

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANA BİLİM DALI
BALİSTİK VE ZIRH TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

ZIRH SİSTEMLERİNDE FARKLI MEKANİK
ÖZELLİKLERE SAHİP ÖN YÜZ SERAMİK
MALZEMELERİN BALİSTİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSA TALHA İZGİ
2081904

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ONUR ALTUNTAŞ

ANKARA
HAZİRAN 2023

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANA BİLİM DALI
BALİSTİK VE ZIRH TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

**ZIRH SİSTEMLERİNDE FARKLI MEKANİK
ÖZELLİKLERE SAHİP ÖN YÜZ SERAMİK
MALZEMELERİN BALİSTİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MUSA TALHA İZGİ
2081904**

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ONUR ALTUNTAŞ

**ANKARA
HAZİRAN 2023**

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANA BİLİM DALI
BALİSTİK VE ZIRH TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

**ZIRH SİSTEMLERİNDE FARKLI MEKANİK
ÖZELLİKLERE SAHİP ÖN YÜZ SERAMİK
MALZEMELERİN BALİSTİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MUSA TALHA İZGİ
2081904**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09.06.2023

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.07.2023

Tez Oy birliği ile başarılı bulunmuştur.

	Unvanı Ad Soyad	İmza
Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ	
Jüri Üyeleri	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU	
	Dr. Öğr. Üyesi Öğ. Alb. Ayhan AYTAÇ	

**ANKARA
HAZİRAN 2023**

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Kuramsal Temeller, d) Literatür Taraması, e) Materyal ve Metot, f) Deney Sonuçları ve Öneriler kısımlarından oluşan toplam 98 sayfalık kısmına ilişkin, 09/06/2023 tarihinde şahsım tarafından "Turnitin" adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre 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.

Musa Talha İZGİ

09/06/2023

ETİK BEYAN

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Musa Talha İZGİ

09/06/2023

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında bana yol gösteren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Balistik testlerin gerçekleştirilmesi için Balistik Koruma Merkezi altyapısından faydalanma imkanı sunan ROKETSAN A.Ş.'ye ve tez çalışmamın başlangıcından tamamlanmasına kadar kıymetli akademik bilgisinden ve derin mesleki tecrübesinden faydalandığım her konuda bana destek olan Sayın Dr. Ahmet Kaan TOKSOY başta olmak üzere ve kıymetli çalışanlarına; Seramik plakaların tedarikinde sağladıkları katkılar nedeniyle Sayın Murat GİRAY ve CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye; bu tezi tamamlayamasam sanki yüklü bir borcun altına girecekmişçesine beni teşvik eden değerli çalışma arkadaşım Tolga COŞKUN başta olmak üzere Savunma Sanayi Başkanlığı Tank Müdürlüğü güzide personeline teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Selma İZGİ ve babam Ramazan İZGİ'ye, yüksek lisans eğitimim boyunca her aşamada yanımda olan, zorlandığım zamanlarda beni teşvik eden, bana moral veren, bunlar işe yaramazsa şiddetin her türlüsünü uygulamaktan geri durmayan sevgili eşim Cana Nur İZGİ'ye ve hayatımıza huzur (!) katan güzel evlatlarım Muhammed Ali ve Musa Tarık'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZGÜNLÜK RAPORU	
ETİK BEYAN	
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR	XIII
ÖZ	XIV
ABSTRACT	XVI
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER	5
2.1.Balistik	5
2.1.1.İç Balistik	5
2.1.2.Namlu Ağzı Balistiği	5
2.1.3.Dış Balistik	5
2.1.4.Terminal Balistik	6
2.1.5.Yara Balistiği	6
2.2.Zırh Sistemleri	6
2.2.1.Pasif Zırh Sistemleri	7
2.2.2.Reaktif Zırh Sistemleri	13
2.3.Zırh Malzemeleri	16
2.3.1.Metaller	17
2.3.2.Seramikler	21
2.3.3.Polimerler	24
2.4.Hasar Mekanizmaları	25
2.4.1.Seramik Ön Yüzlü Zırh Sistemleri	27
3.LİTERATÜR TARAMASI	31
3.1.Seramik Ön Yüzlü Zırh Sistemlerinde Tasarım Parametreleri	31
3.1.1.Çerçeveleme/Kaplama	31
3.1.2.Zırh Seramiği Geometrisi	33
3.1.3.Vuruş Yüzeyi Geometrisi	36
3.1.4.Plaka Kalınlığı	39
3.1.5.Birleştirme Metodu	40
3.1.6.Katmanlı Yapı	43
3.2.Literatür Özeti ve Değerlendirmesi	48
4.MATERYAL VE METOT	52
4.1.Materyal	52
4.1.1.Test Bileşenleri	52
4.1.2.Balistik Test Düzeneği	57
4.2.Metot	59
5.DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	61
6.SONUÇ VE ÖNERİLER	74
KAYNAKÇA	76
ÖZGEÇMİŞ	81

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1: Zırh Sistemleri.	7
Tablo 2: Yaygın Kullanılan Zırh Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.	17
Tablo 3: Çelik, Alüminyum, Magnezyum ve Titanyum Alaşımları İçin ABD Askeri Standartları.	17
Tablo 4: RHA'nın Kimyasal Kompozisyonu.	19
Tablo 5: 7,62 mm AP Mermilere Karşı Zırh Çeliklerine Ait Kalınlık, Alansal Yoğunluk ve Kütle Etkinliği Değerleri.	20
Tablo 6: Yaygın Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.	21
Tablo 7: Yaygın Kullanılan Seramik Malzemelerin Mekanik Özellikleri.	22
Tablo 8: Seramik Malzemelerin Karşılaştırmalı Maliyeti.	22
Tablo 9: Seramiklerin Metallere Göre Avantaj ve Dezavantajları.	24
Tablo 10: Balistik Uygulamalarda Kullanılan Fiberlerin Mekanik Özellikleri.	24
Tablo 11: Literatür Özeti.	50
Tablo 12: Tedarik Edilen Seramik Plaka Bilgileri.	52
Tablo 13: Seramik Plakaların Mekanik Özellikleri.	52
Tablo 14: Test Matrisi.	53
Tablo 15: Testlerde Kullanılan Numunelerin Ağırlık ve Boyut Ölçümleri.	54
Tablo 16: Vuruş Hızı ve Penetrasyon Derinliği Ölçümleri.	65
Tablo 17: Test Numuneleri Balistik Verimlilik ve Kütle Verimlilik Değerleri.	66
Tablo 18: SiC Seramiklerin Balistik Verimliliği.	70
Tablo 19: Al ₂ O ₃ Seramiklerin Balistik Verimliliği.	71
Tablo 20: B ₄ C Seramiklerin Balistik Verimliliği.	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Maliyet Karşılaştırması.	3
Şekil 1.2: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Ağırlık Karşılaştırması.	4
Şekil 1.3: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Kalınlık Karşılaştırması.	4
Şekil 2.1: Tank Müzesi'nde (Bovington, Dorset, İngiltere) Sergilenen Jagdtiger Tankı.	8
Şekil 2.2: Eğimli Zırh Plakaları.	9
Şekil 2.3: Eğimli Çelik Plaka ve 14,5 mm Zırh Delici Mermi Etkileşimi.	10
Şekil 2.4: Eğimli Pleksiglas Plaka ve 7,62 mm Zırh Delici Mermi Etkileşimi.	10
Şekil 2.5: Delikli Metalik Zırh.	11
Şekil 2.6: Monoblok Zırh ve Boşluklu Zırh	12
Şekil 2.7: Izgara Zırh.	12
Şekil 2.8: Era Zırhların Çalışma Prensibi	14
Şekil 2.9: Tandem Tipi Era.	15
Şekil 2.10: Elektro-Manyetik Zırh Sistemi.	16
Şekil 2.11: Metalik Zırhların Üretim Yöntemleri	18
Şekil 2.12: DHA (Çift Sertlikli Zırh) Üretim Tekniği	20
Şekil 2.13: Hasar Mekanizmaları	27
Şekil 2.14: Seramik Ön Yüzlü Zırh Sisteminin Şematik Gösterimi	28
Şekil 2.15: Seramik Plakalarda Hasar Mekanizmaları	30
Şekil 3.1: Çerçevelemenin Seramik Plakanın Balistik Verimliliğine Etkisi	31
Şekil 3.2: Vuruş Anından 8 ms Sonra Çekilen Çerçevesiz (A) ve Çerçeveli (B) Numunelerde Mermi Ucunda Meydana Gelen Mantarlaşmanın Görüntüsü	32
Şekil 3.3: Çerçevesiz (A) ve E-Glass/Epoksi Çerçeveli (B) Numunelerin Arka Yüzlerinin Yer Değiştirmesi	33
Şekil 3.4: Farklı Kalınlıklarda E-Glass/Epoksi (A), Karbon-Fiber/Epoksi (B) ve Ti-3%Al-2.5%V (C) Çerçeveli Al ₂ O ₃ Seramiklerin Balistik Etkinliğinin Değişimi	33

Şekil 3.5: Kare ve Altıgen Şekilli Karo Seramiklerde Çoklu Atış Modellemesi	35
Şekil 3.6: Farklı Derinlik ve Genişliklerde Modifiye Edilmiş Seramik Zırh Plakaları	37
Şekil 3.7: Düz Yüzlü (A) ve Dış Bükey (B) Seramik Plakalar	37
Şekil 3.8: Farklı Ön Yüz Geometrisine Sahip Seramik Plakalar	38
Şekil 3.9: Farklı Yarı Çapta Küresel Yüzey Profiline Sahip Seramik Plakaların Kinetik Enerji Sönümleme Miktarı	39
Şekil 3.10: AD-99.8 ve AD-96 Seramiklerinin Balistik Verimliliğinin Plaka Kalınlığı ve Vuruş Hızına Göre Değişimi	39
Şekil 3.11: Karolar Arasında Sönümleme Elemanı Kullanılmayan (A) ve Kullanılan (B) Seramiklerin Atış Sonrası Görüntüleri	41
Şekil 3.12: (A), (B), ve (C) Sırasıyla 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm Boşluklu Seramikler, (Ç), (D) ve (F) Sırasıyla 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm Kompozit Sargılı Seramikler	42
Şekil 3.13: (A) Hasarlı Seramik Alanı (B) ve (C) Sırayla İlk ve İkinci Atış Sonrası Destek Plakadaki Delme Derinliği	43
Şekil 3.14: Katmanlı ve Monoblok Seramik Plakaların Performans Karşılaştırması	44
Şekil 3.15: Monoblok, 2, 3 ve 6 Katmanlı Seramik Zırhların Balistik Testinin Sayısal Modellemesi	44
Şekil 3.16: Monoblok, 2, 3 ve 6 Katmanlı Seramik Zırhlarda Normalize Delme Derinlik Değerleri	45
Şekil 3.17: Katman Sayısının ve Katmanlar Arasında Farklı Kalınlıkta PMMA Malzeme Kullanımının Delme Derinliğine Etkisi	45
Şekil 3.18: Katman Sayılarının Ardıl Delinme Miktarına Etkisi	47
Şekil 4.1: Test Numuneleri	53
Şekil 4.2: Test Numunelerinin Bresin Malzeme ile Kalıp İçerisinde Kaplama İşlemi	55
Şekil 4.3: Bresin Malzeme ile Kaplanmış Numuneler	55
Şekil 4.4: 14,5 mm AP Mermi Çekirdeği	56
Şekil 4.5: Sevk Barutu'nun Ayarlanması	56
Şekil 4.6: Mermi Hızı Ölçüm Sistemi	57
Şekil 4.7: Silah Sistemi	58
Şekil 4.8: Roketsan Balistik Koruma Merkezi Kapalı Balistik Laboratuvarı	58
Şekil 4.9: Test Numunelerinin Destek Plakaya Yapıştırılması	59
Şekil 4.10: Test Numunesinin Test Fikstürüne Bağlanması	59
Şekil 4.11: Delme Derinliği Testi	60
Şekil 5.1: Test Grubu-1 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü	61
Şekil 5.2: Test Grubu-2 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü	62
Şekil 5.3: Test Grubu-3 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü	62
Şekil 5.4: Test Grubu-4 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü	63

Şekil 5.5: 729-2 Kodlu Atışa Ait 1. Destek Plakasının Ara Kesiti	64
Şekil 5.6: Her Bir Atışta Merminin Nüfuz Ettiği Son Destek Plakasının Ara Kesiti	64
Şekil 5.7: Kesilen Plakalardan Delme Derinlik Ölçümü	65
Şekil 5.8: Seramik Plakaların Alansal Yoğunluğuna Karşı Delinen Destek Plakanın Alansal Yoğunluğu	68
Şekil 5.9: Numunelerin Kütle Verimliliği	68
Şekil 5.10: Sic Numuneleri Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması	70
Şekil 5.11: Al_2O_3 Numuneleri Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması	71
Şekil 5.12: B_4C Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması	72
Şekil 5.13: Test Edilen Seramik Plaka Konfigürasyonları Balistik Verimliliği	73
Şekil 5.14: Rosenberg Seramik Plaka Konfigürasyonları Balistik Verimliliği	73



SEMBOLLER LİSTESİ

E_m	Kütle verimliliği,
ρ_{cer}	Seramik plakanın yoğunluğu,
ρ_{des}	Destek plakasının yoğunluğu,
η	Balistik verim,
P_∞	Merminin yarı sonsuz destek plaka üzerindeki delme miktarı,
Pr	Önüne seramik plaka yerleştirilmiş yarı sonsuz destek plaka
T_{cer}	Seramik plakanın kalınlığı,

KISALTMALAR

AD	Alansal Yoğunluk (Areal Density)
AP	Zırh Delici (Armor Piercing)
APFSDS	Kanat Dengeli Sabot Bırakan Zırh Delici (Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot)
BHN	Brinell Sertlik Numarası (Brinell Hardness Number)
DHA	Çift Sertlikli Zırh (Dual Hardness Armor)
DOP	Penetrasyon Derinliği (Depth of Penetration)
ERA	Patlayıcı Reaktif Zırh (Explosively Reactive Armor)
HHA	Yüksek Sertlikli Zırh (High Hardness Armor)
JH2	Johnson-Holmquist-II Seramik Malzeme Modeli
NERA	Patlayıcı İçermeyen Reaktif Zırh (Non-explosive Reactive Armor)
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh (Rolled Homogeneous Armor)

ÖZ

Zırh Sistemlerinde Farklı Mekanik Özelliklere Sahip Ön Yüz Seramik Malzemelerin Balistik Performansının İncelenmesi

Musa Talha İZGİ

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü

Ankara, Haziran 2023

Bu çalışmada penetrasyon derinliği (DOP) metodu kullanılarak 10'ar mm kalınlıklarda Al_2O_3 , SiC ve B_4C seramik plakaları ile 5'er mm kalınlığa sahip Al_2O_3 ve SiC plakaların birleştirilmesinden oluşan SiC+ Al_2O_3 numunesinin balistik performansı incelenmiştir. Balistik testler STANAG 4569 AEP55 Volume-1 Seviye-4'e uygun olarak 14.5 mm zırh delici mermi ile icra edilmiştir. Destek plakası olarak 6061-T6 alüminyum alaşım kullanılmıştır.

Balistik testler neticesinde en düşük penetrasyon derinliği Al_2O_3 seramik plakaya yapılan atışta elde edilmiştir. Penetrasyon derinliği sıralaması SiC, SiC+ Al_2O_3 ve B_4C olarak devam etmektedir. Öte yandan zırhlı muharebe araçlarının hareket kabiliyeti muharebe ortamında hayati öneme sahiptir. Balistik koruma artırılırken hareket kabiliyetinin korunması veya düşüşün asgari seviyede tutulması gerekmektedir. Bu kapsamda, zırh sistemlerinin istenilen balistik performansı daha düşük alansal yoğunlukta sağlaması arzu edilmektedir. Bu doğrultuda zırh uygulamalarında kullanılan numunelerin daha yüksek balistik verimlilik değerine sahip olması talep edilmektedir. Bu çalışmada, SiC, Al_2O_3 , SiC+ Al_2O_3 ve B_4C plakalarının balistik verimlilik değerleri sırasıyla 6,76 5,80 5,58 ve 3,89 olarak tespit edilmiştir.

Test sonuçları literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. SiC ve Al_2O_3 numuneleri için elde edilen balistik verim değerlerinin literatür verisiyle uyumlu olduğu görülmüştür. Fakat B_4C numunesine ait balistik verim değeri literatür verisinin altında kalmıştır. B_4C plakanın üretim parametrelerindeki değişkenlerin sonuç üzerinde olumsuz etkisi olduğu değerlendirilmektedir.

SiC+ Al_2O_3 numunesinin Al_2O_3 'e yakın ama biraz daha aşağısında balistik verim değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Fakat, test edilen SiC ve Al_2O_3 numunelerinin birbirine yakın balistik verim değerlerine sahip olması nedeniyle SiC+ Al_2O_3 balistik

verim değerinin tespit edilmesinde atış sayısının yetersiz kalabileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Seramik Zırh, Katmanlı Zırh, Balistik Verim, Penetrasyon Derinliği Testi

Bilim Kodu : 91405

Sayfa Sayısı : 98

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAş



ABSTRACT

Investigation of Ballistic Performance of Front Face Ceramic Materials with Different Mechanical Properties in Armor Systems

Musa Talha İZGİ

National Defence University Alparslan Defence Sciences and National Security Institute

Ankara, June 2023

In this study, the ballistic performance of 10 mm thick Al_2O_3 , SiC and B4C ceramic plates and SiC+ Al_2O_3 sample, which is composed of 5 mm thick Al_2O_3 and SiC plates was investigated using the depth of penetration method (DOP). Ballistic tests were carried out with 14.5 mm armor-piercing bullet in accordance with STANAG 4569 AEP55 Volume-1 Level-4. 6061-T6 aluminum alloys were used as backing plate.

As a result of ballistic tests, the lowest penetration depth was obtained in the shot made on the Al_2O_3 ceramic plate. The order of penetration depth continues as SiC, SiC+ Al_2O_3 and B4C. On the other hand, the mobility of armored combat vehicles is vital in the combat environment. While increasing ballistic protection, mobility should be maintained or the drop should be kept to a minimum. Thus, it is desired that armor systems provide the desired ballistic performance at a lower areal density. Accordingly, it is requested that the samples used in armor applications have higher ballistic efficiency values. In this study, the ballistic efficiency values of SiC, Al_2O_3 , SiC+ Al_2O_3 and B4C plates were determined as 6.76 5.80 5.58 and 3.89, respectively.

The test results were compared with the studies in the literature. The ballistic efficiency values obtained for SiC and Al_2O_3 samples were found to be compatible with the literature data. However, the ballistic efficiency value of the B4C sample remained below the literature data. It is evaluated that the production method of the B4C plate has a negative impact on the result.

It has been observed that the SiC+ Al_2O_3 sample has an ballistic efficiency value close to but slightly lower than Al_2O_3 . However, since the tested SiC and Al_2O_3 samples have ballistic efficiency values close to each other, it is considered that the number of shots may be insufficient in determining the ballistic efficiency value of SiC+ Al_2O_3 .

Key Words: Ceramic Armor, Layered Armor, Ballistic Efficiency, Depth of Penetration (DOP) method

Science Code : 91405
Page Number : 98
Adviser : Asst. Prof. Dr. Onur ALTUNTAŞ



1. GİRİŞ

Savaş ortamında en öncelikli amaçlardan biri şüphesiz düşman unsurlarını etkisiz hale getirmektir. Ancak, bu amacı gerçekleştirirken hedef olmamak veya karşıdan gelen saldırıları bertaraf etmek de bir o kadar ehemmiyete sahiptir.

Personel, hareketli platformlar, sabit yapılar veya stratejik öneme sahip bölgeler savaş ortamında düşman unsurların hedefi olabilmektedir. Bu yüzden söz konusu hedefler, çeşitli savunma sistemleri ile donatılmaya ihtiyaç duyar.

Bu kapsamda, savaş ortamında hedef olabilecek unsurların bekasını artırmak maksadıyla;

- Hedefin tehdit tarafından tespit edilememesini sağlayan çeşitli gizleme sistemleri,
- Tehdidin önceden tespit edilmesini sağlayan çeşitli sensor, radar ve kameraların kullanılabilirdiği durumsal farkındalık sistemleri,
- Tespit edilen tehdidin hedefe ulaşmadan imha edilmesini sağlayan hava savunma sistemleri veya aktif koruma sistemleri,
- Tehdidin hedefe ulaşması durumunda, tehdidin yıkıcı etkilerine karşı hedefe koruma sağlayan zırh sistemleri

gibi çok çeşitli savunma sistemleri ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilir.

Zırh sistemleri, savaş tarihinin ilk dönemlerinden itibaren kullanılmış en eski savunma sistemlerinden biridir. Söz konusu savunma sistemleri arasında halkanın son katmanını oluşturur ve hedefin korunması noktasında hayati öneme sahiptir. Zırh sistemleri; kullanıldığı platform, maruz kalacağı tehdit tipi, kullanım ortamı gibi hususlara göre farklılaşmaktadır. (Crouch, 2017)

Her platform, kullanım konseptine göre farklı önceliklere sahip olduğundan söz konusu platformlara uygulanacak zırh uygulamaları da değişiklik gösterir. Söz gelimi, sabit yapılarda kullanılan zırh sistemleri genellikle ağırlık ve hacim kısıtlarına tabi değildir. Öte yandan, zırh sistemi eklenerek personel ve hareketli platformların beka kabiliyeti artırılırken hareket kabiliyetinden kayıp olmaması veya kaybın asgari seviyede tutulması gerekmektedir. Bu sebeple, personel ve hareketli platformlar için

zırh sisteminin düşük ağırlığa ve hacme sahip olması kritik önemi haizdir. (Hazell, 2022; Rosenberg vd., 2008)

Zırh sistemleri tehdit tiplerine göre çeşitli hasar mekanizmalarını işleterek görevini icra eder. Örnek olarak hafif silah mühimmatına veya yüksek hızlı parçacıklara karşı kullanılan zırh sistemleri, merminin saptırılması, zırh yüzeyinde durdurulması, merminin plastik deformasyona uğratılması, merminin aşındırılması ve merminin parçalanması mekanizmalarından bir veya birkaçını işletmek suretiyle platformu tehdidin yıkıcı etkilerine karşı korumaktadır. Bu maksatla, zırh sistemlerinde yüksek mukavemetli malzemeler farklı geometrik tasarımlar altında kullanılır. (Crouch, 2017; Rosenberg vd., 2008)

Zırhın kullanılacağı platforma veya tedbir alınan tehdit türüne göre performans gereksinimleri büyük farklılıklar gösterdiğinden tüm uygulamalar için en iyi sonucu veren bir zırh malzemesi yoktur. Bu kapsamda, bir zırh sisteminde kullanılacak malzemeleri seçerken birbiriyle çelişen bir dizi kriter göz önünde bulundurulmaktadır. İstenilen performansı sağlayan malzemeler arasından genellikle ağırlık, kalınlık ve maliyet hususları gözetilerek en uygun malzeme tercih edilmektedir. (Bracamonte vd., 2016)

Savaş tarihi boyunca çelik, zırh malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmıştır. I. Dünya Savaşı'nda kullanıma giren savaş araçlarının zırhlandırılmasında da diğer metallere nazaran genel olarak üstün mekanik özellikler sunması, üretim ve entegrasyon kolaylığı, daha ucuza üretilebilmesi gibi sebeplerle çelik tercih edilmiştir. Zırh geliştirme çalışmaları, uzun süre boyunca çeliğin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde, en iyi performansı sağlayan üretim yöntemlerinin araştırılmasında, en uygun geometri ve konfigürasyonunun tespitinde yoğunlaşmıştır. Ancak, II. Dünya Savaşı'nda ve sonrasında gelişen ve yeni ortaya çıkan tehditlerin makul ağırlıkta çelik zırhlarla durdurulamaması alternatif çözümlere yönelime neden olmuştur. (Carlucci & Jacobson, 2008; Graswald vd., 2019; Ogorkiewicz, 2017; Rosenberg & Dekel, 2020)

Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan çözümlerden biri de farklı üstün özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanımına dayanan kompozit zırh sistemleridir.

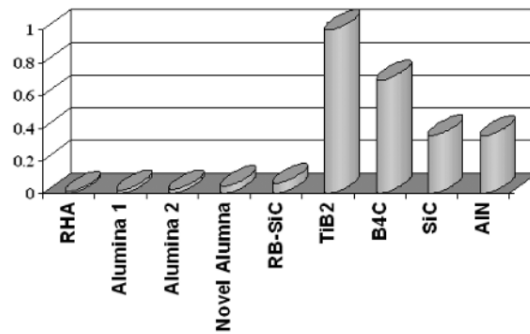
Günümüzde yaygın kullanılan kompozit zırh uygulamalarında iki ana katman bulunur. Ön katman tehdidi parçalama, tehdidin yapısını bozma veya yolundan saptırma maksadıyla kullanılırken arkada yer alan diğer katman tehdidin enerjisini soğurmayı hedefler. Ön katmanda, yüksek sertliğe sahip malzemeler kullanılır. Seramik malzemeler düşük yoğunlukta yüksek sertlik sunması sebebiyle genellikle kompozit

zırhların ön katmanını oluşturur. Arka katman ise, ön katmanda parçalanana/aşındırılan/köreltilen/saptırılan merminin kinetik enerjisini plastik deformasyona uğratarak soğurur, ısı gibi daha düşük bir enerji formuna dönüştürür. Bu kapsamda, yüksek tokluk değerine sahip metaller veya polimer malzemeler kullanılır. (Crouch vd., 2017; Hazell, 2022; Medvedovski, 2002)

Seramikler yekpare veya seramik-seramik, seramik-metal gibi kompozit yapıda kullanılabilir. Yekpare olarak kullanıldıklarında gevrek yapıya sahip olmaları nedeniyle aldıkları ilk darbeye bütünlükleri zarar görmektedir. Bu nedenle yekpare seramikler, çoklu atışlarda zafiyete neden olur. Öte yandan kompozit seramikler, daha yüksek tokluğa ulaşmaları sebebiyle daha iyi çoklu atış performansı sergiler. (Kalemtas & Ersan Güray, 2014)

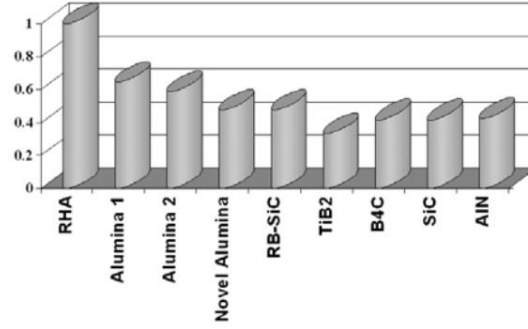
Alüminyum Oksit (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC), Bor Karbür (B_4C), Titanyum Diborür (TiB_2) ve Alüminyum Nitrür (AlN) yaygın olarak kullanılan seramik malzemelerdir. (Kalemtas & Ersan Güray, 2014) Yukarıda ifade edildiği gibi kullanılacak zırh malzemesi performans, maliyet, ağırlık ve hacim kriterleri arasında yapılan optimizasyon çalışması neticesinde belirlenmektedir.

Belirli bir tehdidi bertaraf etmek için gereken zırh malzemelerinin maliyet karşılaştırması Şekil 1.1’de, ağırlık karşılaştırması Şekil 1.2’de, kalınlık karşılaştırması ise Şekil 1.3’te verilmiştir. Söz konusu grafiklerde seramik malzemeler arasında Al_2O_3 ’ün uygun maliyeti ile öne çıktığı, oksitsiz seramiklerin ise Haddelenmiş Homojen Zırh (RHA)’a nazaran çok daha hafif bir çözümü yüksek maliyetle sunduğu görülmektedir. Ayrıca, TiB_2 dışındaki seramik malzemelerin hacim açısından RHA’ya kıyasla dezavantajlı oldukları görülmektedir. (James, 2002)



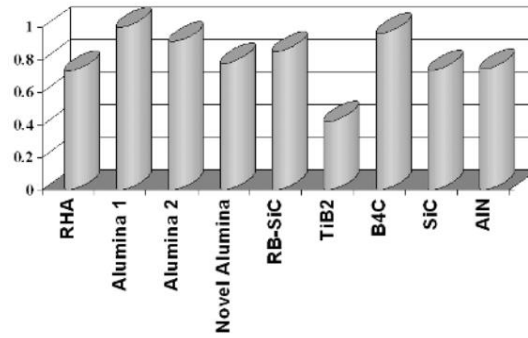
Şekil 1.1: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Maliyet Karşılaştırması.

James, B J. (2002)



Şekil 1.2: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Ağırlık Karşılaştırması.

James, B J. (2002)



Şekil 1.3: Belirli Bir Tehdidi Bertaraf Etmek İçin Gereken Seramik Malzemenin Kalınlık Karşılaştırması.

James, B J. (2002)

Seramik zırh sistemlerinin balistik performansı çok sayıda değişkene bağlıdır. Seramiğin malzeme özellikleri yanında seramiğin kalınlığı, geometrisi, vuruş yüzeyi, seramiğin eğik, boşluklu veya katmanlı kullanılması gibi çok sayıda tasarım parametresi de zırhın etkinliğinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışma kapsamında, performans, maliyet, ağırlık ve hacim kriterleri çerçevesinde en uygun zırh çözümü belirlenirken, farklı seramik malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulan katmanlı zırh plakalarının bir seçenek olabilme durumu incelenmiştir. Bu doğrultuda, 10'ar mm kalınlıklarında Al_2O_3 , SiC ve B_4C seramik plakaları ile 5'er mm kalınlığa sahip Al_2O_3 ve SiC plakaların birleştirilmesinden oluşan $SiC+Al_2O_3$ numunesinin balistik performansı Penetrasyon Derinliği (DOP) metodu kullanılarak incelenmiştir. Her bir numunenin balistik verimliliği hesaplanmış ve literatürde yer alan veri ile mukayese edilerek yorum ve öneriler getirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Balistik

Balistik mermilerin namlu yatağından atımı, hedefe kadar uçuşu ve hedefe çarpmasına kadar gerçekleşen olayları inceleyen bilim dalıdır. Balistik beş başlık altında incelenmektedir.

