

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH DELİCİ HAFİF SİLAH MÜHİMMATINA DAYANIKLI  
KOMPOZİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet ÖZTEMÜR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Mayıs 2024



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH DELİCİ HAFİF SİLAH MÜHİMMATINA DAYANIKLI  
KOMPOZİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet ÖZTEMÜR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan GENEL

Mayıs 2024



Ahmet ÖZTEMÜR tarafından hazırlanan “Zırh Delici Hafif Silah Mühimmatına Dayanıklı Kompozit Zırh Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 28.05.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Kenan GENEL (Danışman)** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Yaşar Kahraman** .....  
Sakarya Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ZIRH DELİCİ HAFİF SİLAH MÜHİMMATINA DAYANIKLI KOMPOZİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(28/05/2024).

Ahmet ÖZTEMÜR







*Eşime ve çocuklarıma*



## TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlama sürecinde her daim gerek bilimsel, gerek kişisel destekleri ile bu tezin ortaya çıkmasını sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu yoğun çalışma döneminde desteğini her an hissteğim ailem bu tezi bitirmemde çok önemli rol oynamıştır.

Deneysel çalışmaların yapıldığı MKE Gazi Fişek Fabrikası ve çalışanlarının bu çalışmanın tamamlanmasında gösterdiği gayret takdire şayandı. Onlara da teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet ÖZTEMÜR



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                          |      |
|----------------------------------------------------------|------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....        | v    |
| TEŞEKKÜR .....                                           | ix   |
| İÇİNDEKİLER .....                                        | xi   |
| KISALTMALAR .....                                        | xiii |
| SİMGELER .....                                           | xv   |
| TABLO LİSTESİ .....                                      | xvii |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                      | xix  |
| ÖZET .....                                               | xxi  |
| SUMMARY .....                                            | xxv  |
| 1. GİRİŞ .....                                           | 1    |
| 2. MALZEMELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARI VE BALİSTİK BİLİMİ3 |      |
| 2.1. Malzemelerin Dinamik Davranışları .....             | 3    |
| 2.1.1. Malzeme dinamiği .....                            | 4    |
| 2.2. Balistik Tanımı ve Özellikleri .....                | 10   |
| 2.2.1. İç balistik .....                                 | 11   |
| 2.2.2. Dış balistik .....                                | 11   |
| 2.2.3. Terminal balistik .....                           | 12   |
| 3. ZIRH GELİŞTİRİLMESİ VE ZIRH DELİCİ MÜHİMMATLAR.....   | 15   |
| 3.1. Zırh Tanımı ve Tarihçesi .....                      | 15   |
| 3.2. Zırh Çeşitleri.....                                 | 16   |
| 3.2.1. Metalik zırhlar .....                             | 18   |
| 3.2.2. Seramik zırhlar.....                              | 19   |
| 3.2.3. Polimerik zırhlar .....                           | 22   |
| 3.2.4. Kompozit zırhlar .....                            | 22   |
| 3.3. Kompozit Yapıların Balistik Performansı .....       | 28   |
| 3.3.1. Fiber/reçine tipi.....                            | 28   |
| 3.3.2. Elyaf dokusu .....                                | 31   |
| 3.3.3. Tehdit geometrisi ve darbe hızı .....             | 31   |
| 3.3.4. Hedef kalınlık .....                              | 32   |
| 3.4. Zırh için Malzeme Kombinasyonları .....             | 32   |
| 3.4.1. Seramik-metal.....                                | 32   |
| 3.4.2. Kompozit-seramik zırhlar .....                    | 34   |
| 3.5. Hafif Zırh Sistemleri .....                         | 37   |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                | 39   |
| 4.1. Kavramsal Tasarım.....                              | 39   |
| 4.2. Katmanlarda Kullanılan Malzemeler .....             | 40   |
| 4.2.1. ÖK-ön katman ve ARK- arka katman .....            | 40   |
| 4.2.2. 1AK-1. ara katman.....                            | 42   |
| 4.2.3. 2AK-2. ara katman.....                            | 44   |
| 4.2.4. Yapıştırıcı .....                                 | 44   |
| 4.3. Çelik Zırh Atış Testleri.....                       | 45   |

|                                        |           |
|----------------------------------------|-----------|
| 4.4. Kompozit Zırh Atış Testleri ..... | 53        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>    | <b>69</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                  | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                   | <b>79</b> |



## KISALTMALAR

|               |                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AP</b>     | : Armor piercing (Zırh delici)                                                           |
| <b>DOP</b>    | : Depth Of Penetration (Delinme derinliği)                                               |
| <b>KKE</b>    | : Kişisel koruyucu ekipmanlar                                                            |
| <b>RHA</b>    | : Rolled homogeneous armour (Haddelenmiş homojen zırh çeliği)                            |
| <b>SiC</b>    | : Silisyum karbür                                                                        |
| <b>UHMWPE</b> | : Ultra high molecular weight polyethylene (Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) |





## SİMGELER

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| <b>B<sub>4</sub>C</b>          | : Bor karbür           |
| <b>C<sub>p</sub></b>           | : Özgöl ısı            |
| <b>E</b>                       | : Young modülü         |
| <b>K</b>                       | : termal iletkenlik    |
| <b><math>\alpha</math></b>     | : Genleşme katsayısı   |
| <b><math>\sigma</math></b>     | : Elektrik iletkenliği |
| <b><math>\rho</math></b>       | : Direnç               |
| <b><math>\epsilon_r</math></b> | : Dielektrik sabiti    |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1.</b> Ck 75 sacın kimyasal kompozisyonu.....                             | 40 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Ck75 sacın mekanik özellikleri.....                                | 42 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Al 7075 T6 sacın kimyasal kompozisyonu.....                        | 43 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Al 7075 T6 sacın mekanik özellikleri.....                          | 44 |
| <b>Tablo 4.5.</b> HDPE malzemenin teknik özellikleri.....                            | 44 |
| <b>Tablo 4.6.</b> Epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri .....                     | 44 |
| <b>Tablo 4.7.</b> Tüm atış testleri özet.....                                        | 53 |
| <b>Tablo 4.8.</b> SET 1 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları.....  | 53 |
| <b>Tablo 4.9.</b> SET 1 değerlendirmesi.....                                         | 58 |
| <b>Tablo 4.10.</b> SET 2 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları..... | 58 |
| <b>Tablo 4.11.</b> SET 2 değerlendirmesi.....                                        | 65 |
| <b>Tablo 4.12.</b> SET 3 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları..... | 65 |
| <b>Tablo 4.12.</b> SET 3 Değerlendirmesi.....                                        | 68 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.1. Katmanların şematik görünümü. ....                  | 40 |
| Şekil 4.2. Sac malzemenin sertlik ölçümü. ....                 | 41 |
| Şekil 4.3. ASTM E8 çekme testi numunesi ölçüleri. ....         | 41 |
| Şekil 4.4. Ck 75 sacdan hazırlanan çekme numuneleri. ....      | 42 |
| Şekil 4.5. Al 7075 T6 sacdan hazırlanan çekme numuneleri. .... | 43 |
| Şekil 4.6. Katmanlı numune örneği (15 mm Ck 75). ....          | 46 |
| Şekil 4.7. 15 mm numunenin ön ve arka yüzü. ....               | 47 |
| Şekil 4.8. 14 mm numunenin ön ve arka yüzü. ....               | 48 |
| Şekil 4.9. 13 mm numune ön yüz ve delinmiş 2mm sac. ....       | 49 |
| Şekil 4.10. 12 mm numunenin ön ve arka yüzü. ....              | 50 |
| Şekil 4.11. 11 mm numune ön yüzü ....                          | 51 |
| Şekil 4.12. 11 mm numune arka yüzü. ....                       | 51 |
| Şekil 4.13. 10 mm numune ön ve arka yüzü. ....                 | 52 |
| Şekil 4.14. 1-1. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 54 |
| Şekil 4.15. 1-2. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 55 |
| Şekil 4.16. 1-3. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 56 |
| Şekil 4.17. 1-4. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 57 |
| Şekil 4.18. 2-1. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 59 |
| Şekil 4.19. 2-2. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 60 |
| Şekil 4.20. 2-3. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 61 |
| Şekil 4.21. 2-4. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 62 |
| Şekil 4.22. 2-5. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 63 |
| Şekil 4.23. 2-6. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 64 |
| Şekil 4.24. 3-1. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 66 |
| Şekil 4.25. 3-2. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....    | 67 |
| Şekil 4.26. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü. ....         | 68 |



# ZIRH DELİCİ HAFİF SİLAH MÜHİMMATINA DAYANIKLI KOMPOZİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Balistik dayanım, katmanlı yapılar, kompozit, hedef balistiği.

İnsanların yaşama içgüdüğü sebebi ile dış etkenlerden korunma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Zaman içerisinde çeşitli malzemeler ile kendilerini dış tehditlere karşı korumaya çalışmışlardır. Bu malzemeler insanlığın bilimsel ve teknolojik seviyelerine paralel hatta onun önünde gelişim sağlamıştır. Çünkü yaşama içgüdüğü insanları kendilerini koruyacak yeni, etkili ve güvenli malzemeler araştırmaya ve geliştirmeye sevk etmiştir. Deri, tahta, taş gibi malzemelerle başlan süreç zaman içerisinde metallerin keşfi ile bakır, pirinç, demir ve çelik olarak gelişmiştir. Günümüz dünyasında zırh teknolojisinde seramik malzemeler, kompozit malzemeler ve alaşım çelikler önemli bir yer tutmaktadır. Çelik malzemeler zırh yapımında en büyük paya sahip olmaya devam etmektedir.

Bunun yanında kompozit malzemeler farklı malzemelerin olumlu yanlarını bir araya getirerek hepsinden daha verimli bir malzeme geliştirmeyi hedeflemektedir. Özellikle insanların kişisel korunmalarında seramik ve kompozit malzemeler hafiflikleri sebebi ile en büyük paya sahiptir. Örneğin kevlar benzeri elyaflar hem balistik korumada hem de iş sağlığı ve güvenliği alanında yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle askeri personelin kişisel korumasında çelik levhalara göre ağırlığının düşük ve hareket kısıtlamasının daha az olması muharebe sahasında çok önemli avantajlar oluşturmaktadır. Üretim maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen avantajlarının fazlalığı sebebi ile yoğun kullanımı devam etmektedir.

Bu çalışmada, farklı malzemelerden oluşan kompozit zırhın performansının sadece çelik malzemelerin yapıştırılması ile elde edilen kompozit zırh arasındaki farklılıklarının araştırılması hedeflenmiştir. Kompozit zırh 3 elemanlı ve 4 katmanlı olarak tasarlanmıştır. Kullanılan malzemeler özel işlem gerektirmeyen piyasadan hazır olarak temin edilebilen ürünlerden seçilmiştir. Ön ve arka katmanda piyasada serleştirilmiş olarak satılan Ck75 çelik sac, birinci ara katmanda Al 7075 sac ve ikinci ara katmanda yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeler kullanılmıştır.

Kullanılan çelik sacın nispeten yüksek sertliğinin yanında tokluğunun da yüksek olması merminin ve çelik çekirdeğin malzemeyi kesme ve eğilmeye zorlayarak enerjisini sönmlemesine olanak tanıyacaktır. Çelik malzeme 1245 MPa ortalama akma mukavemetine sahiptir. Malzemenin ortalama sertliği 42 HRC olarak ölçülmüştür.

Al 7075 malzeme T6 ısıt işlem kalitesinde olup alüminyumlar içerisinde yüksek mukavemet ve orta tokluk değerleri içerisinde öne çıkmaktadır. Bu malzemenin amacı çeliğe göre yüksek olan tokluğu ile merminin enerjisini sönmlemeye yardımcı

olmaktır. Bunun yanında sertliği ile de mermiyi durdurmaya destek olacaktır. Alüminyum malzeme 470 MPa ortalama akma mukavemetine sahiptir.

HDPE özgül ağırlığının düşük darbelere direncinin yüksek olması sebebi ile zırhta sönümleme elemanı görevini üstlenmektedir.

Malzemelerin yapıştırılması için epoksi yapıştırıcı tercih edilmiştir. Seçilen epoksi yapıştırıcı darbe anında katmanları bir arada tutacak kadar mukavemetli aynı zamanda eğilme esnasında malzemelerle beraber esneyecek yapıda olacak şekilde seçilmiştir.

