çeliktir. Bu özellik, çelik plakaların sürtünme ve darbelere karşı dayanıklı olmasını sağlar.

MIL-DTL-32332-CL2 gibi zırh çelikleri, özel olarak tasarlanmış üretim yöntemleri kullanılarak üretilir. Bu yöntemler arasında, termomekanik haddeleme ve sıcak dövme gibi işlemler yer alabilir. Bu işlemler, çelik plakaların istenen özellikleri kazanmasını sağlar ve sonrasında kesilerek şekillendirilirler.

MIL-DTL-46100 (ARMOX ADVANCE)

Mekanik Özellikler:

Yüksek seviyede balistik koruma sağlamak için tasarlanmıştır. Bu çelik, kurşun, mermi ve şarapnel gibi tehditlere karşı yüksek direnç gösterir.

Yüksek darbe dayanımına sahiptir. Bu özellik, çelik plakaların aşınma ve yıpranmaya karşı dayanıklı olmasını sağlar.

Sert ve mukavemetli bir çeliktir. Bu özellik, çelik plakaların çeşitli hasarlara karşı dayanıklı olmasını sağlar.

Kimyasal Özellikler:

Yüksek mukavemetli çelikler sınıfına girer. Bu çelik, karbon, manganez, krom, molibden ve nikel gibi çeşitli elementlerin bir araya gelmesiyle üretilir.

İyi kaynaklanabilen bir çeliktir. Bu özellik, çelik plakaların birbirine kaynaklanarak büyük boyutlu zırh panelleri oluşturulmasını sağlar.

Yüksek aşınma direncine sahiptir. Bu özellik, çelik plakaların sürtünme ve darbelere karşı dayanıklı olmasını sağlar.

MIL-DTL-46100 gibi zırh çelikleri, çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak üretilir. Bu yöntemler arasında, sıcak haddeleme, soğuk haddeleme, termomekanik haddeleme ve sıcak

dövme gibi işlemler yer alabilir. Bu işlemler, çelik plakaların istenen özellikleri kazanmasını sağlar ve sonrasında kesilerek şekillendirilirler.

NATO üyesi ülkelerin askeri alandaki standartlarını belirleyen bir bildirimdir. Bu ülkeler ürettiği bütün askeri malzemeleri bu standartlara uymak zorundadır. Bu çalışmada balistik koruma seviyelerini gösteren STANAG 4569 standardına uygun olarak Penetratör (mühimmat) seçimi yapılmıştır.

STANAG 4569 standardı NATO tarafından belirlenmiş “Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçların Yolcuları için Koruma Seviyelerini gösteren bir standarttır. Tam adı NATO AEP-55 STANAG 4569’dur. Bu standart lojistik ve hafif zırhlı araçların koruma seviyesini belirlenmesi için sistem nitelikliliği ve kabul sürecini açıklamaktadır.

Ülkemizin içinde bulunduğu askeri ortam dikkate alınacak olursa NATO STANAG 4569 balistik standardı askeri maksatlı araçların zırhlandırılmasında en uygun standart olarak değerlendirilmektedir. Son dönemde ortaya çıkan ihtiyaç doğrultusunda ağırlıklı olarak faaliyet gösterilen tehdit ve koruma seviyeleri Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1. Nato Stanag 4569 seviyelere göre kinetik enerji tehditleri

STANAG 4569			
SEVİYE	KİNETİK ENERJİLİ TEHDİTLER		
	Mühimmat	Hedefe Vuruş Hızı	Hedefe Vuruş Açısı
1	5.56 mm x 45 M193	937 m/s $\pm$ ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
1	5.56 mm x 45 SS109	900 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
1	7.62 mm x 51 Nato Ball	833 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
2	7.62 mm x 39 API BZ	695 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
Özel Çözüm (2+)	7.62 mm x 51 M61 AP	830 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
3-a	7.62 mm x 54 R B32 API	854 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
Özel Çözüm (3a+)	7.62 mm x 63 AP	873 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
3-b	7.62 mm x 51 AP (WC core)	930 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
Özel Çözüm (3b+)	12.7 mm x 99 AP	830 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
4	14.5 mm x 114 API/B32	911 m/s ($\pm$ 20 m/s)	0° - 360°
5-a	25mm x 137 APDS-T	1258 m/s ($\pm$ 20 m/s)	$\pm$ 30°
5-b	25mm x 137 APFSDS-T	1336 m/s ($\pm$ 20 m/s)	$\pm$ 30°
6-a	30mm x 165 AP-T	810 m/s ($\pm$ 20 m/s)	$\pm$ 30°

Son dönemde asimetrik savaş ya da Asya tipi savaş denilen meskûn mahallerde yapılan operasyonlarda sıklıkla kullanılan anti materyal keskin nişancı tüfeklerinden (Şekil 8.2) ateşlenen zırh delici uçaksavar mühimmatları zırhlı araçlarda büyük tahribat yaratmaktadır.



Şekil 8.2. Ön planda, 14.5 mm Şer Portatif; Arka planda 12.7 mm Zagros silahları

12.7 mm × 99 API (.50 cal) mühimmat ateşlendiğinde 100 metrede 22 mm 321-375 HB sertlikteki çeliğe tam nüfuziyet sağlamaktadır. 12.7 mm x 99 AP-S (50 cal) (WC Core) mühimmat ateşlendiğinde 900 metrede 22 mm RHA zırh plakasına tam penetrasyon sağlanmaktadır.

Bu çalışmada NATO STANAG 4569 standardına uygun olarak Seviye 3 (+) Plus 12.7 x 99 mm AP mühimmatı seçilmiştir. Bu mühimmat Şekil 8.3'te gösterilmiştir (EK 1).



Şekil 8.3. 12.7 x 99 mm AP mühimmatı

12.7 x 99 mm NATO veya .50 BMG, M2 Browning makineli tüfeğinde kullanılmak üzere John Browning tarafından tasarlanmış bir fişektir. Makineli tüfekler ve anti-materyal keskin nişancı tüfeklerinde kullanılmaktadır. Bu kalibreyi kullanan en ünlü silahlar M2

Browning ve Barrett M82 olsa da birçok makineli ve anti-materyal keskin nişancı tüfeği bu kalibreyi kullanılmaktadır. Tablo 8.2.'de mühimmatın özellikleri verilmiştir [45].

Tablo 8.2. 12.7 mm x 99mm Fişek [M2 AP] mühimmatının özellikleri

Fişek Boyu	138.43 mm
Fişek Ağırlığı	~114 g
Hız (23.7m)	887 m/s1
Ortalama Basınç	Max. 4500 bar (P+3ss)
Dağılım (100 m)	X ve Y eksenindeki max. Std. Sapma 5,45 cm
Mermi Ağırlığı	42.87 g