1. İç Balistik
2. Namlu Ağız Balistiği
3. Dış Balistik
4. Terminal Balistik
5. Yara Balistiği

2.1.1. İç Balistik

Temel anlamda iç balistik, silah içerisinde meydana gelen patlamadan merminin namluyu terk ettiği ana kadar meydana gelen olayları incelemektedir. Ateşleme olayı, sevk barutunun yanması ve bunun sonucunda namlu içerisinde artan basınç, sıcaklık ile merminin namlu içindeki hareketi iç balistiğin ilgi alanıdır. En basit haliyle ateşleme sonrasında sevk barutunun yanması neticesinde namlu içerisinde oluşan basıncın mermiyi dışarıya atmasına kadar olan süreci doğrudan etkileyen barut, namlu ve mermi özellikleri bu kısımda incelenmektedir. (Al-khaf, 2019; Carlucci & Jacobson, 2008)

2.1.2. Namlu Ağız Balistiği

Namlu ağız balistiği iç balistik ile dış balistik arasındaki geçiş fazıdır ve namlu ağzında gerçekleşen olayları incelemektedir. Bu bölümde mermi namlu ağzını terk ettikten sonra kısa bir süre için çıkan gazın basıncıyla hareket etmektedir. (Al-khaf, 2019; Moss vd., 1995)

2.1.3. Dış Balistik

Dış balistik, merminin namluyu terk ettiği andan hedefe çarpma kadar geçen süredeki davranışını incelemektedir. Dış balistik, temel olarak merminin uçuş esnasında maruz

kaldığı yer çekimi, sürtünme kuvveti ve hava koşulları gibi etmenlerin yörünge, stabilite, hız ve çarpma açısına olan etkisini incelemektedir. Bunların hesaplanabilmesi için iç balistik bilgilerine ve merminin tasarım bilgilerine ihtiyaç vardır. Merminin çıkış hızı ve açısı, namlu içerisindeki yiv-set sayısı, geometrisi ve ağırlığı bilinmeden dış balistik hesaplarının yapılması mümkün değildir. Bu nedenle dış balistik mermi ve namlu tasarımcılarına da rehberlik etmektedir. (Al-khaf, 2019; Carlucci & Jacobson, 2008)

2.1.4. Terminal Balistik

Terminal Balistik hedef balistiği olarak da bilinir. Personel, zırhlı muharebe araçları, deniz ve hava platformları ile binalar gibi hedeflere, kinetik veya kimyasal enerjili tehdit unsurlarının çarpmasıyla veya patlayıcıların infilakıyla gerçekleşen bütün olayları inceler. Tehdit hedef etkileşimlerinde sonucu belirleyen ana unsurlar arasında hedef ve tehdidin mekanik özellikleri, çarpma hızı, mermi ucu geometrisi, mermi çapı, hedefin geometrisi, hedef kalınlığı sayılabilir. (Al-khaf, 2019; Carlucci & Jacobson, 2008; Crouch, 2017; Hazell, 2022)

2.1.5. Yara Balistiği

Yara balistiği, ateşli silah yaralanmalarının mekanizması, tedavi yöntemleri, bireysel balistik koruma ekipmanları ve mühimmat etkinlikleri konularını incelemektedir. Dr. Theodor Kocher tarafından yapılan çalışmalar yara balistiği biliminin temelini oluşturmuştur. Ateşli silah yaralanmaları özelinde yeni tedavi yöntemleri geliştirmek, hedefi etkisiz hale getiren fakat öldürücü olmayan ve hedefte kalıcı hasar bırakmayan mühimmat geliştirmek, personel koruyucu balistik ekipman geliştirmek, hedefi acı çektirmeden hızlı ve etkin bir şekilde etkisiz hale getirecek silahlar geliştirmek bu kapsamda yapılan çalışmaların hedefleri arasındadır. (Ali İhsan UZAR vd., 2019; Moss vd., 1995)

2.2. Zırh Sistemleri

Zırh sistemleri tehdidin yıkıcı etkilerinden platformu koruması amacıyla kullanılır. Koruma soğanı konsepti çerçevesinde alınan tedbirlerle tehdidin hedef platforma gelmesinin engellenememesi durumunda, zırh sisteminin tehdidin hedefi etkisiz hale getirmesine engel olması beklenir. Zırh sistemleri personel, kara, deniz ve hava araçları ile sabit yapılar olmak üzere savunma sanayiinde birçok farklı platformda kullanılmaktadır. Hareketli platformlar koruma gereksinimi kadar hareket kabiliyetine de ihtiyaç duyar. Bu kapsamda en iyi zırh, hareket kabiliyetinden en az feragatle en

fazla faydayı sağlayan zırhtır. Bu motivasyon, en hafif ve en etkili zırh çözümü geliştirme çalışmalarında her zaman etkili olmuştur. (Papetti, 1980)

Zırh sistemleri çalışma mekanizmalarına göre pasif zırh sistemleri ve reaktif zırh sistemleri olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılabilir. Ayrıca, zırh sistemleri içerdikleri malzemeye ve kullanım geometrisine göre de gruplandırılabilir. Sistem, malzeme, geometri ve platform başlıkları altında zırh sistemleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Zırh Sistemleri.

Sistem	Malzeme	Geometri	Platform
Pasif • Metalik Zırhlar • Kompozit Zırhlar	Metaller • Çelik • Alüminyum • Titanyum vb.	Eğimli Boşluklu Katmanlı Delikli	Personel Hareketli Platformlar • Kara Araçları • Deniz Araçları • Hava Araçları Sabit Yapılar • Kritik Tesisler • Askeri Üs Bölgeleri koruma sistemleri
	Seramikler • Al_2O_3 • SiC • B_4C • TiB2 vb.		
	Polimerler		
Reaktif • ERA • NERA	Patlayıcılar		
	Hiperelastik kauçuk malzemeler		

Crouch, I.G. (2017)’den uyarlanmıştır.

2.2.1. Pasif Zırh Sistemleri

Pasif zırh sistemleri, zırh malzemesinin mekanik özellikleri yardımıyla belirlenmiş tehditlere karşı koruma sağlamaktadır. Ayrıca, yapısal bir eleman olarak kullanılan zırh sistemleri darbe aldığı anda yapısal bütünlüğünü korumalı, çoklu darbelerde çatlamaya, parçalanmaya ve kırılmaya karşı dirençli olmalıdır. (Papetti 1980)

Pasif zırh sistemleri başlığı altında çelik, alüminyum gibi metalik malzemelerden dövme üretim metoduyla imal edilen plakaların monoblok olarak kullanılmasıyla veya birden çok plakanın boşluklu veya katmanlı kullanımıyla elde edilen çeşitli konfigürasyonda zırhlar, aynı malzemelerden döküm metoduyla üretilen daha kompleks şekilli zırhlar ile metal, seramik veya plastik gibi farklı malzeme türlerinin birlikte kullanıldığı kompozit zırhlar yer alır.

2.2.1.1. Monoblok Zırhlar

Tankların kullanılmaya başlandığı 1. Dünya Savaşı'ndan itibaren 40 yıl boyunca tanklar yüksek mukavemetli çelik zırhlarla donatılmıştır. 2. Dünya Savaşı'na kadar zırhların gelişimini belirleyen en temel unsur tank topları olmuştur. Kalibresi ve etkinliği artan toplara karşı daha kalın homojen çelik plakalar kullanılmıştır. Bu süreçte kullanılan en kalın çelik plaka 2. Dünya Savaşı'nda kullanılan ve Şekil 2.1'de görülen 71.7 ton ağırlığındaki Alman Jagdtiger tankının ön yüzünde yer alan 250 mm kalınlıktaki çelik zırh plakasıdır. (Ogorkiewicz, 1991)



Şekil 2.1: Tank Müzesi'nde (Bovington, Dorset, İngiltere) Sergilenen Jagdtiger Tankı.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Jagdtiger> [Erişim Tarihi: 15.06.2023].

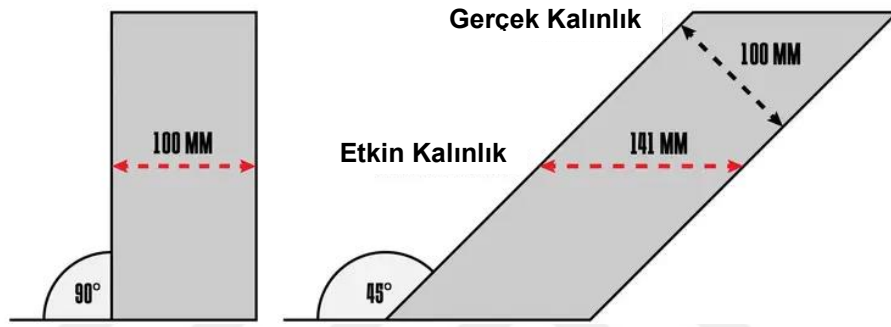
Daha kalın zırh kullanımı, tankın ağırlığını önemli ölçüde artmasına ve hareket kabiliyetinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, hem kinetik enerjili zırh delici mermilerin artan etkinliği hem de II. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkan ve çalışma mekanizması Munroe Etkisi'ne (Çukur İmla Hakkı) dayanan 600 mm'ye kadar kalınlıklarda zırhları delebilen tanksavar sistemlerinin ortaya çıkması farklı zırh çözümlerinin geliştirilmesini tetiklemiştir. (Ogorkiewicz, 2017)

Bu doğrultuda reaktif zırh sistemleri, kompozit zırhlar ile metalik zırh plakalarının eğimli, boşluklu veya katmanlı olarak farklı konfigürasyonlarda kullanımıyla oluşan yeni zırh çözümleri ortaya çıkmıştır.

Çok farklı zırh sistemlerinin geliştirilmesine rağmen, metalik zırhlar erişim kolaylığı, üretim kolaylığı, maliyet etkin olması, çoklu atışlara karşı koruma sağlaması, yapısal bileşen olarak kullanılabilmesi gibi avantajları nedeniyle hala en fazla kullanılan zırh sistemidir. (Gooch, 2006; Hazell, 2022)

2.2.1.2. Eğimli Zırhlar

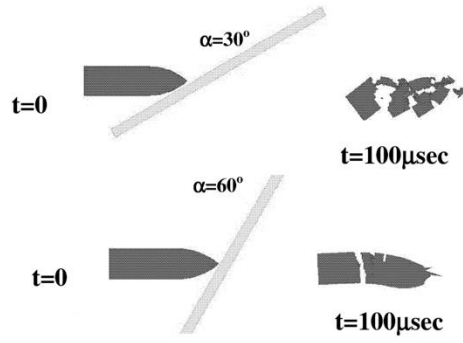
2. Dünya Savaşı'ndan itibaren zırhlı araçların daha fazla isabet aldığı ön bölgesine platformun diğer bölgelerine kıyasla daha fazla zırhlandırma yapılmış ve öncesinden farklı olarak zırhlar eğimli yerleştirilmiştir. (Gooch, 2006; Ogorkiewicz, 2017) Şekil 2.2'de görüldüğü üzere eğimli zırhın kullanımıyla tehdidin zırhı delebilmesi için daha fazla yol kat etmesi gerekeceğinden aynı ağırlıkta daha fazla koruma sağlanmıştır. Platformun en çok isabet aldığı ön yüzüne zırh plakasının 60° eğimle konumlandırıldığı durumda, önden gelen atışlarda merminin delmesi gereken zırh kalınlığı iki katına çıkmaktadır.



Şekil 2.2: Eğimli Zırh Plakaları.

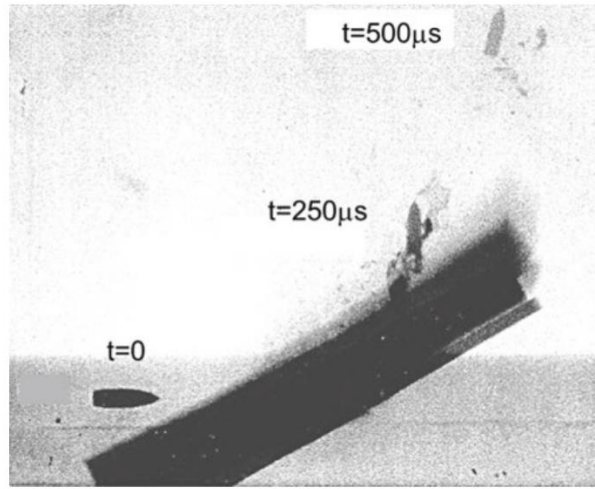
Jesse B. (2022)

Ayrıca, eğimli zırha çarpan mermiler asimetrik kuvvetlere maruz kalmaktadır. Tehdit-hedef etkileşimlerinde ortaya çıkan asimetrik kuvvetler farklı hasar mekanizmalarına neden olur. Söz gelimi kalın eğimli plakalar uzun penetratörleri sektirebilirken yüksek sertlikteki ince plakalar zırh delici mermileri parçalayabilmektedir. (Zvi Rosenberg ve Dekel, 2020) Nitekim Yeshurun ve Rosenberg (1993) 45° eğimle konumlandırılmış yüksek sertlikli 4,4 mm kalınlığındaki çelik plakanın 14,5 mm merminin çelik çekirdeğini parçaladığını raporlamıştır. Plakanın mermiye göre daha dik yerleştirildiği atışlarda ise mermi çekirdeğinin daha az parçaya ayrıldığı veya yörüngesinden saptığı görülmüştür. Rosenberg vd. (2008) tarafından yapılan sayısal modelleme sonuçlarına göre 30° ve 60° eğimli yüksek sertlikli 4 mm kalınlığındaki çelik plaka ile 14,5 mm zırh delici mermi etkileşiminin sonucu Şekil 2.3'te görülmektedir. Zırh delici mermilerin eğimli yüzeylerden sektirilmesinde zırhın mukavemeti önemli rol oynamaktadır. Yeshurun vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada 7,62 mm zırh delici merminin 30° eğimli 20 mm kalınlığında pleksiglas plakadan sektiği Şekil 2.4'te görüntülenmiştir.



Şekil 2.3: Eğimli Çelik Plaka ve 14,5 mm Zırh Delici Mermi Etkileşimi.

Rosenberg, Z., E. Dekel, Y. Ashuach, ve Y. Yeshurun. (2008)



Şekil 2.4: Eğimli Pleksiglas Plaka ve 7,62 mm Zırh Delici Mermi Etkileşimi.

Yeshurun Y, Ashuach Y, Rosenberg Z. ve Rozenfeld M. (2001)

2.2.1.3. Delikli Zırhlar

Asimetrik etkileşimlerden yararlanmayı amaçlayan zırh tasarımlarından biri de Şekil 2.5'de görülen delikli zırh plakalarıdır. Plaka üzerinde yer alan belirli büyüklükteki delikler sayesinde plakaya çarpan merminin bir kısmı boşluğa gelir ve mermi üzerinde asimetrik kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Delikli plakalar platform yüzeyi ile genellikle 200-300 mm mesafe boşluk kalacak şekilde entegre edilir. Plakaya çarpan mermi, asimetrik kuvvetlerin etkisinde platform yüzeyine ulaşınca kadar parçalanabilir, yörüngesinden sapabilir veya belirli bir sapma açısı ile ana zırha çarpabilir. Bu şekilde merminin etkinliği azaltılır. Söz konusu sistemin istenilen sonucu verebilmesi için plaka malzemesi, delik çapı ve platforma uzaklığı parametreleri üzerinde optimizasyon çalışması yapılmalıdır. Amerikan M113'in varyantı olan İsrail Toga aracının zırhlandırılmasında 10 mm kalınlıkta ve 10 mm çapta delikli çelik plakalar aracın ana zırhına 15 mm mesafede entegre edilerek kullanılmıştır. Böylelikle,

alüminyum alaşımlı (AA 5083) ana zırhla birlikte, 7,62 mm × 51 mm'den 14,5 mm × 114 mm AP (Zırh Delici) mühimmatına koruma seviyesinde önemli bir artış sağlanmıştır. Delikli metalik plakaların kullanımı, balistik performans artışı yanında normal plakaya göre yarı yarıya ağırlık tasarrufu da sağlar. (Ogorkiewicz, 2017) Ayrıca, delikli zırh plakasının isabet aldığı durumda, isabet alan bölgeye yakın delikler tarafından çatlak oluşumunun ilerlemesinin durdurulması nedeniyle delikli zırh plakalarının çoklu atışlarda balistik direnci artırdığı belirtilmiştir (Balos vd. 2021). Bu kapsamda yapılan çalışmalardan birinde 600 BHN sertlikteki toplam alanının yarısı boşaltılmış delikli çelik plakaların, 14,5 mm zırh delici merminin penetrasyon performansını önemli ölçüde düşürdüğü ve çoklu atışlarda da performansını koruduğu tespit edilmiştir. (Heritier vd. 2010) Öte yandan, delikli plakaların APFSDS mermilere karşı kullanılabilirliğine ilişkin gerçekleştirilen çalışmalarda, söz konusu zırhın önemli bir avantaj sağlamadığı bildirilmiştir. (K Weber, 2002)

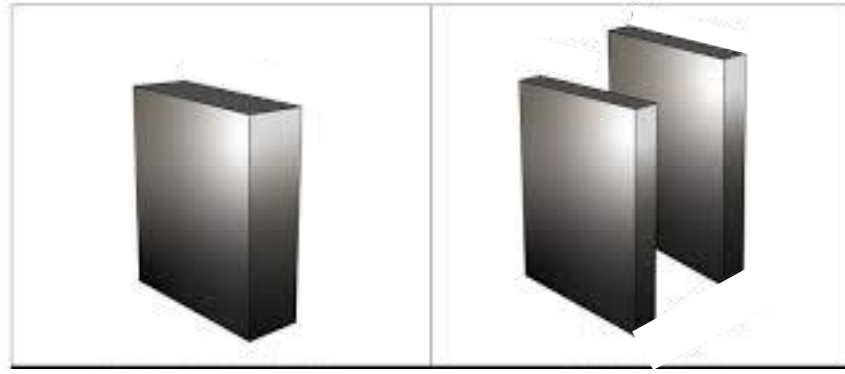


Şekil 2.5: Delikli Metalik Zırh.

<https://www.secantglobal.com/add-on-armor> [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

2.2.1.4. Boşluklu Zırhlar

Kinetik enerjili mermilerin artan etkinliği ve kimyasal enerjili mühimmatın ortaya çıkışı alternatif zırh sistemlerine yönelimi tetiklemiştir. Bu kapsamda, 1960'lardan sonra farklı konfigürasyonda boşluklu zırh sistemleri kullanılmıştır. Ana zırh tabakasının belirli bir miktar önüne yerleştirilen sert zırh plakası ile ana zırha ulaşmadan kinetik enerjili merminin sapıtılması, parçalanması veya belirli bir sapma açısı ile ana zırha çarptırılarak etkinliğinin azaltılması hedeflenmiştir. (Ogorkiewicz, 2017) Bir diğer konfigürasyonda kimyasal enerjili merminin harp başlığının ana zırha ulaşmadan aktive edilmesi ile balistik performansının azaltılması maksadıyla ön plakaya yumuşak zırh yerleştirilmiştir. Boşluklu zırh sistemleri daha iyi balistik performansı sağlarken daha büyük hacim ihtiyacı duymaktadır. (Gooch, 2006; Ogorkiewicz, 1991)



Şekil 2.6: Monoblok Zırh ve Boşluklu Zırh.

Types of Armour – Norfolk Tank Museum, <http://norfolktankmuseum.co.uk/types-of-armour/>. [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

2.2.1.5. Izgara Zırhlar

Izgara zırh, tehdidin çapından daha küçük aralık bırakılarak bir araya getirilen metal çubuklardan oluşur. RPG-7 mühimmatına karşı ucuz ve istatistiki bir çözüm sunar. Çalışma mekanizması, tehdidin iki metal çubuk arasından geçerken parçalanarak fünyenin kısa devre yaptırılması ve harp başlığını aktive etmesinin engellenmesi esasına dayanır. Fakat roketin burnunun doğrudan metal çubuğa çarpması halinde sistem amacını gerçekleştiremez. Dolayısıyla %60 oranında başarı imkânı sunar. (Ogorkiewicz, 2017) Şekil 2.7’de izgara zırh entegre edilmiş bir zırhlı muharebe aracı görülmektedir.



Şekil 2.7: Izgara Zırh.

Types of Armour – Norfolk Tank Museum, <http://norfolktankmuseum.co.uk/types-of-armour/>. [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

2.2.1.6. Katmanlı Zırhlar

Zırh plakalarının katmanlı kullanımının plakalarının her birinin kendi balistik performansının toplamından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. (Gooch, 2006)

2.2.1.7. Kompozit Zırhlar

2. Dünya Savaşı sonrasında, metal olmayan malzemelerin zırh sistemlerinde kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çukur imlali mühimmatın zırha nüfuzu “hidrodinamik teori” ile açıklanmaktadır. (Ogorkiewicz, 1991) Buna göre çukur imlali mühimmatın kullanılan zırh malzemesi karşısındaki delme derinliğinin RHA'ya karşı delme derinliğine oranı, kullanılan zırh malzemesinin yoğunluğunun karekökünün RHA'nın yoğunluğunun kareköküne bölünmesi ile elde edilir. Böyle bir durumda daha düşük yoğunluklu malzemede jetin delme derinliği daha fazla olacaktır fakat alansal yoğunluk açısından bakıldığında, jeti durdurabilmesi için RHA'dan daha az alansal yoğunluk yeterli olacaktır. Bu durum, seramik, cam, polimer, dizel yakıt (İsveç S-tank ve İsrail Merkava tanklarında bekayı artırmak için dizel kayıttan faydalanılmıştır.) gibi birçok malzemenin çukur imlali mühimmata karşı kullanılabileceğini göstermiştir. (Ogorkiewicz, 1991)

İlk kompozit zırh 1971'de FV4211 tankında Chobham adıyla İngilizler tarafından kullanılmıştır. Söz konusu kompozit zırhta, metal ve metal olmayan malzemelerin birlikte kullanıldığı ve katmanlar arasında boşluk bırakıldığı bilinmektedir. Chobham zırhın çukur imlali harp başlığı taşıyan tanksavar mühimmatına karşı aynı ağırlıktaki çelik zırhlardan iki kat fazla koruma sağladığı belirtilmektedir. (Ogorkiewicz, 2017) Günümüze kadar tasarlanan tanklarda çok katmanlı kompozit zırh kullanımına devam edilmiştir. Kompozit zırh metal, seramik, polimer gibi birçok malzemenin birlikte kullanılmasından oluşur.

2.2.2. Reaktif Zırh Sistemleri

Reaktif zırh sistemleri üzerine gelen tehditlere karşı reaksiyon oluşturarak tehdidin penetrasyon performansını ortadan kaldırmayı veya azaltmayı hedefler. Reaktif zırh sistemlerinin çalışma prensibi de eğimli veya delikli plaka kullanımı gibi tehdit ile zırh plakası arasında asimetrik etkileşin oluşturmaya dayanır. Tehdit doğrultusunda eğimli plakaları çeşitli yöntemlerle hareketlendirerek mermiye asimetrik kuvvet uygular. (Zvi Rosenberg ve Dekel, 2020) En yaygın kullanılan türü ERA'lardır.

2.2.2.1. ERA

ERA'lar, II. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkan kimyasal enerjili tanksavar sistemlerinin zırh sistemlerine karşı artan etkinliğini kırmak için Manfred Held tarafından 1970'lerin başında tasarlanmıştır. İlk olarak İsrail ordusuna ait Centurion ve M60A1 tanklarında 1982 yılında Lübnan'da kullanılmıştır. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi İki metal plakanın arasına patlayıcı katmanın eklenmesiyle oluşan sandviç

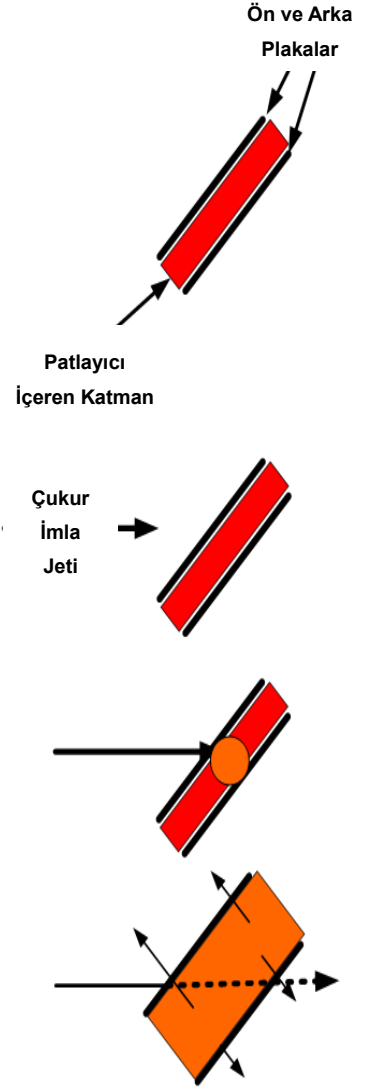
yapıdadır. (Ogorkiewicz, 1991.)

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi tanksavarın zırha çarpmasıyla ERA içindeki patlayıcı aktive olur. Patlayıcının aktive olmasıyla mermi yönünde oluşan tepki merminin çukur imla hakkını bozarak jetin oluşmasını engelleyebilir veya jetin yapısını bozarak tehdidin etkinliğini %70'ine kadar azaltabilir. Sovyet ordusu tarafından 15 mm veya daha kalın plakalar kullanıldığında kimyasal enerjili mermilerin yanında APFSDS mühimmatına da etkinlik sağladığı görülmüş ERA'ların kullanımı yaygınlaştırılmıştır. (Ogorkiewicz, 2017)

ERA'lar diğer zırh sistemlerine nazaran daha düşük alansal yoğunlukta etkili bir koruma sağlarken bazı dezavantajları da vardır. ERA'lar CE'ler yanında kinetik enerjili mühimmata karşı da etkinlik sağlar fakat kinetik enerjili mühimmat için daha fazla alansal yoğunluk gerektirir. Patlama sonrası oluşan ardıl etkiler, platform çevresindeki personele ve platform üzerindeki sistemlere zarar verebilir. Ardıl etkilerin platform içindeki personele zarar vermemesi için platformun kendisinin de yeterli bir zırh korumasına sahip olması gerekir. Bu yüzden ERA'lar tank gibi kendiliğinden zırhlı araçlarda kullanılmaktadır. Öte yandan, hafif zırhlı muharebe araçlar için hibrid ERA'lar geliştirilmiştir. ERA'ların arka plakaları elastomerlerle desteklenerek platforma karşı olumsuz etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır. Hybrid ERA'lar Bradley, M113, FV 432 gibi çeşitli zırhlı muharebe araçlarında kullanılmıştır. (Ogorkiewicz, 2017)

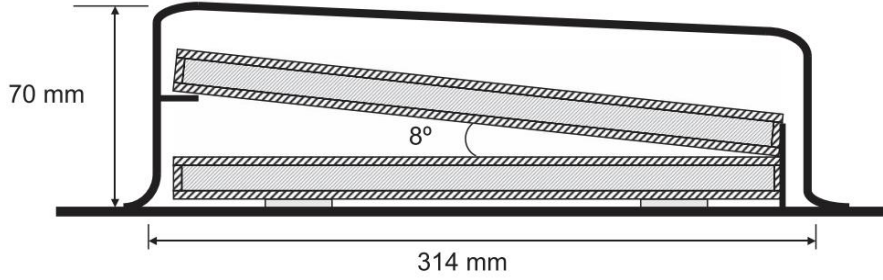
ERA'ların tanksavar silahlarına karşı etkinlik sağlaması tandem başlıklı tanksavarların geliştirilmesini tetiklemiştir. Tandem tanksavarlarda ön harp başlığı ERA'yı aktive ederek arkadaki ana harp başlığının platforma nüfuz etmesini kolaylaştırmaktadır.

Tandem mühimmatlara karşı Şekil 2.9'da görülen çift patlayıcılı yeni nesil ERA'ların geliştirildiği bilinmektedir. T 80'de kullanıldığı düşünülen zırh, tek bir çelik muhafaza içinde patlayıcı içeren iki kompozit yapıdan oluşmaktadır Bu yapı ile, çukur imla jeti ile daha iyi temas sağlanmaktadır. Aynı zamanda tandem savaş başlıklarına karşı arkadaki kompozit yapı ana harp başlığı ile etkileşime girerek etkinlik sağlamaktadır.



Şekil 2.8: ERA Zırhların Çalışma Prensibi.

Ayrıca, farklı açılarda yönlendirilmiş iki kompozit ile 70° eğiklikte, 93 mm çaplı şekilli şarjlı bir savaş başlığının etkinliğini %98'e kadar azaltabileceği literatürde yer almaktadır. (Hazell, 2022; M. Rastopshin, 2000)



Şekil 2.9: Tandem Tipi ERA.

Hazell, P.J. (2022)

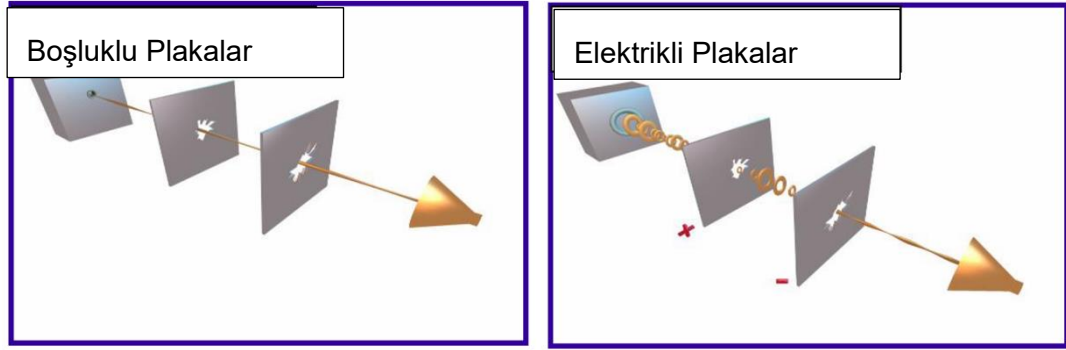
2.2.2.2. NERA

ERA'ların ardıl etkilerinin platforma veya platform çevresinde bulunan personele zarar verme ihtimali, patlayıcı bir ara katman malzemesi yerine inert bir malzeme kullanan reaktif bir zırh sisteminin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu konseptin patenti ilk olarak 1973 yılında Held tarafından alınmıştır. Plakaların zırh kasetinden yüksek hızda ayrılması sebebiyle NERA'lar, ERA'lara nazaran askeri personel ve siviller için daha güvenli bir ortam sunmaktadır. Bununla birlikte, daha düşük plaka ayrılma hızı balistik performansta azalmaya neden olur. (Gooch 2006; Hazell, 2022)

2.2.2.3. Elektro-Manyetik Zırh Sistemleri

Zırh teknolojilerinin geleceği açısından önemli bir potansiyel taşıyan ve Şekil 2.10'da şematize edilen elektromanyetik zırhlarda, zırhın dış yüzeyine yerleştirilen fiber-optik algılayıcı tabaka sayesinde tehdit bertaraf edilmektedir. Söz konusu algılayıcı tabaka, yaklaşan mermi ya da füzeleri tespit ederek elektrik akımını aktive eder. Sonuçta güçlü bir manyetik alan oluşturulur. Manyetik kuvvet, mermi zırha çarpınca oluşan ve normalde zırhı delip aracın içine fırlatarak mürettebatı öldüren erimiş metal sütununun genişleyip zarar vermeden dağılmasını sağlar. (Gooch 2006) Öte yandan,

sistemle birlikte güç kaynağı ve kapasite bankları platforma ilave yük getirmektedir.



Şekil 2.10: Elektro-manyetik Zırh Sistemi.