Testlerde kullanılacak zırh delici mühimmat 7,62 mmx51 M61 fişegidir. Bu fişek 7.62 mmx51 piyade tüfeklerinde ve makineli tüfeklerde kullanılmakta olup hafif zırhlı hedeflere atılmaktadır. Bu mühimmatın mermisi FMJ (Full Metal Jacket, Tam Metal Gömlekli) tipindedir. Bakır veya yumuşak çelikten dış gömleğin içerisine kurşun gömlekli sertleştirilmiş çelik çekirdek bulunmaktadır. Çelik çekirdeğin zırh delme kabiliyetini arttırmak için ucu sivridir.

Hazırlanan zırhların başarılı sayılabilmesi için çelik çekirdeğin zırhı sıfırdan yüksek bir hızla terk etmesi gerekmektedir. Bu nedenle bir kısmı delinen, hatta tamamını delinen zırhlar mermi zırhı terk etmedi ise başarılı sayılmışlardır. Askeri şartnamelerde de başarı kriteri bu şekildedir.

İlk deney olarak Ck75 saclar farklı kalınlıklarda yapıştırılarak hangi kalınlıkta mermiyi durdurabildiği test edilmiştir. Burada 15 mm kalınlıktan başlanarak 1 mm azaltma ile testler yapılmıştır. 11 mm kalınlığındaki zırh çelik çekirdeği durdurmuş 10 mm kalınlığındaki zırh delinmiştir. Bu sebeple çelik zırh için 11 mm referans alınmıştır. Bu durumda zırhın alan yoğunluğu 8,58 g/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra 4 katmanlı kompozit yapılarla 3 farklı deney setleri hazırlanmıştır. Bu deney setlerinde ön katman birinci ara katman ve arka katman kalınlıklarının zırh performansına etkileri gözlemlenmiştir.

Birinci deney setinde ilk üç katman sabit tutulup arka katmanın etkisi incelenmiştir. Ön katman 4 mm çelik, birinci ara katman 7 mm Al7075, ikinci ara katman 10 mm HDPE ve arka katman 4 mm çelikten 1 mm kalınlık azaltılarak testler yürütölmüştür. Arka katmanın 2 mm olduğu numune başarılı olmuştur. Bu durumda zırhın alan yoğunluğu 7,58 g/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

İkinci deney setinde birinci ara katmanın farklı kalınlıklarının zırh performansına etkileri incelenmiştir. Ön katman 3 mm çelik, birinci ara katman 11,2 mm Al7075'den başlayarak 1,4 mm azaltarak, ikinci ara katman 10 mm HDPE ve arka katman 3 mm çelik olacak şekilde testler yürütölmüştür. İkinci ara katmanın 8,4 mm olduğu numune başarılı olmuştur. Bu durumda zırhın alan yoğunluğu 7,98 g/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Üçüncü deney setinde ön katman farklı kalınlıklarda diğer katmanlar sabit tutulup zırhın performansı incelenmiştir. Ön katman 4 mm çelikten başlayarak 1 mm azaltılarak, birinci ara katman 7 mm Al7075, ikinci ara katman 10 mm HDPE ve arka katman 4 mm çelik olacak şekilde testler yürütölmüştür. Ön katmanın 3 mm olduğu numune başarılı olmuştur. Bu durumda zırhın alan yoğunluğu 8,37 g/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Her numunenin alan yoğunluğu hesaplanarak sadece çelikten oluşan kompozit zırh ile karşılaştırılmıştır. En başarılı numune ön katman kalınlığının 4 mm ve arka katman kalınlığının 2 mm olduğu numune olmuştur. Burada yapılan testlerde ön katmanın önemi ortaya çıkmıştır. Çelik malzeme miktarının toplam zırh içerisindeki miktarı tek



başına önemli olmayıp ön ve arka katman arasındaki dağılımı da zırhın performansını etkilemektedir. Ön katmanda kalın çelik kullanımı merminin uç sivrilğini bozmakta ve mermiye uygulanan direnci arttırmaktadır.

Yapılan testlerde alan yoğunlukları karşılaştırıldığında en başarılı numunenin sadece çelik numuneye göre %11.6 ağırlık tasarrufu sağladığı görülmüştür. Bu oran kişisel korunma için anlamlı olmayıp araç veya binaların zırhlandırılmasında anlam kazanabilecek bir değerdir.





## **DEVELOPMENT OF COMPOSITE ARMOUR RESISTANT TO ARMOUR PIERCING SMALL ARMS AMMUNITION**

### **SUMMARY**

Key words: Ballistic resistance, layered structures, composite, terminal ballistics.

Due to people's survival instinct, the need for protection from external factors has emerged. Over time, they have tried to protect themselves against external threats with various materials. These materials have developed parallel to or even ahead of humanity's scientific and technological levels. Because the instinct to live has led people to research and develop new, effective and safe materials to protect themselves. The process, which started with materials such as leather, wood and stone, developed over time with the discovery of metals such as copper, brass, iron and steel. In today's world, ceramic materials, composite materials and alloy steels have an important place in armor technology. Steel materials continue to have the largest share in armor production.

In addition, composite materials aim to develop a more efficient material by combining the positive aspects of different materials. Especially in the personal protection of people, ceramic and composite materials have the biggest share due to their lightness. For example, Kevlar-like fibers are used extensively both in ballistic protection and in the field of occupational health and safety. Especially in the personal protection of military personnel, its lower weight and less movement restriction compared to steel plates constitute very important advantages on the battlefield. Although its production costs are high, its intensive use continues due to its many advantages.

In this study, it was aimed to investigate the differences in the performance of composite armour consisting of different materials between the composite armour obtained by bonding only steel materials. The composite armour was designed as 3-element and 4-layer. The materials used were selected from readily available products that do not require special processing. Commercially hardened Ck75 steel sheet was used in the front and back layers, Al 7075 sheet was used in the first intermediate layer, and high density polyethylene (HDPE) materials were used in the second intermediate layer.

The relatively high hardness and toughness of the steel sheet used will allow the projectile and the steel core to absorb the energy of the bullet and the steel core by forcing the material to shear and bend. The steel material has an average yield strength of 1245 MPa. The average hardness of the material was measured as 42 HRC.

Al 7075 material has T6 heat treatment quality and stands out among aluminum with its high strength and medium toughness values. The purpose of this material is to help absorb the energy of the bullet with its higher toughness compared to steel. In addition, it will support to stop the bullet with its hardness. The aluminum material has an average yield strength of 470 MPa.

HDPE acts as a damping element in armor due to its low density and high resistance to impacts.

Epoxy adhesive was preferred for bonding the materials. The selected epoxy adhesive was chosen to be strong enough to hold the layers together during the impact and at the same time to flex together with the materials during bending.

The armor-piercing ammunition to be used in the tests is the 7.62 mmx51 M61 cartridge. This cartridge is used in 7.62 mmx51 infantry rifles and machine guns and is fired at lightly armored targets. The bullet of this ammunition is FMJ (Full Metal Jacket) type. There is a hardened steel core with a lead jacket inside an outer jacket of copper or mild steel. The tip of the steel core is pointed to increase its armour penetration capability.

In order for the prepared armor to be considered successful, the steel core must leave the armor at a speed higher than zero. For this reason, armor that was partially penetrated or even completely penetrated was considered successful if the bullet did not leave the armor. This is also the success criterion in military specifications.

As the first experiment, Ck75 sheets were bonded in different thicknesses and it was tested which thickness could stop the bullet. Here, tests were carried out starting from 15 mm thickness and reducing by 1 mm. The 11 mm thick armour stopped the steel core and the 10 mm thick armour was penetrated. For this reason, 11 mm was taken as a reference for steel armor. In this case, the areal density of the armor is calculated as 8.58 g/cm<sup>2</sup>.

Then, 3 different experimental sets were prepared with 4-layer composite structures. In these test sets, the effects of the front layer, first intermediate layer and back layer thicknesses on armor performance were observed.

In the first set of experiments, the first three layers were kept constant and the effect of the back layer was examined. Tests were carried out by keeping the front layer 4 mm steel, the first intermediate layer 7 mm Al7075, the second intermediate layer 10 mm HDPE constant and reducing the thickness of the back layer from 4 mm steel by 1 mm. The sample with the back layer of 2 mm was successful. In this case, the areal density of the armor is calculated as 7.58 g/cm<sup>2</sup>.

In the second set of experiments, the effects of different thicknesses of the first intermediate layer on the armor performance were examined. Tests were carried out so that the front layer was 3 mm steel, the first intermediate layer was 11.2 mm Al7075, decreasing by 1.4 mm, the second intermediate layer was 10 mm HDPE and the back layer was 3 mm steel. The sample with the second intermediate layer of 8.4 mm was successful. In this case, the areal density of the armor is calculated as 7.98 g/cm<sup>2</sup>.

In the third set of experiments, the performance of the armor was examined by keeping the front layer at different thicknesses and the other layers constant. Tests were carried out by starting from 4 mm steel in the front layer and decreasing it by 1 mm, with the first intermediate layer was 7 mm Al7075, the second intermediate layer was 10 mm HDPE and the back layer was 4 mm steel. The sample with a front layer of 3 mm was successful. In this case, the areal density of the armor is calculated as 8.37 g/cm<sup>2</sup>.

The areal density of each sample was calculated and compared with composite armor consisting only of steel. The most successful sample was the one with a front layer of 4 mm and a back layer of 2 mm. The importance of the front layer has been revealed in the tests performed here. The amount of steel material in the total armour is not only

important, but also the distribution between the front and back layers affects the performance of the armour. The use of thick steel in the front layer disrupts the tip sharpness of the bullet and increases the resistance applied to the projectile.

When the area densities were compared in the tests, it was seen that the most successful sample provided 11.6% weight saving compared to the steel sample only. This rate is not meaningful for personal protection, but it is a value that can be meaningful in the armouring of vehicles or buildings.





## 1. GİRİŞ

İnsanlığın tarihsel gelişimi bir bakıma savaşlar tarihi olarak adlandırılabilir. İnsanlar diğer kabil, ırk veya milletten insanları çoğu zaman tehdit olarak algılamış ve onlarla savaşabilmek için silahlar geliştirmiştir. Taş ve sopalarla başlanan bu süreç termonükleer bombalarla devam etmektedir. Her canlının yaradılışında tehditlerden kaçınma güdüsü vardır. Bu sebeple kaçınılmaz olan savaşlarda insanlar kendilerini tehdiye karşı koruyacak malzemeler geliştirmiştir. Ağaç kabukları ve hayvan derileri ile başlayan bu süreç pasif koruma sistemlerini geçerek korunma yerine tehditi imha eden aktif koruma sistemleri ile devam etmektedir.

İnsanların metalleri işlemesi ile birlikte silah yapımında demir uçlu oklar, mızraklar ve kılıçlar geliştirildi. Tehdit geliştikçe koruma da gelişti. Zırh olarak tunç plakalar, örme zırhlar ve demir levhalar kullanılmaya başlandı. Kalkanlarda ahşap, deri ve metalin bir arada kullanılması kompozit zırhlar için tarihi örnekler oluşturmıştır.

Sanayi devrimi ile silah sanayiindeki hızlı ilerleme ile korunmanın önemi daha da artmıştır. Çelik en yaygın ve bilinen malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çeliklerin özgül ağırlığının görece yüksek olması sebebi ile farklı malzeme arayışlarına gidilmiştir. Bu aşamada alüminyum, seramik, plastik malzemeler ile çalışmalar yapılmıştır. Her malzemenin öne çıkan özelliklerinin birleştirilmesi ile oldukça etkin kompozit zırhlar üretilmiştir. Bu çalışmada konusu olduğu üzere mermilerin uç formunu bozarak delme kabiliyetini azaltmak için oldukça sert ön katmanlar bununla birlikte darbe enerjisini sönümleyecek tokluğu yüksek destek katmanlı yapılar önem kazanmıştır.