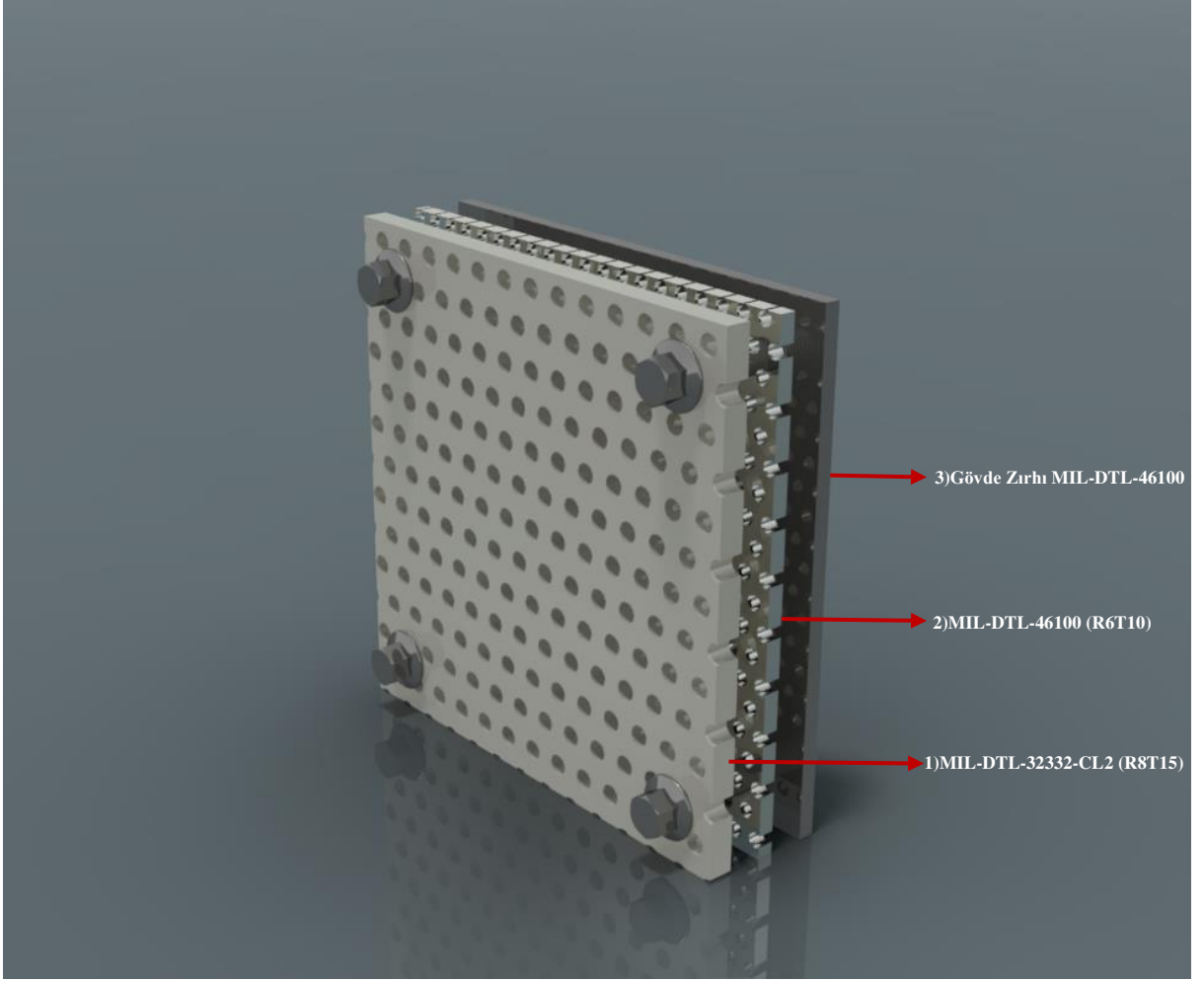
8.3 Test Numuneleri ve Konfigürasyonlar

Bu çalışmada kullanılan balistik test konfigürasyonlarını Tablo 8.3' de verilmiştir.

Tablo 8.3. Balistik test konfigürasyonu

	No	Birinci Konfigürasyon	İkinci Konfigürasyon	Üçüncü Konfigürasyon	Dördüncü Konfigürasyon
Plaka Kalınlığı	1	10 mm (MIL-DTL-32332-CL2)	6,5 mm (MIL-DTL-46100)	10 mm (MIL-DTL-32332-CL2)	6,5 mm (MIL-DTL-46100)
	2	6,5 mm (MIL-DTL-46100)	10 mm (MIL-DTL-32332-CL2)	6,5 mm (MIL-DTL-46100)	10 mm (MIL-DTL-32332-CL2)
	3	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm
Delik Çapı	1	8 mm	6 mm	8 mm	6 mm
	2	6 mm	8 mm	6 mm	8 mm
	3	-	-	-	-
Delik Arası Mesafe	1	15 mm	10 mm	15 mm	10 mm
	2	10 mm	15 mm	10 mm	15 mm
	3	-	-	-	-
Plakalar Arası Mesafe	-	14 mm	14 mm	24 mm	24 mm
Alansal Yoğunluk	-	104 kg/m ²	104 kg/m ²	104 kg/m ²	104 kg/m ²

8.3.1. Birinci konfigürasyon

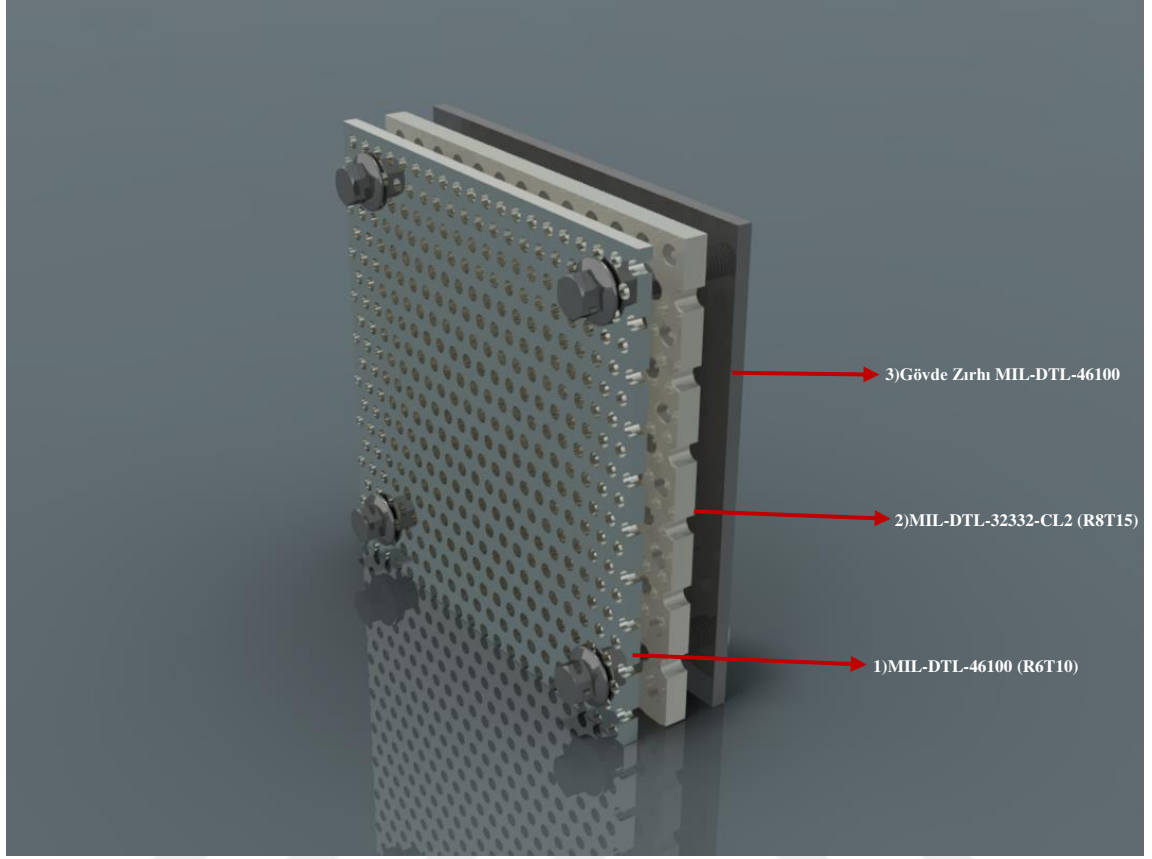


Şekil 8.4. Birinci zırh konfigürasyonu şematik görünümü

Birinci konfigürasyonda perfore zırh plakaları sırasıyla en önde 10 mm kalınlığında, delik çapı 8 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 15 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-32332-CL2, arkasına 6.5 mm kalınlığında, delik çapı 6 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 10 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-46100, gövde zırhı olarak 6.5 mm kalınlığa sahip MIL-DTL-46100 zırh plakaları dizilmiştir. Bu diziliş Şekil 8.4’ de gösterilmiştir. Zırh plakaları arasındaki mesafeleri (GAP) 14 mm olarak ayarlanmıştır.

Bağlantı elemanları dahil 104 kg/m^2 , bağlantı elemanları hariç 92 kg/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir.