Gooch, William. (2006)

2.3. Zırh Malzemeleri

Personel koruyucu zırhlar ile araç zırh sistemleri birbirinden farklı tehdit türlerine maruz kaldığından performans gereksinimleri de aynı değildir. Personel zırhlarında personelin korunmasının yanında kolay ve hızlı giyilebilip çıkarılabilmesi, çok farklı coğrafyalarda ve iklim şartlarında askere konforlu kullanım sunması yer alır. Askerin hem çevik kalabilmesi hem konforlu kullanıma sahip olması hem de yüksek koruma içinde tutulması için en uygun zırh malzemeleri seçilmelidir. Benzer şekilde bir zırhlı kara aracının zırh sisteminden belirli ağırlık, hacim, maliyet, sürdürülebilirlik, lojistik kriterlerini sağlayarak maruz kalınabilecek tehditlere karşı koruma sağlaması beklenir. Dolayısıyla, tüm uygulamalar için en iyi performansı sağlayan tek bir zırh malzemesi yoktur. Tasarımcı, algılanan tehdidi yenmek için en uygun malzemeyi veya malzeme kombinasyonunu seçmelidir. Bir zırh sisteminde kullanılacak malzemeler seçilirken birbiri arasında optimizasyon çalışması yapılması gereken birtakım kriterler bulunur. Performans gereksinimlerini karşılayan zırh sistemleri, tipik olarak ağırlık, kalınlık ve maliyet açısından değerlendirilir. Tablo 2'de en yaygın olarak kullanılan zırh malzemelerinin mekanik özellikleri verilmiştir. Genel olarak, Tablo 2'de gösterildiği gibi zırh malzemeleri; metaller (alüminyum, çelik), polimerler (polietilen, aramid), seramikler (alüminyum oksit, silisyum karbür, boron karbür, titanyum diborür) ve bunların kompozitleri olmak üzere dört temel kategoriye ayrılabilir. Seramik ve kompozit malzemelerden üretilen zırh sistemleri, zırh delici mermileri yenmek için balistik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) yaygın olarak kullanılan seramiklerden bazılarıdır. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemeleri, Kevlar® ve Twaron® gibi aramid dokuma kumaşları, S2-cam ve E-cam gibi fiberglas malzemeleri zırh

sistemindeki parçalanmayı azaltması, parçacıkları bir arada tutması için zırh sistemlerinde destek plaka olarak kullanılmaktadır. (Bracamonte vd. 2016)

Tablo 2: Yaygın Kullanılan Zırh Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.

Malzeme	İsim	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik	Yoğunluk (g/cm ³)
Alüminyum	5083-HI 12	70	300	50 (Rockwell)	2.66
Çelik	Alleghany Ludlum K12 DHA	200	1020	48—54 (Rockwell)	7.86
Polietilen	Spectra 2000	113—124	3250-3340	NA	0.97
Aramid	Kevlar 149	179	3450	NA	1.47
Alüminyum Oksit	Coorstek CAP-3	370	379	83 (Rockwell)	3.9
Silisyum karbür	Hexoloy	410	380	2800 (Knoop)	3.13
Bor karbür	RBBC-751	380	280	1550 (Knoop)	2.56
Titanyum Diborür	Ceralloy 225	540	265	2100 (Vickers)	4.50

Bracamonte, L, R Loutfy, I K Yilmazcoban, ve S D Rajan. (2016)

2.3.1. Metaller

Metaller zırh malzemesi olarak uzun zamandan beri kullanılagelen ve halen en yaygın kullanılan zırh malzemeleridir. Çelik ve alüminyum nispeten ucuz olmaları, kolay erişilebilmeleri, işlenebilme ve kaynaklanabilmeleri ile yapısal yük taşıyıcı malzeme olarak kullanılabilmesi sayesinde en çok tercih edilen metal zırh malzemeleridir. Bunların yanında görece pahalı olmalarına rağmen titanyum, magnezyum gibi bazı ayırt edici özellikleri sebebiyle kullanılabilen zırh malzemeleri de mevcuttur. Söz konusu malzemelerin belirli tehditlere karşı sağlaması gereken en düşük balistik değerlerin tanımlandığı Amerika Birleşik Devletleri askeri standartları Tablo 3’de yer almaktadır.

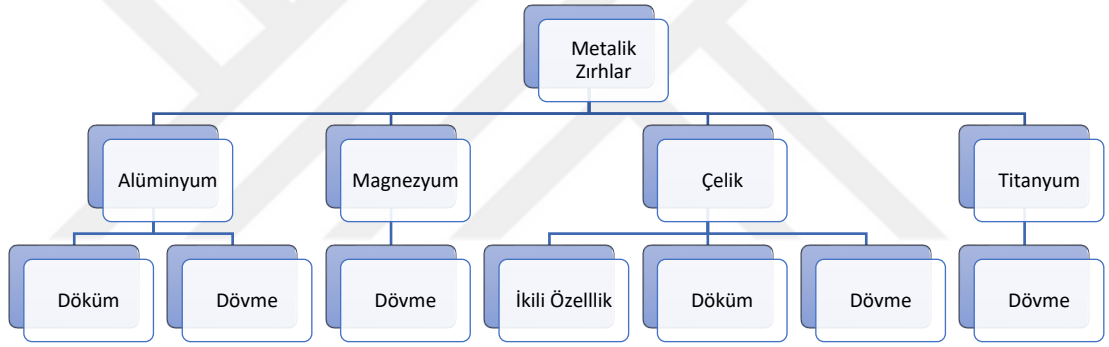
Tablo 3: Çelik, Alüminyum, Magnezyum ve Titanyum Alaşımları için ABD Askeri Standartları.

Standart	Tarih	İsim
MIL-DTL-12560J	24 Tem 2009	Haddelenmiş Homojen Zırh Plakası
MIL-DTL-46100E	24 Eki 2008	Zırh plakası, çelik, dövme, yüksek sertlik
MIL-DTL-46177C	24 Eki 1998	Zırh plakası, çelik, dövme, homojen (1/8 ile 1/4 inç kalınlıklarında)
MIL-DTL-46027K	31 Tem 2007	Zırh plakası, alüminyum alaşımı, kaynaklanabilir, 5083, 5456 ve 5059
MIL-DTL-46063H	14 Eyl 1998	Zırh plakası, alüminyum alaşımı, 7039
MIL-DTL-32333	29 Tem 2009	Zırh plakası, magnezyum alaşımı
MIL-DTL-46077G	28 Eyl 2006	Zırh plakası, titanyum alaşımı, kaynaklanabilir

Hazell, P.J. (2022).

Şekil 2.11’de metal zırh malzemelerinin hangi işlemlerden geçirilerek kullanıldığı gösterilmektedir. Çoğunlukla metal malzemeler presleme veya haddelemeyle dövme

levha haline getirilerek kullanılır. Dövme levhalara sıcak işlem veya soğuk işlem uygulanarak malzemenin mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Bununla birlikte, döküm yöntemi ile zırh üretimi gerçekleştirilebilmektedir. 2. Dünya Savaşı'ndan önce döküm zırh sınırlı ölçekte kullanılmıştır. Bu dönemde yapılan bazı balistik çalışmaların olumlu sonuçlar vermesi üzerine döküm zırh kullanımı 2. Dünya Savaşı ve sonrasında yaygınlaşmıştır. Döküm zırhlar dövme plakalara nazaran daha az balistik direnç sağlasa da daha karmaşık şekilli zırhların hızlı üretilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Avantajları sebebiyle tercih edilen döküm zırhlarının kullanımı, dövme zırhlarla aynı balistik korumayı %5 ilave ağırlık getirerek sağlamıştır. Bu sebeple döküm zırhların kullanımı, hali hazırda hantallaşan tankların ağırlığını daha da artırmıştır. (Ogorkiewicz, 1991; Papetti, 1980; Ogorkiewicz, 2017) Müteakip dönemde, dövme zırh plakalarının daha üstün mukavemet sunması, döküm zırhların gözenekli yapıda olması ve daha düşük tokluk değerlerine sahip olması döküm zırhların gözden düşmesine neden olmuştur. (Hazell, 2022)



Şekil 2.11: Metalik Zırhların Üretim Yöntemleri.

Hazell, P.J. (2022)

2.3.1.1. Çelik

Çelik, yüzyıllar boyunca korunma amaçlı kullanılmış olup bugün hala en yaygın kullanılan zırh malzemesidir. 1. Dünya Savaşı ve sonrasındaki 40 yıl boyunca askeri araçların zırhlandırılmasında neredeyse yalnız çelik kullanılmıştır. Tokluk, sertlik, yük taşıyabilmeleri, imalat ve birleştirme kolaylığı ile nispeten düşük maliyeti, çeliği zırhlı araç gövdeleri için makul bir seçim haline getirir. Çeliklerin zırh delici mermilere karşı daha iyi direnç göstermesi için ısıtılma işlemi uygulanarak sertlikleri artırılır. Sonrasında temperleme ısıtılma işlemi uygulanarak çeliğin kırılganlığı azaltılır ve tokluğu artırılır. Böylelikle gelen merminin kinetik enerjisinin sönmünebilmesi sağlanır. (Hazell, 2022; R. Ogorkiewicz 2017; R. Ogorkiewicz, 1991.; Gooch 2006)

Çelik zırhlar, Haddelenmiş Homojen Zırh (RHA), Yüksek Sertlikli Zırhı (HHA) ve

Değişken Sertlikli Çelik Zırh olmak üzere üç grupta incelenebilir.

RHA

Haddelenmiş homojen zırh (RHA), yaklaşık bir asırdır zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, balistik testlerde farklı zırh sistemlerinin karşılaştırılmasında bir ölçüt olan nüfuz etme derinliğini tespit için test edilen zırhın arkasına yerleştirilir. Zırh sistemleri RHA eşdeğerlikleri ile ifade edilir. Yine tehdit sistemlerinin performansı da debildiği RHA derinliği ile ifade edilir. RHA plakasının tipik bir kimyasal bileşimi Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4: RHA'nın Kimyasal Kompozisyonu.

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

Hazell, P.J. (2022)

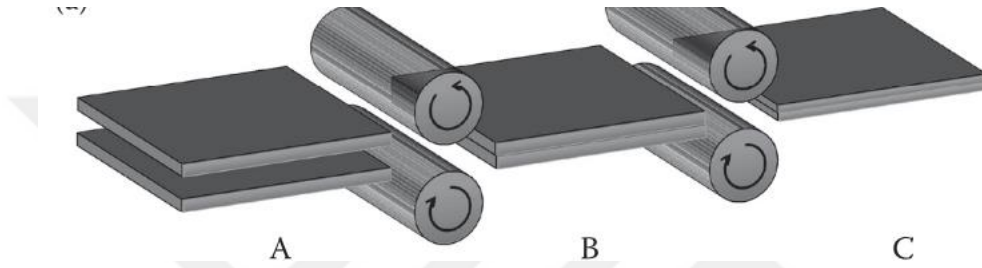
HHA

Sertlik değerleri 430 BHN'yi aşan homojen çelik zırhlar yüksek sertlikli zırh (HHA) olarak isimlendirilir. I. Dünya Savaşı'nda 8-14 mm kalınlıklarda 420-650 BHN arasında sertlik değerlerine sahip çelik plakalar kullanılmıştır. Fakat, kalınlık arttıkça plakaların perçinleme yerine kaynakla birleştirileceğinden daha düşük sertlikte çelik plakaların kullanılması gerekmiştir. Bu yüzden müteakip dönemde daha düşük sertlikte fakat daha kolay işlenebilen çeliklere yönelim olmuştur. Daha sonraları, yüksek sertlikli çelik plakalar üzerinde elde edilen ilerlemelerin önemli bir kısmı Vietnam Savaşı'nda 7,62 mm bilye mermilere karşı koruma sağlayabilecek ince zırh ihtiyacı neticesinde olmuştur. (Hazell, 2022) Gevrek yapısı nedeniyle platforma kaynaklanırken bile kırılabilen plakalardaki problem, çeliğin üretim prosesinde ve kimyasal kompozisyonunda yapılan değişiklikler sayesinde giderilmiştir. Böylelikle 500 – 550 BHN sertlik değerleri arasındaki çelikler zırh delici mermilere karşı hafif zırhlı araçlarda başarılı bir şekilde kullanılmıştır. 7,62 mm zırh delici NATO mühimmatı 14,5 mm RHA ile durdurulabiliyorken 12,5 mm HHA kullanımı yeterli gelmektedir. Dolayısıyla aynı koruma seviyesinde RHA HHA'ya göre %16 daha fazla ağırlık getirmektedir. (R. Ogorkiewicz, 1991)

DHA

Kullanılacak zırhın hem yüksek sertlik değerine hem de yüksek tokluk değerine sahip olması istenir. Fakat malzemenin sertliği arttıkça daha gevrek bir yapıya kavuşur ve tokluğu azalır. Çeşitli ısı işlemleriyle optimum sertlik ve tokluk değerinin elde edilmesi hedeflenir. Bu çerçevede, tek bir levhanın kalınlığı boyunca farklı mekanik özellikler gösterebilmesi akıllıca bir çözüm sunar. Çelik levhanın bir tarafının yüzey

sertleştirilmesiyle, levhanın bir tarafında sert bozucu, diğer tarafında da tok soğurucu özellik elde edilebilmektedir. Böylelikle, daha sünek destek tabakanın zırh plakasında oluşabilecek çatlak ilerlemesini durdurabilmesi, sert ön tabakanın ise mermiyi deforme edebilmesi veya parçalayabilmesi mümkün olmaktadır. Şekil 2.12'de çift sertlikli zırhların üretimi şematize edilmiştir. Tablo 5'teki performans verileri, DHA'nın etkinliğini göstermektedir. Tablo 5'ten görülebileceği gibi, DHA'nın balistik performansı, çelik çekirdekli 7,62 mm'lik bir AP merminin saldırısına maruz kaldığında karşılaştırmalı sertlikteki HHA'nındakinden çok daha üstündür. Bununla birlikte, avantajlarına rağmen üretimin karmaşıklığı ve maliyeti nedeniyle DHA'nın zırh uygulamalarında kullanımı sınırlı kalmıştır. (R. Ogorkiewicz, 1991; Hazell, 2022)



Şekil 2.12: DHA (Çift Sertlikli Zırh) Üretim Tekniği.

Hazell, P.J. (2022)

Tablo 5: 7,62 mm AP Mermilere Karşı Zırh Çeliklerine Ait Kalınlık, Alansal Yoğunluk ve Kütle Etkinliği Değerleri.

Zırh Çeliği	Yoğunluk (kg/m ³)	Kalınlık (mm)	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Em
RHA (380 BHN)	7830	45091	114	1.00
HHA (550 BHN)	7850	45058	98	1.16
DHA (600-440 BHN)	7850	44934	64	1.78

Ogorkiewicz, R. (1991)

2.3.1.2. Alüminyum

Alüminyumun görece düşük yoğunluğu ve balistik olarak bazı işlenmiş alaşımların oldukça iyi performans gösterdiğinin keşfedilmesi ile alüminyum bazlı zırh uygun bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Warrior (Birleşik Krallık), CVR araç ailesi (Birleşik Krallık), Bradley AFV, M113 (Amerika Birleşik Devletleri) gibi araçlarda tercih edilmiştir. Bu araçlarda alüminyumun tercih edilmesinin nedeni, dövme alüminyum alaşımlarında 7,62 mm AP ve 14,5 mm AP'ye karşı koruma sağlamak için gerekli malzeme alan yoğunluğunun çelik muadillerine göre daha düşük olmasıdır. Hali hazırda AFV'lerde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri

Tablo 6'da yer almaktadır. (R. Ogorkiewicz, 1991; Hazell, 2022)

Tablo 6: Yaygın Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri.

Alüminyum Alaşım	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AA 5083-H131	(0.2%) 285	345	10
AA 5059-H131	(0.2%) 360	405	9
AA 7017-T6	(0.2%) 385	445	11
AA 7039-T6	(0.2%) 375	435	11

Aleris, Defence aluminium product data sheet, Switzerland, Aleris Switzerland GmbH, 2010.

Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarıyla ilgili bazı dezavantajlar vardır. Zırh olarak uygun olan daha sert alaşımlar, gerilim altında korozyon çatlağına karşı hassastır. Korozyon çatlağını başlatabilir gerilmenin büyüklüğü akma mukavemetinden daha düşüktür. Makineyle işleme, montaj veya kaynak sırasında oluşan gerilmeler böyle bir duruma yol açabilir. (R. Ogorkiewicz, 1991; Hazell, 2022)

2.3.2. Seramikler

Vietnam Savaşı sırasında küçük kalibreli silahlara karşı Amerikan helikopterlerinin savunmasız olduğunun görülmesi bu hususa yönelik önlem alınmasını gerektirmiştir. Bu çerçevede seramik parçaların şarapnel etkisini azaltması maksadıyla balistik bir kaplama ile kullanılan cam elyaf ile desteklenmiş seramik bir zırh tasarlanmıştır. Böylelikle seramikler zırh sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Seramiklerin ilk olarak hava platformlarında kullanılması, hava platformları için ağırlığın çok daha önem arz etmesinden kaynaklanmaktadır. Vietnam Savaşı'nda Amerikan helikopterleri için geliştirilen zırhın malzemeleri işlenebilirlik, maliyet, yoğunluk ve balistik performans kriterleri referans alınarak seçilmiştir. İhtiyacın aciliyeti sebebiyle tasarım uzun soluklu bir araştırma programında incelenememiştir. Balistik performans basitçe V_{50} testleri ile değerlendirilmiştir. Bu dönemde, malzeme özelliklerinin seramiğin balistik performansına etkisine dair çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Örnek olarak, metallerde görülen aksine seramiklerin mukavemetinin balistik performansa önemli bir etkisinin olmadığı yoğunluğa bağlı performansın değiştiği bu dönemde yapılan çalışmalarda gözlenmiştir. (Ogorkiewicz, 1991)

Müteakip dönemde seramiklerden merminin saptırılması, körleştirilmesi, parçalanması maksadıyla faydalanılmıştır. Seramik malzemelerin düşük yoğunlukları, yüksek sertlikleri, yüksek elastisite modülleri, düşük basma mukavemeti ve iyi ayrışma ve erozyon direnci özellikleri zırh sistemlerinde tercih edilmelerini sağlamıştır. (Walley 2010) Günümüzde seramik içerikli zırhlar sabit yapıların, piyadelerin veya helikopter, savaş gemileri, zırhlı muharebe araçları gibi kara, deniz ve hava platformlarının zırhlandırılmalarında kullanılmaktadır. Zırh uygulamalarında çoğunlukla kullanılan seramikler ve mekanik özellikleri Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7: Yaygın Kullanılan Seramik Malzemelerin Mekanik Özellikleri.

Seramik Malzeme	Yoğunluk (g/cm)	Sertlik HV (GPa)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	Elastisite Modülü (GPa)	Sonik Hız (km/s)	Eğme Mukavemeti (MPa)
S-A1203	3,60-3,95	12-18	3,0-4,5	300-450	9,5-11,6	200-400
S-SiC	3,10-3,20	22-23	3,0-40	400-420	11,0-11,4	300-340
SP-SiC	3,25-3,28	20	5,0-5,5	440-450	11,2-12,0	500-730
SP-B ₄ C	2,45-2,52	29-35	2,0-47	440-460	13,0-13,7	200-500
S-TiB ₂	4,55	21-23	8	550	-	350
SP-TiB ₂	4,48-4,51	22-25	6,7-6,95	550	11,0-11,3	270-700
SP-AIN	3,20-3,26	12	2,5	280-330	-	300-400

Kalemtas, Ayse, ve Ersan Güray. (2014)

Zırh malzemesi olarak kullanılacak seramiklerin seçiminde seramik malzemenin balistik performansı kadar maliyeti de önemli bir parametredir. Tablo 8'de %98 sıvı fazlı sinterlenmiş alümina esas alınarak seramik malzemelerinin zırh uygulamalarında karşılaştırmalı maliyeti sunulmuştur.

Tablo 8: Seramik Malzemelerin Karşılaştırmalı Maliyeti.

Seramik	Yoğunluk (kg/m ³)	Sertlik	K _{IC}	Karşılaştırmalı Maliyet
Al ₂ O ₃	3800	1600	4.5	1.0
RB SiC	3100	1200/2200	4.5	2.5
Sinterlenmiş SiC	3150	2700	3.2	4.5
HP SiC	3220	2200	5.0	9.0
HP B ₄ C	2520	3200	2.8	16.0

Roberson, C. (2004)

2.3.2.1. Alüminyum Oksit

Alüminyum Oksit (Al₂O₃), sinterlenmiş haliyle, oksit olmayan sıcak preslenmiş rakiplerine kıyasla üretimi nispeten ucuz bir seramiktir. Bununla birlikte, silisyum karbürler ve bor karbürler ile karşılaştırıldığında nispeten düşük bir sertliğe ve yüksek yoğunluğa sahiptir. Yüksek saflıkta alümina (~%99,5) en sertidir ve sert çekirdekli AP mermilere karşı ağırlık açısından en verimli korumayı sağlar. (Hazell 2022)

2.3.2.2. Silisyum Karbür

Silisyum karbür (SiC), alüminaya göre üstün mekanik özellikleri nedeniyle zırh sistemlerinin tasarımında daha yaygın hale gelmektedir. Silisyum karbür tozları ticari olarak SiO₂ (kum) ve kok karışımının reaksiyonuyla üretilir. Ortaya çıkan bileşik, sinterlemeyi zorlaştıran çok güçlü bir kovalent bağa sahiptir ve bu nedenle, yüksek yoğunluklu silisyum karbür üretmek için özel işlemlerin uygulanması gerekir. Zırh uygulamaları için silisyum karbür üç yolla yapılabilir: basınçsız sinterleme, sıcak

presleme ve reaksiyonla bağlama. Basınçsız sinterleme, 2000°C'yi aşan pişirme sıcaklıkları gerektirdiğinden, yaygın ancak gerçekleştirilmesi nispeten zor bir işlemdir. Sıcak presleme, zırh uygulamaları için çok yüksek performanslı bir seramik sağlar, ancak maliyeti yüksektir. Tersine, reaksiyonla bağlama nispeten ucuz bir üretim yöntemidir ancak bu seramiklerin balistik performansı nispeten zayıftır. (Hazell 2022)

2.3.2.3. Bor Karbür

Bor karbür (B_4C), zırh uygulamalarında kullanılan önemli bir seramik malzemelerden biridir. Silisyum karbürüne benzer şekilde, bor karbürün en kullanışlı hali sıcak presleme yolu ile üretilir. Diğer seramiklere (2,5 g/cc) kıyasla çok yüksek sertlik ve nispeten düşük yoğunluk vaadine çok hızlı kırılması nedeniyle ortaya çıkan mukavemet düşüşü nedeniyle çok yüksek şok gerilimlerine maruz kaldığında iyi performans gösterememektedir. (Hazell 2022)

2.3.2.4. Titanyum Diborür

Titanyum diborür (TiB_2), sinterlenmesi zor olduğu için genellikle sıcak preslenen nispeten yoğun bir seramiktir (4,5 g/cc). TiB_2 çok yüksek performanslı ancak nispeten pahalı bir seramiktir. Sıcak preslenmiş formunda taşlanması zordur. Öte yandan, iletken olması sebebiyle elektro-deşarj yöntemleri kullanılarak işlenebilme avantajına sahiptir. (Hazell 2022)

2.3.2.5. Tungsten Karbür

Tungsten karbür (WC) de nispeten yüksek sertliği nedeniyle bir zırh malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, çoğu durumda, nispeten yüksek yoğunluğu nedeniyle zırh uygulamalarında çok tercih edilmemektedir. Bununla birlikte, yarı sonsuz hedef tipinde, tungsten alaşımlı çubuklara karşı, ağırlık bazında ve kalınlık bazında RHA'dan daha iyi bir performans göstermiştir. Bugün üretilen tungsten karbürlerin çoğu aslında kobalt veya nikel gibi bir seramik ve metal alaşımı olan sermetlerdir. Bu sermetler mühimmat tasarımında sıklıkla kullanılır. (Hazell 2022)

2.3.2.6. Alüminyum Nitrür

Alüminyum nitrür (AlN), elektronik ve yarı iletken işleme endüstrilerinde kullanımı yaygınlaşan seramik bir malzemedir. Bu malzeme, basınçsız sinterleme yolu kullanılarak yapılabilir; ancak, en kaliteli malzemeler sıcak preslenir. Bu malzemenin, yüksek gerinim hızlarında gevrekten süneğe doğru bir geçişe uğradığı düşünülmektedir. (Hazell 2022)

Seramik malzemelerin metalik malzemelere göre avantaj ve dezavantajları Tablo 9'da

sunulmuştur.

Tablo 9: Seramiklerin Metallere Göre Avantaj ve Dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
Belirli bir kalınlık için iyi düzeyde balistik direnç	Çoklu vuruşlarda zafiyet
Belirli bir tehdit için hafif çözüm	Aracın yük taşıyıcı yapısal birimi olarak kullanılamaz
Yüksek sertlik	Düşük tokluk – Nakliye ve kullanım durumlarında hasar görme ihtimali
Daha düşük lojistik maliyet	Yüksek performanslı ürünlerin pahalı olması
	Yüksek performanslı ürünlerin üretiminde kritik know-how bilgisi gerekmesi ve kolayca temin edilememesi

Hazell, P.J. (2022)'den uyarlanmıştır.

2.3.3. Polimerler

Kompozitler istenen özelliklerin elde edilmesi amacıyla farklı özelliklere iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Genellikle, bir matris ve bir takviye malzemenin birleşmesiyle oluşur. Sert kompozit malzemelerden balistik uygulamalarda faydalanılmaktadır. Balistik uygulamalarda kullanılan lifler genellikle bozulmaya karşı makul gerinimlere (~%3-%6) dolayısıyla yüksek enerji soğurma yeteneklerine sahiptir. Balistik uygulamalarda kullanılan elyafaların bazı mekanik özellikleri Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10: Balistik Uygulamalarda Kullanılan Fiberlerin Mekanik Özellikleri.

Fiber	Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Spesifik Sertlik (m ² /s ²)	Kopma Gerinimi (%)
Aramid (low modulus)	1440	2900	60	60	3.6
Aramid (high modulus)	1450	2900	120	120	1.9
Polyethylene (low modulus)	970	2700	89	89	3.5
Polyethylene (high modulus)	970	3200	99	99	3.7
E-glass	2600	3500	72	72	4.8
S-glass	2500	4600	86	86	5.2
Carbon (high strength)	1780	3400	240	240	1.4
Carbon (high modulus)	1850	2300	390	390	0.5

Edwards M.R. (2002)

Günümüzde balistik koruma için kullanılan kompozit malzemelerin çoğu lifli yapıdadır. Yani, birden çok lif katmanından oluşurlar. Personel zırh sistemlerinde tercih edilir ve

kullanılan elyafların en ünlüsü, çoğunlukla dokuma kumaş yapısında kullanılan Kevlar®'dır. Doğal lifli yapıya sahip deri ve ahşap, koruyucu özellikleri ve özellikle düşük hızlı bir darbenin enerjisini emme kabiliyeti sebebiyle çok erken zamanlardan itibaren zırh olarak kullanılmıştır. (Hazell 2022)

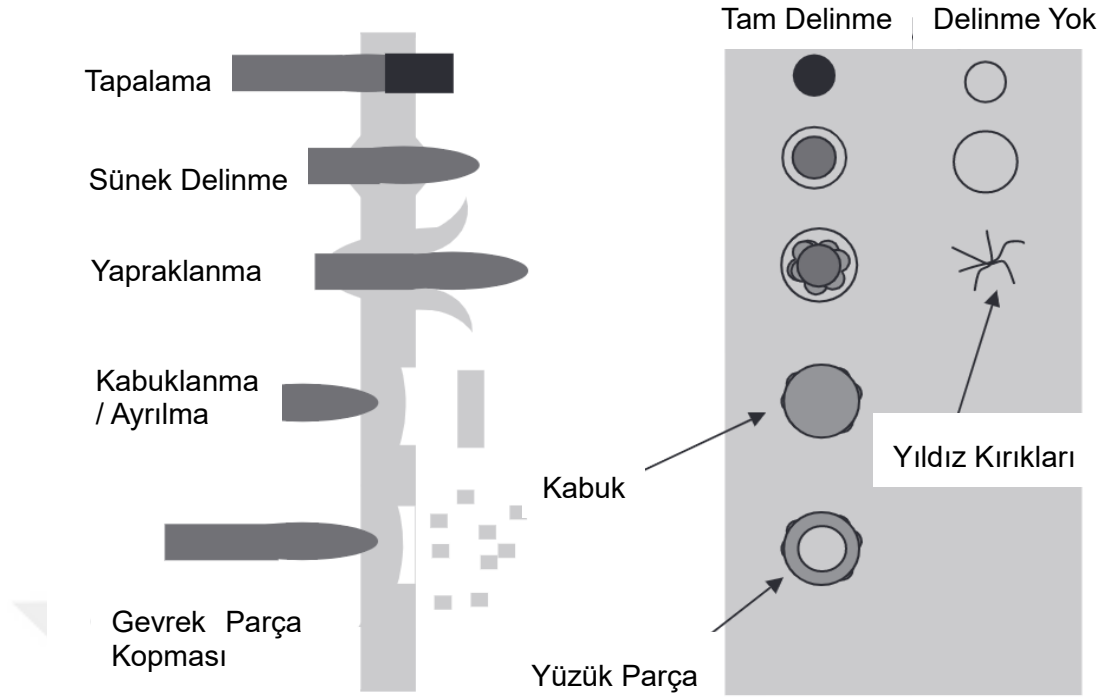
2.4. Hasar Mekanizmaları

Hedef-tehdit etkileşimleri, tehdidin malzemesinden geometrisine hedefin konfigürasyonundan mekanik özelliklerine içinde sayısız değişken barındırır. Değişkenlerin kombinasyonları sonucunda da farklı hasar mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, görevini istenilen seviyede ifa edecek zırh sisteminin başarılı olabilmesi için zırhın maruz kalacağı tehdit tiplerinin belirlenmesi ve belirlenen tehditlerle etkileşimlerinde ortaya çıkabilecek hasar mekanizmalarının dikkate alınması gerekmektedir.

Hedef-tehdit etkileşimlerinde ortaya çıkan hasar mekanizmaları Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Zırhın veya merminin malzeme özellikleri, merminin çarpma hızı, mermi geometrisi ile mermi ve hedefin boyutları söz konusu etkileşimlerde kritik rol oynayan parametrelerdir. (Carlucci ve Jacobson, 2008) Tehdidin zırh üzerinde bıraktığı etkiye göre sonuç farklı kavramlarla ifade edilir. Tehdidin neden olduğu hasarın etkilerini tanımlamak için hedefin arkasına yerleştirilen ve şahit plaka olarak isimlendirilen ince levhayı, eğer mermi veya merminin bir parçası delip geçmişse veya levhanın arka yüzeyinden ışık görülebilecek kadar bir delik oluşmuşsa böyle bir olay perforasyon veya tam penetrasyon olarak tanımlanır. Öte yandan şahit plakada ışığın görülebilir olmadığı sonuçlar kısmi penetrasyon olarak tanımlanır. (Nato/Pfp Unclassified Allied Aep-55, Volume 1 Engineering (Edition 2) Publication Procedures For Evaluating The Protection Level Of Armoured Vehicles Volume 1 Kinetic Energy And Artillery Threat, 2011)

Sünek delinme genellikle kinetik enerjili mermilerin düşük mukavemetli çelik veya sünek alüminyum alaşım gibi zırhlara çarpmasıyla oluşmaktadır. Mermide deformasyon ya çok az meydana gelir ya da hiç oluşmaz. Hedefte kütle kaybı yaşanmaz. Zırh malzemesi mermi burnundan geriye doğru akar. Mermi zırhı deldikçe zırh arkasında ve zırhın ön yüzeyinde mermi deliğinin etrafında şişkinlik oluşur. Merminin zırha çarpmasıyla enerji sönümlenme mekanizmaları çalışır. Bu hasar mekanizmasında hedefin balistik direnci plastik akma karakteristiğine dayanır. Merminin kinetik enerjisi, plastik deformasyon yoluyla sönümlenir. (Crouch 2017; Carlucci ve Jacobson, 2008)

Parça kopması çok yaygındır. Merminin hedefe çarptığı anda ve çarptığı noktada oluşan basma gerilme dalgaları sebebiyle meydana gelir. Bu dalgalar plakanın arka yüzeyinden yansıması neticesinde çekme dalgalarına dönüşür. Çekme dalgaları ile orijinal basma dalgaları etkileşime girer. Bu etkileşim kalınlık boyunca malzemenin çekme mukavemetini aşarsa parça kopmaları görülür. Genellikle basma mukavemeti çekme mukavemetinden yüksek olan malzemelerde görülür. Kabuklanma/Ayrılma, parça kopmasına benzemektedir. Fakat, bu hasar mekanizmasında homojen olmayan lokal bir bölgedeki çatlaktan başlayarak kırılan büyük plaka zırhın arkasından kopar. Gevrek kırılma genellikle zayıf ve düşük yoğunluklu hedeflerde meydana gelir. Radyal çatlaklar, çekme mukavemetinin basma mukavemetinden düşük olduğu seramik tipi malzemelerde yaygındır, ancak bazı elik zırhlarda da meydana gelir. Tapalama, sünek olan malzemelerde ve genellikle küt şekilli merminin çarpma hızı hedefin balistik limitine çok yakın olduğunda meydana gelir. Mermi zırha çarptığında mermi önündeki malzeme, çevresi nispeten sabit kalırken, ivmelenir. Bunun sonucunda merminin açtığı silindirik alanda adyabatik koşullar altında oluşan yüksek kayma gerilmeleri, kayma deformasyonuna neden olur. Bu hasar mekanizmasında sünek delmeye nazaran daha az kinetik enerji sönümlenir. Ayrıca, merminin önündeki malzemenin zırh boşluğundan fırlaması halinde mermi zırha sıkışsa bile çıkan malzeme mermi etkisi gösterebilir. Yapraklanma, radyal ve çevresel gerilimler yüksek olduğunda ve merminin çarpma hızı hedefin balistik limitine yakın olduğunda meydana gelir. (Carlucci ve Jacobson, 2008; Crouch 2017; Hazell, 2022)



Şekil 2.13: Hasar Mekanizmaları.