## 2. MALZEMELERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARI VE BALİSTİK BİLİMİ

### 2.1. Malzemelerin Dinamik Davranışları

Malzeme dinamiği, malzemelerin darbe, deformasyon ve aşırı ortamlara maruz kalma gibi çeşitli koşullar altındaki davranışlarına odaklanmaktadır. Yüksek gerilme hızları altında malzemelerin dinamik deformasyonu ve kırılması, zırh uygulamalarıyla ilgisi nedeniyle yaygın olarak incelenmiştir (Meyers, 1994; Rittel, Ravichandran ve Lee, 2002). Yüksek gerilme hızlarına maruz kalan malzemeler genellikle yarı statik yükleme koşullarına kıyasla farklı mekanik özellikler sergilemektedirler (Zukas, 2004). Malzemelerin yüksek gerilme hızları altındaki davranışları üzerine yapılan araştırmalar, zırh malzemelerinin tasarımı ve optimizasyonu için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Önemli bir araştırma alanı, dinamik yükleme altında malzeme davranışını tahmin etmek için kurucu modellerin geliştirilmesidir. Johnson ve Cook (1983), metallerin dinamik davranışını tanımlamak için gerilme, gerilme hızı ve sıcaklık etkilerini içeren bir yapı modeli önermiştir. Bu model, zırh delme ve darbeye ilgili diğer sorunların analizinde yaygın olarak kullanılmıştır (Forrestal ve Tzou, 1997; Siviour ve Jordan, 2016).

Bununla birlikte malzeme dinamiği, aşırı yükleme koşulları altında meydana gelen faz dönüşümleri ve dinamik yeniden kristalleşme çalışmalarını da kapsamaktadır. Faz dönüşümlerinin zırh malzemelerinin balistik performansı üzerindeki etkisi çok sayıda çalışmaya konu olmuştur (Maweja ve Stumpf, 2009; Ramesh, 2000). Örneğin, lokalize bir deformasyon süreci olan adyabatik kayma bandının zırh çeliklerinin penetrasyon direncinde kritik bir rol oynadığı gösterilmiştir (Meyers ve ark. 2001). Dinamik yeniden kristalleşme, yüksek gerilme hızları altında malzemelerin mekanik davranışını önemli ölçüde etkileyebilen bir başka olgudur (Murr ve ark. 2001).

Kompozit ve seramiklerde malzeme dinamiklerinin incelenmesi, hafif zırh sistemlerindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle artan bir ilgi görmüştür (Chocron ve ark. 2009; Holmquist ve ark. 2002). Bu malzemelerin dinamik yükleme altındaki

davranışı karmaşıktır ve bileşen malzemelerin özellikleri, mikro yapı ve arayüz özellikleri gibi faktörlere bağlıdır (Clegg ve ark. 1997). Son zamanlarda yapılan çalışmalar, kompozit malzemelerin dinamik tepkisinde arayüzey özelliklerinin rolünü araştırmıştır (Lee ve ark. 2018). Ayrıca, seramikler üzerine yapılan araştırmalar, daha etkili seramik zırh sistemlerinin tasarımını bilgilendirebilecek yüksek gerilme oranları altında hasar mekanizmalarını ve başarısızlık süreçlerini anlamaya odaklanmıştır (Hazell ve ark. 2012). Sonuç olarak, malzeme dinamiklerinin incelenmesi, aşırı yükleme koşulları altında malzemelerin davranışını anlamak ve optimize edilmiş zırh sistemleri tasarlamak için çok önemli olmaktadır. Bu kapsamda aşağıda malzeme dinamiği ve davranışları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

### **2.1.1. Malzeme dinamiği**

#### **2.1.1.1. Malzeme davranışı ve özellikleri**

Malzeme dinamiğinin anlaşılması açısından aşağıda malzemelerin mekanik özellikleri, termal özellikleri, elektriksel özellikleri ve manyetik özellikleri gibi farklı özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

**Malzemelerin mekanik özellikleri:** Malzeme davranışının en önemli yönlerinden biri mekanik yüklemeye verilen tepkidir. Bu, elastikiyet, plastiklik ve kırılma gibi özellikleri içermektedir. Esneklik, bir malzemenin deformasyondan sonra orijinal şekline dönme kabiliyetini tanımlamakta ve genellikle Young modülü (E) ile karakterize edilmektedir (Ashby ve Jones, 2022). Öte yandan plastisite, bir malzemenin elastik sınırının ötesinde stres altında kalıcı deformasyonunu ifade etmektedir (Gere ve Goodno, 2018). Kırılma mekaniği çalışması, malzeme arızasını anlamak için gerekli olan stres altındaki malzemelerde çatlakların oluşumunu ve yayılmasını incelemektedir (Anderson, 2017).

**Malzemelerin termal özellikleri:** Malzemeler, davranışlarını ve performanslarını etkileyen farklı termal özellikler sergileyebilmektedir. Bu özellikler arasında termal iletkenlik (k), özgül ısı kapasitesi ( $C_p$ ) ve termal genleşme katsayısı ( $\alpha$ ) bulunmaktadır. Termal iletkenlik, bir malzemenin ısıyı ne kadar verimli bir şekilde aktarabileceğini tanımlamakta ve yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler ısı yönetimi uygulamaları için kullanışlı olmaktadır (Incropera ve ark. 1996). Özgül ısı kapasitesi, bir malzemenin birim kütlesini bir santigrat derece yükseltmek için gereken ısı miktarını

tanımlamakta ve bir malzemenin enerji depolama ve aktarma yeteneklerini anlamak için çok önemli olmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018). Öte yandan termal genişleme, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir malzemenin boyutlarındaki değişimi ölçmekte ve sıcaklık dalgalanmalarının boyutsal değişikliklere neden olduğu uygulamalarda hayati önem taşımaktadır.

**Malzemelerin elektriksel özellikleri:** Elektrik iletkenliği ( $\sigma$ ), direnç ( $\rho$ ) ve dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) gibi malzemelerin elektriksel özellikleri, elektronik ve enerji depolama dahil olmak üzere birçok uygulamada önemli bir rol oynamaktadır. Elektriksel iletkenlik, öz direncin tersidir ve bir malzemenin elektrik akımını iletme kabiliyetini ölçmektedir (Tipler ve Mosca, 2018). Dielektrik sabiti, bir malzemenin elektrik alanında elektrik enerjisi depolama yeteneğinin bir ölçüsüdür ve özellikle kapasitörlerin ve yalıtkanların tasarımı için önemlidir (Griffiths, 2017).

**Malzemelerin manyetik özellikleri:** Malzemeler ferromanyetizma, paramanyetizma ve diamanyetizma gibi çeşitli manyetik özellikler sergileyebilmektedir. Demir ve nikel gibi ferromanyetik malzemeler kendiliğinden mıknatıslanma sergilemekte ve kalıcı bir manyetik durumu koruyabilmektedirler (Tehrani ve Spaldin, 2021). Öte yandan, paramanyetik malzemeler manyetik alanlara zayıf bir şekilde çekilmekte, ancak kalıcı bir manyetik durumu sürdürmemektedirler. Bununla birlikte, diamanyetik malzemeler manyetik alanlar tarafından zayıf bir şekilde itilmektedirler (Blundell, 2018). Bu manyetik özellikler veri depolama, motorlar ve transformatörler gibi uygulamalarda çok önemli hale gelmektedir.

#### **2.1.1.2. Malzemelerin dinamik davranışları**

Malzemelerin çeşitli yükleme koşulları altındaki dinamik davranışlarının anlaşılması, zırh sistemleri gibi yüksek gerinim oranları ve darbe yükleriyle karşılaşılacak uygulamalarda kullanılan malzemelerin tasarlanması ve optimize edilmesi için gereklidir. Bu bölümde metaller, seramikler ve kompozitler de dahil olmak üzere malzemelerin dinamik davranışlarına ilişkin literatür tartışılmaktadır.

##### **2.1.1.2.1. Metaller**

Metallerin dinamik davranışı, zırhlarda ve darbeye ilgili diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmalar, adyabatik kesme bandı ve dinamik yeniden kristalleşme gibi yüksek gerilme hızları

altındaki deformasyon ve kırılma mekanizmalarını anlamaya odaklanmıştır (Meyers, 1994; Murr ve ark. 2001). Metallerin dinamik davranışlarını incelemadaki en önemli zorluklardan biri, yüksek gerilme hızları altında mekanik tepkilerini doğru bir şekilde tanımlayabilen bünye modelleri geliştirmektir. Johnson ve Cook (1983) modeli, gerilme, gerilme hızı ve sıcaklık etkilerini hesaba katan en yaygın kullanılan modellerden biridir. Bu model, zırh delme ve darbe yüklemesi ile ilgili çeşitli problemlere başarıyla uygulanmıştır (Forrestal ve Tzou, 1997; Siviour, 2016).

#### **2.1.1.2.2. Seramikler**

Seramikler, yüksek sertlikleri ve kırılkanlıkları nedeniyle benzersiz dinamik davranışlar sergilemektedirler. Seramiklerin yüksek gerilme oranları altında incelenmesi, daha etkili seramik zırh sistemlerinin tasarımını bilgilendirebilecek hasar mekanizmalarını ve başarısızlık süreçlerini anlamaya odaklanmıştır (Hazell ve ark. 2012). Seramiklerin dinamik davranışı malzeme özellikleri, mikro yapı ve yükleme koşulları gibi faktörlerden etkilenmektedir (Holmquist ve ark. 2002). Seramik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar, çok katmanlı yapılar ve gradyan malzemelerin kullanımı gibi gelişmiş performansa sahip yeni seramik zırh sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Chocron ve ark. 2009). Ayrıca, çalışmalar seramiklerin kompozit sistemlere dahil edilmesinin genel dinamik davranışlarını ve balistik performanslarını artırabileceğini göstermiştir (Clegg ve ark. 1997).

#### **2.1.1.2.3. Kompozitler**

Kompozit malzemelerin dinamik davranışları, hafif zırh uygulamalarına yönelik potansiyelleri nedeniyle giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Kompozitler, bileşen malzemelerin özellikleri, mikro yapı ve arayüzey özellikleri gibi faktörlere bağlı olan karmaşık dinamik davranış sergilemektedirler (Lee ve ark. 2018). Son zamanlarda yapılan çalışmalar, kompozit malzemelerin dinamik tepkisinde arayüzey özelliklerinin rolünü araştırmış ve arayüzey özelliklerinin optimize edilmesinin yüksek gerilme oranları altında daha iyi performansa yol açabileceğini göstermiştir (Lee ve ark. 2018). Ayrıca araştırmalar, genel dinamik davranışlarını ve balistik performanslarını artırmak için seramik bileşenleri kompozit sistemlere dahil etme potansiyelini araştırmıştır (Chocron ve ark. 2009).

### 2.1.1.3. Malzemelerin patlama davranışı

Patlama olayları, yüksek basınç, sıcaklık ve çevreye yayılan bir şok dalgasının oluşmasıyla sonuçlanan hızlı enerji salınımı ile karakterize edilmektedir. Patlama olaylarının özelliklerinin anlaşılması tehlike değerlendirmesi, güvenlik mühendisliği ve koruyucu yapıların tasarımı için gereklidir. Patlama olayları enerji salınımının kaynağına göre kategorize edilebilmektedir. Kimyasal patlamalar, patlayıcıların infilak etmesi veya yanıcı gazların yanması gibi ısı ve basınç şeklinde enerji açığa çıkaran ekzotermik reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Baker ve ark. 2021). Öte yandan fiziksel patlamalar, basınçlı kapların yırtılması veya dönen makinelerin arızalanması gibi depolanan enerjinin hızlı bir şekilde serbest bırakılmasını içermektedir (Kuchta, 2019). Enerji salınım mekanizmasını anlamak, bir patlama olayının potansiyel büyüklüğünü ve sonuçlarını tahmin etmek için kritik öneme sahiptir.

Bir patlama olayı sırasında enerjinin hızlı bir şekilde serbest kalması, çevredeki ortam boyunca yayılan bir şok dalgasının oluşmasıyla sonuçlandığında patlama dalgaları oluşmaktadır (Cooper, 2019). Patlama dalgaları, başlangıçta aşırı basınç, ardından basınçta hızlı bir düşüş ve ardından gelen negatif basınç aşaması ile karakterize edilmektedir (Kingery ve Bulmash, 2020). Patlama dalgasının şiddeti, enerji salınım hızı, patlama kaynağından uzaklık ve çevredeki ortamın özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte sınırlama veya engellerin varlığı bir patlama olayının özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Binalar veya tüneller gibi hapsetme, basınçta ve patlama dalgasının süresinde artışa yol açarak yapılarda daha ciddi hasara ve daha fazla yaralanma potansiyeline neden olabilmektedir (Cormie, Mays ve Smith, 2020). Duvarlar veya bariyerler gibi engeller, patlama dalgasının yansımaya ve büyümesine neden olarak lokalize basınç ve hasar alanlarının artmasına yol açmaktadır (Movahedifar ve Remennikov, 2021).