8.3.2. İkinci konfigürasyon

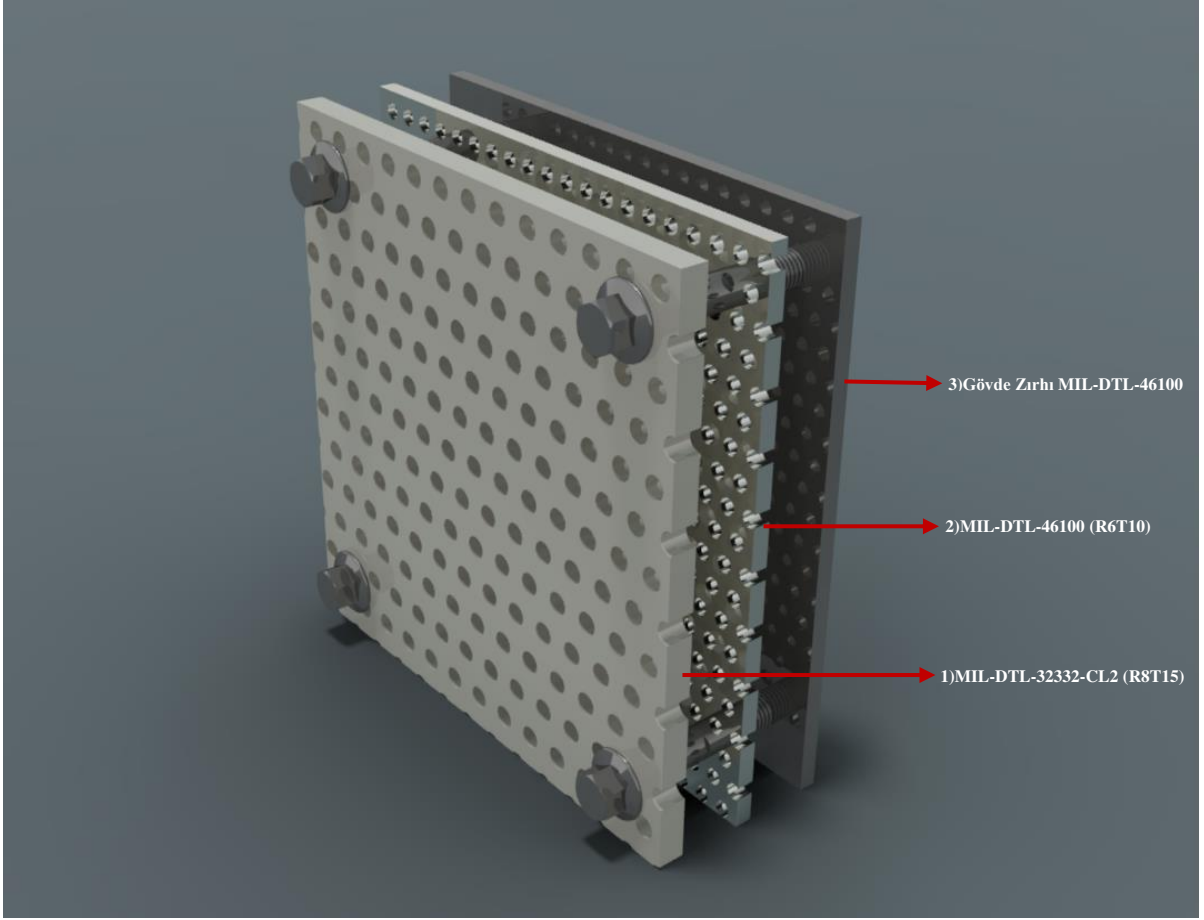


Şekil 8.5. İkinci zırh konfigürasyonu şematik görünümü

İkinci konfigürasyonda perfore zırh plakaları sırasıyla en önde 6.5 mm kalınlığında, delik çapı 6 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 10 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-46100, arkasına 10 mm kalınlığında, delik çapı 8 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 15 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-32332-CL2, gövde zırhı olarak 6.5 mm kalınlığa sahip MIL-DTL-46100 zırh plakaları dizilmiştir. Bu diziliş Şekil 8.5’ de gösterilmiştir. Zırh plakaları arasındaki mesafeleri (GAP) 14 mm olarak ayarlanmıştır.

Bağlantı elemanları dahil 104 kg/m^2 , bağlantı elemanları hariç 92 kg/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir.

8.4.2. Üçüncü konfigürasyon

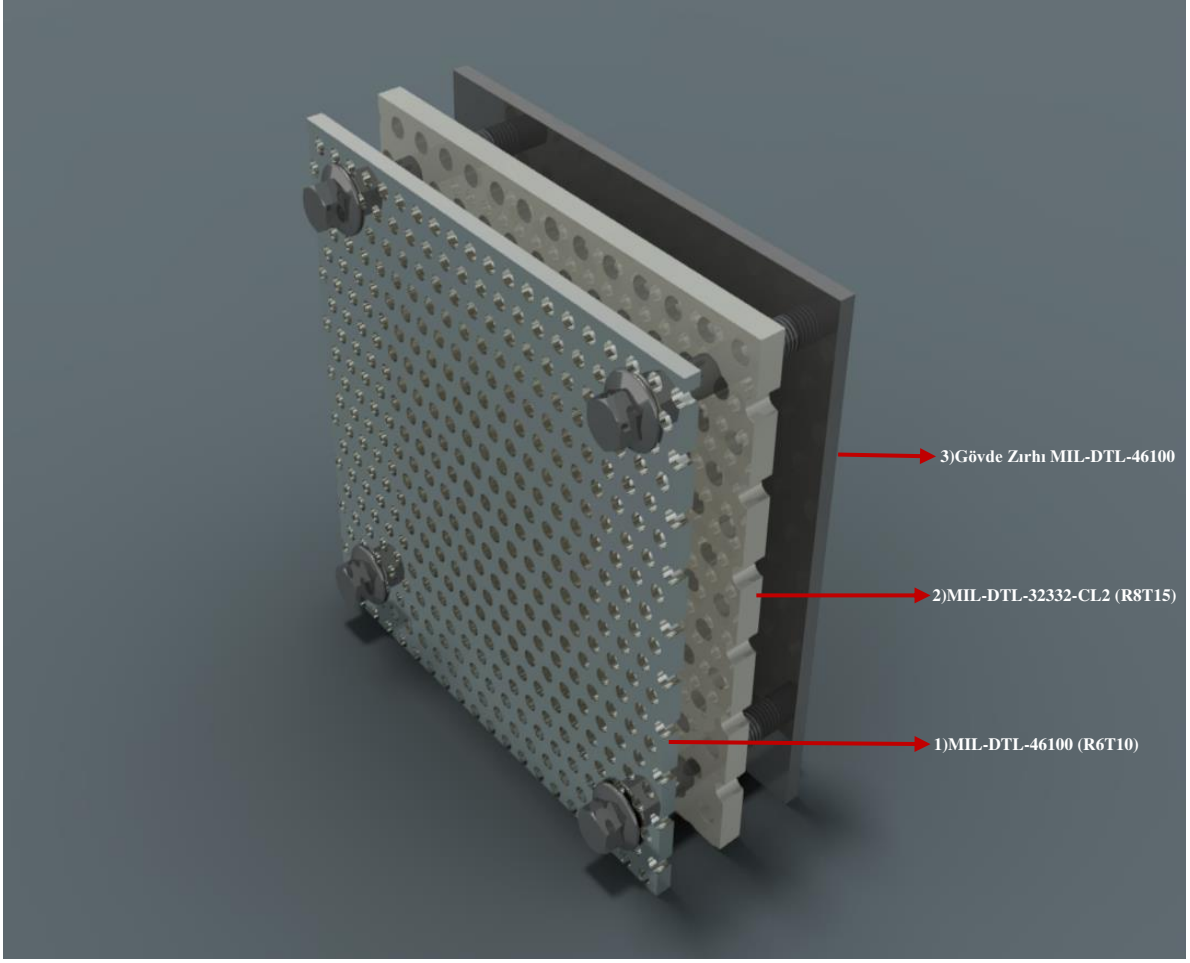


Şekil 8.6. Üçüncü zırh konfigürasyonu şematik görünümü

Üçüncü konfigürasyonda perfore zırh plakaları sırasıyla en önde 10 mm kalınlığında, delik çapı 8 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 15 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-32332-CL2, arkasına 6.5 mm kalınlığında, delik çapı 6 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 10 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-46100, gövde zırhı olarak 6.5 mm kalınlığa sahip MIL-DTL-46100 zırh plakaları dizilmiştir. Bu diziliş Şekil 8.6' de gösterilmiştir. Zırh plakaları arasındaki mesafeleri (GAP) 24 mm olarak ayarlanmıştır.

Bağlantı elemanları dahil 104 kg/m^2 , bağlantı elemanları hariç 92 kg/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir.

8.4.3. Dördüncü konfigürasyon



Şekil 8.7. Dördüncü zırh konfigürasyonu şematik görünümü

Dördüncü konfigürasyonda perfore zırh plakaları sırasıyla en önde 6.5 mm kalınlığında, delik çapı 6 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 10 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-46100, arkasına 10 mm kalınlığında, delik çapı 8 mm, delik merkezleri arasındaki mesafesi 15 mm olarak açılmış olan MIL-DTL-32332-CL2, gövde zırhı olarak 6.5 mm kalınlığa sahip MIL-DTL-46100 zırh plakaları dizilmiştir. Bu diziliş Şekil 8.7’ de gösterilmiştir. Zırh plakaları arasındaki mesafeleri (GAP) 24 mm olarak ayarlanmıştır.

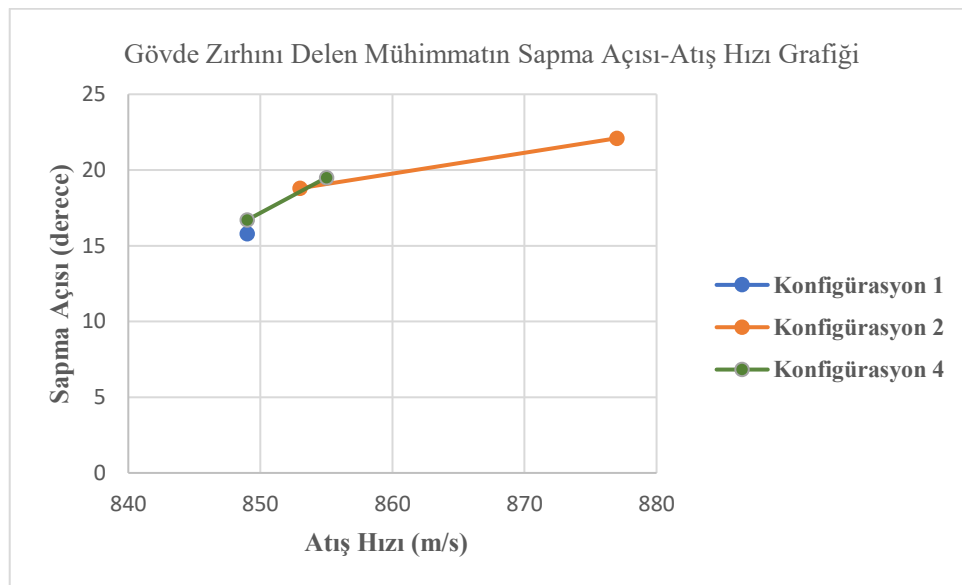
Bağlantı elemanları dahil 104 kg/m^2 , bağlantı elemanları hariç 92 kg/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir.