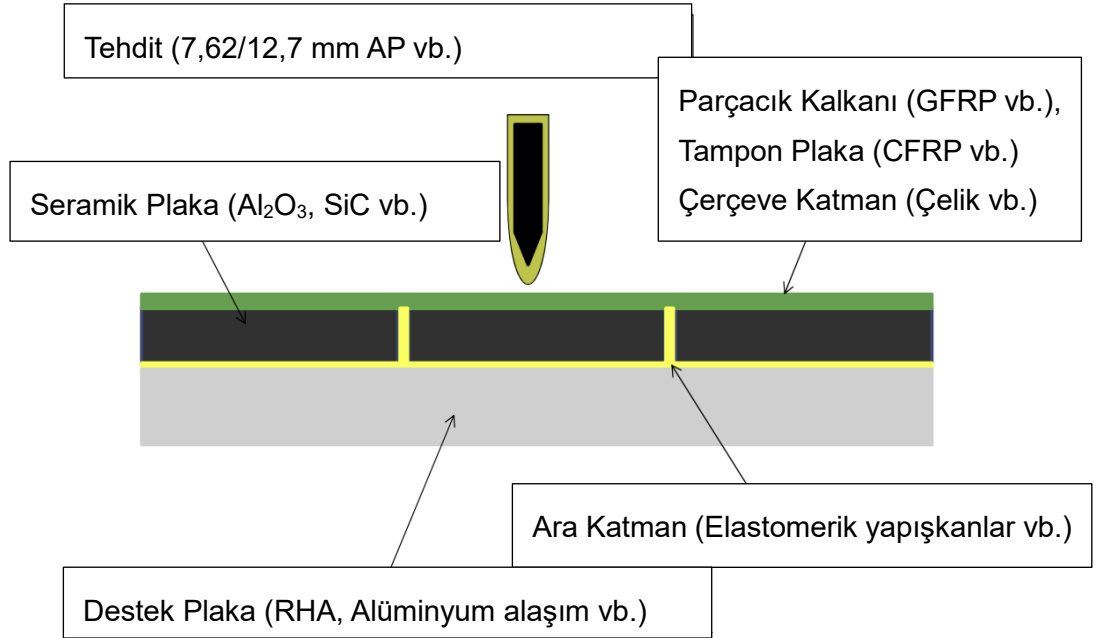
Carlucci, Donald E, ve Sidney S Jacobson. (2008)'den uyarlanmıştır.

2.4.1. Seramik Ön Yüzlü Zırh Sistemleri

Seramik malzemelerin balistik performansı yoğunluk, gözeneklilik, sertlik, kırılma tokluğu, Young modülü, ses hızı, mukavemet başta olmak üzere birçok parametreye bağlıdır. Fakat herhangi bir parametre tek başına balistik performans üzerinde belirleyici bir role sahip değildir. Çünkü hedef-tehdit etkileşimleri sırasında gelişen hasar mekanizmaları çok karmaşıktır. Farklı gerilme fenomenleri nedeniyle kısa sürede meydana gelen çatlak oluşumlarını göz önünde bulundurmak gerekir. Kısacası, fiziksel ve balistik özellikleri etkileyen mikro yapısal farklılıklar, çatlak ilerlemesini, merminin aşındırılmasını/parçalanmasını veya merminin kinetik enerjisinin sönmelenmesini sağlayan mekanizmaları ve nihayetinde balistik performansı önemli ölçüde etkiler. Örneğin, bir mermiyi etkisiz kılmak veya etkinliğini azaltmak için seramiklerin yüksek sertlik değerlerine sahip olması gerekir, ancak darbe sonrası seramiklerde yüksek sertlik nedeniyle oluşabilecek yoğun çatlak ilerlemesi arzu edilmez. Çoğu durumda, bu iki koşulu da sağlamak kolay değildir. (Medvedovski 2010) Bu kapsamda, başarılı bir zırh tasarımı için seramik zırhın mermiyle etkileşim anında nasıl reaksiyon gösterdiği iyi analiz edilmelidir.

Seramikler, gelen plastik deformasyon yoluyla tehdidin enerjisini sönmleyen metallerden farklı olarak, tehdidin yapısını bozarak sahip olduğu kinetik enerjiyi dağıtmayı hedeflemektedir. Şekil 2.14'te seramik ön yüzlü zırh sistemi şematize

edilmiştir. Ön yüzünde seramik plaka arkasında da destek plakası yer alır. Seramik plaka çarpan mermiyi aşındırmaya veya parçalamaya çalışır. Destek plakası ise hem gerilme kırılmasının başlamasını geciktirmek suretiyle seramiğin parçalanmasını ve dağılmasını yavaşlatır hem de plastik deformasyon yoluyla çarpan merminin kinetik enerjisinin bir kısmını sönümler. Destek plakası olarak yüksek çekme mukavemetine sahip Kevlar gibi elyaf takviyeli kompozit malzeme veya çelik, alüminyum gibi metal zırh kullanılmaktadır. Seramik plakaların, çarpma, düşme ve titreşim gibi günlük olaylarda kırılmaması maksadıyla ve atış geldiğinde çatlak oluşumunu azaltması veya bütünlüğünü koruması amacıyla metal, polimer vb. malzemeden bir çerçevenin veya kalıbın içinde için kullanılabildiği görülmektedir. Ayrıca plakaların birleştirilmesi için çeşitli yapıştırıcılardan faydalanılmaktadır. (Medvedovski, 2010)



Şekil 2.14: Seramik Ön Yüzlü Zırh Sisteminin Şematik Gösterimi.

Carlucci, Donald E, ve Sidney S Jacobson. (2008)

Wilkins tarafından yapılan çalışmalar, çarpışma anında seramik ön yüzlü zırh sistemlerindeki seramik plaka ve destek plakalarının davranışının tespitine ve hasar mekanizmalarının anlaşılmasına önemli katkı sağlamıştır. Wilkins alüminyum destekli seramik öz yüzlü zırh sistemi ile yaptığı çalışmalarda, alüminyum destek plakasının sertliğinin seramik plakayı destekleyerek seramiğin parçalanmasını geciktirdiğini, böylece zırh sisteminin balistik performansını önemli oranda artırdığını tespit etmiştir. Öte yandan, seramik ön yüzlü zırhlarda arka katman olarak kullanılan fiber takviyeli kompozit destek tabakasının seramikleri nispeten daha az desteklemesine rağmen daha fazla plastik deformasyona uğrayarak sönümlenen kinetik enerjiyi artırdığı

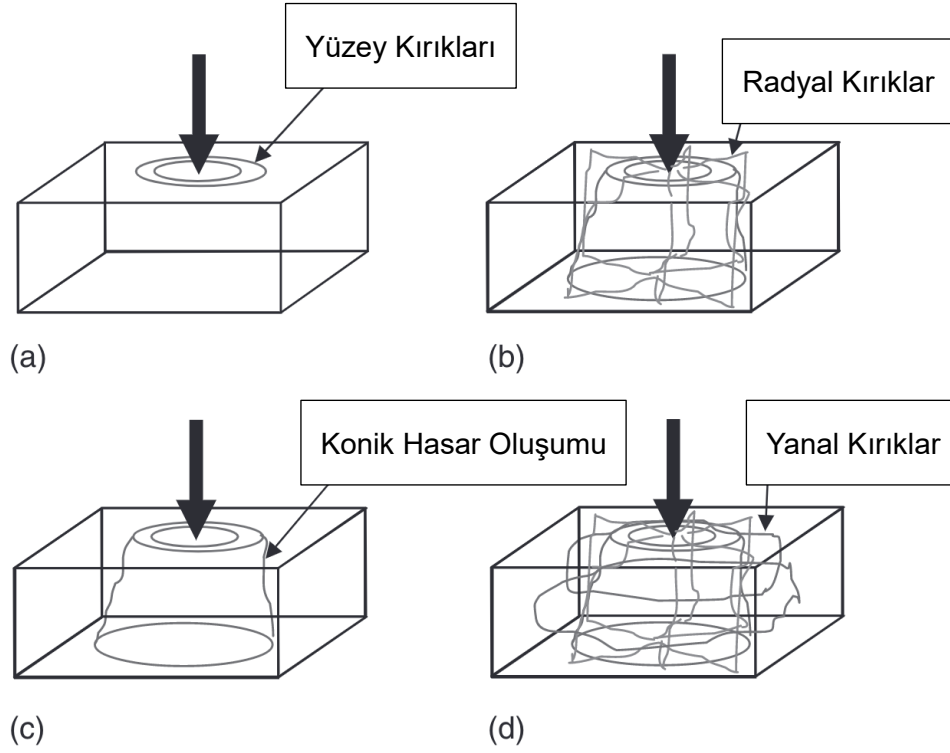
belirtilmiştir. (Wilkins 1978; Crouch vd. 2017)

Field ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, seramik plakanın tokluğunun artırılmasının zırh sisteminin balistik performansını artırmada pek faydalı olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yerine, mermiden daha sert bir seramik plakanın kullanılması ile sertlik/yoğunluk oranının artırılmasının uygun olacağı belirtilmiştir. (Field vd. 2004)

Daha düşük yoğunluğa sahip plaka kullanımının toplam zırh sisteminin ağırlığını azaltması yanında aynı alansal yoğunlukta daha kalın seramik plakasının kullanımına imkân tanır. Destek plakaya uygulanan yükün dağılımı merminin çarpmasından sonra oluşan parçacık konisinin taban alanına bağlıdır. Seramik kalınlığının artmasıyla parçacık konisinin taban alanı da artacağından gelen tehdidin enerjisi destek plaka tarafından daha hızlı ve iyi sönmülenebilecektir. (Crouch vd. 2017)

Seramiklerin düşük yoğunlukta yüksek sertlik ve basma mukavemeti sunması, seramikleri zırh tasarımında tercih edilen zırh malzemesi yapmaktadır. Öte yandan, seramiklerin gevrek yapıları ve düşük çekme mukavemetine sahip olmaları da dikkate alınması gereken zafiyet noktalarıdır. Ayrıca, gevrek yapıları, çoğu zaman ilk atışta çatlak oluşumuna ve kırılmaya neden olduğu için çoklu atışlarda metallere nazaran daha kötü balistik performans gösterirler. (Carlucci ve Jacobson, 2008; Bracamonte vd. 2016, Crouch vd. 2017)

Seramikler tehdit ile etkileşimlerinde diğer zırh malzemelerinden daha farklı davranış sergiler. Seramiklerin etrafının çevrelenmiş olması veya başka bir tabakayla arkadan desteklenmeleri onların vereceği tepkiyi etkiler. Seramiklerin başka bir tabaka ile desteklenmediklerinde mermi etkileşimlerinde maruz kaldıkları yükler nedeniyle çoğunlukla parçalandıkları görülmüştür. Arka katmanla desteklenen seramikler, yüksek basma mukavemeti sayesinde penetrasyon anında yüksek direnç gösterirler. Bu direnç sonucunda mermi ucunda deformasyon oluşabilir. Merminin çarpma hızına bağlı olarak mermi parçalanabilir veya sekebilir. Bu proses infinite dwell olarak adlandırılır. Diğer taraftan, merminin seramiğin gösterdiği direnci yenmesi durumunda Şekil 2.15'te görülen süreç yaşanır. (Carlucci ve Jacobson, 2008)



Şekil 2.15: Seramik Plakalarda Hasar Mekanizmaları.

Carlucci, Donald E, ve Sidney S Jacobson. (2008)

Başlangıçta merminin zırha çarptığı yerin çevresinde dairesel halkaları oluşturan çekme çatlaklarının olduğu görülür. Bu çatlaklar gerilim düzlemleri boyunca genellikle yüzey normaline göre 25° ile 75° arasındaki açılarla ilerler. Çatlaklar arka yüzeye ulaşınca koni şeklinde birleşir. Seramik plaka başka bir katmanla desteklenmediyse tapalama gerçekleşir ve seramik plaka delinir. Seramik plaka başka bir katmanla desteklendiyse gerilimler dairesel olarak dağılır, radyal çatlaklar oluşur ve çarpma yüzeyinde yanal eksende çatlaklar ortaya çıkar. Sonuç olarak başka bir plakanın desteklemesi nedeniyle tapalama oluşmadığından seramik malzeme plaka yapısında korunur ve mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Bu durum seramik malzemenin toz haline gelmesi ile sonuçlanır. Bu ufalanma sürecinde oluşan seramik toz malzemenin mermiyi aşındırdığı görülür. Toz halindeki malzeme sürekli mermi yoluna girer. Bu malzeme radyal olarak dışa ve arkaya doğru akar. (Carlucci ve Jacobson, 2008)

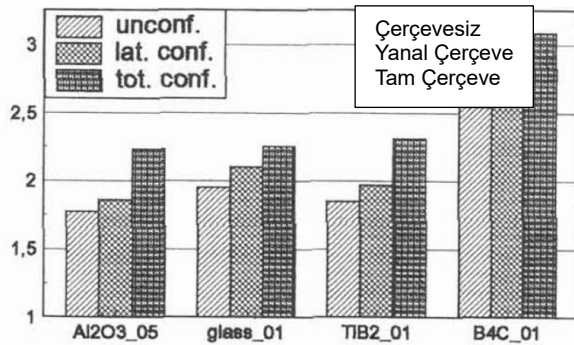
3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Seramik Ön Yüzlü Zırh Sistemlerinde Tasarım Parametreleri

3.1.1. Çerçeveleme/Kaplama

Araştırmacılar, seramik zırh bileşenlerinin özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, tasarıma yönelik çalışmalarla zırhın performansını geliştirmeye çalışmaktadır. Seramik plakanın çerçevelenmesi veya kaplanması bu kapsamda üzerinde çalışılan konulardan bir tanesidir. Seramiğin çerçevelenmesiyle, ilk atışta seramik plakanın dağılmasının engellenmesi ve böylelikle müteakip atışlarda da koruma sağlaması amaçlanmaktadır. Ayrıca, söz konusu yöntemin seramik plakanın balistik limitini artırdığı belirtilmiştir. (Carlucci ve Jacobson, 2008; Bracamonte vd. 2016)

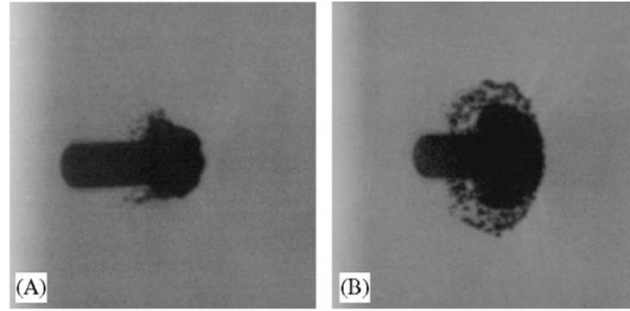
Ernst ve arkadaşları (1994) çerçevelemenin seramik plakaların balistik verimliliği üzerine etkisini DOP metoduyla test etmiştir. 20 mm kalınlığında 100x100 mm boyutunda seramik plakalar çerçevesiz, yanal yüzleri çelik çerçeve içinde ve yanal yüzler dahil vuruş noktası açıkta kalacak şekilde ön yüzünün de kaplandığı tam çelik çerçeve içinde üç farklı konfigürasyonda testler gerçekleştirmiştir. Destek plakası olarak RHA kullanılmıştır. Çalışma sonuçları Şekil 3.1’de sunulmuştur. En iyi balistik performansı tam çerçevelemeli konfigürasyon sağlarken en kötü sonucu çerçevesiz plakalarla vermiştir. Seramik malzemenin çerçevelenerek kısıtlanmasının, ona sünek bir malzeme gibi davranabilme kabiliyeti kazandırdığı belirtilmiştir.



Şekil 3.1: Çerçevelemenin Seramik Plakanın Balistik Verimliliğine Etkisi.

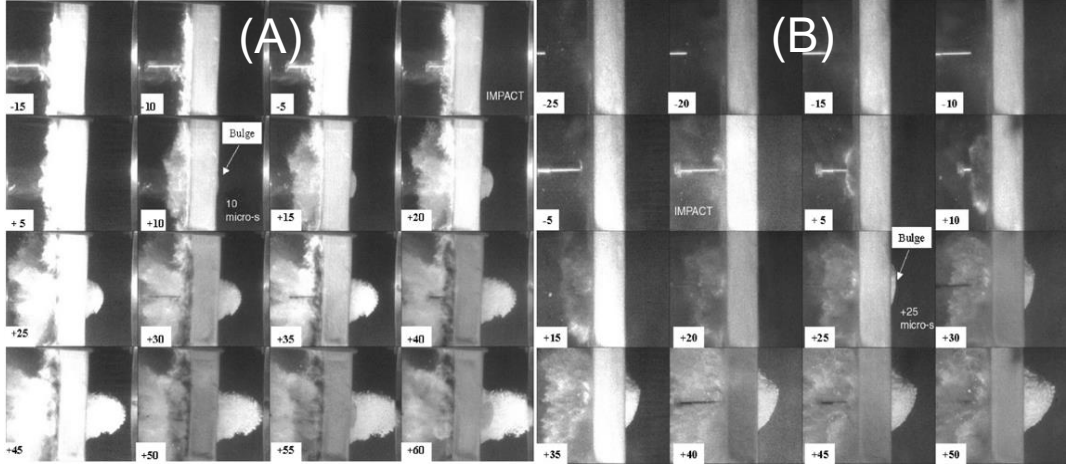
Ernst, H.-J, K Hoog, ve V Wiesner. (1994)

Sarva ve arkadaşları (2007), Al_2O_3 ve SiC seramik karoları değişik kalınlıklarda E-glass/epoksi, karbon-fiber/epoksi ve Ti-3%Al-2.5%V alaşımı malzemelerle çerçevelemenin karşılaştırmalı etkilerini incelenmiştir. Numunelere 900 m/s çarpma hızında WHA (tungsten ağır alaşım) mühimmatla atış yapılmış olup atış sonucunda numunelerin ara yüzlerindeki yer değiştirme (Şekil 3.3), atış neticesinde seramiğin ufalanması ile ortaya oluşan tozların öne ve geriye doğru hareketi ve mermi ucundaki mantarlaşma (Şekil 3.2) yüksek hızlı kameralar yardımıyla görüntülenmiştir. Yapılan analizler neticesinde, çerçevelemenin seramik tozların akışını belirli bir alana hapsettiği ve bunun da mermi ucunun erozyonunu artırarak daha büyük mantarlaşmaya neden olduğu bildirilmiştir. Merminin daha fazla deforme olması ve hızının daha büyük ivmeyle azalması çerçeveli numunelerin arka yüzlerindeki hareketin gecikmesini sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma sonucunda Şekil 3.4'te görüldüğü gibi seramik karoların çerçevelemesi ile balistik etkinliğinin iyileştirilebileceği göstermiştir. Seramik karoların darbe yüzeyinin uygun gerilme mukavemetine sahip bir tabaka ile kaplanmasıyla, alan yoğunluğunda %2,5 kadar bir artışa karşılık balistik etkinliğin yaklaşık %25 oranında iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Ön yüz kaplamada belirli bir kritik kalınlığa (3 katman) ulaşıldıktan sonra, seramiğin balistik performansında önemli bir artış görülmemiştir.



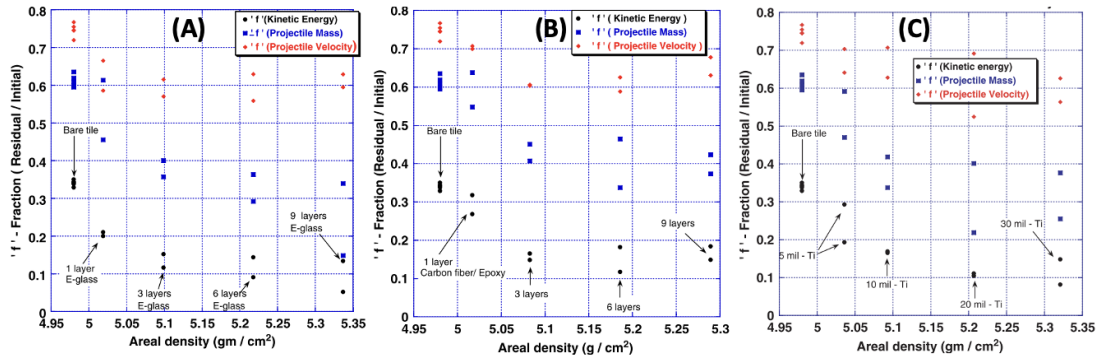
Şekil 3.2: Vuruş Anından 8 ms Sonra Çekilen Çerçevesiz (A) ve Çerçeveli (B) Numunelerde Mermi Ucunda Meydana Gelen Mantarlaşmanın Görüntüsü.

Sarva, Sai, Sia Nemat-Nasser, Jeffrey McGee, ve Jon Isaacs. (2007)



Şekil 3.3: Çerçevesiz (A) ve E-glass/Epoksi Çerçeveseli (B) Numunelerin Arka Yüzlerinin Yer Değiştirmesi.

Sarva, Sai, Sia Nemat-Nasser, Jeffrey McGee, ve Jon Isaacs. (2007)



Şekil 3.4: Farklı Kalınlıklarda E-glass/Epoksi (A), Karbon-fiber/Epoksi (B) ve Ti-3%Al-2.5%V (C) Çerçeveseli Al_2O_3 Seramiklerin Balistik Etkinliğinin Değişimi.

Sarva, Sai, Sia Nemat-Nasser, Jeffrey McGee, ve Jon Isaacs. (2007)

Nasser ve arkadaşları (2002), seramik zırh karoları uygun gerilme mukavemetine sahip ince bir katmanla sararak balistik performansın önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. Balistik etkinlikteki iyileşmenin arıza mekanizmalarındaki değişimin neticesinde elde edildiği flaşlı radyografi teknikleri yardımıyla tespit edilmiştir. Kaplamayla toz haline gelen seramiklerin akışının sınırlandırılması ve kısıtlanması sağlanmış pulverize bölgeden daha fazla yararlanılmıştır. Böylelikle, merminin çok daha fazla mantarlaşıma tepkisi vermesi ve daha fazla aşınmaya uğraması sağlanmıştır.

3.1.2. Zırh Seramiği ve Geometrisi

Seramikler üzerinde yapılan araştırmaların kayda değer bir bölümü, seramik zırhın çoklu vuruşlara karşı koruma kabiliyetinin artırılması konusundadır. Seramiğin

kaplanması, çerçevelenmesi veya çok parçalı bir konfigürasyon kullanılması bu kapsamda yapılan çalışmalar arasındadır. Çok parçalı konfigürasyon ile bir seramik karonun kırılmasına neden olan gerilmelerin bir çatlak şeklinde yayılıma neden olmaması amaçlanır. (Bracamonte vd. 2016)

Çok parçalı seramik zırh sistemi, korunması daha zor vücut bölümleri için daha kapsamlı karmaşık şekilli, kavisli bileşenlerle çok daha geniş bir koruma alanı elde etme imkânı verir. İmal edilmesi gereken seramik parçalarının boyutunun küçülmesi, düşük kapasiteli işleme tezgahlarının, fırınların ve sıcak preslerin kullanımını mümkün kılmakta alt yapı maliyetlerini azaltmaktadır. Literatürde farklı boyutta ve geometride seramik karoların bitişik olarak veya aralarında bir miktar mesafe korunarak kullanıldığı, bazen de karolar arasında sönümleyici malzemelerin kullanıldığı görülmektedir.

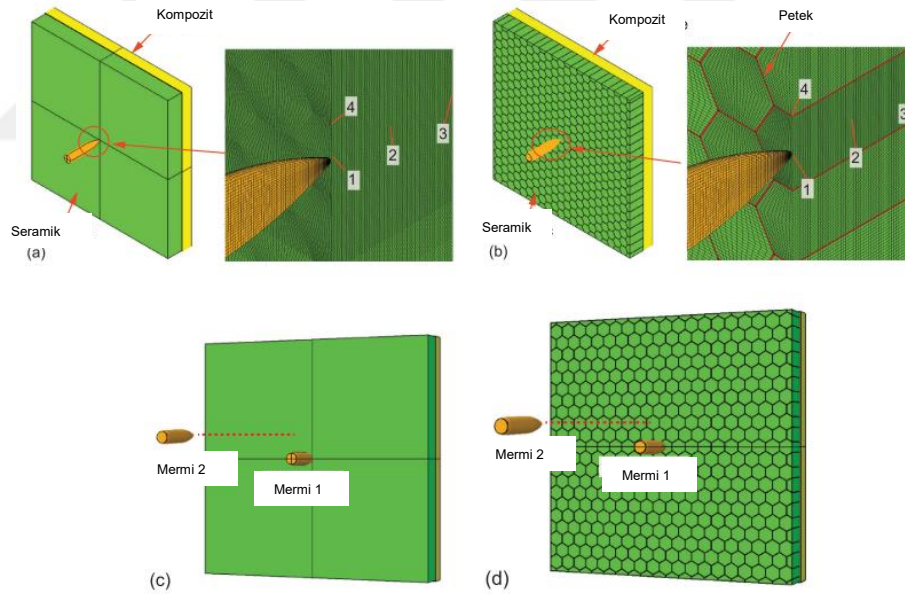
Cui ve arkadaşları (2017), SiC ve B₄C balistik plakaların çoklu atış testlerinde gösterdiği performansı incelemiştir. Balistik testler, 87 tipi 5.8 mm çelik çekirdekli mermi ile gerçekleştirilmiştir. Şahit plakadaki penetrasyon derinliği, balistik plakalarının arkasındaki şişkinlik hacmi ve dijital radyografi (DR) ile tahribatsız olarak test edilen darbe hasarı analizi ile çoklu vuruştan sonra SiC ve B₄C balistik plakaların hasar karakteristiği araştırılmıştır. Çalışma neticesinde, SiC ve B₄C balistik plakaların 87 tipi 5.8 mm çelik çekirdekli mermiye 3 kez etkili bir şekilde direndiği ve etkin çoklu vuruş kabiliyeti gösterdiği tespit edilmiştir. B₄C balistik plakasının balistik performansı SiC plaka ile karşılaştırıldığında, B₄C plakanın arkasındaki şişkinlik hacminin %35'ten fazla azaldığı ve B₄C plakanın seramik konisinin ortalama çapının %30'dan fazla arttığı görülmüştür. Merminin darbe enerjisinin, B₄C balistik plakası tarafından etkin bir şekilde emildiği tespit edilmiştir.

Hazell ve arkadaşları (2008), farklı yüzey alanlarına sahip ve iki farklı işleme tekniği ile üretilen SiC kare şeklindeki karoların, balistik performanslarını DOP metoduyla incelemiştir. Karolar polikarbonat katmanlara yapıştırılmıştır. 85 mm, 60 mm, 50 mm ve 33 mm olmak üzere dört seramik karo boyutu test edilmiştir. Her durumda, yarı sonsuz polikarbonat destek katman olarak kullanılmıştır. Hasar mekanizmalarını açıklamak için JH-1 seramik modelini kullanan bir hesaplama modeli kullanılmıştır. Her seramik karoya merkezinden vurulduğunda optimum sistem performansını sağlamak için silikon karbür esaslı seramik yüzölçümü mozaik zırh sistemi tasarımında kullanılması gereken spesifik bir karo boyutunun olduğu belirtilmiştir.

Bless ve Jurick (1998), seramik katmanlı zırhlarda çoklu atış performansını artırmak için daha küçük boyutlarda seramik mozaiklerin kullanıldığını fakat mozaikler arası

ara yüzlerin artırması nedeniyle atışın ara yüze gelme olasılığının arttığını belirtmiştir. Bu durumun birden fazla mozağin kırılma ihtimalini artırması sebebiyle balistik performansı düşüreceği belirtilmiş ve optimum mozaik boyutunun tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Guo ve arkadaşları (2020), sonlu elemanlar analizi kullanarak Şekil 3.5'te görüldüğü üzere kare ve altıgen şekilli karolardan oluşan iki farklı seramik katmanlı zırh tasarımının balistik performansını incelemiştir. Hem tek vuruşlu hem de çift vuruşlu darbeler, oval burunlu sertleştirilmiş çelik 4340 malzemeden 5,5 g ağırlığında mermi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki tasarımın balistik performansları, penetrasyon mekanizmaları ve balistik direnç açısından karşılaştırılmıştır. İkinci zırh tasarımında, petek varlığının balistik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Petek karoların stres dalgası yayılımını kesintiye uğrattığı ve kırığı yerel bir alanda sınırladığı görülmüştür. Ayrıca, petek yapı eklendiğinde, tek vuruşta darbe performansı düşerken ikinci vuruşta darbe performansının düşmediği, bu da çoklu atış gereksinimi yüksek önceliğe sahip zırh tasarımı için umut verici bir aday olduğu belirtilmiştir.



Şekil 3.5: Kare ve Altıgen Şekilli Karo Seramiklerde Çoklu Atış Modellemesi.