Malzemelerin patlama davranışı, infilaklar ve patlamalar gibi hızlı enerji salınımı olaylarına karşı malzeme tepkilerinin incelenmesini kapsamaktadır. Patlama yükü, bir patlama veya infilak olayı nedeniyle bir malzeme veya yapıya hızlı bir şekilde kuvvet uygulanmasıdır (Krauthammer, 2018). Patlama yükleri, malzemelerde karmaşık gerilme durumlarına neden olarak hasara veya arızaya yol açabilmektedir. Malzemeler üzerindeki patlama yükünün incelenmesi, patlamaya dayanıklı binalar gibi koruyucu

yapıların tasarlanması ve patlamalarla ilişkili tehlikeler için azaltma stratejilerinin geliştirilmesi için gereklidir (Remennikov ve Carolan, 2019).

Şok dalgası yayılımı, bir patlamanın ardından enerjinin bir malzeme veya ortam aracılığıyla hızlı bir şekilde iletilmesidir (Shepherd, 2021). Şok dalgaları, malzemelerde ve yapılarda dökülme, kırılma ve plastik deformasyon dahil olmak üzere ciddi hasara neden olabilmektedir. Malzemelerde şok dalgası yayılımını anlamak, patlayıcı yüklemeye maruz kalan malzemelerin ve yapıların performansını tahmin etmek ve gelişmiş koruyucu malzemelerin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir (Zukas, 2018).

Bununla birlikte patlama olaylarına maruz kalan malzemeler,  $10^3$  ila  $10^6$  s<sup>-1</sup> mertebesinde hızlı deformasyon oranları ile karakterize edilen yüksek gerilme oranlı yükleme yaşamaktadırlar (Meyers, 2019). Malzemelerin yüksek gerilme oranlı yüklemeye tepkisi, yarı statik yükleme koşulları altındaki davranışlarından önemli ölçüde farklı olabilir ve benzersiz deformasyon ve arıza mekanizmalarına yol açabilir (Chen ve Ravi-Chandar, 2022).

#### **2.1.1.4. Malzemelerin darbe davranışları**

Farklı malzeme türlerinin farklı darbe davranışları bulunmaktadır. Öne çıkan bazı malzemelerin darbe davranışları aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

##### **2.1.1.4.1. Çelik**

Çelik, balistik uygulamalar için en çok kullanılan metal türlerinden biridir. Çubuk şeklindeki bir tehdidin çelik bir levhaya çarpması durumunda, hedef tehditten daha yumuşak ise homojen plastik akış ile penetrasyon gerçekleşmektedir. Penetrasyondan sonra çubukta (tehdit) çok az deformasyon olabilir veya hiç olmayabilir. Hedef olarak sertleştirilmiş çelik (zırh çeliği) kullanıldığında, çarpma bölgesinde kesme bölgesi olacaktır (Zhao ve Guo, 2018). Hedefin arka yüzünde şişkinlik gözlenmekte ve kesme tapası nedeniyle çelik parçası kopar ve penetrasyon gerçekleşir. Penetrasyon olayı sırasında, çarpma noktasından bitişik bölgelere aktarılan gerilim yükü nedeniyle, spall'lar meydana gelir ve çevreye yayılır. Bu da tehdidin kinetik enerjisinin hedefe yayılmasını sağlar. Sonuç olarak, çeliğin penetrasyonu sırasında üç ana deformasyon mekanizması vardır. Bunlar plastik deformasyon, kesme tapası ve çekme kırılmasıdır (Liu, He ve Wu (2009).

#### 2.1.1.4.2. Seramik

Seramikler diğerk balistik malzemelere kıyasla daha sert ve kırılğan malzemelerdir. Seramik malzeme penetrasyonu temel olarak çarpma bölgesinde kırılma ve seramik parçacıklarının yayılmasına dayanmaktadır. Seramik penetrasyon mekanizmaları üzerine yapılan araştırmalarda, kırılmanın gerçekleşikten sonra radyal ve kalınlık yönünde ilerlediğı gözlemlenmiştir (Si ve ark. 2023). Bu durum Hertzian Koni Çatlakları olarak adlandırılmaktadır. Deforme olmuş seramikler incelendiğinde penetrasyon mekanizmaları olarak taneler arası/tane içi mikro ve makro çatlaklar, kayma bölgeleri, dislokasyonlar ve faz dönüşümleri gözlenmektedir. Penetrasyon olayı sırasında seramiklerin yüksek sertlik özelliklerinden dolayı tehdit üzerinde de kırılma ve diğerk deformasyonlar gözlenmektedir (Arslan, 2023).

Seramiklerin darbe davranışını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Gözeneklilik, üretim tekniğı ve seramik türü bu faktörlerden bazılarıdır. En önemli faktörlerden biri seramik blokların hapsedilmesidir. Anderson ve Timmons (1997) seramiklerin hapsedilmesinin balistik darbe özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma için üç farklı sınırlama türü kullanılmıştır. Testlerden birinde çıplak seramik karo kullanılmıştır (Anderson ve Royal-Timmons, 1997). Sınırlandırmaların karşılaştırılması için penetrasyon derinliğini ölçmek amacıyla seramiklerin arkasında RHA çeliğı kullanılmıştır. İlk sınırlama seramik karoya radyal olarak uygulanmıştır. İkincisinde seramik karo radyal olarak sınırlandırılmış ve seramik üzerinde de çelik bir plaka bulunmaktadır. Üçüncü ve sonuncusunda seramik karo üzerinde iki çelik plaka vardır (Anderson ve Royal-Timmons, 1997).

Seramik karolar üzerinde balistik testlerden önce, penetrasyon derinliğı (DOP) referans değerk olarak RHA çeliğı üzerinde ölçülmüştür. Referans DOP ölçümlerinden sonra sınırlı seramikler RHA çeliğinin önüne yerleştirilmiş ve balistik testler gerçekleştirilmiştir. Seramik karolar için hangi hapsedme yönteminin daha iyi olduğunu analiz etmek için DOP değerkleri ölçülmüştür (Anderson ve Royal-Timmons, 1997). Sonuç olarak, seramik karoların hapsedilmesinin çıplak seramik karoya kıyasla balistik performanslarını artırdığı gözlemlenmiştir. Seramik karoların balistik performansının kapak plakası kalınlığına bağılı olduğu tespit edilmiştir. Analizden, optimum bir kapak plakası kalınlığından sonra seramiklerin performansının azaldığı söylenmiştir (Anderson ve Royal-Timmons, 1997). Hapsedilmiş seramiğın çıplak seramiğe göre daha iyi balistik performans göstermesinin nedeni, seramik toz haline

geldikçe sıkıştırma özelliklerinin artması olabilir. Hapsedilme durumunda seramikler çıplak seramikler kadar çevreye yayılamamakta, dolayısıyla seramik karonun tehdide karşı direnci artmaktadır (Bhatnagar, 2016).

#### **2.1.1.4.3. Kompozitler**

Bir darbe olayı sırasında kompozit yapıların malzeme tepkisi iki ana başlıkta analiz edilebilir. Bunlar küresel ve yerel tepkilerdir. Darbe sırasında yerel ve küresel tepkinin dağılımı, tehdidin geometrisi ve darbe hızı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında tehdidin çarpma hızı, iki malzeme tepkisinin dağılımı için en önemli parametredir. İki tepki arasındaki temel fark, küresel tepki hedef geometrisi ve boyutları gibi parametrelere bağlıyken yerel tepki bu tür faktörlere bağlı olmamasıdır (Anderson ve Morris, 1992). Düşük hızlı darbelerde küresel tepkinin gözlemlenmesi daha olasıdır. Darbe hızı arttıkça global tepki yerini lokal tepkiye bırakmaktadır. Global tepkide kompozit yapı üzerine yarı statik yük uygulandığında eğilirken, lokal tepkide kesme tıkanması, delaminasyon, fiber/matris çatlaması gibi daha karmaşık deformasyon mekanizmaları gözlemlenebilmektedir (Saeedifar ve ark. 2018). Yerel tepkide baskın deformasyon mekanizması fiber/matris tipine, panel kalınlığına ve tehdit tipine bağlıdır.

## **2.2. Balistik Tanımı ve Özellikleri**

Balistik, bir merminin namlu içindeki, namludan çıktıktan sonra havadaki ve çarpma olayı sırasında hedef üzerindeki davranışını inceleyen bilim dallarından biridir. "Balistik" ismi, orta çağ savaşları sırasında askerlerin kale içlerine girerek yapılara zarar vermeleri için kullanılan bir mancınık sisteminden gelmektedir. Bu sistem "Ballista" olarak adlandırılmaktadır (Lawton, 2004). Ballista sistemleri ile kayalar, büyük oklar ve benzeri cisimler karşı tarafa fırlatılmış ve hedeflenen bölgeyi vurmak için cismin davranışının hesaplanması gerekmiştir. Bu hesaplamalara göre mancınıkların konumları düzenlenmiştir. Bu hesaplamalar modern balistik uygulamalar için kilit faktörler olmuştur (Black, 2013).

Yukarıda belirtildiği gibi balistik çalışmalar merminin namlu içinde, havada ve hedef. Bu temelde balistik üç gruba ayrılır;

1. İç Balistik
2. Dış Balistik



### 3. Terminal Balistik

#### 2.2.1. İç balistik

İç balistik, ateşleme iğnesinin kapsüle çarpmasından merminin namludan çıkışına kadar geçen sürede itici gaz basıncı, ivme ve merminin çıkış hızı ile silahın geri tepmesi gibi parametreleri incelemektedir. Ateşleme iğnesi kapsüle çarptığında, kapsüle yerleştirilen kimyasal bileşenler yüksek sıcaklıklara neden olan bir patlama oluşturmaktadır. Bu patlama sonucu oluşan alevler baruta ulaşır ve yüksek sıcaklık nedeniyle barut yanmaya başlar. Bu yanma esnasında yüksek basınçlı gaz meydana gelir. Yüksek basınçlı gaz namlunun yan duvarlarından dışarı çıkamadığı için mermiyi ileri doğru iter ve merminin namludan çıkmasına neden olur (Salman ve Leman, 2018).

Normalde barut yavaş bir şekilde yanar. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi kinetik enerji tehditlerinde mermi bir fişek tarafından hapsedilir ve fişek namlu tarafından çevrelenir. Bu engeller, gazın fişek içinde sıkışmasına neden olur ve sonuç olarak sıcaklık ve basınç katlanarak artar. Gazın enerjisi merminin eylemsizliğine ulaştığında, mermi hareket etmeye başlar ve sonunda yüksek hızlarla namludan çıkar. Merminin çıkışı silahın geri tepmesine neden olur. Merminin ağırlığı arttıkça silahın geri tepmesi de artmaktadır (Salman ve Leman, 2018).

#### 2.2.2. Dış balistik

Dış balistik, merminin namludan hedefe kadar hava içindeki davranışını inceleyen bir balistik alanıdır. Uçuş sırasında mermi namlu içindeki gibi yan etkilerden etkilenmez ve serbest bir cisim gibi davranır. Bu nedenle, merminin davranışı namlu içindeki davranışından çok daha karmaşıktır ve merminin yaklaşık rotasını ölçmek için ayrıntılı matematiksel hesaplamalar gerekmektedir. Dış balistik, bir merminin silahın namlusundan çıktığı andan hedefe ulaştığı ana kadar uçuş sırasındaki davranış ve hareketinin incelenmesidir (Courtney ve Courtney, 2008). Bir merminin dış balistiğini etkileyen ana faktörler arasında merminin şekli, kütlesi, ilk hızı ve içinden geçtiği hava yoğunluğu ve rüzgâr koşulları gibi fiziksel ortam yer almaktadır.

**Mermi hareketi ve yörüngesi:** Dış balistikte bir merminin yörüngesi, başta yerçekimi ve aerodinamik sürükleme olmak üzere üzerine etki eden kuvvetler tarafından belirlenen parabolik bir yol olarak tanımlanmaktadır. Bir merminin hareketi iki

bileşene ayrılabilir. Bunlar yatay hareket ve dikey harekettir. Yatay hareket ilk hız tarafından belirlenirken, dikey hareket yerçekiminden etkilenmektedir (Courtney ve Courtney, 2008). Mermi hareketi, sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin mermi üzerindeki etkilerini dikkate alan nokta kütle modeli ve değiştirilmiş nokta kütle modeli gibi çeşitli matematiksel modeller kullanılarak daha fazla analiz edilebilmektedir (Golan ve Katz, 2011).