8.4 Elde Edilen Veriler ve Değerlendirme

Bu çalışmada elde edilen veriler Tablo 8.4' de verilmiştir.

Tablo 8.4. Elde edilen veriler

	Atış Sayısı	Birinci Konfigürasyon	İkinci Konfigürasyon	Üçüncü Konfigürasyon	Dördüncü Konfigürasyon
Atış Hızı	1	864 m/s	859 m/s	873 m/s	863 m/s
	2	852 m/s	877 m/s	861 m/s	855 m/s
	3	849 m/s	853 m/s	851 m/s	849 m/s
	4	-	844 m/s	-	-
Başarı Durumu	1	Delinmedi	Delinmedi	Delinmedi	Delinmedi
	2	Delinmedi	Delindi	Delinmedi	Delindi
	3	Delindi	Delindi	Delinmedi	Delindi
	4	-	Delinmedi	-	-
Sapma Açısı	1	-	-	-	-
	2	-	22,1° .Yukarı	-	19,5° Yukarı
	3	15,8° .Yukarı	18,8° Aşağı	-	16,7° Aşağı
	4	-	-	-	-



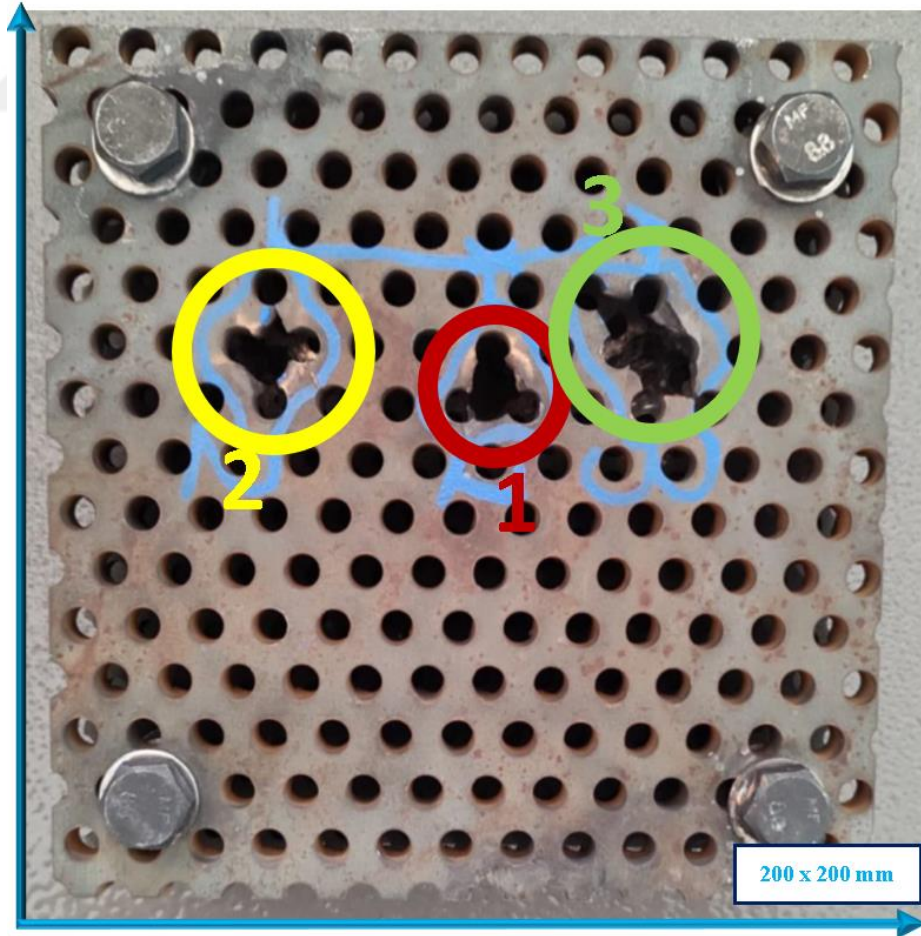
Şekil 8.8. Gövde zırhını delen mühimmatın sapma açısı-atış hızı.

Şekil 8.8’de verilen grafikte birinci, ikinci ve dördüncü konfigürasyonda gövde zırhını delen mühimmatın atış hızı ile sapma açısı arasındaki bağlantı verilmiştir. Üçüncü konfigürasyonda gövde zırhı delinmediği için bu grafikte yer almamaktadır. Grafikte görüldüğü gibi, atış hızı arttıkça sapma açısı da artmaktadır. İkinci ve dördüncü konfigürasyonda plaka kalınlığı, plaka sertliği, delik çapları, delikler arası mesafe ve plakalar arası mesafeleri aynı olduğundan bu sonuç daha doğru bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, zırh tasarımı ve mühimmat seçiminde dikkate alınabilir.

8.4.1. Birinci konfigürasyon

Her bir zırh konfigürasyonuna 12.7 x 99 mm NATO veya .50BMG (Browning Machine Gun), M2 Browning makineli tüfeği mühimmatı ile üç adet atış yapılmıştır. Birinci atış 864 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. İkinci atış 852 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. Üçüncü atış 849 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmiştir.

Yapılan bu balistik testler sonunca perfore ve gövde zırh plakalarında oluşan deformasyon durumları Şekil 8.9 ve Şekil 8.10’te verilmiştir.



Şekil 8.9. Birinci zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü



Şekil 8.10. Birinci zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü

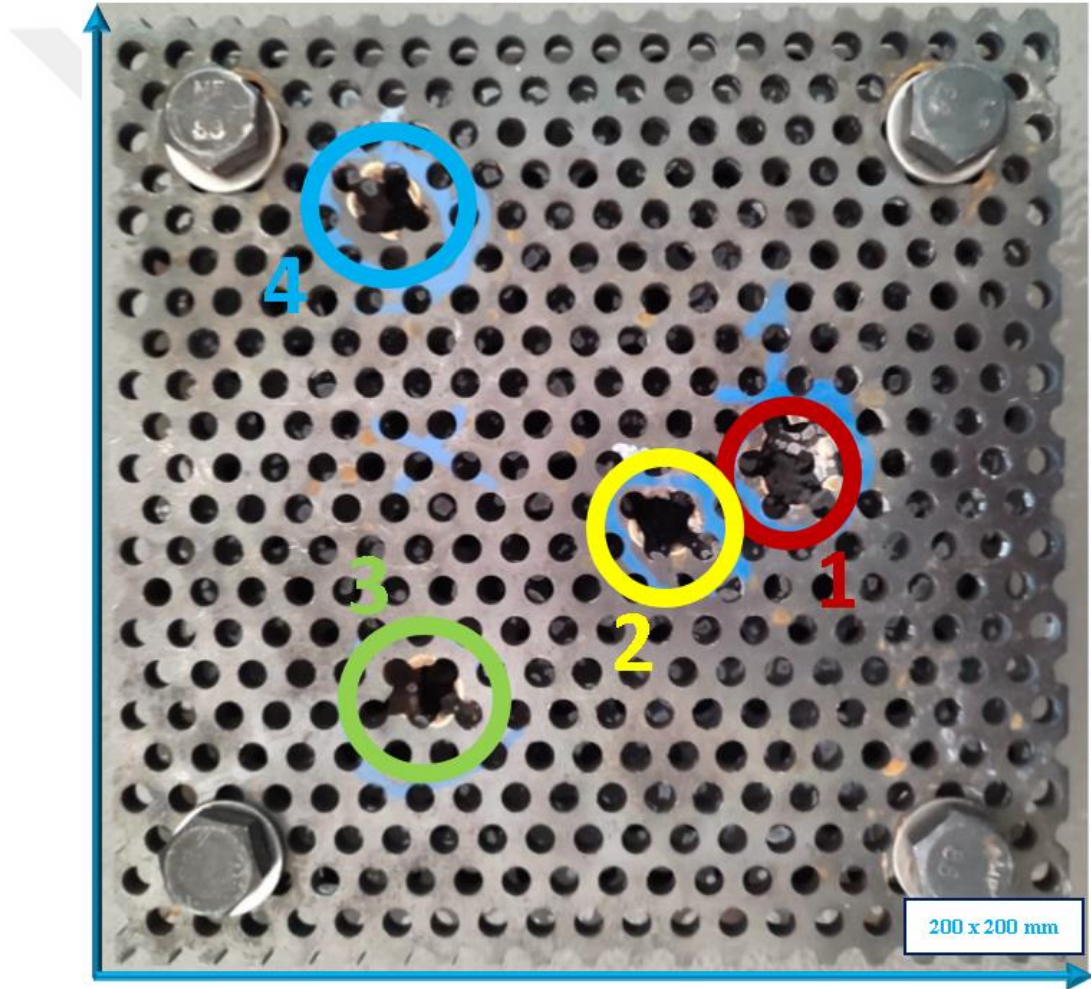
Üçüncü atışta mermi 0° ile perfore plakaya temas etmiştir. Mermi gövde zırhını delip çıktığında yaklaşık olarak ilk yörüngesinden yukarıya doğru $15,8^\circ$ lik açı saptığı gözlemlenmiştir.