Guo, Guodong, Shah Alam, ve Larry D. Peel. (2020)

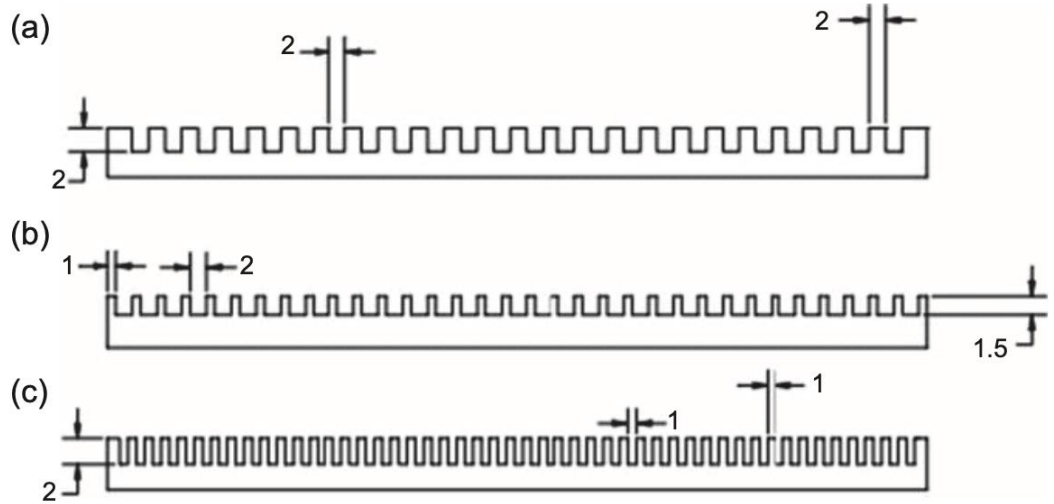
Savio ve Madhu, (2018), 7,62 mm çelik çekirdekli zırh delici (AP) mermilere karşı DOP test yöntemini kullanarak bor karbür karo şeklindeki seramiklerin balistik performansı üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Karonun kalınlığındaki değişimin malzemenin balistik etkinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karo kalınlığının 5,2 mm'den 7,3 mm'ye

ıkarılmasında verimde kayda değer bir artış gözlenmediği belirtilmiştir. Seramikleri farklı tip malzemelerle erevelemenin DOP zerindeki etkisi de incelenmiştir. elik ereve kullanımında çerçevesiz duruma göre %34 oranında, alüminyum alaşım ereve kullanımında ise çerçevesiz duruma göre %19 oranında DOP değerinde düşüm elde edildiği bildirilmiştir.

3.1.3. Vuruş Yüzeyi Geometrisi

P. Karandikar vd. (2015) seramik zırh plakasını oluşturan mozaiklerin geometrik özelliklerinin zırhın balistik performansını nasıl etkilediğini incelemiştir. Bu amaçla, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ile desteklenmiş delikli, daire, koni gibi çeşitli geometrik özelliklere sahip seramik numuneler (100 x 100 mm) zırh delici mermilerle MIL.STD.662'ye uygun olarak atışlı testlere tabi tutulmuştur. Numunelerin V_{50} hız değerleri belirlenmiştir. Yapılan alışma neticesinde olukların, perforasyonların ve kr perforasyonların ilk atışta V_{50} hızında sırasıyla %40, %20 ve %18 azalma sağladığı tespit edilmiştir. ndeki yuvarlak düğmeler ve arkası kapalı boşluklu numunelerde, %5 daha yüksek V_{50} hızı ölçülmüştür. Bu nedenle, bazı geometrik tasarımların, potansiyel olarak hasar lokalizasyonu ve çoklu vuruş yetenekleri sağlarken eşdeğer V_{50} hızını koruyabildiği belirtilmiştir. Geometrik tasarımları daha da iyileştirmek, balistik testlerle çoklu vuruş kabiliyetini değerlendirmek için ek çalışmalara ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

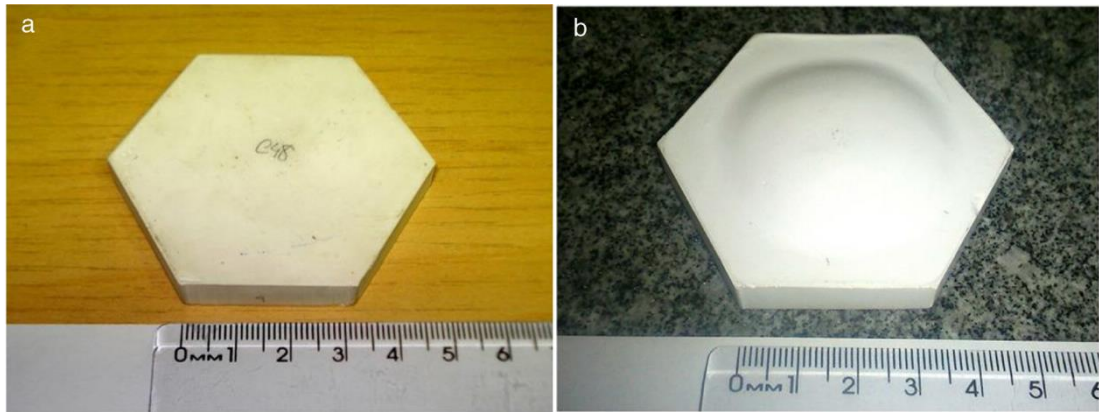
Arun Shukla vd. (2003) seramik plakaların n yüzeyinde çeşitli modifikasyonlar yaparak kompozit zırhın balistik performansının artırılması maksadıyla bir takım balistik testler yapmıştır. Kumaştan yapılmış bir arka plakaya yapıştırılmış bir seramik karodan oluşan zırh sistemi kullanılmıştır. Malzeme olarak Bor Karbür ve Silisyum Karbür seramikler tercih edilmiştir. şekil 3.6'da görüldüğü gibi seramiğin n yüzünde düz ve açılı oluklar açılmıştır. 7,62 APM2 zırh delici mermi ile atış yapılmıştır. Çalışma sonucunda, yüzey modifikasyonlarının mermiye hasar vermede ve daha da önemlisi elik çekirdeği parçalamada etkili olduğu raporlanmıştır. Olukların derinlik ve genişliklerdeki küçük farklılıklar balistik sonuçları önemli ölçüde değiştirmiştir. Örneğin, şekil 3.6(b)'deki yapı üstün balistik performans sağlarken, şekil 3.6(a) ve (c)'deki özelliklerin mermiye zarar verme ve elik çekirdeği parçalama konusunda nispeten etkisiz kaldığı raporlanmıştır.



Şekil 3.6: Farklı Derinlik ve Genişliklerde Ön Yüzlü Seramik Zırh Plakaları.

Arun Shukla, Eric J. Kovolyan, Joseph Grogan, ve Venkit Parameswaran. (2003)

Braga vd., (2018), seramik zırh plakasının yüzey geometrisinin zırhın balistik performansına etkisini incelemiştir. Şekil 3.7’de görülen dış bükey ve düz yüzlü seramik numunelere NIJ-0101.06 standardına uygun olarak 7.62×51 mm mermilerle yapılan atışlar sonucunda zırh plakalarının arkasında deformasyon ölçülerek yüzey modifikasyonunun etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma neticesinde her iki zırh numunesinin balistik performansının NIJ-0101.06 Standardı koruma seviyesi III’e göre tatmin edici olduğu; dışbükey yüzlü seramik plakanın, düz yüze göre %19 oranında daha iyi balistik performans sağladığı bildirilmiştir. Performans artışının merminin dış bükey yüzlü seramiğe eğik açıyla çarpması, bunun sonucunda asimetrik etkileşimlerin ortaya çıkması ve darbe enerjisinin seramiğin daha büyük hacminde daha iyi sönümlenmesinin bir sonucu olduğu belirtilmiştir.

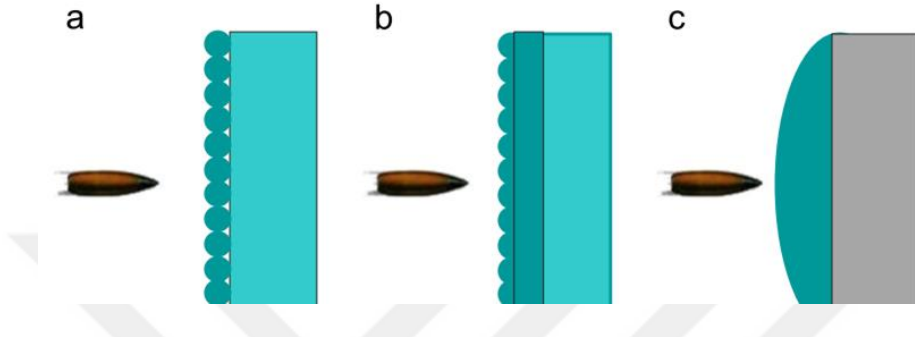


Şekil 3.7: Düz Yüzlü (a) ve Dış Bükey (b) Seramik Plakalar.

Braga, Fábio De Oliveira, Fernanda Santos Da Luz, Sergio Neves Monteiro, ve Édio Pereira Lima. (2018)

Monteiro vd. (2016), Al_2O_3 - Nb_2O_5 Şekil 3.8’de görülen farklı ön yüz geometrisine

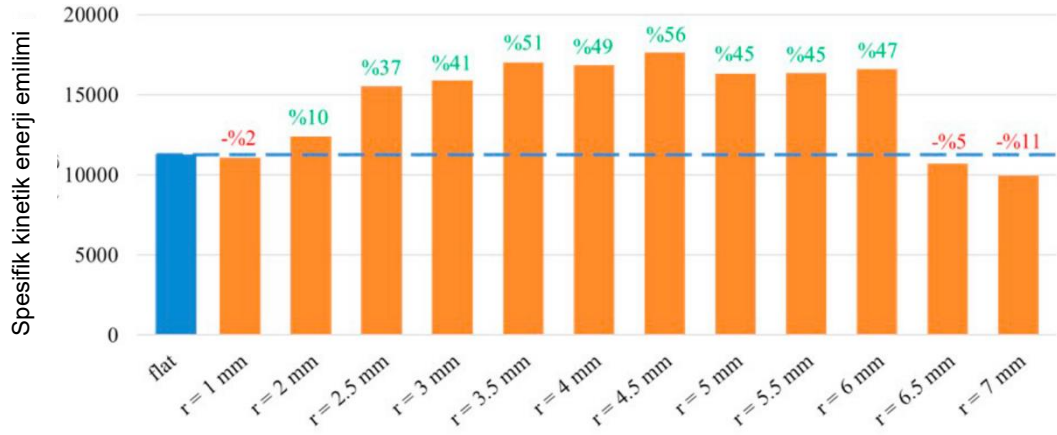
sahip seramik zırh tarafından yüksek hızlı 7.62 mm mühimmatın darbe enerjisinin ne kadarının elimine edildiğini tespit etmeye çalışmıştır. Hem balistik simülasyon çalışmasında hem de gerçek testlerde, düz ön yüzü seramiğe kıyasla dışbükey ön yüzü seramiğin %16-18 üstün performans gösterdiği belirtilmiştir. Merminin kırılma ve sapma mekanizmalarının yanında çatlakların asimetrik yayılımının neden olduğu daha fazla hasar dış bükey ön yüzü seramiklerin daha etkin balistik performans göstermesini sağladığı belirtilmiştir.



Şekil 3.8: Farklı Ön Yüz Geometrisine Sahip Seramik Plakalar.

Monteiro, Sergio Neves, Luis Henrique Leme Louro, Alaelson Vieira Gomes, Carlos Frederico De Matos Chagas, Aldelio Bueno Caldeira, ve Édio Pereira Lima (2016)

Çelikbas ve Acar (2021), seramiklerin mermiyi aşındırma veya parçalama amacıyla kullanılmasından hareketle seramik karoların yüzey profilini değiştirerek merminin yalpalamasını artırmayı ve delme kabiliyetini düşürmeyi hedeflemiştir. Seramik karoların yüzey profilini değiştirerek zırhın özgül kinetik enerji emme kapasitesindeki gelişimi sayısal yöntemler yardımıyla incelemiş, sonuçları literatürde yer alan deneysel veri ile karşılaştırmıştır. Farklı yarıçap değerlerine sahip küresel yüzey profilli seramik karolar ve düz yüzü seramik karonun kinetik enerji sönmeme miktarı Şekil 3.9'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar balistik performansın %56'ya kadar artırılabilirliği göstermektedir. Merminin kürenin tepesine çarptığı en kötü durumda balistik performansın %21 arttığı tespit edilmiştir.

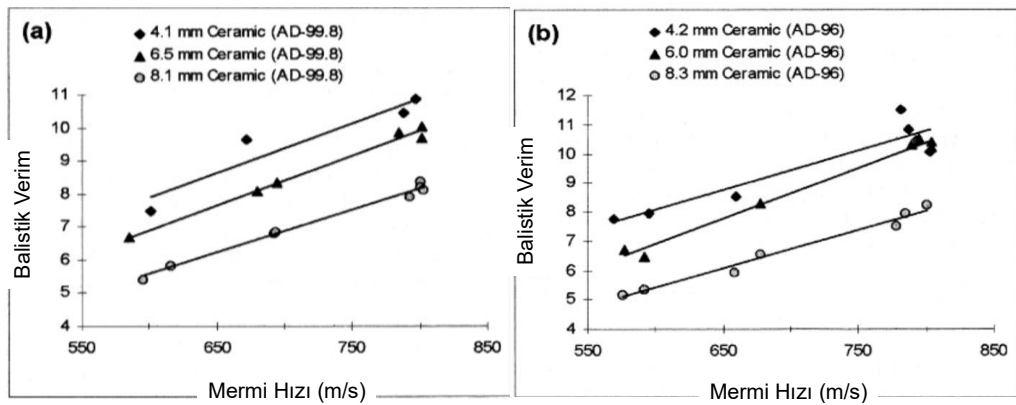


Şekil 3.9: Farklı Yarı Çapta Küresel Yüzey Profiline Sahip Seramik Plakaların Kinetik Enerji Sönümleme Miktarı.

Çelikbas, Deniz, ve Erdem Acar (2021)

3.1.4. Plaka Kalınlığı

Vural vd. (2002). DOP test yöntemini kullanarak farklı kalınlıklara sahip 50x50 mm boyutlarında AD-96 ve AD-99.8 Alümina seramik plakalara 7,62 mm zırh delici mermi ile 506 – 803 m/s arasında değişen hızlarda atışlar yaparak balistik testler gerçekleştirmiştir. Testlerde Al 6061 alüminyum alaşımı destek plaka olarak kullanılmıştır. Seramikler destek plakaya neopren bazlı yapıştırıcı marifetiyle yapıştırılmıştır. Atışlar sonucunda destek plakalarında oluşan delinme miktarları ölçülmüş, plakaların balistik verimlilikleri hesaplanmıştır. Elde edilen verilerle Şekil 3.10'da sunulan grafik oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda seramiklerin balistik verimlilik parametresinin plaka kalınlığı ile ters orantılı, mermi hızları doğru orantılı değiştiği bildirilmiştir.



Şekil 3.10: AD-99.8 ve AD-96 Seramiklerinin Balistik Verimliliğinin Plaka Kalınlığı ve Vuruş Hızına Göre Değişimi.

Vural, Murat, Zeki Erim, B A Konduk, ve A Hikmet Üçışık. (2002)

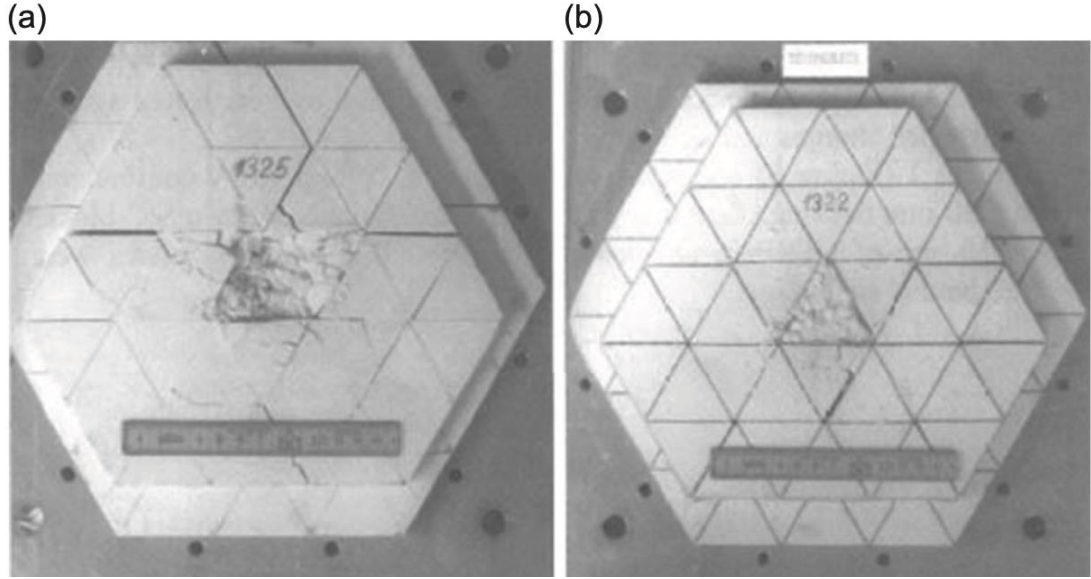
Delagrave (1988) tarafından yapılan çalışmada 12.7 mm kalınlığında Al_2O_3 %98, 12.7 mm kalınlığında Al_2O_3 %95, 25.4 mm kalınlığında Al_2O_3 %95, 5.2 mm ve 10.2 mm

kalınlıklarında SiC ile 6.4 mm kalınlığında B₄C olmak üzere toplamda altı farklı numuneye 14.5 mm AP B32 mermi ile 1005 m/s hızda ve 12.7 SLAP mermi ile 993 m/s hızda ayrı ayrı atışlar gerçekleştirilmiştir. Destek plakası olarak 6061 T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Testler sonucunda iki farklı tehdit için de B₄C en yüksek kütle verimliliği sunarken sıralama SiC (5,2 mm kalınlığında), SiC (10,2 mm kalınlığında) Al₂O₃ (%98 saflık derecesinde), Al₂O₃ (%95 saflık derecesinde 12,7 mm kalınlığında) ve Al₂O₃ (%98 saflık derecesinde 25,4 mm kalınlığında) şeklinde devam etmektedir. Kalınlık artışının kütle verimliliğini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hem 12,7 mm SLAP hem de 14,5 mm AP için performans sıralamaları aynı olan seramiklerin kütle verimlilik değerlerinin mermi türüne göre değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak seramik zırh plakalarının add-on zırhlandırmalarda etkili bir yöntem olduğu bildirilmiştir.

3.1.5. Birleştirme Metodu

Araştırmalar, çok parçalı seramik zırhlarda, seramik parçalar arasındaki bağlantıların balistik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Karolar arasındaki herhangi bir ara yüz, boyuna ve enine yansıyan ve iletilen dalgalara neden olacaktır. Yansıyan dalgalar seramik üzerinde büyük çekme gerilmelerine yol açabilir ve seramiğin kırılmasına neden olabilir. Bu yüzden, bağlantı elemanının, zırh bileşenleriyle eşleşen akustik empedansa sahip olması arzu edilir; ancak etkili bir bağ kuramayan seramik yapıştırıcılar dışında yüksek empedansa sahip yapıştırıcı yoktur. Buna göre, uygun akustik empedansa sahip daha yüksek mukavemetli yapıştırıcılara yönelik ihtiyaç devam etmektedir veya bu sorunu ortadan kaldırmak için başka bir yaklaşımın geliştirilmesi gerekmektedir. (Bracamonte vd. 2016)

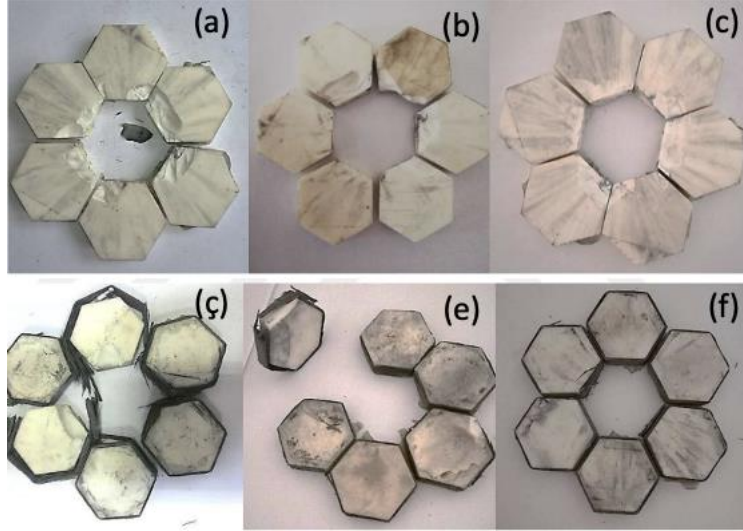
Lanz (2002) kinetik ve kimyasal enerjili tehditlere karşı iki farklı konfigürasyonda alümina seramik karolar üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Şekil 3.11(a), karolar arasında sönümlleme elemanı olmayan deney numunesini, Şekil 3.11(b), karolar arasında 1 mm kalınlığında kauçuk tabaka bulunan deney numunesini göstermektedir. Karolar arasında sönümlleme elemanı kullanılan seramiklerde 40 mm çapta çukur imlalı bir mühimmatın numunede daha küçük bir alanda hasar bıraktığı görülmüştür. Çalışma neticesinde seramik karolar arasındaki sönümlleme elemanları kullanımının çok parçalı bir seramik zırh sistemindeki hasar miktarını azaltabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 3.11: Karolar Arasında Sönümlleme Elemanı Kullanılmayan (a) ve Kullanılan (b) Seramiklerin Atış Sonrası Görüntüleri.

Lanz, W. (2002)

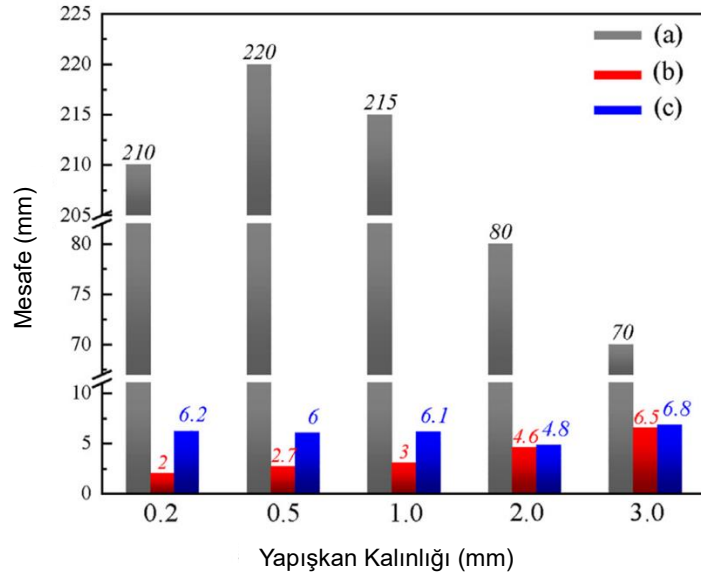
Ongun (2019) yaptığı çalışmada, merminin seramik plakaya çarpmasıyla merminin çarptığı bileşende oluşan hasarın komşu plakalara yayılmasını azaltmak istemiştir. Bu maksatla altıgen şeklindeki alümina seramik plakalar karbon/epoksi kompozit malzeme ile sarılmış 6 mm kalınlığında Hardox zırh çeliği ile desteklenmiştir. Numunelerin bir kısmı seramiklerin arasına 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm uzunluklarında boşluk bırakılarak hazırlanmıştır. Diğer numunelerde ise seramik plakalar aynı kalınlıklarda kompozit sargı ile sarılmıştır. Atışlar sonunda (Şekil 3.12) 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm boşluklu seramiklerde sırasıyla ortalama 6, 4,83 ve 3,67 seramikte hasar gözlenirken 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm kompozit sargılı seramiklerde sırasıyla 6, 0,5 ve 0 seramikte hasar oluşmuştur. Çalışma sonucunda, boşluk miktarının artması ve her bir kalınlıkta boşluklu yapı yerine kompozit sargı kullanımının hasar yayılımını azalttığı; özellikle 1,5 mm kompozit sargının hasar yayılımını neredeyse engellediği; ayrıca, söz konusu uygulamaların zırhın balistik performansına olumlu ya da olumsuz bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir.



Şekil 3.12: (a), (b), ve (c) Sırasıyla 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm Boşluklu Seramikler, (ç), (d) ve (f) Sırasıyla 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm Kompozit Sargılı Seramikler.

ONGUN, Alemdar. (2019)

Shen vd. (2021), seramik/metal kompozit zırhlardaki yapışkan tabakanın zırhın çoklu vuruş durumunda sağladığı balistik performans üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. 0,2 ila 3,0 mm arasında değişen kalınlıklarda epoksi ve poliüretan yapışkanlarının bağlanma mukavemeti ve kopma gerinimi; mermi, seramik ve destek plakası üzerindeki tepkileri üzerinden incelenmiştir. Çalışma neticesinde, epoksi hedeflerin poliüretan hedeflerden tek vuruşlarda daha iyi balistik performans sergilediği ancak daha düşük kırılma gerilimi nedeniyle tüm seramik karoların destek plakasından ayrılması sonucunda epoksi hedefin çoklu vuruşlarda daha düşük balistik performans göstermesine neden olduğu belirtilmiştir. Poliüretan daha iyi çoklu atış performansı sağlamasına rağmen ilk atıştan sonraki penetrasyonda destek plakasındaki delinme derinliğinin, seramik karolardaki geniş hasar nedeniyle daha da büyüdüğü görülmüştür. Kopan, parçalanmış seramik alan, yapışma mukavemetinin ve kopma geriniminin artmasıyla önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yapışkan kalınlıklarının çoklu atışlarda verdiği sonuçlar Şekil 3.13'te sunulmuştur. Yapışkan tabaka kalınlığının belirli seviyeden sonra artmasının seramiğe arka tabakanın sağladığı desteği zayıflattığı, bu sebeple seramiğin balistik performansının kötüleştiği çıkarımı yapılmıştır. Yapışkan tabaka kalınlığının seramiğin balistik direncine ve hasar alanına ters etki yaptığı ifade edilmiştir. Daha iyi çoklu vuruş balistik performansı için optimal yapışkan tabaka kalınlığı 2,0 mm olarak önerilmiştir.



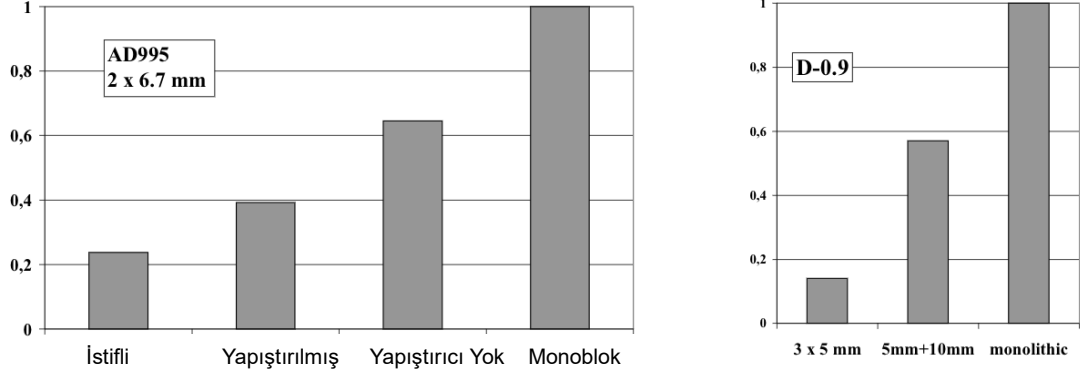
Şekil 3.13: (a) Hasarlı Seramik Alanı (b) ve (c) Sırayla İlk ve İkinci Atış Sonrası Destek Plakadaki Delme Derinliği.

Shen, Yonghua, Yangwei Wang, Shaofeng Du, Zhikun Yang, Huanwu Cheng, ve Fuchi Wang. (2021)

3.1.6. Katmanlı Yapı

Seramik kompozit zırh sistemlerinin gelen tehdidin enerjisini daha iyi absorbe edebilmesi için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, kalın monoblok bir seramik plaka kullanımı yerine çok katmanlı seramik kullanma üzerine yapılan çalışmalar literatürde yer almaktadır.

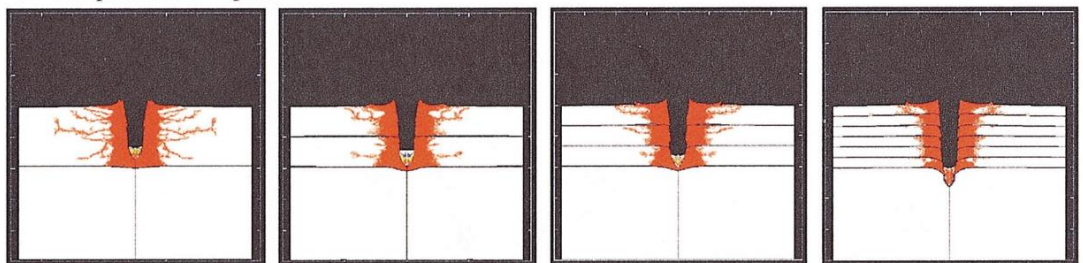
Strassburger ve arkadaşları (2002), Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Sintered Materials (IKTS) ve Ernst-Mach-Institute (EMI) kurumları tarafından geliştirilen mikron altı tane büyüklüğüne sahip alüminalar ile ticari alüminaların 1045 ± 15 m/s uçuş hızına sahip 14,5 mm zırh delici (AP) çelik çekirdekli mermilere karşı balistik performansını DOP metodunu kullanarak incelemiştir. Seramik plakalar poliüretan yapıştırıcı ile Alüminyum (AlCuMg1) destek plakaya sabitlenmiştir. 6,7 mm kalınlığında iki AD-99.5 alumina plakalar farklı yöntemlerle birleştirilerek test edilmiş fakat Şekil 3.14'te görüldüğü gibi katmanlı yapılar monoblok konfigürasyonun altında balistik performans sergilemiştir. Benzer şekilde D-0.9 alumina plakalar toplam 15 mm kalınlık olacak şekilde 3 farklı konfigürasyonda (3x5 mm, 5+10 mm ve 15 mm) test edilmiştir. Tüm arayüzler birbirine poliüretan yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Testler neticesinde Şekil 3.14'te görüldüğü üzere balistik performansın katman sayısı arttıkça azaldığı bildirilmiştir.



Şekil 3.14: Katmanlı ve Monoblok Seramik Plakaların Performans Karşılaştırması.

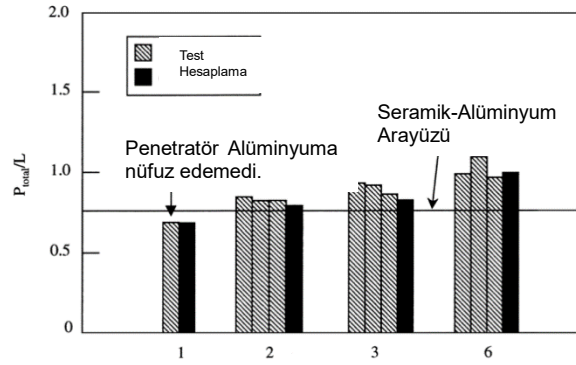
Strassburger E, Lexow B, ve Krell A. (2002)

Holmquist ve arkadaşları (2001), AlN seramiği için JH-2 modelindeki sabitleri belirlemek maksadıyla bir çalışma gerçekleştirmiş AlN için belirledikleri modellemenin yüksek gerinim hızları ve yüksek basınçlardaki ağır yükleme koşullarında bile geçerli sonuçlar verdiğini bildirmiştir. Geliştirilen modellemede katmanlı zırh kullanımının Şekil 3.15'te görüleceği üzere zırh sisteminin balistik performansını düşürdüğü tespit edilmiştir. Modelleme sonuçlarını doğrulamak için aynı parametreler kullanılarak DOP metoduyla balistik testler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, toplam kalınlık 38,1 mm olacak şekilde monoblok, 2, 3 ve 6 katmanlı AlN seramik numuneler hazırlanmıştır. Katmanlar arasında 0,25 mm poliüretan yapıştırıcı, destek plaka olarak da 60 mm 6061-T6 Alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 50 mm uzunluğunda 8,33 mm çapında tungsten alaşım malzemeden imal edilen 50 gr ağırlığındaki çubukla 1150 m/s hızında yapılan atış sonuçlarında numunelerde oluşan delme derinlikleri Şekil 3.16'da görülmektedir. Testler neticesinde tek katmanlı numuneye yapılan atışta, tehdidin destek plakasına nüfuz edemediği fakat katmanlı numunelerde ise katman sayısındaki artışla doğru orantılı olarak delme derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Test sonuçlarının modelleme verisiyle uyumlu olduğu bildirilmiştir.