**Aerodinamik kuvvetler:** Bir merminin aerodinamik özellikleri, dış balistiğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu özellikler, merminin sürüklenme katsayısını, kaldırma katsayısını ve moment katsayısını etkileyen şeklini, boyutunu ve kütle dağılımını içermektedir. Merminin hareketine karşı koyan sürüklenme kuvveti viskoz sürüklenme ve basınç sürüklemesi olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır (Liu ve Sun, 2013). Viskoz sürüklenme, merminin yüzeyi ile çevresindeki hava arasındaki sürtünmeden kaynaklanırken, basınç sürüklemesi, merminin şekli nedeniyle etrafındaki basınç farklılıklarının bir sonucudur (Liu ve Sun, 2013). Öte yandan kaldırma kuvveti, hareket yönüne dik olarak etki eder ve merminin spin nedeniyle yörüngesinden sapmasına neden olan Magnus etkisinden sorumludur.

**Çevresel faktörler:** Hava yoğunluğu, sıcaklık, nem ve rüzgâr koşulları gibi çeşitli çevresel faktörler dış balistiği etkilemektedir (Golan ve Katz, 2011). Hava yoğunluğu merminin maruz kaldığı sürüklenme kuvvetini etkiler, daha yüksek yoğunluk daha fazla sürüklenme ile sonuçlanmaktadır (Courtney ve Courtney, 2008). Sıcaklık ve nem de hava yoğunluğunu ve dolayısıyla sürüklenme kuvvetini etkilemektedir. Rüzgâr koşulları, bir merminin yörüngesini önemli ölçüde etkileyerek yolunda sapmalara neden olabilir ve menzilin ve isabetliliğini etkileyebilmektedir. Sonuç olarak dış balistik, uçuş halindeki bir merminin yörüngesini ve performansını etkileyen çeşitli faktörleri göz önünde bulunduran mermi hareketi çalışmasının çok önemli bir yönüdür. Bu faktörlerin ve bunların mermi hareketi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, mermi tasarımında, silah sistemlerinde ve hedefleme doğruluğunda iyileştirmeler yapılmasını sağlamaktadır.

### 2.2.3. Terminal balistik

Terminal balistik, kinetik enerjinin aktarımı ve ortaya çıkan hasara odaklanarak bir merminin bir hedefe çarpması üzerine davranış ve etkilerinin incelenmesidir (Feng ve ark. 2020). Bir mermi ile hedef arasındaki etkileşim karmaşıktır ve merminin kinetik

enerjisi, şekli ve malzemesinin yanı sıra hedefin malzeme özellikleri, kalınlığı ve tasarımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Feng ve ark. 2020). Bir mermi bir hedefe çarptığında, yavaşlama yaşar, bu da kinetik enerjinin hedefe aktarılmasıyla sonuçlanır ve hem merminin hem de hedefin deformasyonuna, penetrasyonuna veya parçalanmasına neden olur (Zook, Frankve Silsby, 1992).

Etkileşim iki ana kategoride sınıflandırılabilir: deformasyon ve malzeme bozulmasının baskın olduğu düşük hızlı darbeler ve şok dalgaları ve hidrodinamik etkilerin önemli bir rol oynadığı yüksek hızlı darbeler (Zukas, 1996). Terminal balistikteki hedefler genel olarak biyolojik dokular ve tekstiller gibi yumuşak hedefler ve metaller ve seramikler gibi sert hedefler olarak sınıflandırılmaktadır (Siviour, 2012). Yumuşak hedefler çarpma üzerine önemli derecede deformasyon gösterir ve tepkileri hedef kalınlığı, malzeme özellikleri ve çarpma hızı gibi faktörlerden etkilenir. Öte yandan sert hedefler daha katı bir tepki gösterirler ve penetrasyona karşı dirençleri ve mermi parçalanmasına neden olma potansiyelleri ile karakterize edilirler.

İnsan veya hayvan dokuları gibi yumuşak hedefler oldukça heterojendir ve doğrusal olmayan, viskoelastik davranış sergilerler. Yumuşak hedeflerde terminal balistik çalışması, mermilerin canlı organizmalar üzerindeki etkilerini anlamak ve balistik yelekler gibi kişisel koruyucu ekipmanların (KKE) geliştirilmesi için çok önemlidir (Siviour, 2012). Yara balistiği, geçici ve kalıcı boşlukların değerlendirilmesinin yanı sıra enerji transferinin ve sonuçlarının değerlendirilmesini içeren biyolojik dokularda mermilerin neden olduğu hasara odaklanan terminal balistiğin bir alt alanıdır (Rosenberg ve Dekel, 2012).

Metaller, seramikler ve kompozitler gibi sert hedefler, askeri araçların ve koruyucu bariyerlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Zukas, 1996). Sert hedeflerde terminal balistik çalışması, penetrasyon, delinme ve parçalanma mekanizmaları da dahil olmak üzere bu malzemelerin yüksek hızlı darbeler altındaki davranışlarını anlamayı ve tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu alandaki araştırmalar, ultra yüksek sertlikte çelikler ve seramik kompozit zırh sistemleri gibi gelişmiş performansa sahip gelişmiş malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır (Hazell, Roberson ve Moutinho, 2014).

Sonuç olarak Terminal balistik, mermilerin, kişisel koruyucu ekipmanların ve askeri sistemlerin tasarımı üzerinde önemli etkileri olan, çarpma anında mermiler ve hedefler

arasındaki etkileşimleri anlamak için hayati bir çalışma alanıdır ve bir merminin katı veya sıvı hedef üzerindeki penetrasyon davranışının incelenmesidir. Balistik biliminin bu alanı, merminin hedefe çarptığı andaki davranışını ve merminin enerjisinin hedefe nasıl aktarıldığını incelemektedir.



### 3. ZIRH GELİŞTİRİLMESİ VE ZIRH DELİCİ MÜHİMMATLAR

#### 3.1. Zırh Tanımı ve Tarihçesi

Zırh, darbelerden kaynaklanan enerjiyi emmek ve dağıtmak için tasarlanmış koruyucu bir katman veya yapı olarak tanımlanabilir, böylece korunan birey veya nesnenin yaralanma veya hasar riskini azaltır. Zırh, kask ve vücut zırhı gibi kişisel zırhlar ve askeri araçlar, uçaklar ve gemiler için koruma sağlayan araç zırhları da dahil olmak üzere çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir (Cao ve ark. 2020). Zırhın etkinliği malzeme özellikleri, kalınlık ve tasarımın yanı sıra çarpan merminin türü ve enerjisi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Tarih boyunca insanlar sürekli olarak dış tehditlere karşı korunma arayışında olmuşlardır. Silahların yaygınlaşmasıyla birlikte, bunların tehlikelerine karşı korunma ihtiyacı kalkan ve zırhların geliştirilmesine yol açmıştır. Zırhın tarihi, deri ve bronz gibi ilk kişisel zırh biçimlerinin savaşta askerleri korumak için kullanıldığı eski uygarlıklara kadar uzanmaktadır (Edge ve Paddock, 1988). Çağlar boyunca zırh, silah teknolojisindeki gelişmelere ve savaşın değişen doğasına yanıt olarak evrim geçirmiştir. Mısır, Mezopotamya ve Yunan gibi eski uygarlıklarda zırhlar deri, bronz ve demir gibi malzemelerden yapılmış, savaş sırasında askerleri korumak için miğfer, kalkan ve göğüs zırhı olarak şekillendirilmiştir (Edge ve Paddock, 1988). Roma İmparatorluğu zırh teknolojisini daha da geliştirerek lorica segmentata olarak bilinen ve askerler için gelişmiş esneklik ve koruma sağlayan parçalı plaka zırhları ortaya çıkarmıştır (Bishop, 2002).

Ortaçağ döneminde, zincir zırh ve plaka zırh gibi yeniliklerle zırhın gelişimi devam etmiştir (Edge ve Paddock, 1988). Demir veya çeliğin birbirine kenetlenmiş halkalarından yapılan zincir zırh, kesici ve delici saldırılara karşı esnek koruma sağlarken, büyük metal plakalardan oluşan plaka zırh, küt kuvvet darbelerine ve ok gibi mermi silahlarına karşı daha fazla koruma sağlamıştır.

15. yüzyılda, savaşlarda kılıç ve kalkan kullanan bireyler, dış tehlikelere karşı ek koruma için vücutlarını kaplayan çelik zırhlara güvenmişlerdir. 16. yüzyıla

gelindiğinde Gusoku adı verilen yeni bir zırh türü ortaya çıkmıştır. Gusoku başlangıçta deri, bambu, kumaş ve metalden yapılan bu çok yönlü zırh, delikli yatay şeritler, geniş dikdörtgen delikli yapraklar ve sıkıca kalıplanmış, perçinlenmiş yatay ve dikey bantlardan oluşan göğüs zırhı gibi çeşitli tasarımlara sahipti. Kollar ve boyun, renkli ipliklerle birbirine sıkıca bağlanmış küçük metal parçalarla korunuyordu. Zırh plakaları sertleştirilmiş deri, boynuz, kemik, katmanlı doku ve demirden üretiliyordu ve farklı vücut tiplerine uyum sağlamak için şekil ve boyutlar açısından esneklik sağlıyordu (Bishop, 2002).

Ortaçağın sonlarında ateşli silahların ortaya çıkması ve ardından modern silahların geliştirilmesi, zırh tasarımında ve malzemelerinde önemli değişikliklere yol açmıştır. Çelik plaka zırhın yerini, yüksek hızlı mermilere ve şarapnel parçalarına karşı daha iyi koruma sağlayan Kevlar ve seramik kompozitler gibi daha hafif ve daha esnek malzemeler almıştır. Balistik yelekler, kasklar ve kalkanlar gibi modern vücut zırhları, çok çeşitli tehditlere karşı etkili koruma sağlamak için aramid lifler, seramik plakalar ve yüksek performanslı plastikler gibi malzemelerin bir kombinasyonunu içermektedir (Edge ve Paddock, 1988).

### 3.2. Zırh Çeşitleri

Balistik zırh, insan vücudunu mühimmat ve metal parçalarından korumak için tasarlanmış hayati bir koruyucu donanımdır. Askeri kuvvetler ve kolluk kuvvetleri tarafından personeli korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel gereklilikleri yerine getirmek için balistik zırhın makul bir ağırlıkta olması ve hareket kabiliyetini engellemeyecek şekilde tasarlanması gerekir. Uygulama özelliklerine göre yumuşak ve sert zırh olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

**Yumuşak Zırhlar:** Yumuşak vücut zırhları dokuma kumaşlar, dokuma olmayan kumaşlar veya esnek balistik malzemelerin bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Bu zırhlar 500 m/s'ye varan hızlarda gelen parçalara karşı koruma sağlamaktadır. Öte yandan sert zırhlar polimerler, kompozitler, seramikler, metaller, silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B4C) gibi sert malzemelerden yapılmakta ve daha yüksek seviyede koruma sağlamaktadır. Bununla birlikte, sert zırh yumuşak muadiline kıyasla daha büyük bir ağırlığa sahiptir (Cavallaro, 2011).

**Bütüncül Zırhlar:** Savunma uygulamalarında, güvenlikten ödün vermeden enerji verimliliği ve yüksek hareket kabiliyeti elde etmek için uygun malzemenin seçilmesi çok önemlidir. Sonuç olarak, zırh tasarımcıları belirli bir mühimmatın vereceği hasarı önleyebilecek en düşük alan yoğunluğuna sahip malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir (David, Gao ve Zheng, 2009). Bu bağlamda çok sayıda malzeme ve malzeme sistemi göz önünde bulundurulmaktadır, ancak çelik, üstün mekanik özellikleri nedeniyle en önde gelen aday malzeme olmaya devam etmektedir (Gooch, 2002). Ayrıca çelik, geniş bir teknolojik veri tabanına sahiptir ve nispeten ucuzdur. Çeliğin yüksek yoğunluğu, ısıl işlem yoluyla sertliğinin artırılmasıyla önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Ogorkiewicz, 2004).