Merminin vuruş lokasyonuna göre balistik performansın değiştiği değerlendirilmektedir. Örneğin; Birinci atış ile ikinci atış sonrasındaki hasar birbiriyle benzerdir. Mühimmatın benzer lokasyonlara çarptığı öngörülmektedir. Ancak üçüncü ve son atış hasara bakıldığında mühimmat farklı vuruş lokasyonuna denk gelmiş görünmektedir. Aynı zamanda mühimmatın birinci ve üçüncü atışlardaki temas ettikleri yerlerin birbirine yakın olması yani ilgili vuruş lokasyonundan kaynaklı zırhın delindiği düşünülmektedir. Zırh plakalarına yapılan balistik testlerde genelde bir ve iki numaralı kırılma şekli baskın görülürken sadece üç numaralı atışta mühimmat lokasyonuna bağlı deformasyonlar görülmektedir. Sonuçların gözlemlenmesi ile perfore zırhın mühimmat üzerinde yeterince eğme gerilmesi oluşturmamış ve mühimmatı bertaraf edemediği fikrine varılmıştır.

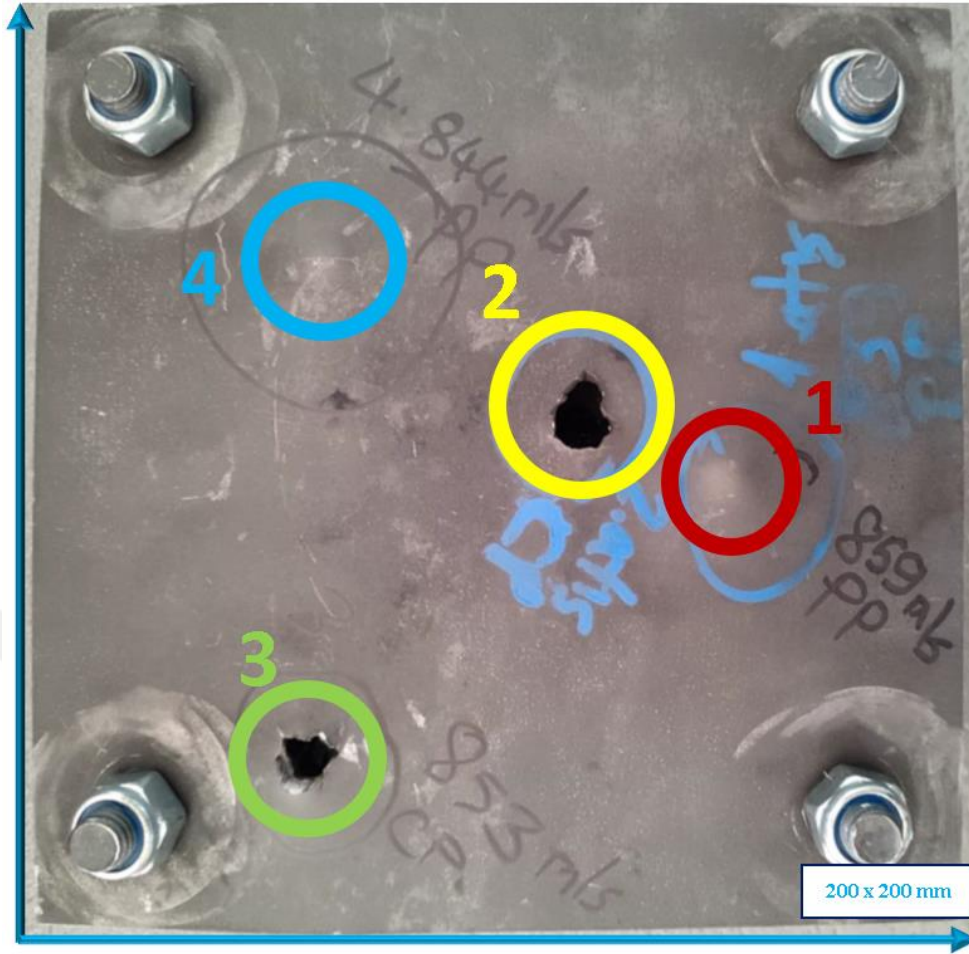
8.4.2. İkinci konfigürasyon

Zırh plakalarına 12.7 x 99 mm NATO veya .50BMG (Browning Machine Gun), M2 Browning makineli tüfeği mühimmatı ile dört adet atış yapılmıştır. Birinci atış 859 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. İkinci atış 877 m/s hız ile yapılmış olup birinci atışta merminin temas ettiği lokasyona yakın olduğundan plaka delinmiştir. Üçüncü atış 853 m/s hız ile yapılmış olup merminin ilk yörüngesi değişip çıkış lokasyonu bağlantı elemanına yakın olduğundan dolayı plaka delinmiştir. Dördüncü atış 844 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir.

Yapılan bu balistik testler sonunca perfore ve gövde zırh plakalarında oluşan deformasyon durumları Şekil 8.11 ve Şekil 8.12’de verilmiştir.



Şekil 8.11. İkinci zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü



Şekil 8.12. İkinci zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü

İkinci ve üçüncü atışta mermi 0° ile perfore plakaya temas etmiştir. Mermi gövde zırhını delip çıktığında yaklaşık olarak ilk yörüngesinden ikinci atışta $22,1^\circ$ yukarıya, üçüncü atışta aşağıya doğru $18,8^\circ$ ’lik açı saptığı gözlemlenmiştir.

Yapılan balistik testte dört atış gerçekleştirilmiştir. Bu atışların ikinci ve dördüncü atışlar zırhı deldiği gözlemlenmiştir. İlk testteki olay yine gerçekleşmiş ve birinci ile ikinci atış sonrasında mühimmatın temas ettiği lokasyonun, dördüncü atışta ise mühimmat bağlantı elemanına yakınına temas ettiğinden dolayı zırh plakasının delindiği düşünülmektedir.

Mühimmatın perfore zırh plakası üzerinde oluşturduğu deformasyonlar Şekil 8.11 ve Şekil 8.12’de gösterilmiştir. Zırh plakaları ile yapılan balistik testlerde genelde görülen kırılma şekilden farklı bir deformasyon gözlemlenmiştir. Mühimmat perfore plakaya temas ettikten sonra eksenini değiştirmiş olduğu oluşan deformasyondan anlaşılmaktadır. Bu durumda zırh plakasının üzerinde açılmış deliklerin görevini yerine getirdiği gözlemlenmiştir.

Perfore zırhlar temelde mühimmatta eğme gerilmeleri ve açısal yörünge değişimleri oluşturarak plakalarda oluşan delme derinlikleri azaltmaktadır. Perfore zırhlar ilave zırh

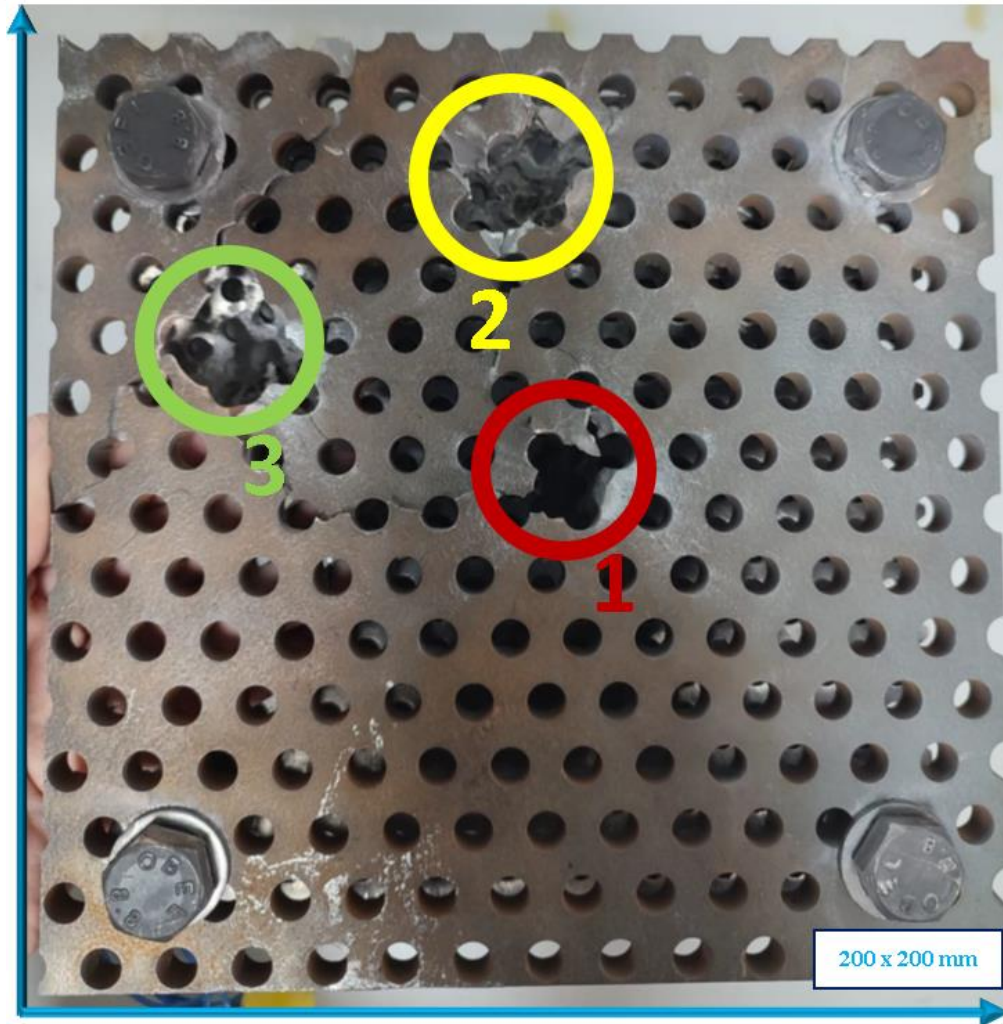
olarak da mekanik bağlantılar yardımı ile montaj ve demontaj olarak aracın gövdesini oluşturan ana zırha eklenebilir.