Şekil 3.15: Monoblok, 2, 3 ve 6 Katmanlı Seramik Zırhların Balistik Testinin Sayısal Modellemesi.

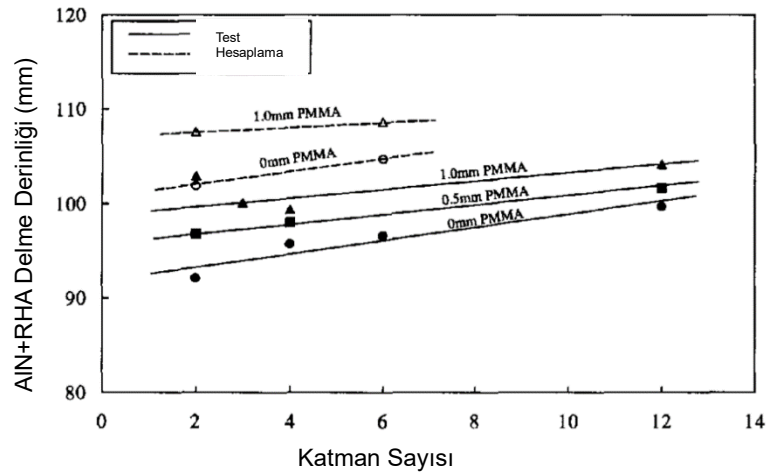
Holmquist, Timothy J, Douglas W Templeton, ve Krishan D Bishnoi. (2001)



Şekil 3.16: Monoblok, 2, 3 ve 6 Katmanlı Seramik Zırhlarda Normalize Delme Derinlik Değerleri.

Holmquist, Timothy J, Douglas W Templeton, ve Krishan D Bishnoi. (2001)

Weber vd. (2001), aynı kalınlıkta farklı katmanlarda AIN hedeflere DOP metoduyla balistik testler icra etmiş, sonuçları sayısal veri ile karşılaştırmıştır. AIN hedefler toplam kalınlık 76.2 olacak şekilde 2,3,4,6 ve 12 olarak değişen katman sayısında ve 100x100 mm ile 150x150 mm olarak iki farklı boyutta ayarlanmıştır. 66 mm uzunluğunda, 11 mm çapında, 110 gr ağırlığında tungsten alaşım penetratör 2100 m/s hızda hedefe çarptırılmıştır. Destek plaka olarak RHA kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada AIN seramik katmanları arasında 1 mm ve 0,5 mm kalınlıklarda ince, düşük empedanslı, polimetil metakrilat (PMMA) kullanımının etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda Şekil 3.17’de gösterildiği üzere, PMMA eklendiğinde ve daha fazla katman kullanıldığında hedef direncinin azaldığı raporlanmıştır.



Şekil 3.17: Katman Sayısının ve Katmanlar Arasında Farklı Kalınlıkta PMMA Malzeme Kullanımının Delme Derinliğine Etkisi.

Weber, Karl, Timothy J Holmquist, ve Douglas W Templeton. (2001)

Rashed ve arkadaşları (2016) çok katmanlı seramik zırh sisteminin yüksek çarpma hızlarında gösterdiği balistik davranışı sayısal modellemeler yardımıyla incelemiştir. Simülasyonlarda 830 m/s hıza sahip 20 mm APDS mühimmat modeli kullanılmıştır. Çalışmada, aşağıda yer alan dört farklı parametrenin balistik performansa etkisi

incelenmiştir.

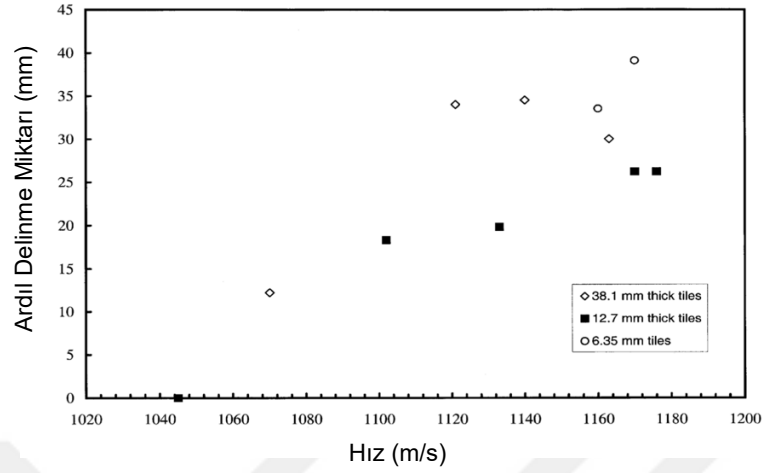
1. Seramik katman sayısı
 2. Seramik katmanların dizilimi
 3. Ara katmanın kalınlığı
 4. Polimetik ara katman malzemeler
- Birinci parametre için, aralarında 0,2 mm epoksi yapıştırıcı bulunan, toplam kalınlığı 24 mm olacak şekilde monoblok, 2, 3, 4, ve 6 katmanlı alümina zırhlar;
 - İkinci parametre için, toplam kalınlığı 24 mm olacak şekilde 4 farklı konfigürasyonda ve 2 farklı dizilimde (16-8 / 8-16) (12-8-4 / 4-8-12) (9-7-5-3 / 3-5-7-9) (8-8-4-4 / 4-4-8-8) alümina zırhlar;
 - Üçüncü parametre için, 12 mm kalınlıkta 2 adet alümina plaka arasında, 0,1 ile 0,5 mm arası kalınlıklarda epoksi reçine;
 - Dördüncü parametre için, epoksi reçine, polietilen, poliüretan, teflon, polisiterin ve naylon ara katman olarak kullanılmıştır.

Çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 2 katmanlı alüminalar en iyi balistik performansı sağlamıştır. Katman sayısı ikiden fazla olan konfigürasyonlarda, balistik performans katman sayısının artışı ile doğru orantılı azalmıştır.
- Katman kalınlıkları azalacak şekilde yapılan dizilimlerin daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Öte yandan katman sayısı artırılarak daha düşük aralıklarla plaka kalınlıklarının azaltılması ile oluşturulan konfigürasyonlar ise daha kötü performans ortaya koymuştur.
- Ara katman malzemesi olarak polisiterin en iyi performansı verirken naylon ile en düşük sonuç elde edilmiştir.
- 0,1 mm kalınlığında polisiterin ara katman ile eşit karo kalınlıklarına sahip çift katmanlı konfigürasyonun en iyi balistik performansı sağladığı raporlanmıştır.

Yadav ve Ravichandran (2003) toplam 38,1 mm kalınlığa sahip monoblok, 3 ve 6 katmanlı AIN seramik numunelere 6 L/d oranlı, düz burunlu tungsten ağır alaşımlı penetratör ile 1100 m/s civarında çapma hızında DOP metodu kullanarak balistik testler icra etmiştir. 0,254 mm poliüretan yapıştırıcı ara katman olarak, 76,2 mm 6061-T6 Alüminyum alaşımı destek plaka olarak kullanılmıştır. Atışlar sonucunda ölçülen delme derinlikleri Şekil 3.18'de görülmektedir. Çalışma sonucunda üç adet seramik katmandan oluşan seramik/polimer yapı, monoblok seramikten daha iyi penetrasyon direnci göstermiştir. Bu durumun, azaltılmış hasar hızı ve seramikteki polimer ara katmanın çatlak önleyici özelliği nedeniyle stres dalgalarının sönmelenmesinin

sonucu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, seramik plakaların artan esnemesinden kaynaklanan hasara bağlı olarak 6'lı katmana sahip numunede penetrasyon direncinin düştüğü raporlanmıştır.



Şekil 3.18: Katman Sayılarının Ardıl Delinme Miktarına Etkisi.

Yadav, S, ve G Ravichandran (2003)

She ve ark. (2000) tarafından SiC içeren ara faza sahip çok katmanlı Al_2O_3 seramikler, ekstrüzyon kalıplama ve sıcak presleme ile imal edilmiştir. Al_2O_3/SiC seramiğin mekanik özellikleri ve kırılma davranışı eğilme testleri ile incelenmiştir. Al_2O_3 katmanları ile SiC içeren ara faz arasındaki arayüzlerde çatlak sapması tespit edilmiştir. Eğilme mukavemeti, görünen tokluk ve kırılma enerjisi sırasıyla 563 MPa, 15,1 MPam^{1/2} ve 3335 J/m²'ye kadar çıkmıştır.

Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından kalınlıkları 6 ile 10 mm arasında değişen AD85 ve BC90G alüminalar ile SiC, B_4C , TiB_2 ve işbu tez çalışmasında kullanılan konfigürasyona benzer şekilde %50 Al_2O_3 +%50 B_4C seramik plakalara 920 m/s namlu çıkış hızında 12.7 mm zırh delici mermi ve 980 m/s namlu çıkış hızında 14.5 mm zırh delici mermiyle ayrı ayrı atışlar yapılmıştır. Testlerde mermi vuruş hızlarının namlu çıkış hızının $\pm\%3$ 'ü içinde ölçüldüğü bildirilmiştir. Destek plakası olarak 2024-T351 alüminyum plaka kullanılmıştır. Testler sonucunda iki farklı tehdit için de B_4C en yüksek balistik verimliliği sunarken sıralama SiC, %50 Al_2O_3 +%50 B_4C , TiB_2 , Al_2O_3 (BC90G) ve Al_2O_3 (AD85) şeklinde devam etmektedir. 12,7 mm ve 14,5 mm mermilere karşı seramiklerin benzer tepkiler verdiği görülmüş, söz konusu tehditlerin burun tipleri ve geometrilerinin aynı olmasından hareketle boyut farklılığının balistik verimliliği önemli ölçüde etkilemediği bildirilmiştir. Balistik verimliliğin, seramiklerin dinamik ve statik akma mukavemetlerinin ortalamasının seramiğin yoğunluğuna oranı ile paralel olarak değiştiği sonucu raporlanmıştır.

3.2. Literatür Özeti ve Değerlendirmesi

Seramik zırh sistemlerinin balistik performansı çok sayıda değişkene bağlıdır. Seramiğin malzeme özellikleri yanında seramiğin kalınlığı, geometrisi, vuruş yüzeyi, seramiğin eğik, boşluklu veya katmanlı kullanılması gibi çok sayıda tasarım parametresi de zırhın etkinliğinde belirleyici rol oynamaktadır. Bunların yanında seramik plakaların bir kaplama veya çerçeveleme işlemine tabi tutulması da sonucu etkileyen işlemler arasındadır. Ayrıca, seramik karoların hem birbirleri hem de destek plaka ile birleştirme metotları da balistik performansı etkilemektedir. Bu kapsamda, aşağıda yer alan 6 başlık altında literatürde yapılan çalışmalar incelemiştir.

- Çerçeveleme/kaplama

Seramiklerin çoklu atışlarda zafiyet yaşaması çerçeveleme/kaplama uygulamalarının asıl tetikleyici unsuru olmuştur. Seramiğin çerçevelenmesiyle, ilk atışta seramik plakanın dağılmasının engellenmesi ve böylelikle müteakip atışlarda da koruma sağlaması amaçlanmaktadır. Literatürde çalışmalarda, çerçevelemenin seramik tozların akışını belirli bir alana hapsettiği ve bunun da merminin daha fazla deforme olmasını sağladığı; mermi hızının daha büyük ivmeyle azalması ile çerçeveli numunelerin arka yüzlerindeki seramiğin parçalanmasını başlatacak hareketin gecikmesini sağladığı görülmektedir. Özetle söz konusu yöntemin hem çoklu atışlara karşı mukavemeti artırdığı hem de seramiğin balistik limitini artırdığı söylenebilir.

- Zırh Seramiği Geometrisi

Seramik zırhın çoklu vuruşlara karşı koruma kabiliyetinin artırılması maksadıyla uygulanan diğer bir yöntem seramiklerin farklı geometrilerde ve boyutlarda çok parçalı şekilde kullanılmasıdır. Çok parçalı konfigürasyon ile bir seramik karonun kırılmasına neden olan gerilmelerin bir çatlak şeklinde yayılma neden olmaması amaçlanmaktadır. Bu çerçevede yapılan çalışmalarda seramiğin boyutlarında ve geometrisindeki değişimin balistik performans ve çoklu atışlara karşı mukavemeti nasıl etkilediğine dair her koşulda çalışan bir ilişki tespit edilememiş ve her durum için optimizasyon çalışması ihtiyacı görülmüştür.

- Vuruş Yüzeyi Geometrisi

Literatürde vuruş anında mermi üzerinde asimetric kuvvetlerin oluşturulması amacıyla çeşitli çalışmalar icra edilmiş olup vuruş yüzeyi geometrisinin değiştirilmesi ile balistik performansın artırılabilceği görülmektedir.

- Plaka Kalınlığı

Plaka kalınlığı ile seramiklerin balistik verimliliğinin ters orantılı değiştiği görülmektedir.

- Birleştirme Metodu

Seramik karolar arasındaki herhangi bir ara yüzde, tehdit hedef etkileşimi sonrası boyuna ve enine yansıyan ve iletilen gerilme dalgaları görülmektedir. Başarılı bir birleştirme metodu yansıyan dalgaları azaltarak seramik üzerinde büyük çekme gerilmeleri oluşmasını engeller ve seramiğin kırılmalara karşı direncini artırmaktadır. Literatürde yer alan araştırmalar, çok parçalı seramik zırhlarda, seramik parçalar arasındaki bağlantıların hem balistik performans üzerinde hem de atış sonrası seramiklerin hasar görme miktarında kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermekte olup ara yüz malzemesi ve kalınlığı hususunda farklı sonuçlar olduğu görülmektedir.

- Katmanlı Yapı

Literatürde yer alan çalışmalarda çoğunlukla katman sayısının artmasıyla balistik performansın düştüğü görülmektedir. Bu durum ara yüzlerde iletilen ve yansıyan gerilim dalgaları ile açıklamaktadır.

Öte yandan seramiklerin balistik performansının basit ve etkin bir şekilde tespit edilmesini sağlayan DOP metodu ile literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde;

- Tehdidin türü ve geometrisinin, (Rozenberg & Yeshurun, 1988)(Delagrave, 1988) (Woolmore vd., 2003) (Woodward & Baxter, 1994)
- Çarpma açısı ve vuruş hızı gibi hedef tehdit etkileşimlerinin, (Vural vd., 2002) (Savio & Madhu, 2018) (Cui vd., 2017) (Madhu vd., 2005),
- Seramik plakanın malzemesi, üretim yöntemi, geometrisi, plaka kalınlığının (Vural vd., 2002) (Savio & Madhu, 2018) (Rozenberg & Yeshurun, 1988) (Delagrave, 1988) (Savio & Madhu, 2019) (Jones, 2015)(Woolmore vd., 2003)(Madhu vd., 2005)(Cui vd., 2017) (Vural vd., 2002)
- Destek plakanın malzemesi ve kalınlığının (Savio & Madhu, 2019)(Woodward & Baxter, 1994)

seramik plakanın balistik performansını etkilediği görülmektedir.

Tablo 11: Literatür Özeti.

No	Yazar	Seramik Malzeme	Destek Plaka	Mermi	Tasarım Parametresi
1	Ernst ve diğ. (1994)	Al ₂ O ₃ TiB ₂ B ₄ C Glass	RHA	Tungsten Penetratör Çap: 7,25 mm Uzunluk: 145 mm Ağırlık:105 g	Çerçeveleme/Kaplama
2	Sarva ve diğ. (2007)	Al ₂ O ₃ SiC	-	Tungsten Penetratör Çap: 6 mm Uzunluk: 19,8 mm Ağırlık:10,68 gr	Çerçeveleme/Kaplama
3	Nasser ve diğ. (2002)	Al ₂ O ₃	-	Tungsten Penetratör Çap: 6,14 mm Uzunluk: 20,86 mm	Çerçeveleme/Kaplama
4	Cui ve diğ. (2017)	SiC B ₄ C	-	87 tipi 5,8 mm Çelik Çekirdekli Mermi	Seramik Geometrisi
5	Hazell ve diğ (2008)	SiC	Polikarbonat	7,62 Tungsten Çekirdekli AP	Seramik Geometrisi
6	Bless ve Jurick (1998)	-	-	-	Seramik Geometrisi
7	Guo ve diğ. (2020)	Al ₂ O ₃	Kevlar-29	4340 çelik malzemeden 5,5 g ağırlığında oval burunlu mermi	Seramik Geometrisi
8	Savio ve Madhu (2018)	B ₄ C	Al7017-T6 Al2024-T351 Al6063-T6	7,62 Çelik Çekirdekli AP	Seramik Geometrisi Çerçeveleme/Kaplama
9	Karandikar ve diğ. (2015)	BSC-800 (80% B ₄ C and 20% SiC)	-	7,62 Çelik Çekirdekli AP	Vuruş Geometrisi Yüzeyi
10	Shukla ve diğ. (2003)	SiC B ₄ C	Kumaş	7,62 APM2	Vuruş Geometrisi Yüzeyi
11	Braga ve diğ. (2018)	Al ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅ (ağırlık %4)	Kevlar-29 5052 H34 Alüminyum	7.62 × 51 mm M1 AP	Vuruş Geometrisi Yüzeyi
12	Monteiro ve diğ. (2016)	Al ₂ O ₃ -Nb ₂ O ₅ (ağırlık %4)	Al6061-T6	7.62 × 51 mm M1 AP	Vuruş Geometrisi Yüzeyi
13	Çelikbaş ve Acar (2021)	Al ₂ O ₃	-	Çelik Mermi (MAT 98 – Simplified Johnson Cook)	Vuruş Geometrisi Yüzeyi
14	Vural ve diğ. (2002)	Al ₂ O ₃ (AD-96) Al ₂ O ₃ (AD-99.8)	Al6061-T6	7,62 AP	Plaka Kalınlığı
15	Lanz (2002)	Al ₂ O ₃ Si ₃ N ₄ SiC	GFRP RHA	Tungsten Penetratör	Birleştirme Metodu Çerçeveleme/Kaplama
16	Ongun (2019)	Al ₂ O ₃	S235 Çelik	7,62 AP	Birleştirme Metodu
17	Shen ve diğ. (2021)	SiC	RHA	12.7 API	Birleştirme Metodu
18	Strassburger ve diğ. (2002)	Al ₂ O ₃	RHA AlCuMg1	14.5 Tungsten Çekirdekli AP 14.5 Çelik Çekirdekli AP	Katmanlı Yapı Birleştirme Metodu
19	Holmquist ve diğ. (2001)	AlN	Al6061-T6	Tungsten Penetratör Çap: 8,33 mm Uzunluk: 50 mm Ağırlık: 50 gr	Katmanlı Yapı
20	Weber ve diğ. (2001)	AlN	RHA	Tungsten Penetratör Çap: 11 mm	Katmanlı Yapı Birleştirme Metodu

				Uzunluk: 66 mm Ağırlık: 110 gr	
21	Rashed ve diğ. (2016)	Al ₂ O ₃	Al5083-H116	20 mm APDS	Plaka Kalınlığı Katmanlı Yapı Birleştirme Metodu
22	Yadav ve Ravichandran (2003)	AlN	Al6061-T6	6 L/d oranlı, düz burunlu Tungsten Penetratör	Katmanlı Yapı
23	She ve diğ. (2000)	Al ₂ O ₃ /SiC	-	-	Katmanlı Yapı
24	Rozenberg ve Yeshurun (1988)	Al ₂ O ₃ SiC B ₄ C TiB ₂	Al2024-T351	12.7 AP 14.5 AP	Plaka Kalınlığı Katmanlı Yapı
25	Delagrave (1988)	Al ₂ O ₃ SiC B ₄ C	Al6061-T6	14.5 AP B32 12.7 SLAP	Plaka Kalınlığı
26	Woolmore ve diğ. (2003)	Al ₂ O ₃ SiC	Alüminyum Alaşımları	14.5 AP BS41	Plaka Kalınlığı
27	Woodward ve Baxter (1994)	Al ₂ O ₃	Al5083-H115 RHA HHA	7,72 mm Tungsten Çekirdekli Düz ve Oval Burunlu Mermi 10,85 mm Çelik Çekirdekli Düz ve Oval Burunlu Mermi	Destek Plaka Mermi Geometrisi
28	Savio ve Madhu (2019)	Al ₂ O ₃	Al6061-T6 Al6063-T6	7.62 mm× 54R (B32)	Seramik Geometrisi
29	Madhu ve diğ. (2005)	Al ₂ O ₃	Al7017	7,62 AP 12,7 AP	Plaka Kalınlığı
30	Jones (2015)	SiC B ₄ C	Al6061	12,7 AP M2	Seramik Malzeme

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Materyal

4.1.1. Test Bileşenleri

Bu çalışma kapsamında 5 mm ve 10 mm kalınlıklarda üç farklı kimyasal bileşime sahip malzemeden seramik plaka temin edilmiş olup söz konusu plakalara ilişkin model, adet ve boyut bilgileri Tablo 12’de mekanik özellikleri Tablo 13’te yer almaktadır.

Tablo 12: Tedarik Edilen Seramik Plaka Bilgileri.

Seramik Tipi	Tanım	Adet	Kalınlık (mm)	En x Boy (mm)
Coorstek FG99.5	Al ₂ O ₃	3	5	100x100
Coorstek FG99.5	Al ₂ O ₃	3	10	100x100
Coorstek SC30-03	SiC	3	5	100x100
Coorstek SC30-03	SiC	3	10	100x100
Paxis B ₄ C	B ₄ C	10	10	100x100

Tablo 13: Seramik Plakaların Mekanik Özellikleri.

Tanım	Al ₂ O ₃	SiC	B ₄ C
Model	Coorstek FG99.5	Coorstek SC30-03	Paxis B ₄ C Borlite322
Üretim Metodu	Sıcak Sinterleme	Sıcak Pres	Direk Sinterleme
Yoğunluk (g/cm ³)	3,80	3,15	2,64
Elastisite Modülü (GPa)	350	410	>400
Basma Mukavemeti (MPa)	2500	3500	-
Çekme Mukavemeti (MPa)	248	-	-
Sertlik	1400 kg/mm ² (KNOOP 100gm)	2800 kg/mm ² ((KNOOP 100gm))	2200 kgf/mm ² (VICKERS)
Kırılma Tokluğu (MPa*m ^{1/2})	4-5	4	4,5
Ses Hızı	-	-	>13000

<https://www.coorstek.com/media/4129/ceramic-armor-superior-lightweight-protection.pdf> [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

<https://www.paxisceramics.com/wp-content/uploads/2019/11/Paxis-Ceramic-Materials.pdf> [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

Tedarik edilen plakalar ile toplam 10 mm kalınlıkta 4 farklı konfigürasyon elde edilmiş olup tez kapsamında icra edilecek testler Tablo 14'te verilmiştir. Her bir numuneye bir atış olacak şekilde toplamda 12 adet atış yapılacaktır. Söz konusu 4 test grubunda yer alan toplam 12 test numunesi Şekil 4.1'de görülmektedir. Testlerde kullanılan plakaların boyut ve ağırlık ölçüm sonuçları Tablo 15'te yer almaktadır.

Tablo 14: Test Matrisi.

Test Grup No	Konfigürasyon	Numune Adedi	Atış Sayısı
1	10 mm Al ₂ O ₃	3	3
2	5 mm Al ₂ O ₃ + 5 mm SiC	3	3
3	10 mm SiC	3	3
4	10 mm B ₄ C	3	3

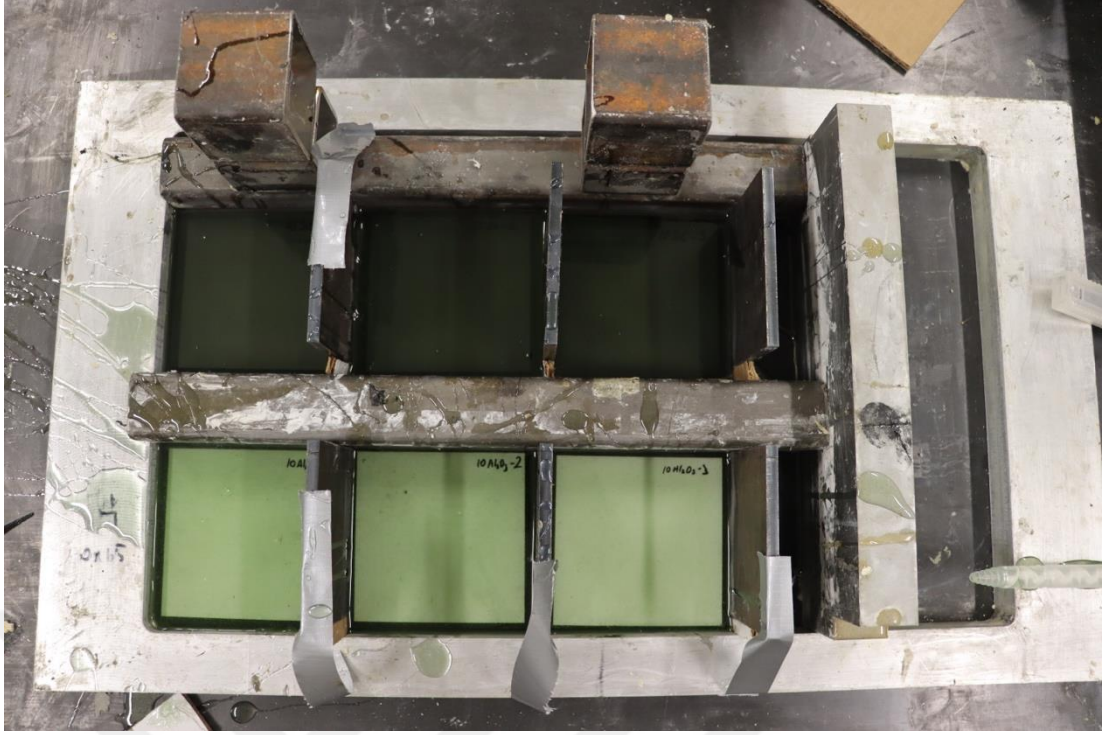


Şekil 4.1: Test Numuneleri.

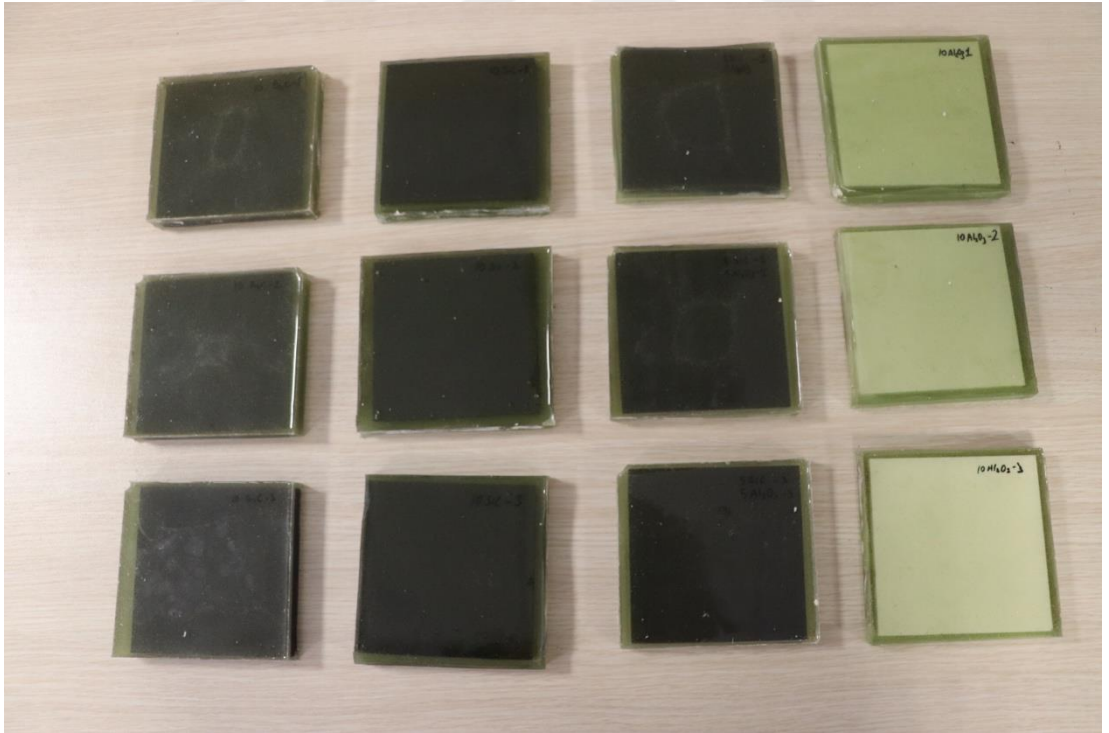
Tablo 15: Testlerde Kullanılan Numunelerin Ağırlık ve Boyut Ölçümleri.

Test Grubu	Atış Kodu	Tanım	Kalınlık (mm)	Boyut – X (mm)	Boyut – Y (mm)	Ağırlık (gr)
1	729-1	10Al ₂ O ₃ -1	9,90	102,92	102,83	399,06
	729-2	10Al ₂ O ₃ -2	9,85	102,90	102,83	396,48
	729-3	10Al ₂ O ₃ -3	9,86	102,78	102,81	396,85
2	729-4	5SiC-1	4,97	101,01	101,29	159,34
		5Al ₂ O ₃ -1	4,93	103,02	102,93	198,37
	729-5	5SiC-2	4,98	100,85	100,86	158,49
		5Al ₂ O ₃ -2	4,95	102,93	102,88	197,35
	729-6	5SiC-3	4,95	100,81	100,83	159,77
		5Al ₂ O ₃ -3	4,95	102,86	102,91	199,75
3	729-7	10SiC-1	9,97	100,79	100,85	319,89
	729-8	10SiC-2	9,98	100,88	100,85	319,47
	729-9	10SiC-3	9,97	101,41	101,01	319,52
4	729-10	10 B ₄ C-1	10,30	100,41	100,39	265,44
	729-11	10 B ₄ C-2	10,33	100,72	100,92	268,83
	729-12	10 B ₄ C-3	10,35	100,83	101,11	268,13

İki farklı plakadan oluşan 4. Test grubundaki numunelerin birbirine tam entegre olabilmesi için bresin malzeme ile kaplanmasının faydalı olacağı değerlendirilmiş ve söz konusu uygulamanın test sonuçlarında fark yaratmaması için tüm numuneler Şekil 4.2’de görüldüğü gibi oda sıcaklığında kalıp içerisinde 12 saat bekletilerek bresin yapıştırıcı ile kaplanmıştır. Numunelerin son hali Şekil 4.3’te görülmektedir.



Şekil 4.2: Test Numunelerinin Bresin Malzeme ile Kalıp İçerisinde Kaplama İşlemi.