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları da yüksek özgül mukavemetleri nedeniyle zırh uygulamaları için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Titanyum alaşımları bir diğer önemli aday malzemedir; ancak nispeten yüksek maliyetleri, önemli potansiyellerine rağmen yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. Yapılan bir çalışmada Alüminyum alaşımı AA 7039'un zırh delici mermilere karşı zırh çeliğinden daha iyi performans gösterdiği ve balistik performansın eğikleme birlikte arttığı bildirilmiştir. Ayrıca, çalışmada AA 7039 kullanımının çeliğe kıyasla ağırlık tasarrufu açısından daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır (Ogorkiewicz, 2004). Başka bir çalışmada (Woodward1977). Woodward, SAE 1020, SAE 4130, P8 Hadfield çeliği, AA 5083, AA7039, titanyum, titanyum alaşımı 318 ve Ti-8Al-1Mo-1V çeliğini fiziksel ve mekanik özelliklerine göre karşılaştırarak metal bazlı zırh malzemelerinin seçimi için bir kriter önermiştir. Sonuç olarak, titanyum alaşımları ve Hadfield çeliği balistik performans açısından diğer malzemelere göre daha başarılı bulunmuştur (Woodward 1977).

Manganello ve Abbot (2012) çelik özelliklerinin çelik zırhın düşük hızlı darbe direnci üzerindeki etkisini incelemiş ve sertliğin balistik performansı etkileyen en etkili özellik olduğu sonucuna varmıştır (Manganello ve Abbot, 2012). Gupta ve Madhu (1997) tek katmanlı ve çok katmanlı yumuşak çelik, RHA (haddelenmiş homojen zırh) çeliği ve alüminyumun  $800-880 \text{ m.s}^{-1}$  hızında hareket eden  $7.62 \text{ mm}$ 'lik mermilere karşı balistik performansını araştırmıştır. Katman kalınlığı iki katmanı aştığında balistik direncin azaldığını bulmuşlardır (Gupta ve Madhu ,1997) Dikshit ve ark. (1995) zırh plakası sertliğinin  $300-800 \text{ m.s}^{-1}$  arasında değişen hızlara sahip mermilere karşı balistik performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Dikshit ve ark.1995).Bir

başka çalışmada, Sorensen ve arkadaşları (2010) soğuk haddelenmiş zırh çeliğinin iki aşamalı bir gaz tabancasından atılan ve hızları  $1,5-4 \text{ km.s}^{-1}$  arasında değişen mermilere karşı yüksek hızlı balistik testlerini gerçekleştirmiştir.

Ayrı bir araştırmada, Sorensen ve arkadaşları (2010) iki aşamalı bir gaz tabancasından ateşlenen mermilere karşı performansını değerlendirmek için soğuk haddelenmiş zırh çeliği üzerinde yüksek hızlı balistik testler gerçekleştirmiştir. Bu mermiler  $1,5$  ila  $4 \text{ km/s}$  arasında değişen aşırı hızlara ulaşarak zırh çeliğinin koruyucu yeteneklerini sınırlarına kadar zorlamıştır. Çalışma, soğuk haddelenmiş zırh çeliğinin bu kadar yüksek hızlardaki mermilerden gelen darbelere dayanmadaki etkinliğini anlamaya çalışarak gelecekteki zırh tasarımları ve malzeme seçimi için değerli bilgiler sağlamıştır. Bununla birlikte zırh türleri üretildikleri maddeler açısından metalik, seramik, polimerik ve kompozit olmak üzere farklı türlere ayrılmaktadır aşağıda bu zırh çeşitleri detaylı olarak incelenmiştir.

### **3.2.1. Metalik zırhlar**

Metaller, köklü teknolojik veri tabanları ve tokluk, mukavemet ve sertlik gibi elverişli mekanik özellikleri nedeniyle zırh teknolojilerinde uzun zamandır önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, metaller zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Zırh tasarlarken, belirli mühimmat veya ateşli silahlardan kaynaklanan hasarı önleyebilecek en düşük alan yoğunluğuna sahip malzemelerin seçilmesi esastır. Bu amaç için birçok malzeme ve malzeme sistemi düşünülebilirken, çelik üstün mekanik özellikleri nedeniyle baskın aday malzeme olmaya devam etmektedir (Ash, 2016).

Çeliğe ek olarak, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları da yüksek özgül mukavemetleri nedeniyle zırh uygulamaları için önemli bir potansiyel göstermektedir. Titanyum alaşımları da kayda değer bir diğer malzemedir; ancak nispeten yüksek maliyetleri, yüksek zırh kabiliyetlerine rağmen yaygın kullanım potansiyellerini sınırlamaktadır. Haddelenmiş homojen zırh yaygın olarak standart zırh malzemesi olarak kabul edilmektedir. Zırh çelikleri arasında, su verme ve temperleme işlemlerinden geçen AISI 4340 bileşimi yaygın bir seçimdir (Genson, 2022).

Hem çelik hem de alüminyum alaşımları, belirli kalınlık sınırlamalarına kadar, haddelenmiş plaka zırh grubuna dahildir. Çeliğin düşük maliyeti, kolay üretilebilirliği



ve yapısal verimliliği onu en çok tercih edilen zırh malzemesi haline getirmektedir. Zırh çelikleri tipik olarak iki kategoride sınıflandırılır: Mermi penetrasyonuna direnmek için tasarlanmış Sınıf 1 zırh çelikleri ve patlamalara dayanmak için tasarlanmış Sınıf 2 zırh çelikleri. Darbelere etkili bir şekilde dayanmak için zırh çeliklerinin çatlamaya, kırılmaya ve parçacık kırılmasına karşı direnç göstermesi gerekir, bu da yüksek kaliteli, homojen bir mikro yapı gerektirir (Crouch, 2019).

Alaşımlı çelikler olan zırh çelikleri, östenitleme ve su verme aşamaları da dahil olmak üzere sertleştirme ve temperleme işlemlerinden geçen ıslah çelikleriyle benzer bir kimyasal bileşimi paylaşır. Bu çelikler temperlenir ve çökelme ile sertleştirilmiş martensitik bir mikroyapı içerir. Birincil amaç, haddeleme yoluyla elde edilen sac kesitinde sertleştirme ve temperleme sonrasında yüksek mukavemet ve tokluk elde etmektir. Homojen zırh çelikleri olarak bilinen bu çelikler, kalınlıkları boyunca eşit sertlik sergilemelidir (Crouch, 2019).

### **3.2.2. Seramik zırhlar**

Seramik zırhlar, kritik askeri teçhizatı patlamaların ve darbelerin zararlı etkilerine karşı korumak için yeni stratejiler geliştirmek amacıyla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Böylece çeşitli balistik koruma sistemleri geliştirilmiştir. İlk dönemlerde, askeri araçlardaki geleneksel zırh sistemleri çelik ve alüminyum gibi monolitik metal malzemelerden yapılmaktaydı. Son zamanlarda, askeri ekipmanlarda kullanılmak üzere titanyum alaşımları ve metal matrisli kompozitler gibi birçok yeni zırh malzemesi geliştirilmiştir. Bu malzemelerin kalınlıklarını artırarak yeterli koruma sağlamakta, ancak bu strateji düşük yakıt verimliliğine ve hareket kabiliyeti kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle, yüksek performanslı zırh sistemleri tasarlanırken çeşitli kısıtlamalar göz önünde bulundurulmaktadır (Zhao ve ark. 2020).

Balistik performans ve hafiflik çok önemlidir. Daha sonraki bir aşamada, bu gereksinimleri karşılamak için monolitik metal zırhlar yerine seramik/metal zırhlar önerilmiştir. Bu seramik/metal zırhlar, vuruş yüzünde seramikten oluşur ve sıkıştırma altında gerilim altında olduğundan daha yüksek mukavemete sahiptir ve metal, seramiğin dezavantajlarını dengeleyen arka kısımdadır. Seramik/metal zırhların mermi etkisinden korunma mekanizması, seramiklerin mermiyi deforme ederek ve aşındırarak mermilerin nüfuz etme kabiliyetini azaltması, ardından arka plakanın kalan kinetik enerjiyi emmesidir (Zhao ve ark. 2020).

Araştırmacılar, seramik zırhların balistik performansını iyileştirmek için uygulanabilir yaklaşımları araştırmaktadır. Önceki çalışmalar, malzeme özelliklerinin seramik/metal zırhın balistik performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Örneğin, elastik modül, mermi ile seramik yüzey arasındaki etkileşim süresini artırarak seramiğin daha fazla enerji emmesini sağlamaktadır. Ayrıca, eğilme mukavemeti/yoğunluk oranı ile balistik direnç arasında pozitif bir korelasyon vardır. Bununla birlikte, statik koşullarda analiz edilen malzeme özellikleri, balistik performansın dinamik taleplerine doğrudan aktarılmayabilmektedir (Fridlund, 2022).

Malzeme özelliklerine ek olarak, bu malzemelerin balistik performansı makul bir yapı oluşturularak önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Örneğin, seramik bloğun kalınlık oranı ve kısıtlama biçimi ayarlanarak balistik limit artırılabilir. Birçok çalışma, seramiğin ön gerilimini artırarak balistik performansı iyileştirmiştir. Önceki çalışmalar ayrıca seramik/metal zırhı optimize etmek için yapı tasarımına yönelik balistik limitlerin teorik modellerini oluşturmuştur (Guo, Alam ve Peel, 2022). Ayrıca, diğerlerinin yanı sıra seramik katmanlar içeren kompozit zırhların balistik performansı Kevlar ve UHMWPE gibi yeni malzemeler eklenerek geliştirilmiştir.

Bu tür kompozit zırhlar önemli ölçüde balistik direnç elde edebilmektedir. Ancak, Kevlar elyafının yoğunluğunun beklenenden yüksek olması ve UHMWPE'nin erime noktasının daha düşük olması, bu iki malzemenin uygulamalarını sınırlamıştır (Guo, Alam ve Peel, 2022). Ayrıca, bu malzemeler yeni zırh sistemleri için gereken maliyet etkinliği, düşük bakım ve yüksek performans gereksinimlerini tam olarak karşılayabilmektedir. Bu nedenle, yeni malzemeler içeren kompozit bir zırh gereklidir. Yukarıdaki eksiklikleri gidermek için yeni malzemeler içeren bir seramik zırhın test edilmesi gerekmektedir (Fridlund, 2022).

Son zamanlarda, poliüre, mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle darbe azaltmadaki mükemmel performansı nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Poliürenin darbe sırasındaki dinamik tepkisi güçlü bir hıza bağımlılık göstermektedir. Darbe sırasında camsı geçişi ile poliüre, deformasyonun neden olduğu iç sürtünme ve faz ayrışmış morfolojinin parçalanması ile ilişkili bir enerji dağılımı kütlesine ulaşabilmektedir. Poliüre tabakasının, viskoelastik ve hacimsel sıkıştırılabilirlik özelliklerini uygun şekilde birleştirerek seramik kompozit zırhlarda balistik koruma direnci ile dayanıklılık arasında bir uzlaşma sağlayabileceği görülmektedir. Buna ek olarak, poliürenin

kaplama konumu çok önemlidir ve etkisi farklı yüzeyler ve farklı poliüre türleri arasında farklı görünmektedir (Si ve ark. 2022).

Poliüre tabakasının metal ve beton yüzeyler için önemli ölçüde koruma sağlayabileceği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Si ve ark. 2022). Metal yüzeylerde elde edilen önemli sonuçlara rağmen, nispeten az sayıda çalışma poliüreanın mermi etkisine maruz kalan seramik zırhlara uygulandığında nasıl bir performans gösterdiğini araştırmıştır. Dahası, poliürenin seramik kompozit zırhın balistik performansı üzerindeki etkisi ve mekanizması belirsizliğini korumaktadır. Bu nedenle, geleneksel seramik/metal zırhların balistik direncinin, gereksiz ağırlık eklemekten yeni bir zırh sistemi oluşturmak için bir poliüre tabakası ile kaplanarak önemli ölçüde iyileştirilebileceği öngörülmüştür. Sonuç olarak, poliüre ile kaplanmış seramik zırhların mermi etkisine maruz kaldığında balistik performansının daha da iyileştirilmesi gerekmektedir (Peinado Seligrat, 2022).

Seramik malzemeler yüksek sertlikleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle zırh uygulamaları için mükemmel adaylardır. Kompozitler için matris malzemesi olarak da kullanılabilirler, ancak tipik olarak zırh malzemelerinde yüzey kaplaması olarak kullanılmaktadırlar. Gerçekte seramik zırh, sünek bir destek plakası (örneğin alüminyum veya çelik) ve sert bir yüzeyden oluşan iki bileşenli bir zırh sisteminin parçasıdır. Bu nedenle, seramik zırhlar çift mukavemetli katmanlı zırh ailesinin üyeleridir (Palaci ve Arikan, 2021).