8.4.3. Üçüncü konfigürasyon

Zırh plakalarına 12.7 x 99 mm NATO veya .50BMG (Browning Machine Gun), M2 Browning makineli tüfeği mühimmatı ile üç adet atış yapılmıştır. Birinci atış 873 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. İkinci atış 861 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. Üçüncü atış 851 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir.

Yapılan bu balistik testler sonunca perfore ve gövde zırh plakalarında oluşan deformasyon durumları ve atış öncesi görünümü Şekil 8.13, Şekil 8.14’de verilmiştir.

Üçüncü konfigürasyon en başarılı test olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.13.Üçüncü zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü



Şekil 8.14. Üçüncü zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü

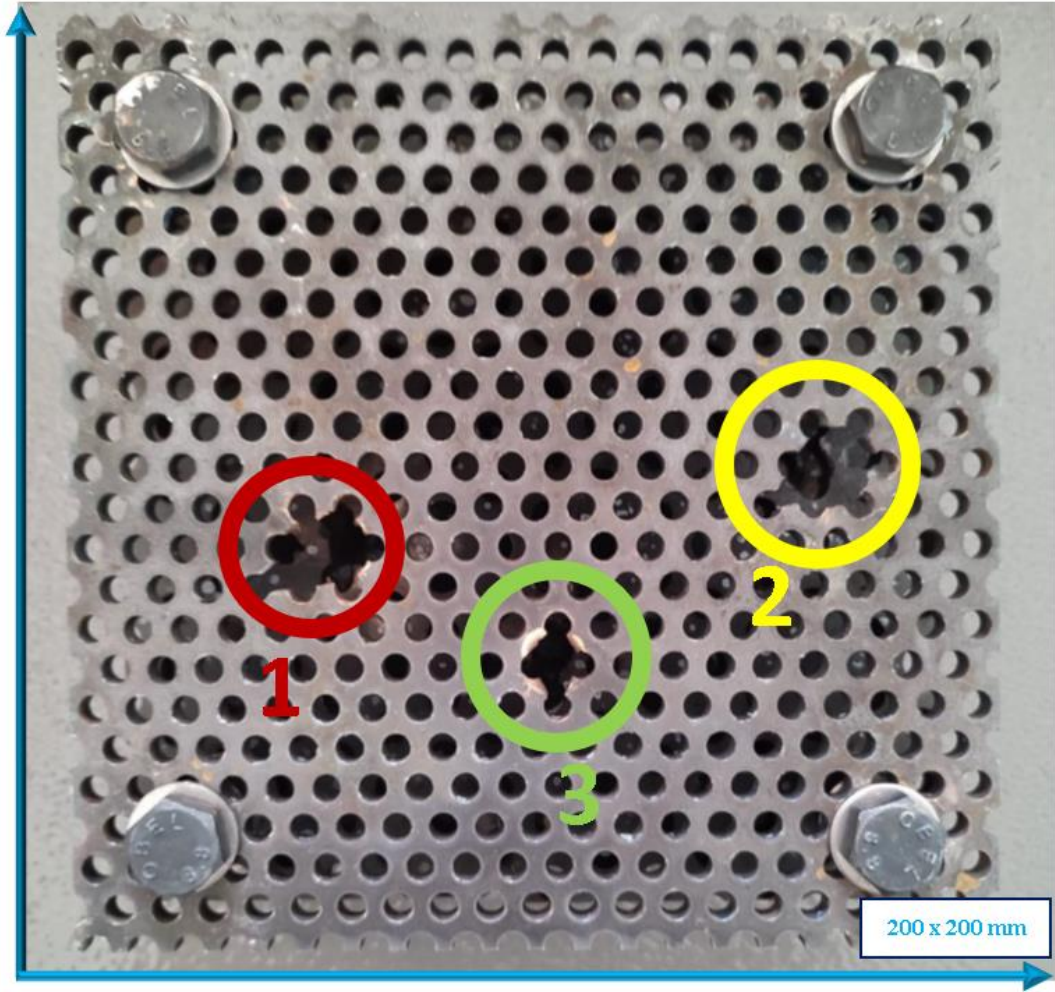
Plakaların bu dizilişinin koruyuculuğunun yüksek olduğu birinci konfigürasyonda zaten gözlemlenmişti. Bu konfigürasyonda farklı olarak plakalar arası mesafe 10 mm daha artırılarak 24 mm'ye çıkarılıp, temas sonrasında mühimmatın ilk yörüngesinin değişmesi ve gövde zırh plakasının delinmemesi amaçlanmıştır. Balistik test sonrasında bu amaç gerçekleşmiştir. AP mühimmatının delik köşelerine çarptığından dolayı ve plakalar arası mesafenin artması ile merminin yörüngesinin değiştiği, saptırdığı ve bükülme gerilimi nedeniyle mermi göbeğinin kırılmasına sebep olduğu gözlemlendi.

Perfore zırhlar merminin çekirdeğinde eğilme gerilmelerine neden olurlar. Teorik olarak, bir mermi perfore zırh plakasının üzerine açılmış olan bir deliğin kenarına çarptığı zaman, temas eden mermi çekirdeğini kırmak için eğilme gerilmeleri oluşturur veya en azından merminin ilk yörüngesinden saptırır, böylece merminin delme kapasitesi azaltılır. Çekirdek genellikle yüksek sertlikte çelikten meydana geldiği için sünekliği düşüktür bu nedenle çarpma anında oluşan eğilme gerilmeleri çekirdeğin kırılmasına sebep olur. Bu durum, merminin delme ihtimalini düşürerek bu parçaların nispeten daha ince bir zırhla durdurulabilmelerini sağlar.