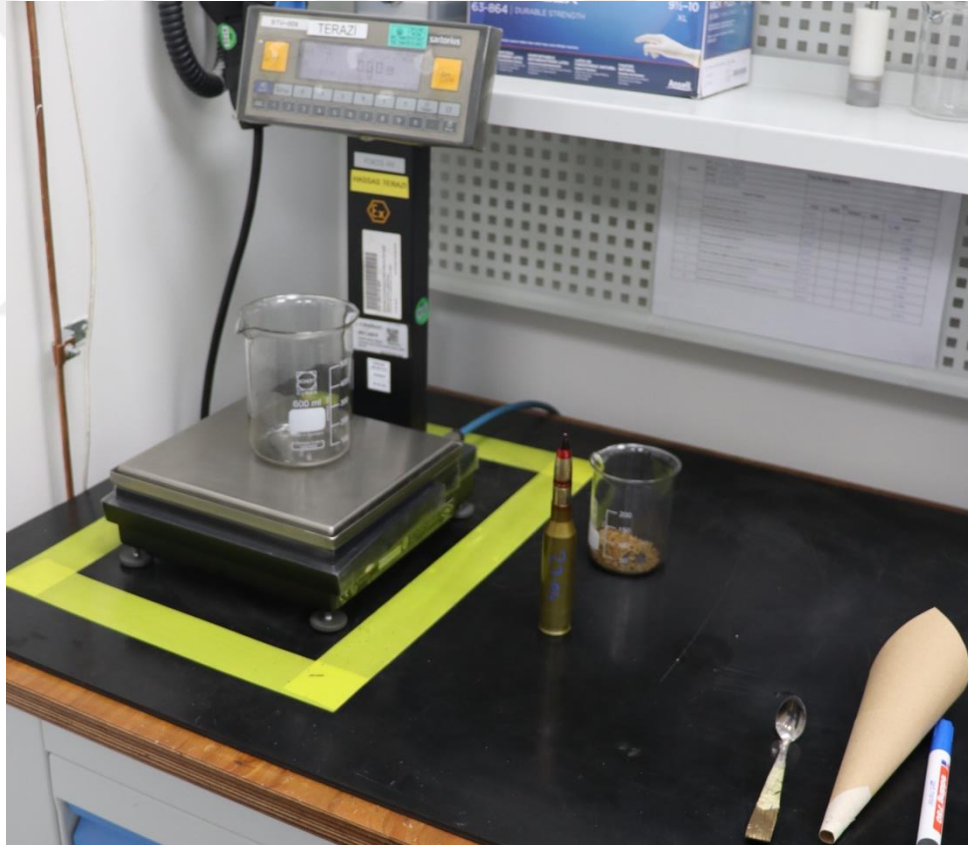


Şekil 4.3: Bresin Malzeme ile Kaplanmış Numuneler.

Atışlarda Şekil 4.4'te görülen 14,5 mm zırh delici mermi kullanılmıştır. Mermi ağırlığı STANAG 4569 AEP55 Volume-1 Seviye-4 doğrultusunda mermi hızı 911 ± 20 m/s olacak şekilde mermi içindeki barut miktarı $63,40 \pm 0,5$ gr aralığında Şekil 4.5'de görüldüğü gibi ayarlanmıştır.



Şekil 4.4: 14,5 mm AP mermi çekirdeği.



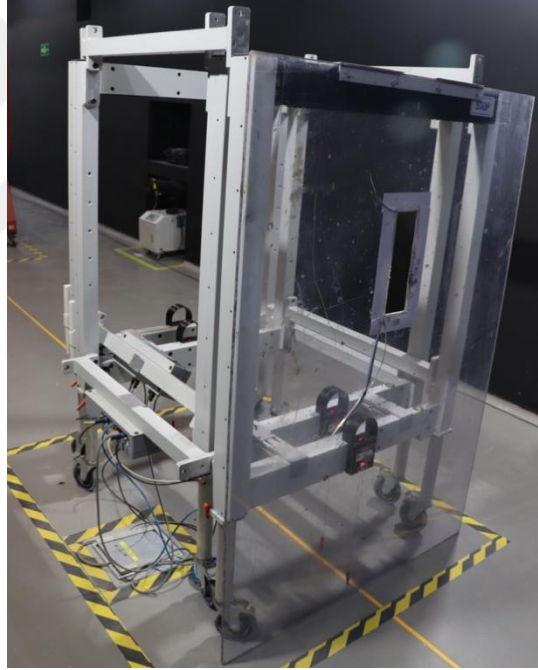
Şekil 4.5: Sevk Barutu'nun Ayarlanması.

Destek plakası olarak her bir atış için 6061-T6 Alüminyum alaşımında 25 mm kalınlığında 3'er adet plaka kullanılmıştır. 6061-T6 Alüminyum alaşımının kullanımıyla her bir atış sonucunda RHA'ya nazaran daha yüksek delme derinliklerinin ortaya çıkması sağlanmış, böylelikle ölçüm hataları minimize edilerek daha doğru sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir.

4.1.2. Balistik Test Düzeneği

Testler Roketsan'ın Elmadağ yerleşkesinde bulunan Balistik Koruma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Balistik Koruma Merkezi savunma sektörünün balistik koruma ihtiyacının milli imkanlarla karşılanması hususunun kritik önemi haiz olduğu değerlendirilerek ALTAY Projesi kapsamında kurulmuştur. Halihazırda sahip olduğu tasarım kabiliyeti ve altyapı imkanları ile kara, deniz ve hava platformlarına AEP 55 STANAG 4569 Vol-1 Seviye-6'ya kadar zırh çözümü sunabilme, ayrıca mayın koruması, parçacık kalkanı, eklemeli zırh çözümleri ve reaktif zırhlar olmak üzere geniş yelpazede balistik koruma sistemleri tasarlama ve üretme yeteneğine sahiptir.

Atışlar Balistik Koruma Merkezi bünyesinde bulunan 20 mm kadar mühimmat ile test yapabilme yeterliliğinde altyapıya sahip akredite Kapalı Balistik Laboratuvarı'nda icra edilmiştir. Şekil 4.6'da mermi hızını ölçen sistem, Şekil 4.7'de atışların yapıldığı silah sistemi ve Şekil 4.8'de Laboratuvarın genel görüntüsü görölmektedir.



Şekil 4.6: Mermi Hızı Ölçüm Sistemi.

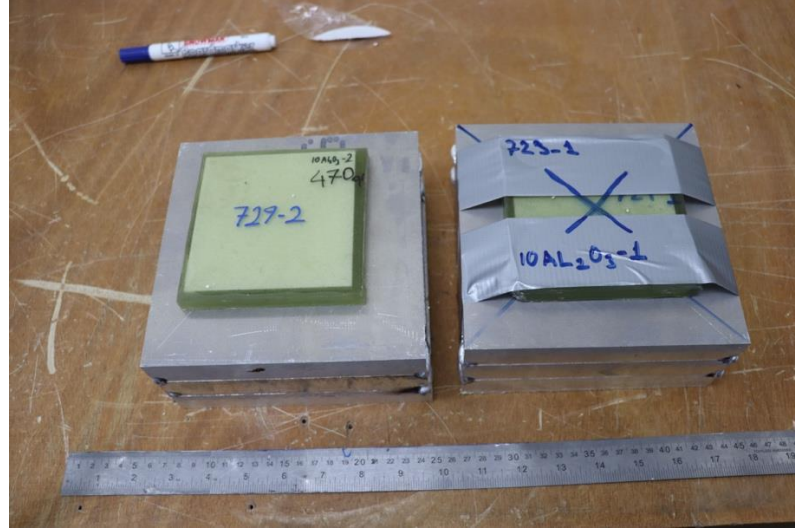


Şekil 4.7: Silah Sistemi.

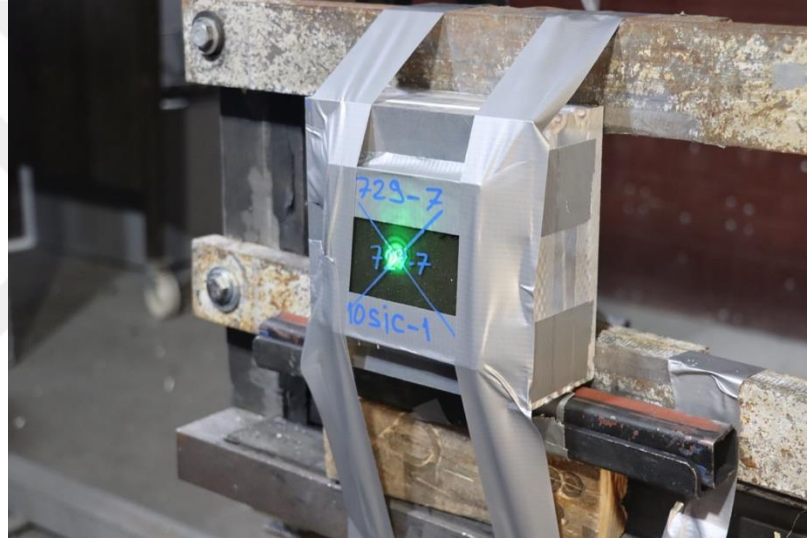


Şekil 4.8: Roketsan Balistik Koruma Merkezi Kapalı Balistik Laboratuvarı.

Test numuneleri Şekil 4.9'da görüldüğü gibi destek plakalarına bantlanmış ve Şekil 4.10'da ise test fikstürüne sabitlenmiştir.



Şekil 4.9: Test Numunelerinin Destek Plakaya Yapıştırılması.



Şekil 4.10: Test Numunesinin Test Fikstürüne Bağlanması.

4.2. Metot

Genellikle balistik testlerde test edilen numunelerin balistik performansını belirlemek veya karşılaştırmak için iki farklı yöntem kullanılır.

Birincisi, balistik limit testidir. Bu yöntem sonucunda zırh numunesinin 50% ihtimalle delindiği tehdit hızı (V_{50} olarak sembolize edilir) tespit edilir. Söz konusu değerin bulunabilmesi için çok defa atış yapılması gerekir. Numunelerin balistik performansını karşılaştırmak için kullanılan en yaygın ikinci yöntem ise delme derinliği (DOP) testidir. Rosenberg ve arkadaşları tarafından seramik malzemelerin arkalarına ince bir plaka yerleştirildiğinde ortaya çıkan çekme gerilmelerinden kurtulmak için yarı sonsuz plaka kullanmalarıyla geliştirilmiştir. (Z. Rosenberg ve Dekel 1994) Şekil 4.11’de gösterildiği üzere söz konusu yöntemde numunenin arkasına yarı sonsuz kalınlıkta bir levha

konur. Belirli bir mühimmat ile yapılan atışlar sonrasında numune arkasına yerleştirilen levhadaki delinme miktarı ölçülür. Aşağıda verilen 1 ve 2 numaralı denklemler kullanılarak test edilen numunelerin balistik verimliliği ve kütle verimliliği hesaplanarak balistik performansları karşılaştırılır. (Akella 2020) (Hazell, 2022)

$$\eta = \frac{\rho_{des} P_{\infty}}{\rho_{cer} T_{cer}} \quad (1)$$

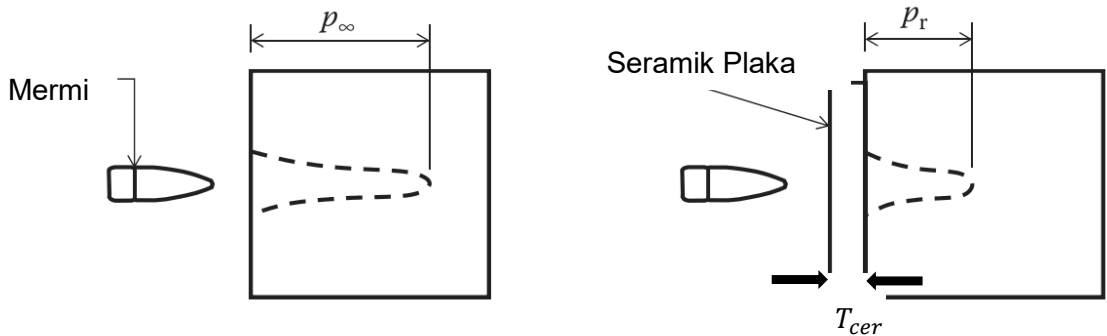
$$E_m = \frac{\rho_{des}(P_{\infty} - P_r)}{\rho_{cer} T_{cer}} \quad (2)$$

Burada;

- η test edilen numunenin balistik verimliliğini,
- E_m test edilen numunenin kütle verimliliğini,
- ρ_{des} destek plakasının yoğunluğunu,
- ρ_{cer} seramik plakanın yoğunluğunu,
- T_{cer} seramik plakanın kalınlığını,
- P_{∞} merminin yarı sonsuz destek plaka üzerindeki delme miktarını,
- P_r ise önüne seramik plaka yerleştirilmiş yarı sonsuz destek plaka üzerindeki delme miktarını sembolize etmektedir.

Levha malzemesi olarak yüksek hızlı çubuk penetratör kullanılan atışlarda haddelenmiş homojen zırh (RHA) tercih ediliyorken düşük kalibreli mermilerde alüminyum veya polikarbonat gibi daha yumuşak ve düşük yoğunluklu malzemeler tercih edilir.

Bu tez çalışması kapsamında, artık delinme miktarı tespit edilecektir. Yukarıda bilgileri verilen mühimmat ile yapılan her atış sonrası artık delme derinliği ölçülecek ve test sonuçları arasındaki farklılıklar kaydedilecektir.



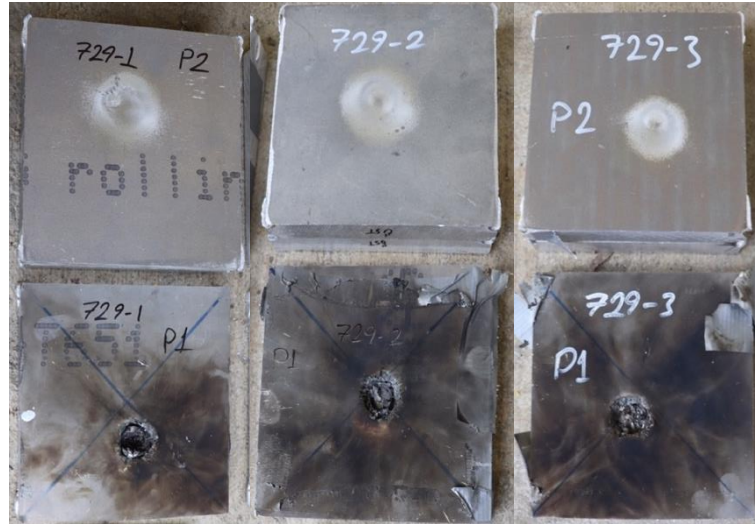
Şekil 4.11: Delme Derinliği Testi.

Hazell, P.J. (2022)'den uyarlanmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında balistik testler dört grupta icra edilmiştir. Birinci grupta 10 mm kalınlığında 100*100 mm boyutunda 10Al₂O₃-1, 10Al₂O₃-2 ve 10Al₂O₃-3 numunelerine; ikinci grupta 5 mm kalınlığında 100*100 mm boyutunda Al₂O₃ ve 5 mm kalınlığında 100*100 mm boyutunda SiC plakaların birleştirilmesiyle oluşan 5SiC-1-5Al₂O₃-1, 5SiC-2-5Al₂O₃-2 ve 5SiC-3-5Al₂O₃-3 numunelerine; üçüncü grupta 10 mm kalınlığında 100*100 mm boyutunda 10SiC-1, 10SiC-2 ve 10SiC-3 numunelerine; dördüncü grupta 10 mm kalınlığında 100*100 mm boyutunda 10 B₄C-1, 10 B₄C-2 ve 10 B₄C-3 numunelerine 25 mm kalınlığında 3'er adet 6061-T6 Alüminyum plakalar destek yapılmış ve 14,5 mm AP mühimmatı ile birer atış yapılmıştır.

Test Grubu-1'e ait destek plakasının atış sonrası görüntüleri Şekil 5.1'de sunulmuştur. Al₂O₃ plakalarını parçalayan mermi 3 atışın tamamında da ilk destek plakasını delmeyi başaramamıştır. 2. Destek plaka yüzeyinde herhangi bir deformasyon görülmemiş olup sadece atış bölgesinde darbe etkisiyle iz oluşmuştur.



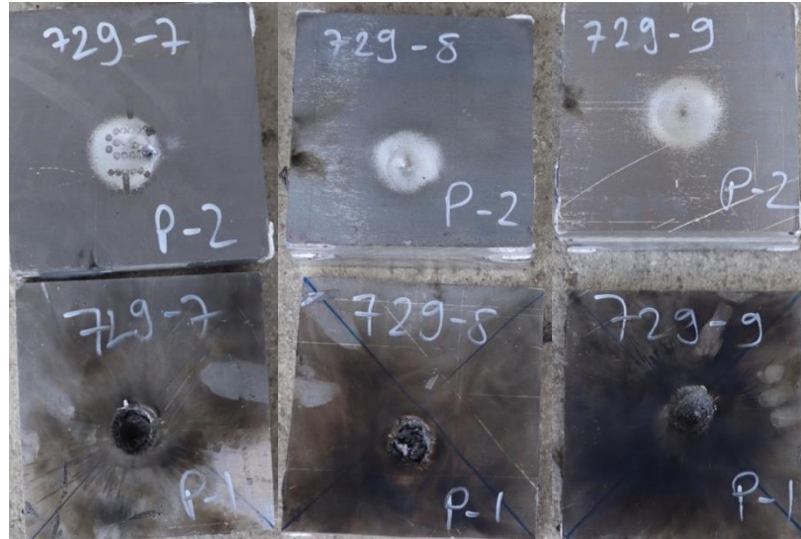
Şekil 5.1: Test Grubu-1 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü.

Test Grubu-2'ye ait destek plakasının atış sonrası görüntüleri Şekil 5.2'de sunulmuştur. 729-4 ve 729-5 kodlu atışlarda merminin ikinci plakaya nüfuz ettiği tespit edilmiştir. Öte yandan, 5SiC-2-5Al₂O₃-2 numunesine yapılan 729-6 kodlu atışta ilk destek plakasında perforasyona ulaşılamamıştır.



Şekil 5.2: Test Grubu-2 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü.

Test Grubu-3'e ait destek plakasının atış sonrası görüntüleri Şekil 5.3'de sunulmuştur. 729-7 kodlu atışta birinci plakada perforasyon görülmüş mermi ikinci destek plakasını çok düşük miktarda penetre etmiştir. 729-8 ve 729-9 kodlu atışlarda mermi birinci destek plakasında kalmıştır.



Şekil 5.3: Test Grubu-3 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü.

Test Grubu-4'e ait destek plakasının atış sonrası görüntüleri Şekil 5.4'te sunulmuştur. Bu gruptaki tüm atışlarda ilk iki destek plakasında perforasyon görülmüş olup mermi üçüncü plakalara nüfuz etmiştir.



Şekil 5.4: Test Grubu-4 Atış Sonrası Destek Plakalarının Görüntüsü

Müteakiben plakalar vuruş yerlerinden kesilmiştir. 729-2 kodlu atışa ait 1. destek plakasının ara kesiti Şekil 5.5’de örnek olarak verilmiştir. Her bir atışta mermilerin nüfuz ettiği son plakaların ara kesit görüntüsü Şekil 5.6’da birlikte gösterilmiştir. Dijital kumpaslar yardımıyla Şekil 5.7’de görüldüğü gibi delme derinliği ölçümü yapılmıştır. Her bir atışa ait ölçülen delme derinlikleri ve vuruş hızları Tablo 16’da işlenmiştir.



Şekil 5.5: 729-2 Kodlu Atışa Ait 1. Destek Plakasının Ara Kesiti.



Şekil 5.6: Her bir Atışta Merminin Nüfuz Ettiği Son Destek Plakasının Ara Kesiti.



Şekil 5.7: Kesilen Plakalardan Delme Derinlik Ölçümü.

Tablo 16: Vuruş Hızı ve Penetrasyon Derinliği Ölçümleri.

Test Grubu	Atış Kodu	Tanım	Vuruş Hızı (m/s)	DOP, P_r (mm)
1	729-1	10Al ₂ O ₃ -1	923,33	22,35
	729-2	10Al ₂ O ₃ -2	922,01	21,01
	729-3	10Al ₂ O ₃ -3	921,71	14,72
2	729-4	5SiC-1 5Al ₂ O ₃ -1	922,58	31,95
	729-5	5SiC-2 5Al ₂ O ₃ -2	918,75	27,86
	729-6	5SiC-3 5Al ₂ O ₃ -3	921,05	22,35
3	729-7	10SiC-1	925,13	28,64
	729-8	10SiC-2	924,67	19,16
	729-9	10SiC-3	919,12	17,29
4	729-10	10B ₄ C-1	931,47	59,61
	729-11	10B ₄ C-2	918,52	63,41
	729-12	10B ₄ C-3	924,05	63,98

Sonuçların analiz edilebilmesi için 1 ve 2 numaralı balistik verimliliği ve kütle verimliliği denklemleri kullanılarak her bir numunenin balistik ve kütle verimliliği hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan numunelerin yoğunluğu Tablo 15’de yer alan ağırlık ve boyut bilgileri kullanılarak bulunmuştur. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Tablo 17’ye işlenmiştir.

Tablo 17: Test Numuneleri Balistik Verimlilik ve Kütle Verimlilik Değerleri.

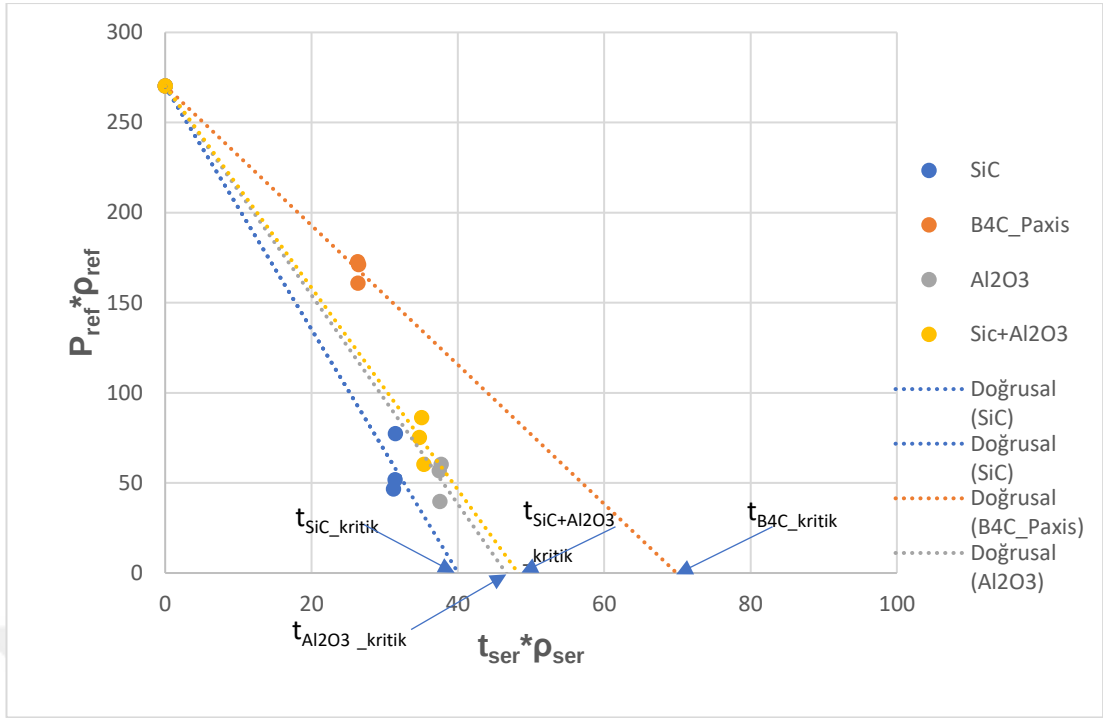
Test Grubu	Atış Kodu	Tanım	Kalınlık (mm)	Yoğunluk, ρ_{cer} (g/cm ³)		AD (kg/m ²)	AD_ort (kg/m ²)	DOP, P_r (mm)	DOP ort, P_r (mm)	DOP, P_{∞} (mm)	ρ_{Al} (g/cm ³)	Kütle Verimliliği, E_m	Ort. Kütle Verimliliği, E_m ort	Balistik Verimliliği, η	Ort Balistik Verimliliği, η	Kritik Kalınlık, t_{kritik} (mm)	AD _{kritik} (kg/m ²)
1	729-1	10Al ₂ O ₃ -1	9,9	3,81		37,71	37,58	22,35	19,36	100	2,7	5,56	5,79	5,81	5,80	12,23	46,56
	729-2	10Al ₂ O ₃ -2	9,85	3,80		37,47		21,01				5,69		5,80			
	729-3	10Al ₂ O ₃ -3	9,86	3,81		37,56		14,72				6,13		5,79			
2	729-4	5SiC-1	4,97	3,13	3,47	35,04	35,05	31,95	27,39			5,35	5,69	5,61	5,58	13,87	48,18
		5Al ₂ O ₃ -1	4,93	3,79				27,86				5,68		5,58			
	729-5	5SiC-2	4,98	3,13	3,45	34,77		27,86				5,68		5,58			
		5Al ₂ O ₃ -2	4,95	3,76				22,35				6,05		5,54			
	729-6	5SiC-3	4,95	3,18	3,50	35,36		22,35				6,05		5,54			
		5Al ₂ O ₃ -3	4,95	3,81				6,12				6,77					
3	729-7	10SiC-1	9,97	3,16		31,47	31,35	28,64	21,70			6,12	6,74	6,77	6,76	12,73	40,03
	729-8	10SiC-2	9,98	3,15		31,40		19,16				6,95		6,78			
	729-9	10SiC-3	9,97	3,13		31,19		17,29				7,16		6,72			
4	729-10	10B ₄ C-1	10,3	2,56		26,33	26,36	59,61	62,33			4,14	3,86	3,96	3,89	27,36	69,84
	729-11	10B ₄ C-2	10,33	2,56		26,45		63,41				3,74		3,81			
	729-12	10B ₄ C-3	10,35	2,54		26,30		63,98				3,70		3,90			

Tez kapsamında 10 mm kalınlıkta $10\text{Al}_2\text{O}_3$, 10SiC ve $10\text{B}_4\text{C}$ ile 5'er mm kalınlıkta Al_2O_3 ve SiC plakadan oluşan $5\text{SiC}5\text{Al}_2\text{O}_3$ numunelerinden en düşük penetrasyon derinliğini üç atışta ortalama 19,36 mm değeri ile $10\text{Al}_2\text{O}_3$ sağlamıştır. $10\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ten sonra aynı kalınlıktaki penetrasyon direnci sıralaması ortalama 21,70 mm ile 10SiC , ortalama 27,39 mm ile $5\text{SiC}5\text{Al}_2\text{O}_3$ ve ortalama 62,33 mm ile $10\text{B}_4\text{C}$ olarak görülmektedir.

Öte yandan, hareket kabiliyetinin kritik önemi haiz olduğu personel veya zırhlı muharebe araçları gibi hareketli platformlar için numunelerin aynı hacimde daha iyi balistik performans sağlamasından ziyade aynı alansal yoğunlukta daha iyi balistik performans sağlaması daha ehemmiyetlidir. Bu çerçevede, numunelerin 6061-T6 Alüminyum destek plakası önünde 14,5 mm zırh delici mermiye karşı gösterdikleri balistik performans Şekil 5.8'de sunulmuştur. Burada, delme derinliği ve seramik plaka kalınlığı sırasıyla destek plakanın ve seramiğin yoğunluğu ile çarpılarak normalize edilmiştir. Sonuç olarak, grafikte seramiğin alansal yoğunluğuna karşılık delinen destek plakanın alansal yoğunluğu bilgisi verilmektedir.

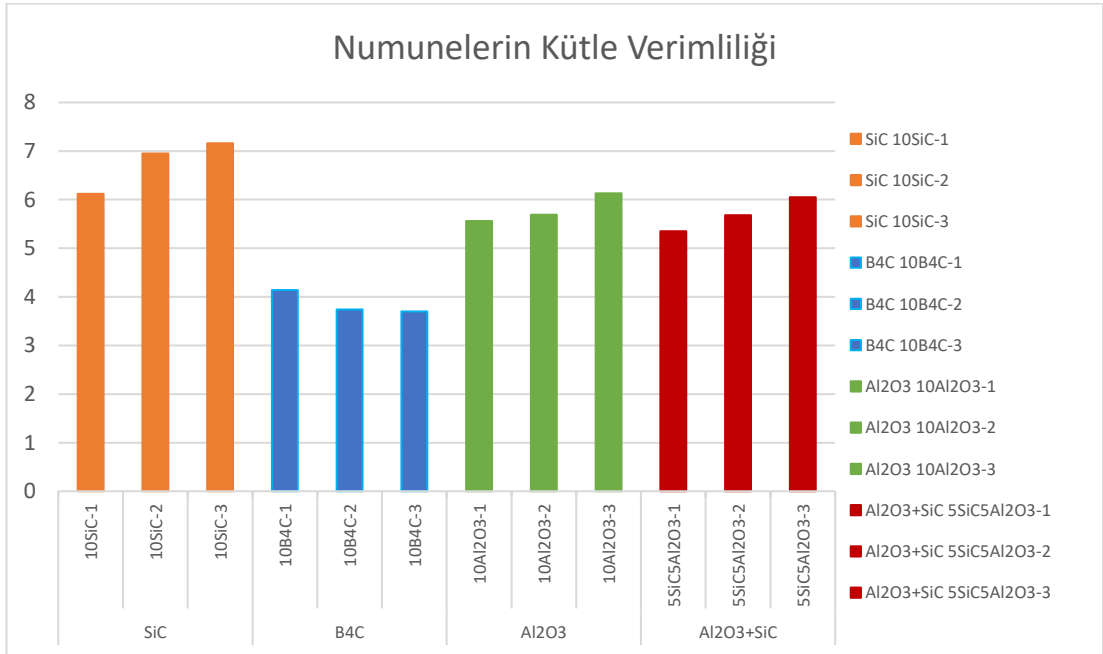
Ayrıca, tehdidin önünde seramik bulunmayan destek plakasında deldiği alansal yoğunluk ile test verisi arasında doğrusal regresyon çizgisi yerleştirilmiş, böylelikle tehdidin destek plakalarına nüfuz etmeden durdurabilmesini mümkün kılan seramik plakanın kritik kalınlığı hesaplanmıştır. Bu şekilde hesaplanan her bir seramik plakaya ilişkin kritik kalınlık değeri Tablo 17'ye işlenmiş ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Grafikteki doğrusal regresyon çizgilerinin eğimi balistik verimliliği vermektedir. Bu kapsamda, daha dik olan çizgiyle gösterilen seramiğin balistik verimlilik değeri daha yüksektir. 6,76 ile 10SiC numunelerinin en yüksek balistik verimliliğe sahip iken, $10\text{Al}_2\text{O}_3$, $5\text{SiC}5\text{Al}_2\text{O}_3$ ve B_4C numunelerinin balistik verimlilik değerleri sırasıyla 5,80 5,58 3,89 olarak hesaplanmıştır. Burada, SiC ve Al_2O_3 malzemelerinin birleştirilmesiyle oluşan $5\text{SiC}5\text{Al}_2\text{O}_3$ numunesinin $10\text{Al}_2\text{O}_3$ 'e yakın ama daha biraz aşağısında verimlilik değerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8: Seramik Plakaların Alansal Yoğunluğuna Karşı Delinen Destek Plakanın Alansal Yoğunluğu.

Test numunelerinin kütle verimliliği değerleri Şekil 5.9'da sunulmuştur. 10SiC ortalama 6,74'le en iyi kütle verimliliğini sunarken Al_2O_3 ve 5SiC5Al₂O₃ numunelerinin kütle verimliliği sırasıyla 5,79 ve 5,69 çıkmıştır. 10B4C numuneleri ise 3,86 gibi diğer numunelere nazaran düşük kütle verimliliği sağlamıştır.



Şekil 5.9: Numunelerin Kütle Verimliliği.