Sert bir ön plaka ve yumuşak bir arka plakaya sahip olmanın mantığı, sert ön plakanın delici nesneyi (mermi) parçalaması, sünek plakanın ise kalan darbe enerjisini emmesidir. Seramiğin rolü, merminin enerjisini arka plakaya dağıtmak ve penetrasyon işlemi sırasında merminin aşınmasına neden olmaktır. Tüm seramikler son derece sert olmalarına rağmen, aynı zamanda çok kırılgandırlar. Aşırı sertlikleri, mermi çarpma anında parçalandığı için seramiklerin koruma sağlamasına olanak tanır. Seramikler için birincil aday zırh malzemeleri alümina ( $Al_2O_3$ ) ve bor karbürdür ( $B_4C$ ). Ancak  $B_4C$ 'nin düşük kırılma tokluğu ve yüksek üretim maliyeti yaygın kullanımını engellemektedir (Palaci ve Arikan, 2021).

Seramik malzemelerin seçimi için tasarım hususları ise şöyledir:

1. Zırh uygulamaları için yaygın olarak kullanılan seramiklerden bazıları  $Al_2O_3$  ,  $AlN$ ,  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $TiB_2$  ve  $WC$ 'dir.

2. Düşük yoğunluklu seramikler kullanıldığında RHA'ya göre hacimde önemli bir değişiklik gözlenmez. Ancak, kütlenin yarıdan fazla azaldığı rapor edilmiştir.
3. Kütledeki azalma en çok B4 C ve TiB2 için umut vericidir. RHA'nın üçte biri kadardır.
4. Yüksek yoğunluklu seramikler, ciddi bir alan kısıtlaması olduğunda kullanılabilir. WC'nin kalınlığı RHA kalınlığının yarısından daha azdır.
5. Darbe hızına karşı normalleştirilmiş penetrasyon eğrisinin seramik malzemeden bağımsız olduğu bulunmuştur.
6. Seramiklerin özellikleri seramik-kompozitler kullanılarak geliştirilebilir.
7. Daha küçük taneli mikron altı tozlar kullanılarak seramiklerin performansı artırılabilir.
8. Seramiklerin reaksiyonla bağlanması ve basınçsız sinterlenmesi gibi alternatif işleme yöntemleri, geleneksel seramiklerin performansını daha düşük işleme maliyetleriyle karşılayabilir (Peinado Seligrat, 2022).

### **3.2.3. Polimerik zırhlar**

Polimer esaslı kompozit malzemeler, elyaflarla güçlendirilmiş ve takviye edilmiş olarak inşaat, denizcilik ve otomotiv gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde uygulama alanı bulmuştur. Balistik performansları nedeniyle savunma sanayi tarafından zırh malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Polimer bazlı zırh malzemeleri, seramiklerle birlikte kullanıldığında yüksek balistik performans, düşük hasar marjları ve hafif yapı gibi avantajlar sunmaktadır. Çift mukavemetli katmanlı zırh sistemlerinde, seramik plakanın arka tarafı yüksek darbe enerjisi emilimine sahip yumuşak bir malzeme ile desteklenmektedir. Balistik olarak, seramik plakanın hemen arkasındaki polimer kompozit zırh delinse bile, parçacık yakalama özelliği hedefin arka tarafındaki etkiyi önemli ölçüde azaltmaktadır (Mehara ve ark. 2021).

### **3.2.4. Kompozit zırhlar**

Kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri ve sertlikleri nedeniyle günümüzde popülerlik kazanmaktadır. Araştırmacılar bunları zırh uygulamaları için kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Uzun elyaf takviyeli kompozitler bu tür uygulamalar için

yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve ark. 2022). Farklı elyaf malzemeleri, matris malzemeleri ve prepregler üzerinde çalışılmıştır. Dokuma ve dokuma olmayan, 3D ve tek bir laminatta farklı elyaf veya kumaş türlerine sahip hibrit kumaşlar, araştırmacılar tarafından değerlendirilen mimarilerden bazılarıdır. Bu çalışmalar sonraki aşağıda incelenmiştir:

**Elyaf lar:** Zırh kompozitleri için birincil takviye malzemesi liflerdir. Tam ve yüksek performanslı fiberler şu şekilde kategorize etmiştir:

1. Klasik (cam, karbon);
2. Sert zincirli aromatik (naylon, aramid);
3. Yüksek sıcaklık (Poly-benzimidazole-PBI, Polyphenylenebenzobisozazole-PBO); ve
4. Termoplastik (sıvı kristal fiber, yüksek modüllü polietilen- HMPE) (Bhat ve ark. 2021).

Literatürde üç tip cam elyaf rapor edilmiştir, Bunlar Eglass, Rglass ve Sglass dir. Karbon elyaflar, kullanılan prekürsöre bağlı olarak poli-akrilo-nitril bazlı (PAN) veya Pitch bazlı olarak sınıflandırılabilir. Naylon, nomex ve aramid (Ticari isimler: Kevlar®, Twaron®) aromatik asitler ve aminlerden elde edilmektedir (Akella ve Naik, 2015). Bunlar yüksek performanslarıyla bilinen sentetik organik elyaflardır. PBI ve PBO (Toyobo™'dan Zylon® olarak ticari olarak temin edilebilir) yüksek sıcaklıklarda mükemmel stabiliteye sahip yüksek mukavemetli elyaflardır. Yüksek sıcaklıkta eritme ve eğirme, sıvı kristal elyaflar (ticari olarak Vectran® olarak mevcuttur) ve HMPE (ticari olarak Spectra®, Dyneema® olarak mevcuttur) gibi termoplastik elyaflar yapmak için kullanılmaktadır (Huang ve ark. 2023).

**Kumaş lar:** Kumaş lar dokunmuş veya dokunmamış ve 2 boyutlu (2D) lamina veya 3D mimariye sahip olabilmektedirler. 2D kumaş türleri genel olarak bezayağı örgü, sepet örgü, dimi örgü, kazayağı örgü ve saten örgü olarak sıralanmaktadır. Balistik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan kumaş yapıları bezayağı örgü, sepet örgü ve tek yönlü olanlardır. **Thomas (2006)** farklı tipte dokunmamış kumaş lar tanımlamıştır. Bunlar reçine takviyeli, dikişli, çapraz bindirmeli ve iğne delikli paralel filamentlerdir (Thomas 2006).

**Matris malzemeler:** Hannibal ve Weir (20) matris reçinelerinin termoset ya da termoplastik olduğunu belirtmektedir. Song (54) balistik koruyucu vücut zırhları için

nitelikli ilk matris malzeme sisteminin fenolik reçine olduğunu bildirmektedir. Yazarlar ayrıca vinil ester ve termoplastik poliüretan kullanımını da rapor etmektedir. Bunların yanı sıra epoksiler, polietilen vb. gibi diğer reçine sistemlerinin karışımları da yaygın olarak kullanılmaktadır.

**Prepregler:** Bhatnagar ve ark. (2006) balistik kompozitler için prepreglerin kullanımı üzerine bir tartışma sunmuştur. Balistik prepreglerin artan kullanımını vurgulamışlardır. Yazarlar balistik prepreglerin yapısal prepreglerden farklı olduğunu çünkü reçine açılığı çektiklerini, reçine içeriğinin %40-50 olan yapısal prepreglerin aksine sadece %10-20 olduğunu belirtmişlerdir. Bu prepregler yapışkan değildir ve 'A' aşamasındadır. Yapısal prepregler 'B' aşamasındadır. Balistik prepregler için hem termoset hem de termoplastik reçineler kullanılmaktadır (Bhatnagar ve ark. 2006).

**Balistik darbeye maruz kalan kompozitlerin tepkisi:** Pandya ve ark. (2015) düz uçlu sert silindirik bir merminin 2D dokuma kompozit hedefe nüfuz etmesi ve delinmesinin farklı aşamalarının ayrıntılı bir tanımını vermiştir. Mermi kompozit bir hedefe çarptığında, düzlemsel görünüm iki bölgeye ayrılmaktadır. Merminin hemen altındaki bölge Bölge 1 olarak adlandırılmaktadır (Akella ve Naik, 2015). Enine gerilme dalgasının düzlem içi yönler boyunca ilerlediği çevre bölge ise Bölge 2 olarak adlandırılmaktadır. Balistik darbe olayı sırasında mermi ile temas halinde olan iplikler birincil ipliklerdir. Birincil iplikler çözgü ve dolgu yönlerindedir. Enine gerilme dalgasının düzlem içi yönler boyunca ilerlediği çevre bölgede kalan iplikler ikincil iplikler olarak adlandırılmaktadır. Bölge 1'de sadece birincil ipliklerin mevcut olduğu, Bölge 2'de ise hem birincil hem de ikincil ipliklerin mevcut olduğu belirtilebilir (Pandya ve ark. 2015)

Bununla birlikte darbe olayı üç alt aşamaya ayrılmaktadır. Aşama 1 sırasında, basınç ve kayma gerilimi dalgaları kalınlık yönü boyunca iletmektedir. Kompozit hedefin katmanları, merminin hemen altında ve ayrıca çevre bölgede sıkışmaya uğramaktadır. Bölge 2'deki katmanların sıkışması, düzlem içi yönlerde yayılan enine kesme dalgasından kaynaklanmaktadır. Katmanların sıkışması aynı zamanda düzlem içi doğrultuda gerilme üretmektedir, indüklenen gerilmeler karşılık gelen kırılma gerilmelerini aştığında katmanlar sıkıştırma, gerilme veya kesme tıkanması altında başarısız olabilmektedir (Akella ve Naik, 2015).

2. Aşama, kesme dalgası hedefin arka yüzüne ulaştığında başlamaktadır. Aşama 1'de başarısız olan katman sayısına ve mermi ile mevcut olan kinetik enerjiye bağlı olarak, hedefin arka yüzünde konik deformasyon meydana gelebilmektedir. Laminatın kalınlığı ve merminin çarpma hızı, başarısız olan katman sayısını ve Aşama 1'in sonunda mermiyle birlikte mevcut olan kinetik enerjiyi etkilemektedir. Aşama 1'de başarısız olmayan katmanlar konik deformasyonun bir sonucu olarak gerilime maruz kalmakta ve indüklenen gerilme gerilmesi başarısızlık gerilmesini aştığında başarısız olabilmektedir (Akella ve Naik, 2015).

Aşama 2, malzeme ya kesme tıkanması ya da gerilme ile tamamen başarısız olduğunda sona ermektedir. Hedefin tamamen başarısız olmasından sonra bile, hedef ile hareketli mermi arasında sürtünme olabilmektedir. Bu aşama 3. Aşama olarak adlandırılmaktadır. Sürtünme nedeniyle bir miktar enerji absorbe edilmektedir. Aşama 3, mermi ucu hedefin arka yüzüne ulaştığında sona ermektedir. Bu aşamada, eğer mermi bir miktar artık kinetik enerjiye sahipse, hedeften belirli bir artık hız ile çıkacaktır (Akella ve Naik, 2015).

**Pandya ve ark. (2015)** balistik çarpma olayı sırasında, mermi tarafından kaybedilen enerjinin, merminin hemen altındaki hedefin sıkıştırılması, çarpılan bölgeyi çevreleyen bölgede sıkıştırma, kesme tıkanması, birincil ipliklerden oluşan bölgedeki ipliklerin/katmanların gerilmesi ve gerilme hatası, ikincil ipliklerden oluşan bölgedeki ipliklerin/katmanların gerilme deformasyonu, hedefin arka yüzünde konik deformasyon, delaminasyon, matris çatlaması ve mermi ile hedef arasındaki sürtünme gibi çeşitli hasar ve enerji emici mekanizmalar yoluyla hedef tarafından emildiğini tespit etmiştir. Yazarlar, hedef kalınlığının balistik limit üzerindeki etkisini incelemiş ve hedef kalınlığı arttıkça balistik limitin de arttığını tespit etmişlerdir.