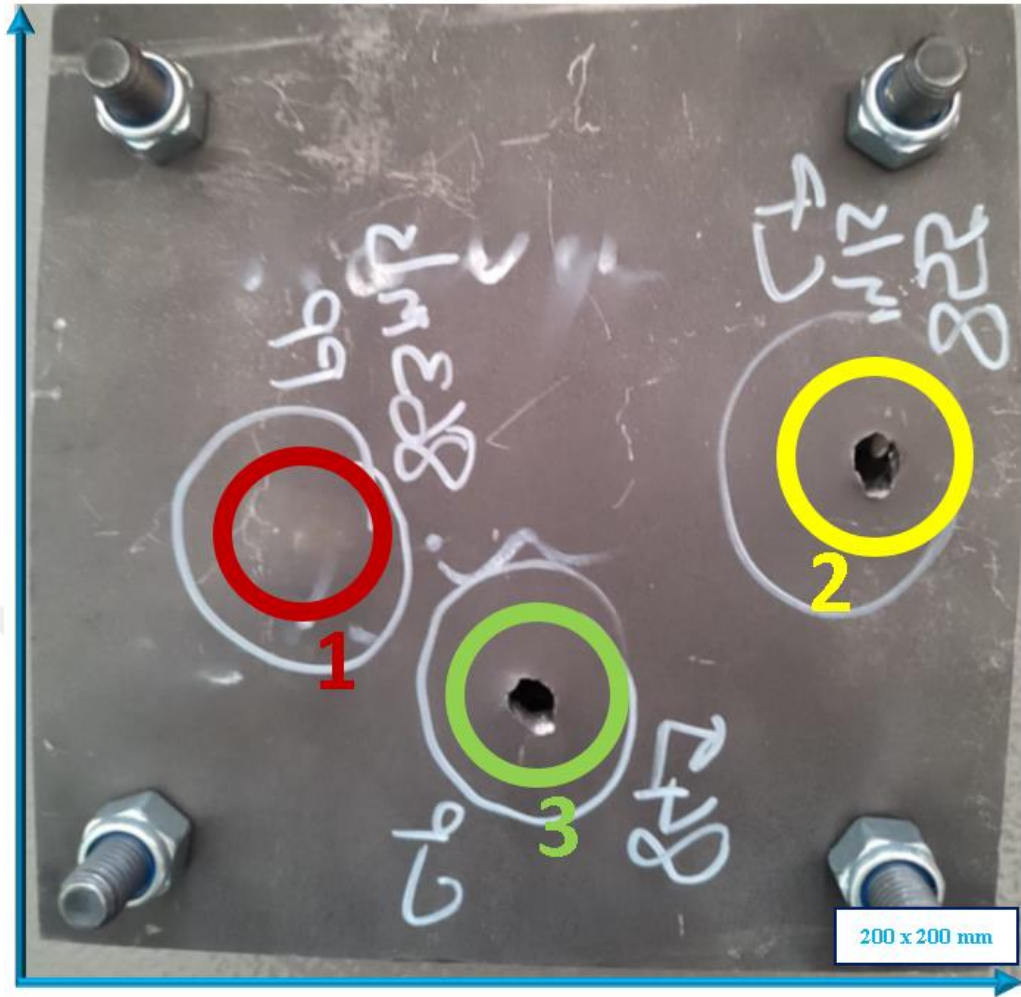
8.4.4. Dördüncü konfigürasyon

Zırh plakalarına 12.7 x 99 mm NATO veya .50BMG (Browning Machine Gun), M2 Browning makineli tüfeği mühimmatı ile üç adet atış yapılmıştır. Birinci atış 863 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmemiştir. İkinci atış 855 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmiştir. Üçüncü atış 849 m/s hız ile yapılmış olup plaka delinmiştir.

Yapılan bu balistik testler sonunca perfore ve gövde zırh plakalarında oluşan deformasyon durumları ve atış öncesi görünümü Şekil 8.15, Şekil 8.16’te verilmiştir.



Şekil 8.15. Dördüncü zırh konfigürasyonu önden atış sonrası görünümü



Şekil 8.16. Dördüncü zırh konfigürasyonu arkadan atış sonrası görünümü

İkinci ve üçüncü atışta mermi 0° ile perfore plakaya temas etmiştir. Mermi gövde zırhını delip çıktığında yaklaşık olarak ilk yörüngesinden ikinci atışta $19,5^\circ$ yukarıya, üçüncü atışta aşağıya doğru $16,7^\circ$ lik açı saptığı gözlemlenmiştir.

Merminin temas lokasyonuna göre performansın değiştiği yine gözlemlenmiştir. Bu balistik test de zırh plakaların sıralanışı ve aralarındaki mesafeye göre incelendiğinde en başarısız balistik test olduğu gözlemlenmiştir.

Mühimmatın perfore plakalar üzerinde oluşturduğu deformasyon yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. 6.5 mm kalınlığındaki MIL-DTL-46100 perfore zırh plakası mühimmatta eğme gerilmesi ve açısal yörünge değişimi oluşturamamıştır ve gövde zırh plakasını delinmesine sebep olmuştur.

9. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, MIL-DTL-46100 ve MIL-DTL-32332-CL2 zırh çelikleri kullanılarak dört farklı konfigürasyonun balistik performansları incelenmiştir. MIL-DTL-46100 ve MIL-DTL-32332-CL2 zırhların kalınlıkları, delik çapları, delik merkezleri arasındaki mesafeleri ve zırh plakaları arasındaki mesafeleri (GAP) değiştirilerek balistik testler yapılmış ve balistik performans etkileri incelenmiştir.

Balistik testler, 12.7 x 99 mm AP mühimmatı kullanılarak, hedef yüzeye 90 (NATO) derece açıyla (Dik doğrultuda) gelecek şekilde 13 adet atış gerçekleştirilmiştir. NATO Standardı STANAG 4569'a göre Tablo 8.2'de gösterilen Seviye 3+ tehdidine karşı bu numunenin çoklu atışa karşı direnç durumları incelenmiş ve perfore plakaların delik çapının, delikler arası mesafenin, plakalar arası uzak durma mesafesinin, perfore plaka malzemesinin ve plaka kalınlığının balistik performans etkileri araştırılmıştır. Bu parametrelerin incelenmesinde her bir parametre için sadece iki farklı değer kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin ışığında, Tablo 8.4;

GAP mesafesi

Bu çalışmada, birinci ve üçüncü konfigürasyonlarda plakaların özellikleri aynı kalmış, ancak GAP mesafeleri 14 mm'den 24 mm'ye çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, plakalar arasındaki mesafenin artırılması, mühimmat çekirdeğinin perfore zırh plakalarından geçerken parçalanarak daha geniş bir alana yayılmasına neden olmuştur. Bu da penetrasyon enerjisinde bir azalmaya yol açmıştır. Sonuç olarak, GAP mesafesinin artırılmasının penetrasyon olasılığını azalttığı tespit edilmiştir.

Delikler arası mesafe

Konfigürasyonlarda, delikler arası mesafe 15 mm ve 10 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda, bu mesafenin plakaların dayanıklılığına ve darbe emme kapasitesine etki ettiği gözlemlenmiştir. Delikler birbirine çok yakınsa, plakanın darbe emme kapasitesinin azaldığı ve dayanıklılığının düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, darbe noktasındaki enerjinin delikler arasında az dağılması ve plakanın genelinde yoğunlaşması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Delikler arasındaki malzeme miktarının azalması, plakanın kolayca delinmesine neden olmaktadır.

Delik çapı

Konfigürasyonda, delik çapları 8 mm ve 6 mm olarak açılmıştır. Plakaların yerleri değiştirildiğinde, mühimmatın ilk zırh paneline penetre olduğu durumda yapılan

karşılaştırmalar sonucunda, daha büyük delik çaplarının darbe enerjisinin deliklerin çevresinde daha yoğunlaşmasına neden olduğu ve bu nedenle plakanın dayanıklılığının düştüğü ve darbe emme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Aksine, daha küçük delik çaplarının plakanın dayanıklılığını arttırdığı ve darbe enerjisini daha iyi dağıttığı tespit edilmiştir.

Plaka sertliği

Daha yüksek sertlikteki perfore zırh plakasının önde kullanıldığında, darbe enerjisinin daha iyi emildiği ve plakanın dayanıklılığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, önde daha yüksek sertlikteki plakalar kullanıldığında, ikinci sırada yer alan plakaların darbe emme kapasitesi daha az önemli hale gelmektedir. Ancak, yine de ikinci sıradaki plakaların yeterli bir sertliğe sahip olması önemlidir, çünkü darbe enerjisinin tamamı önde bulunan plaka tarafından emilemez ve ikinci sıradaki plakanın da bir miktar darbeyi emmek zorunda olduğu belirlenmiştir.

Plaka kalınlığı

Kalın perfore zırh plakaları, darbelere karşı daha iyi koruma sağlayabilirler. Bu plakalar, darbe enerjisini daha iyi absorbe eder ve etkisini daha iyi dağıtır. Ancak, daha kalın plakalar aynı zamanda daha ağırdır ve bu nedenle, taşıma kapasitesi veya aracın hareket kabiliyeti azalabilir. Daha ince perfore plakalar ise daha hafiftir. Ancak, daha ince plakalar darbe enerjisini daha az absorbe edebilirler ve koruma seviyeleri daha düşük olabilir. Perfore plaka kalınlığı, koruma seviyesi ve hareket kabiliyeti arasında bir denge kurmak için dikkatle seçilmelidir. Kullanım amacına ve risk seviyesine bağlı olarak, koruma ve hareket kabiliyeti arasında bir denge sağlamak için kalın ve ince plakalar seçilebilir.

Bu çalışmada, balistik testler kullanılarak belirtilen durumların atış hızları tarafından da etkilendiği belirlenmiştir. Şekil 8.8'deki grafik incelendiğinde, atış hızının artmasıyla birlikte sapma açısının da arttığı gözlemlenmiştir. Mühimmat deliğinin çevresine, iki delik arasına ve üç delik arasına temasında sapma durumunu etkilediği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Perforated Armour Protection – IMPAS® (23.10.2013).
- [2] Balos, S., Grabulov, V., Sidjanin, L., Pantic M., Materials and Design, Radisavljevic, I. Geometry mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application., 31, 2916-2924., (2009).
- [3] Mishra, B., Jena, P.K., Ramankrishna, B., Mahdu, V., Bhat, T.B., Gupta, N.K., International Journal of Impact Engineering, Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel., 44, 17-28., (2012).
- [4] Mishra, B., Ramankrishna, B., Jena, P.K., Kumar, S.V., Mahdu, V., Materials and Design, Gupta, NK. Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact., 43, 17-24., (2013).
- [5] Radisavljevic, I., Balos, S., Nikacevic, M., Sidjanin, L., Materials and Design, Optimization of geometrical characteristics of perforated plates., 49, 81-89., (2013).
- [6] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A., International Journal of Impact Engineering, Ballistic penetration of steel plates. 22, 855-886., (1999).
- [7] Buchar, J., Voldrich, J., Rolc, S., Lisy, J., Proceedings of 20th International Symposium on Ballistics, Ballistic performance of dual hardness armor. Orlando, p.23-27., (2002).
- [8] Borvik, T., Hopperstad, O.S., Berstad, T., Langeseth, M., Numerical simulations. International Journal of Impact Engineering, Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses., 27, 37-64., (2002).
- [9] Khoda-rahmi, H., Fallahi, A., Liaghat, G.H., International Journal of Solids and Structures, Incremental deformation and perforation analysis of deformable projectile into semi-infinite target 43, 569-582., (2006).