Elde edilen test verisi literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tehdidin türü ve geometrisinin, çarpma açısı ve vuruş hızı gibi hedef tehdit etkileşimlerinin, seramik

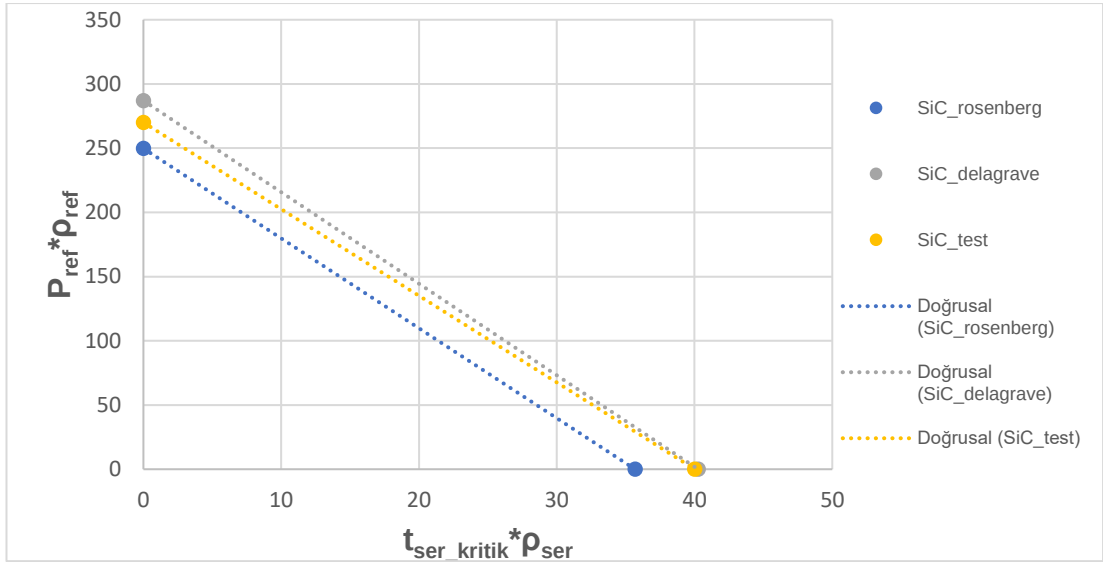
plakanın malzemesi, üretim yöntemi, geometrisi, plaka kalınlığının ve destek plakanın malzemesi ve kalınlığının seramik plakanın balistik ve kütle verimliliği değerlerini etkilediği bilinmektedir. Bu çerçevede, literatürdeki balistik verimlilik ve kütle verimlilik değerleri ile karşılaştırma yapabilmek için yukarıda ifade edilen parametrelerin büyük oranda aynı olduğu çalışmaların seçilmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda, tez kapsamında icra edilen balistik testlerdeki tehdit tipi, destek plakası gibi parametrelerle önemli ölçüde uyduğu için Delagrave (1988) ile Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen değerler bu tez çalışmasında ortaya çıkan balistik test verisiyle karşılaştırılmıştır.

Delagrave (1988) tarafından yapılan çalışmada 12.7 mm kalınlığında Al_2O_3 %98, 12.7 mm kalınlığında Al_2O_3 %95, 10.2 mm kalınlığında SiC ile 6.4 mm kalınlığında B4C seramik plakalara 14.5 mm AP B32 mermi ile 1005 m/s hızda yapılan atışlar neticesinde elde edilen veri analiz çalışmasında kullanılmıştır.

Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmada 14.5 mm zırhlı mermi ile TiB_2 harici seramiklere yapılan atışlarda elde edilen veri, analiz çalışmasında kullanılmıştır.

Şekil 5.10'de bu tez çalışması ile Delagrave (1988) ve Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmalarda, SiC seramik plakalarına karşı 14.5 mm zırh delici mermi ile yapılan atış sonucunda seramik plakanın alansal yoğunluğuna karşı delinen destek plakanın alansal yoğunluğu grafiği verilmiştir. SiC seramik plakaların üç çalışmada da çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Yukarıda ifade edildiği gibi grafiğin eğimi balistik verimi vermekte olup daha dik olan doğru ile gösterilen seramik plaka daha yüksek balistik verime sahiptir. Bahse konu SiC plakalarının balistik verimleri Tablo 18'de verilmiştir.

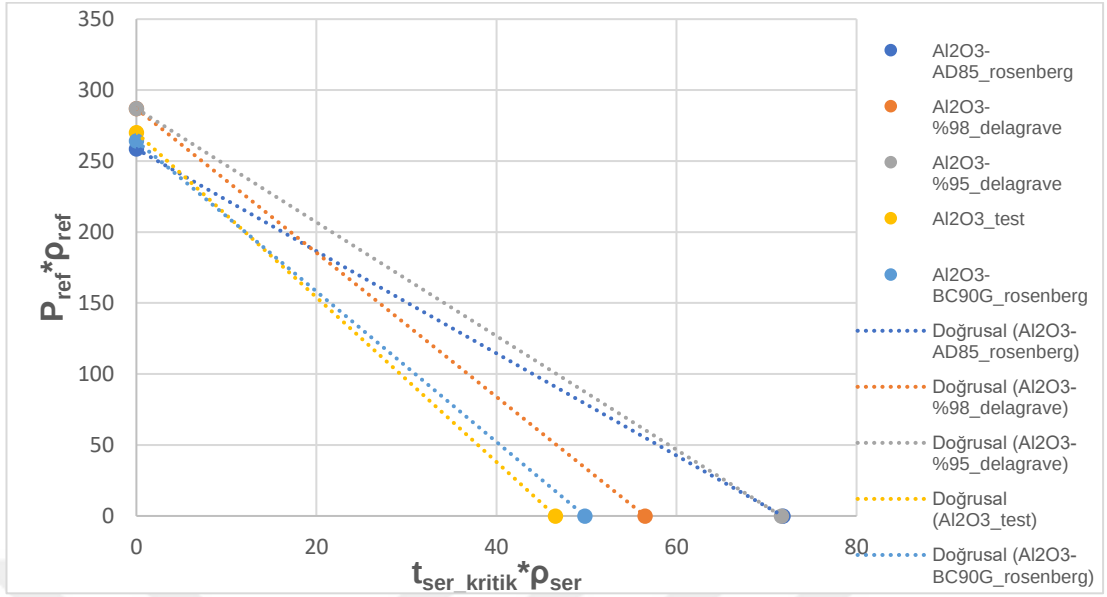


Şekil 5.10: SiC Numuneleri Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması.

Tablo 18: SiC Seramiklerin Balistik Verimliliği.

Tanım	Balistik Verimliliği, η
SiC_test	5,87
SiC_rosenberg	7
SiC_delagrave	7,13

Şekil 5.11’de bu tez çalışması ile Delagrave (1988) ve Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmalarda, Al_2O_3 seramik plakalarına karşı 14.5 mm zırh delici mermi ile yapılan atış sonucunda seramik plakanın alansal yoğunluğuna karşı delinen destek plakanın alansal yoğunluğu grafiği verilmiştir. Bahse konu Al_2O_3 plakalarının balistik verimleri Tablo 19’de verilmiştir. Genel olarak balistik verimliliğin alüminaların saflık dereceleri ile doğru orantılı değiştiği görülmektedir. Bu çerçevede en düşük saflık dereceli Al_2O_3 -AD85_rosenberg numunesi 3,60 ile en düşük balistik verimliliğe sahiptir.

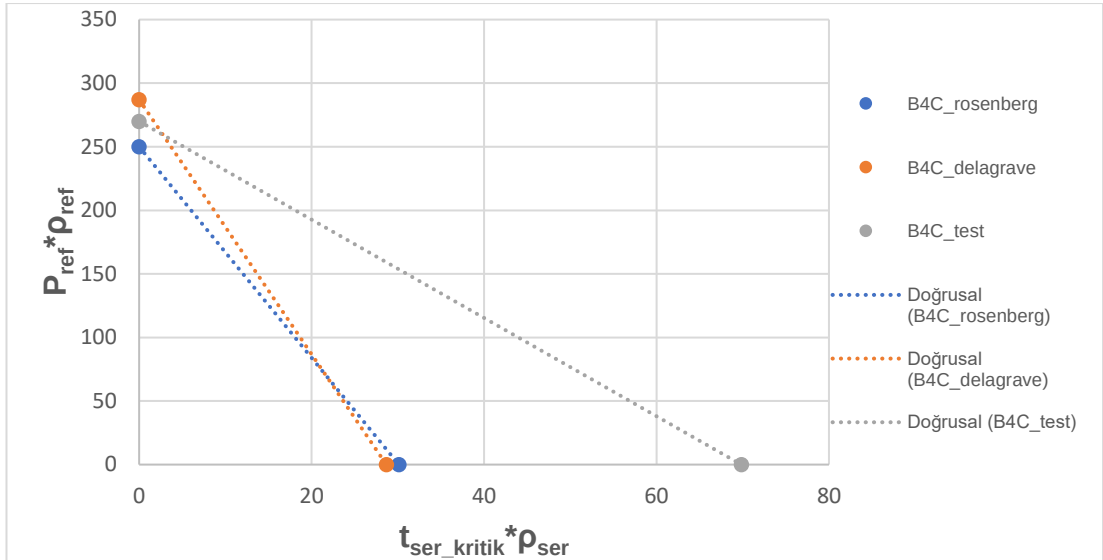


Şekil 5.11: Al₂O₃ Numuneleri Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması.

Tablo 19: Al₂O₃ Seramiklerin Balistik Verimliliği.

Tanım	Balistik Verimliliği
Al ₂ O ₃ _test	5,04
Al ₂ O ₃ -AD85_rosenberg	3,60
Al ₂ O ₃ -BC90G_rosenberg	5,30
Al ₂ O ₃ -%98_delagrave	5,08
Al ₂ O ₃ -%95_delagrave	4,01

Şekil 5.12’da bu tez çalışması ile Delagrave (1988) ve Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmalarda, B₄C seramik plakalarına karşı 14.5 mm zırh delici mermi ile yapılan atış sonucunda seramik plakanın alansal yoğunluğuna karşı delinen destek plakanın alansal yoğunluğu grafiği verilmiştir. Bahse konu B₄C plakalarının balistik verimleri Tablo 20’de verilmiştir. Tez kapsamında test ettiğimiz B₄C plakaların literatürdeki çalışmalardan olumsuz yönde önemli ölçüde ayrıştığı görülmektedir. Bu duruma B₄C plakaların sıcak pres yerine direk sinterleme yöntemi ile üretilmesinin etkisi olduğu değerlendirilmektedir. Çünkü Toz Metalurjisi (T/M) ve Parçacıklı Malzeme üretim süreçlerinin önemli bir basamağı olduğu bilinen sinterleme aşaması sinterleme atmosferi, sıcaklık, basınç, nem ve süre gibi birbirine bağlı birçok değişken tarafından kontrol edilmektedir.

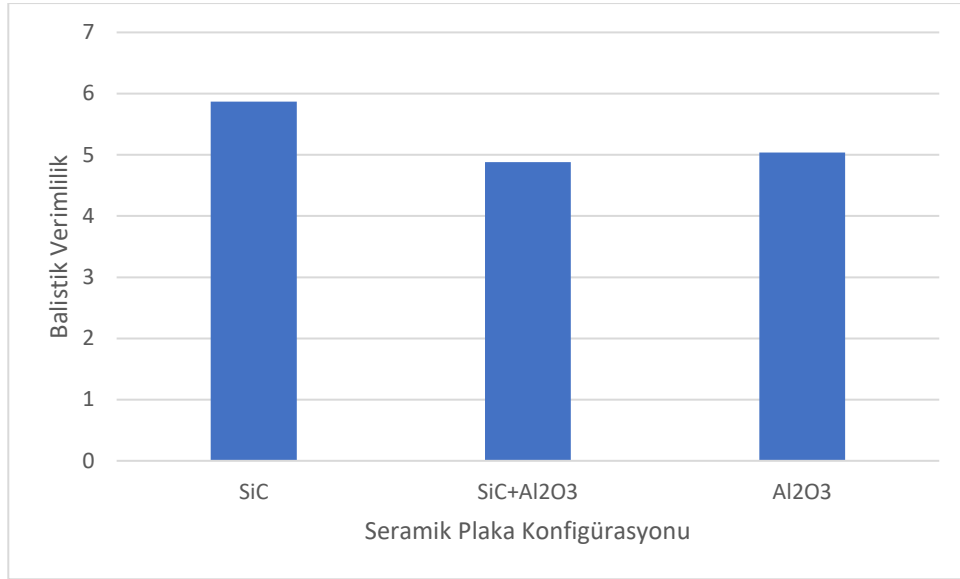


Şekil 5.12: B4C Test Sonuçlarının Literatür Karşılaştırması.

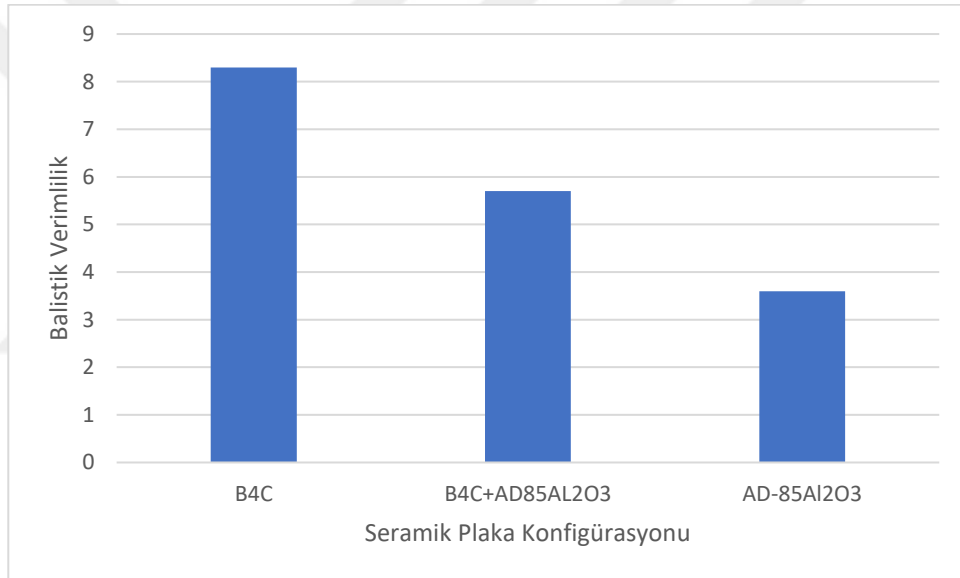
Tablo 20: B4C Seramiklerin Balistik Verimliliği.

Tanım	Balistik Verimliliği
B ₄ C _{test}	3,36
B ₄ C _{rosenberg}	8,3
B ₄ C _{delagrave}	10,01

Şekil 5.13’de bu çalışmada test edilen 10 mm SiC, 10 mm Al₂O₃ ve bunların 5’er mm kalınlıklarından oluşan SiC+ Al₂O₃ numunelerinin balistik verimlilikleri, Şekil 5.14’te Rozenberg ve Yeshurun (1988) tarafından yapılan çalışmada B₄C, Al₂O₃ ve bunların %50+%50 kompozisyonundan oluşan numunelerin balistik verimlilikleri verilmiştir. SiC+ Al₂O₃ numunesi Al₂O₃’nin biraz altında balistik verimlilik sunarken B₄C+AD85Al₂O₃ numunesi B₄C ile Al₂O₃’ün ortasında bir sonuç vermektedir. Bu kapsamda, maliyet, ağırlık ve performans üçgeninde optimizasyon yaparken farklı seramiklerin kompozisyonunun Rozenberg ve Yeshurun (1988) çalışmasında bir seçenek olabileceği görülürken bu çalışmada aynı sonuca ulaşılamamıştır. Fakat tez çalışmasında test edilen SiC ve Al₂O₃ numunelerinin balistik verimlilikleri arasında çok büyük bir fark görülmediğinden bunların kompozisyonunun balistik verimliliğinin doğru hesaplanmasında yeterli test sayısı önem arz etmektedir. Daha çok atışlı test icra edilerek daha kapsamlı veri üzerinden çıkarım yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.13: Test Edilen Seramik Plaka Konfigürasyonları Balistik Verimliliği.



Şekil 5.14: Rosenberg Seramik Plaka Konfigürasyonları Balistik Verimliliği.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, 10'ar mm kalınlıklarında Al_2O_3 , SiC ve B_4C seramik plakalar ile 5'er mm kalınlığa sahip Al_2O_3 ve SiC plakalarının birleştirilmesinden oluşan SiC+ Al_2O_3 numunelerinin balistik performansı DOP metodu kullanılarak incelenmiştir. Balistik testler STANAG 4569 AEP55 Volume-1 Seviye-4'e uygun olarak 14.5 mm zırh delici mermi ile icra edilmiştir. Destek plakası olarak 6061-T6 alüminyum plakalar kullanılmıştır.

Balistik testler neticesinde en düşük penetrasyon derinliğini üç atışta ortalama 19,36 mm değeri ile 10 Al_2O_3 sağlamıştır. 10 Al_2O_3 'ten sonra penetrasyon derinliği sıralaması ortalama 21,70 mm ile 10SiC, ortalama 27,39 mm ile 5SiC5 Al_2O_3 ve ortalama 62,33 mm ile 10 B_4C olarak sonuçlanmıştır. Ağırlığın öncelikli kriterler arasında yer almadığı durumda Al_2O_3 seramik plakalar diğer seramiklere nazaran makul maliyeti ve ortalama performansı ile en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Öte yandan hareket kabiliyetinin kritik önemi haiz olduğu zırhlı muharebe araçları gibi hareketli platformlarda veya personel zırhlıdirmalarında numunelerin aynı hacimde daha iyi balistik performans sağlamasından ziyade aynı alansal yoğunlukta daha iyi balistik performans sağlaması daha ehemmiyetlidir. Bu çerçevede, 6.76 değeri ile en yüksek balistik verimliliğe sahip olan SiC seramik plakalar en iyi çözümü sunmaktadır. Sonrasında ise 5,80 ile Al_2O_3 , 5,58 ile SiC+ Al_2O_3 ve 3,89 ile B_4C plakalarının geldiği görülmüştür.

Test sonuçları literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. SiC ve Al_2O_3 numuneleri için elde edilen balistik verimliliği değerlerinin literatür verisiyle uyumlu olduğu görülmüştür. Fakat B_4C numunesine ait balistik verimlilik değeri literatür verisinin altında kalmıştır. Burada, B_4C üretim yönteminin sonuç üzerinde olumsuz etkisi olduğu değerlendirilmektedir.

SiC ve Al_2O_3 malzemelerinin birleştirilmesiyle oluşan SiC+ Al_2O_3 numunesinin Al_2O_3 'e yakın ama biraz daha aşağısında verimlilik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Test edilen SiC ve Al_2O_3 numunelerinin birbirine yakın balistik verimlilik değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

SiC+ Al_2O_3 balistik verimlilik değerinin doğru tespit edilebilmesi için atış sayısının artırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, maliyet, performans ve ağırlık kriterleri

arasında optimizasyon çalışmalarında farklı seramik plakalarının kompozisyonunun bir seçenek olarak değerlendirilebilmesi için daha detaylı çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



KAYNAKÇA

- Akella, K. (2020). Multilayered Ceramic-Composites for Armour Applications. In Handbook of Advanced Ceramics and Composites (pp. 1–31). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73255-8_11-1
- Akella, K., & Naik, N. (2015). Composite Armour—A Review. Journal of the Indian Institute of Science.
- Al-khaf, Zainab. 2019. "Introduction to Ballistics".
- Aleris, Defence aluminium product data sheet, Switzerland, Aleris Switzerland GmbH, 2010. (n.d.).
- Arun Shukla, Eric J. Kovolyan, Joseph Grogan, & Venkit Parameswaran. (2003). Ballistic performance of surface modified ceramic body armor material. SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics., 97.
- Balos, Sebastian, Daniel Howard, Adrian Brezulianu, ve Danko Labus Zlatanović. 2021. "Perforated Plate for Ballistic Protection—A Review". *Metals* 11 (4). <https://doi.org/10.3390/met11040526>.
- Bless*, S. J., & Jurick, D. L. (1998). Design For Multi-Hit Capability. In Int. J. Impact Engng (Vol. 21, Issue 10).
- Bracamonte, L., Loutfy, R., Yilmazcoban, I. K., & Rajan, S. D. (2016). 12 - Design, manufacture, and analysis of ceramic-composite armor. In A. Bhatnagar (Ed.), Lightweight Ballistic Composites (Second Edition) (pp. 349–367). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00012-X>
- Braga, F. D. O., Luz, F. S. Da, Monteiro, S. N., & Lima, É. P. (2018). Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. Journal of Materials Research and Technology, 7(4), 554–560. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.019>
- Carlucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2008). Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition.
- Çelikbas, D., & Acar, E. (2021). Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile. Procedia Structural Integrity, 35(C), 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.012>
- Crouch, I. G. (2017a). Introduction to armour materials. In The Science of Armour Materials. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00001-3>
- Crouch, I. G. (2017b). Laminated materials and layered structures. In The Science of Armour Materials (Vol. 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00004-9>
- Crouch, I. G., Franks, G. V., Tallon, C., Thomas, S., & Naebe, M. (2017). Glasses and ceramics. In The Science of Armour Materials. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00007-4>
- Cui, F. D., Ma, T., Li, W. P., & Wu, G. Q. (2017). Damage Characteristics of SiC and B4C Ballistic Insert Plates Subjected to Multi-hit. Wuji Cailiao Xuebao/Journal

- of Inorganic Materials, 32(9), 967–972. <https://doi.org/10.15541/jim20160667>
- Cui, F., Wu, G., Ma, T., & Li, W. (2017). Effect of ceramic properties and depth-of-penetration test parameters on the ballistic performance of armour ceramics. *Defence Science Journal*, 67(3), 260–268. <https://doi.org/10.14429/dsj.67.10664>
- Delagrave, R. (1988, March 23). Applying Em Computed From DOP Testing Results To The Design of Actual Ceramic Armor Systems. 17. International Symposium on Ballistics.
- Edwards, M. R. (2002). Materials for military helicopters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 216(2), 77–88. <https://doi.org/10.1243/095441002760179780>
- Ernst, H.-J., Hoog, K., & Wiesner, V. (1994). Ballistic impact behaviour of some ceramics in different environments. *Physique*, 111. <https://doi.org/10.1051/jp4:19948103>
- Field, J. E., Walley, S. M., Proud, W. G., Goldrein, H. T., & Siviour, C. R. (2004). Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7), 725–775. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2004.03.005>
- Gooch, William. 2006. “An Overview of Protection Technology for Ground and Space Applications”.
- Graswald, M., Gutser, R., Breiner, J., Grabner, F., Lehmann, T., & Oelerich, A. (2019). Defeating modern armor and protection systems. 2019 15th Hypervelocity Impact Symposium, HVIS 2019. <https://doi.org/10.1115/HVIS2019-050>
- Guo, G., Alam, S., & Peel, L. D. (2020). Numerical analysis of ballistic impact performance of two ceramic-based armor structures. *Composites Part C: Open Access*, 3(October), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100061>
- Hazell, P. J. (2022). *Armour; Materials, Theory, and Design Second Edition*.
- Hazell, P. J., Roberson, C. J., & Moutinho, M. (2008). The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. *Materials and Design*, 29(8), 1497–1503. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.003>
- Heritier D, Derassat E, ve Fonlupt S. 2010. “Ballistic impact experiments on ultrahigh hard perforated add-on armor”. İçinde *Proceedings of the 25th international symposium on ballistic*, editör WANG ZHONGYUAN ZHANG XIAOBING AN YUDE, 1501-8. Beijing, China.
- Holmquist, T. J., Templeton, D. W., & Bishnoi, K. D. (2001). Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications. In *International Journal of Impact Engineering* (Vol. 25).
- “<https://www.secantglobal.com/add-on-armor>”. [Erişim Tarihi: 15.05.2023].
- <https://www.coorstek.com/media/4129/ceramic-armor-superior-lightweight-protection.pdf> [Erişim Tarihi: 15.05.2023].
- <https://www.paxisceramics.com/wp-content/uploads/2019/11/Paxis-Ceramic-Materials.pdf> [Erişim Tarihi: 15.05.2023].
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Jagdtiger> [Erişim Tarihi: 15.06.2023].
- James, B J. 2002. “Practical issues in ceramic armour design”. *Ceramic transactions* 134: 33-44.
- Jesse B. 2022. “Why do Tanks use Angled Armor? - Tank Historia”. 01 Mart 2022. <https://tankhistoria.com/cold-war/why-do-tanks-use-angled-armor/>. [Erişim Tarihi: 15.05.2023].

- Kalemtas, Ayse, ve Ersan G r y. 2014. "Seramik Esaslı Zırhlar ve Mekanik Modellemeleri", A ustos 2015.
- Jones, T. L. (2015). Investigation of the Kinetic Energy Characterization of Advanced Ceramics.
- Karandikar, P. G., Evans, G., Wong, S., & Aghajanian, M. K. (2009). A Review Of Ceramics For Armor Applcations.
- Lan G. Crouch. (2017). The Science of Armour Materials.
- Lanz, W. (2002). Initial tests on ceramics in composite armor. *Ceramic Transactions*, 134, 63–72.
- Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Balakrishna Bhat, T., & Gupta, N. K. (2005). An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), 337–350. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2005.03.004>
- M. Rastopshin. 2000. "The Present and the Future of the Projectile vs Armor". *Arms* 1: 31-32.
- Medvedovsk, Eugene. 2003. *Ceramic Armor and Armor Systems*. The American Ceramic Society.
- Medvedovski, Eugene. 2002. "Armor alumina ceramics". *Ceramic transactions, vol. 134, ceramic armor materials by design* 134 (Haziran): 91-101.
- Medvedovski E. 2010. "Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1". *Ceramics International* 36 (7): 2103-15. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>.
- Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., Gomes, A. V., Chagas, C. F. D. M., Caldeira, A. B., & Lima,  . P. (2016). How effective is a convex Al₂O₃-Nb₂O₅ ceramic armor? *Ceramics International*, 42(6), 7844–7847. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.147>
- Moss, G M, D W Lemming, ve C L Farrar. 1995. *Military Ballistics*. C. 1.
- Nato/Pfp Unclassified Allied Aep-55, Volume 1 Engineering (Edition 2) Publication Procedures For Evaluating The Protection Level Of Armoured Vehicles Volume 1 Kinetic Energy and Artillery Threat. (2011).
- Nemat -Nasser, S., Sarva, S., Isaacs, J. B., & Lischer, D. W. (2002). Novel Ideas In Multi-Functional Ceramic Armor Design.
- Ogorkiewicz, R. (1991). Technology of Tanks.
- Ogorkiewicz, R. (2017). Tanks 100 Years of Evolution. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- ONGUN, A. (2019).  n Y z ndeki Her Serami i Karbon-Fiber Kompozitle Sarılmış  elik Zırhların Balistik Davranışlarının İncelenmesi.
- P. Karandikar, B. Givens, A. Liszkiewicz, S. Wong, and M. A. (2015). Effects of Novel Geometric Designs On The Ballistic Performance of Ceramics. 129–135.
- Papetti, Dino J. 1980. "Chapter 7 - Metallic Armor Materials". İçinde *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, edit r R O Y C LAIBLE, 5:145-67. Methods and Phenomena. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41928-6.50012-0>.
- Rashed, A., Yazdani, M., Babaluo, A. A., & Hajizadeh Parvin, P. (2016). Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3561–3576. <https://doi.org/10.1177/0021998315622982>

- Roberson, C. (2004, December 2). Ceramic materials for lightweight armour applications. Proceedings of the Combat Vehicle Survivability Symposium.
- Rosenberg, Z., & Dekel, E. (2020). Terminal ballistics. In Terminal Ballistics. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46612-1>
- Rosenberg, Z., Dekel, E., Ashuach, Y., & Yeshurun, Y. (2008). On the mechanisms for defeating AP projectiles. *International Journal of Modern Physics B*, 22(9–11), 1277–1284. <https://doi.org/10.1142/s0217979208046657>
- Rozenberg, Z., & Yeshurun, Y. (1988). The Relation Between Ballistic Efficiency And Compressive Strength Of Ceramic Tiles. In *Int. J. Impact Engng* (Vol. 7, Issue 3).
- Sarva, S., Nemat-Nasser, S., McGee, J., & Isaacs, J. (2007). The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 34(2), 277–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.006>
- Savio, S. G., & Madhu, V. (2018). Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test. *International Journal of Impact Engineering*, 113, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.020>
- Savio, S. G., & Madhu, V. (2019). A comparison on ballistic performance of alumina segments with alumina tiles using DOP test method. *Proceedings - 31st International Symposium on Ballistics, BALLISTICS 2019*, 2, 1329–1340. <https://doi.org/10.12783/BALLISTICS2019/33169>
- She, J., Inoue, T., & Ueno, K. (2000). Multilayer Al₂O₃/SiC ceramics with improved mechanical behavior.
- Shen, Y., Wang, Y., Du, S., Yang, Z., Cheng, H., & Wang, F. (2021). Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1496–1508. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.058>
- Strassburger E, Lexow B, & Krell A. (2002). Ceramic armor with submicron alumina against armor piercing projectiles. , *Ceramic Transactions*, 134, 83–90.
- “Types of Armour – Norfolk Tank Museum”. [Erişim Tarihi: 15.05.2023].
- Uzar, A. İ., Ögünç, G. İ. & Özer, M. T. (2019). Penetran Ateşli Silah Yaralanmalarında Yara Balistiği. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, *Güvenlik Bilimleri Dergisi IDEF Özel Sayı*, 53-77. DOI: 10.28956/gbd.551748
- Vural, M., Erim, Z., Konduk, B. A., & Ucisik, A. H. (2002). Ballistic performance of alumina ceramic armors. *Ceramic Transactions*, 134, 103–110.
- Walley, S. M. (2010). Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour. *Advances in Applied Ceramics*, 109(8), 446–466. <https://doi.org/10.1179/174367609X422180>
- Weber, K. (2002, September 23). Protection efficiency of structured targets against KE projectiles. *Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics*.
- Weber, K., Holmquist, T. J., & Templeton, D. W. (2001). The Response of Layered Aluminum Nitride Targets Subjected to Hypervelocity Impact. In *International Journal of Impact Engineering* (Vol. 26). www.elsevier.com/locate/ijimpeng
- Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11), 793–807. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90066-6)
- Woodward, R. L., & Baxter, B. J. (1994). Ballistic evaluation of ceramics: Influence of

- test conditions. *International Journal of Impact Engineering*, 15(2), 119–124.
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(05\)80024-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(05)80024-7)
- Woolmore, N. J., Hazell, P. J., & Stuart, T. P. (2003). An investigation into fragmenting the 14.5 mm BS41 armour piercing round by varying a confined ceramic target set-up. *Ceramic Transactions*, 151, 175–186.
<https://doi.org/10.1002/9781118406793.CH15>
- Yadav, S., & Ravichandran, G. (2003). Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. In *International Journal of Impact Engineering* (Vol. 28).
- Yeshurun Y, & Rosenberg Z. (1993). AP projectile fracture mechanisms as a result of oblique impact. In Michael J. Murphy (Ed.), *14th international symposium on ballistics* (pp. 537–544).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı : İZGİ, Musa Talha

Eğitim

Derece

Lisans

Üniversite ve Bölüm

Boğaziçi Üniversitesi

Makine Mühendisliği

Mezuniyet Tarihi

2017

Meslekî Deneyim

Yıl

2018- devam

Yer

Savunma Sanayii Başkanlığı

Görev

Uzman Yardımcısı

Yabancı Dil

İngilizce