- [10] Teng, X., Wierzbicki, T., Huang, M., International Journal of Impact Engineering, Ballistic resistance of double-layered armor plates. 35, 870-884., (2008).
- [11] Rosenberg, Z., Dekel, E., International Journal of Solids and Structures, On the deep penetration and plate deformation by rigid projectiles., 46, 4619-4180., (2009).
- [12] Borvik, T., Dey, S., Clausen, A.H., International Journal of Impact Engineering, Perforation resistance of five different highstrength steel plates subjected to small arms projectiles. 36, 948-964. (2009).
- [13] Flores-Johnson, E.A., Saleh, M., Edwards, L. International Journal of Impact Engineering, Ballistic performance of multilayered ceramics plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. 38, 1022-1032. (2011).
- [14] Kılıç N., Bedir S., Erdik A., Ekici B., Taşdemirci A., Güden M. Ballistic Behavior of High Hardness Perforated Armor Plates against 7.62mm Armor Piercing Projectile. 63, 427–438. (2014).
- [15] R. A. Howell, J. S. Montgomery. Advancements In Steel For Weight Reduction Pf P900 Armor Plate. Missouri University For Science And Technology Rolla. MO 6540. (2001).
- [16] Tianning C., Qinghua Q., Wenmin Y., Tao W., Jianxun Z. Ballistic Resistance Of Novel Amorphous Alloy Reinforced Perforated Armor. State Key Laboratory For Strength And Vibration Of Mechanical Structures, Department Of Engineering Mechanics. 710049. China. (2020).
- [17] A. Mubashar, E. Uddin, S. Anwar, N. Arif, S. Ballistic Response Of 12.7 mm Armor Piercing Projectile Against Perforated Armour Developed From Structural Steel. Insitltution Of Mechanical Engineers. (2018).
- [18] Zherui G., Weinoug C. Dimensionless Parameters For The Perforation Of Ductile Plates By Armor Piercing Rounds. International Journal Of Impact Engineering. USA. (2021).
- [19] Teresa F., Norbert F. Influence Of Add-On Perforated Plates On The Protective Performance Of Light Weight Armour Systems. Problems Of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering. DOI:10.5604/01.30001.0011.7177. (2016).

- [20] Wojciech B., Pawel Z., Michal G., Jaroslaw M., Lech S., Barbara J., Mariusz M. Protection Effectiveness Of Perforated Plates Made Of High Strength Steel. Impact Engineering. S0734-74X(18)30101-5. (2018).
- [21] Francisco Javier Ramire Gil, Emilio Carlos Nelli Silva, Wilfredo Montealegre Rubio. Through Thickness Perforated Steel Plates Optimized For Ballistic Impact Applications. Materials & Design. 110257. Brazil. (2021).
- [22] Adam W., Pawel Z. Add-on Passive armour for light armoured vehicles protection. Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia.
- [23] Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 500 Ürün açıklaması, <https://industeel.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2021/02/DS-PROTECTION-MARS-500-EN-2021.pdf> (02.2021).
- [24] Donea, J., Huerta, A., Phontot, J., Ferran, A.R., Encyclopedia of Computational Mechanics Vol1, John Wiley&Sons, Arbitrary Lagrangian Eulerian Methods, (2004).
- [25] Bhat, A. R. Finite element modeling and dynamic impact response evaluation for ballistic applications. M.Sc Thesis, Mumbia University, India. (2007).
- [26] Zukas, J.A. John Wiley and Sons. Inc High Velocity Impact Dynamics. New York, (1990).
- [27] Özşahin, E. Response Of Aluminum Plates Subjected To High Velocity Impact Loads, Ph.D. Thesis, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 11-42. (2008).
- [28] Rosenberg, Z., Dekel, E. Terminal Ballistics, Heidelberg, Elsevier. (2012).
- [29] Elastic wave propagation in materials, Encyclopedia of materials: Science and Technology. Mevcut: <http://www.scribd.com/doc/166770796/Elastic-Wave-Propagation-in-aterials> (23.10.2013).
- [30] Bangash, M.Y.H. Shock, Elsevier, Impact and Explosion Structural Analysis and Design, Heidelberg, (2009).

- [31] Kasonde, M. Optimising the Mechanical Properties and Microstructure of Armored Steel Plate in Quenched and Tempered Conditions, M.S. Thesis, University of Pretoria, Metallurgical Engineering, Hatfield, South Africa, 1-3. (2006).
- [32] G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, Effect of air gap and order of plates on ballistic resistance of two layered armor. Theoret. Appl. Fract. Mech. 31:3, 233–241. (1999).
- [33] P. Elek, S. Jaramaz, D. Mickovic. Modeling of perforation of plates and multi-layered metallic targets. Int. J. Solids Struct. 42:3–4, 1209–1224. (2005).
- [34] ARMOX Protection Plate, Armox 500T Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=ACD3681501884BA2B09D742FE19A0F7F&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [35] ARMOX Protection Plate, Armox 600T Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=536790C1DE7542739D0782FC748EB295&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [36] ARMOX Protection Plate, Armox Advance Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=53D6E1A71424472195D91564577A0F3B&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [37] SSAB Protection Plate, Ramor 500 Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=64DCB50C93D4458187619F4379C9BBA5&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [38] SSAB Protection Plate, Ramor 550 Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=3A1405D3563A4CB9A13A10B3A6D59A4D&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [39] SSAB Protection Plate, Ramor 600 Ürün açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=264986C3DBA84154B05B0EEDC1880989&language=tr-TR> (19.04.2017)
- [40] Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 600 Ürün açıklaması, <https://industeel.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2021/02/DS-PROTECTION-MARS-600-EN-2021.pdf> (02.2021).

- [41] Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 650 Ürün açıklaması, <https://industeel.arcelormittal.com/news/fichier/ds-protection-mars-650-en-2021/> (02.2021).
- [42] ThyssenKrupp Steel Europe, Secure 500 Ürün açıklaması, https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/grobblech_migration/secure/werkstoffblaetter_4/secure_500_wbl_1943_englisch.pdf (01.2016).
- [43] ThyssenKrupp Steel Europe, Secure 600 Ürün açıklaması, https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/grobblech_migration/secure/werkstoffblaetter_4/secure_600_en.pdf (06.2011).
- [44] Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş. 12.7 mm x 99 Fişek (M2 AP) Mühimmatı Ürün Bilgileri. [https://urunler.mke.gov.tr/Urunler/12.7-mm-x-99-Fi%C5%9Fek-\(M2-AP\)/30/443](https://urunler.mke.gov.tr/Urunler/12.7-mm-x-99-Fi%C5%9Fek-(M2-AP)/30/443) (2021).

EKLER

EK-1: 12.7 X 99 AP MÜHİMMATLARI

12.7 mm x 99 API (.50 cal)



PROJECTILE WEIGHT	Approx. 42 g
MUZZLE VELOCITY	903 m/s
MAX. DISPERSION AT 550 m	SD ≤ 300 mm
PENETRATION	22 mm (321-375 HB) at 100 m
TRACER	N/A
SERVICE TEMPERATURE	-54°C to +63°C
SAFETY TEMPERATURE	-54°C to +71°C

12.7 mm x 99 API - T (.50 cal)



PROJECTILE WEIGHT	Approx. 40 g
MUZZLE VELOCITY	903 m/s
MAX. DISPERSION AT 550 m	SD ≤ 400 mm
PENETRATION	22 mm (321-375 HB) at 100 m
TRACER	Visible From 200 m to 1500 m
SERVICE TEMPERATURE	-54°C to +63°C
SAFETY TEMPERATURE	-54°C to +71°C

12.7 mm x 99 AP - S (.50 cal)



PROJECTILE WEIGHT	Approx. 47 g
MUZZLE VELOCITY	Approx. 893 m/s
MAX. DISPERSION AT 550 m	Grade A ≤ 1.8 MOA / Grade B SD ≤ 200 mm
PENETRATION	22 mm (321-375 HB) at 100 m
TRACER	Visible From 200 m to 1500 m
SERVICE TEMPERATURE	-54°C to +63°C
SAFETY TEMPERATURE	-54°C to +71°C

12.7 mm x 99 API – S (.50 cal)



PROJECTILE WEIGHT	Approx. 47 g
MUZZLE VELOCITY	Approx. 893 m/s
MAX. DISPERSION AT 550 m	Grade A ≤ 1.8 MOA / Grade B SD ≤ 200 mm
PENETRATION	22 mm RHA at 0° at 900 m
TRACER	N/A
SERVICE TEMPERATURE	-54°C to +63°C
SAFETY TEMPERATURE	-54°C to +71°C