Biri 6 mm diğeri 20 mm kalınlığında olan iki tip hedefte enerji soğurma mekanizmaları incelenmiştir. Hedef kalınlığı 6 mm için başlıca enerji soğurma mekanizmaları, birincil ipliklerden oluşan bölgede kesme tıkanması, gerilme ve çekme hatası, ikincil ipliklerden oluşan bölgede ipliklerin/katmanların çekme deformasyonu ve hareketli koni tarafından taşınan enerjidir. Diğer mekanizmalar tarafından emilen enerji önemli değildir. Hedef kalınlığı 20 mm için başlıca enerji emici mekanizmalar kesme tıkanması, birincil ipliklerden oluşan bölgedeki gerilme ve çekme hatası, ikincil ipliklerden oluşan bölgedeki ipliklerin / katmanların gerilme deformasyonu ve mermi ile hedef arasındaki sürtünmedir (Akella ve Naik, 2015).

Diğer mekanizmalar tarafından absorbe edilen enerji önemli değildir. Bu durumda, hareketli koni tarafından taşınan enerjinin ihmal edilebilir olduğu belirtilebilir. Balistik darbe olayı sırasındaki gerinim oranı Pandya ve ark. (2015) tarafından da rapor edilmiştir. Yazarlar sıkıştırma sırasında gerinim oranının başlangıçta yüksek olduğunu gözlemlemiştir. 0.48 milisaniyelik olay sırasında saniyede 4211 gerinim oranı rapor edilmiştir. Yazarlar tarafından 3141/s'lik bir tepe gerilme gerinim oranı da rapor edilmiştir.

Kompozitlerin balistik darbe davranışı üzerine deneysel çalışmalar çeşitli gruplar tarafından gerçekleştirilmiştir. Hazell ve Appleby-Thomas (2009) ve Kasano (1999) kompozitlerin balistik darbe davranışı hakkında incelemeler sunmuştur. Pandya ve ark. (2015) mermi kütlelerinin cam-epoksi kompozitlerin balistik limiti üzerindeki etkisini incelemiştir. Mermi kütlesi arttıkça balistik limitin azaldığını bulmuşlardır. Gellert ve ark. (2000) çeşitli kalınlıklarda cam elyaf takviyeli (GRP) plastik kompozit plakalara karşı iki çap ve üç burun şekline sahip sert çelik silindirler kullanarak testler gerçekleştirmiştir. İki doğrusal enerji emilimi modeli gözlemlenmiştir.

Shahkarami ve ark. (2006) yüksek mukavemet, kopma gerilmesi ve düşük yoğunluk gibi yüksek spesifik enerji emme özelliklerine sahip malzemelerin ideal olarak kabul edildiğini gözlemlemiştir. Ayrıca ipliklerin enine özelliklerinin mermi ve hedef arasındaki etkileşimi etkilediğini gözlemlemişlerdir. Yazarlar ayrıca, optimum şekilde bükülmüş bir iplik yapısının mukavemeti en üst düzeye çıkaracağını da ortaya koymuşlardır. Gerinim oranı ve sıcaklığa karşı hassasiyet vurgulanmıştır.

Çalışmalar, ipliklerin sürtünme özelliklerinin çarpma bölgesindeki davranışa odaklandı ve küresel enerji emilim mekanizmaları da vurgulanmıştır. Buna ek olarak, yazarlar elyaf konfigürasyonunun etkisini vurgulamışlardır. 3 boyutlu dokumaların 2 boyutlu dokumalara göre daha yüksek interlaminar kırılma tokluğuna ve yüksek hasar toleransına sahip olduğu bildirilmiş ve dokuma işleminin iplikleri bozduğu belirtilmiştir. Ayrıca, gevrek reçine sistemlerinin anlık delaminasyon yaşadığı, sert sistemlerin ise istikrarlı ve kontrollü delaminasyon büyümesi yaşadığı gözlemlerini sunmuşlardır.

**Performans karşılaştırması:** Pandya ve ark. (2015) aynı kalınlıktaki cam-epoksi ve karbon-epoksi laminatların balistik darbe performansını karşılaştırmıştır. Karbon-epoksi laminatların balistik limit hızının (V50) cam-epoksiden %17 daha düşük



olduğunu gözlemlemişlerdir. Yazarlar, cam-epoksida karbonepoksiye göre daha fazla hasar olduğunu bildirmişlerdir. Sonuç olarak, cam-epoksi laminatlar karbon-epoksiden daha yüksek enerji emmekte ve bu nedenle daha yüksek bir balistik limit hızı göstermektedir.

**Hibrit kompozitler:** Ellis ve ark. (1998) Spectra™ hibrit grafit kompozitlerin balistik darbe direncini incelemiştir. Grafit kompozitin arka yüzüne Spectra™ eklendiğinde enerji emiliminde önemli bir artış gözlemlemişlerdir. Muhi ve ark. (2009) E-cam elyaf takviyeli plastikler ile E-cam ve Kevlar™-29 kumaşlardan oluşan hibrit kompozitleri karşılaştırmıştır. E-cam katmanlarına Kevlar™-29 katmanlarının eklenmesiyle penetrasyon direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Hazell ve Appleby-Thomas (2009) karbon katmanlara Kevlar™-29 katmanlarının eklenmesiyle CFRP tabanlı yapıların balistik performansında önemli bir iyileşme olduğunu tespit etmiştir. Pandya ve ark. (2015) Eglass-epoksi lamine ve karbon-epoksi laminatların hibritlerini incelemiştir. Balistik limit Eglass-epoksi laminatlar için en yüksek ve karbon-epoksi laminatlar için en düşüktür; hibrit kompozitler için bu ikisinin arasındadır. Yazarlar, dış kısımda Eglass tabakaları ve iç kısımda karbon tabakaları olan hedeflerin, dış kısımda karbon tabakaları ve iç kısımda Eglass tabakaları yerleştirmekten daha yüksek balistik limit hızı gösterdiğini bildirmiştir.

**3D kompozitler:** Flanagan ve ark. (1999) yüksek hızlı darbe altında 3D tekstil kompozitlerin penetrasyon direncini ve arıza modlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında hem 3D dokuma hem de örgülü kompozitler kullanmışlardır. Kullanılan malzemeler Spectra, Kevlar ve Twaron'dur. 3D tekstil kompozitlerinin daha yüksek penetrasyon direncine sahip olduğunu ve kalınlık boyunca takviye nedeniyle sadece sınırlı bir delaminasyon büyümesi olduğunu gözlemlenmiştir. Udatha ve ark. (2012) 3D dokuma kompozitleri 2D düz örgü Eglass-epoksi kompozitleri ile karşılaştırmıştır. Yazarlar, 3D ortogonal dokuma kompozit için tam penetrasyon için limit hızın 2D düz örgü kompozitten daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Kompozit malzeme seçimi için tasarım hususları ise şöyledir:

1. Yaygın olarak kullanılan fiber malzemelerden bazıları cam, karbon, aramid ve HMPE'dir.
2. Kullanılan matris malzemeleri termoplastik veya termoset olabilir.

3. Katmanlar prepreg formunda veya kuru kumaş formunda olabilir. Kuru kumaşlar dokuma veya nonwoven olabilir
4. Olay sırasındaki gerilme oranı yaklaşık 3000 ila 4000 olabilir.
5. İnce kompozitlerde, hareketli koni enerjiyi emerken, kalın kompozitlerde; ihmal edilebilir enerji hareketli koni tarafından emilir. Diğer enerji emici mekanizmalar kesme tıkanması, gerilme, gerilme arızası ve mermi ile hedef arasındaki sürtünmedir.
6. Mermi kütlesi arttıkça balistik limit azalır.
7. Yüksek mukavemet, kopma gerilmesi ve düşük yoğunluk gibi yüksek spesifik enerji emme özelliklerine sahip malzemeler ideal olarak kabul edilir.
8. 3 boyutlu örgülerin 2 boyutlu örgülere göre daha yüksek interlaminar kırılma tokluğuna ve yüksek hasar toleransına sahip olduğu bildirilmiştir.
9. Gevrek reçine sistemleri anlık delaminasyon yaşarken, sert sistemler istikrarlı ve kontrollü delaminasyon büyümesi yaşar.
10. Karbon-epoksi laminatların balistik limit hızı (V50) cam-epoksiden %17 daha düşüktür. Cam-epoksidede karbon-epoksiye göre daha büyük ölçüde hasar gözlenmiştir. Sonuç olarak, cam-epoksi laminatlar karbon-epoksiden daha yüksek enerji emer ve bu nedenle daha yüksek bir balistik limit hızı gösterir.
11. Penetrasyon direnci hibritler kullanılarak artırılabilir.
12. 3D tekstil kompozitler, kalınlık boyunca takviye nedeniyle daha yüksek penetrasyon direncine ve sınırlı delaminasyon büyümesine sahiptir.
13. 3D ortogonal dokuma kompozit için tam penetrasyon için limit hız, 2D düz dokuma kompozitten daha yüksektir (Udatha ve ark. 2012)

### **3.3. Kompozit Yapıların Balistik Performansı**

Elyaf takviyeli kompozit yapıların balistik performansı birden fazla faktörden etkilenmektedir. Bunlar aşağıda incelenmiştir.

#### **3.3.1. Fiber/reçine tipi**

Balistik uygulamalarda düşük yoğunluklu ve yüksek enerji absorbe etme kapasitesine sahip fiberler tercih edilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi delaminasyon kompozit

yapılarda en önemli enerji soğurma mekanizmasıdır. Delaminasyon, elyaf ve reçine tipinden doğrudan etkilenmektedir. Balistik uygulamalar için en çok kullanılan elyaf türleri S-Glass, aramid ve polietilen elyaflardır. S-Glass cam elyaf türlerinden biridir ve "S" harfi mukavemet anlamına gelmektedir. S-Glass'ın diğer cam elyaf türlerine göre avantajı daha yüksek mukavemet ve elastik modül özellikleridir (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

Diğer balistik elyaflar aramid ve polietilen ile karşılaştırıldığında yoğunluğu daha yüksektir ve daha kırılgan bir yapıya sahiptir. Sıkıştırma ve çekme yükleri, elyaf kırılması ve kesme tapası, darbe sırasında S- Glass elyaf takviyeli kompozitler için ana deformasyon mekanizmalarıdır. S- Glass elyaflar genellikle termoset reçine malzemeler ile kullanılmaktadır. Termoset reçineler ile kullanılan diğer elyaf türü ise aramid elyaftır. Aramid elyaflar S-Glass elyaflara kıyasla çok daha hafiftir. Elastikiyetleri nedeniyle aramid elyafların ana deformasyon mekanizması matris çatlaması, bükülme ve delaminasyondur. Aramidler ayrıca iplikler arasında yüksek sürtünme özellikleri ile de bilinirler. Düşük yoğunlukları nedeniyle aramidler, vücut zırhı ve kask gibi kişisel koruma amaçlı olarak tercih edilmektedir (Liu ve ark. 2018).

S-Glass ve aramid elyaflara ek olarak polietilen de balistik için kullanılmaktadır. Bunlar arasında en düşük yoğunluğa sahip olan polietilen lifler, genellikle poliüretan ve kauçuk gibi termoplastik reçinelerle birlikte kullanılmaktadır. Yüksek elastikiyete sahip polietilen lifler, S-Glass ve aramid liflere göre çok daha iyi balistik performansa sahiptir, ancak polietilen en pahalı olanıdır. Balistik uygulamalarda ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lifler tercih edilmektedir. Yüksek balistik performansa sahip düşük yoğunluğu nedeniyle polietilen, aramidlerle birlikte kişisel koruma için de kullanılmaktadır (Liu ve ark. 2018).

UHMWPE elyafların kişisel koruma için tek dezavantajı arka yüzünde büyük bir çıkıntıya sahip olmasıdır. Bu çıkıntı arka yüz travmasına neden olabilmekte ve bunu önlemek için karbon lifleri ile hibridizasyon kullanılmaktadır. Karbon fiberler yapıya daha fazla sertlik sağlamaktadır ve bu şekilde şişkinlik azaltılabilir ve arka yüz travması önlenebilmektedir. Reçine tipi de kompozit yapıların balistik performansı için önemlidir (Sapozhnikov, Kudryavtsev ve Zhikharev, 2015). Termoplastik reçineler termoset reçinelere göre daha serttir. Termoplastiklerle üretilen kompozitlerde daha fazla delaminasyon gözlenebilmektedir. Termoset reçineler arasında epoksi ve fenolik en çok kullanılan türlerdir (Liu ve ark. 2018). Epoksi

fenoliğe göre daha yüksek mukavemet ve elastikiyet modülüne sahiptir, ancak fenolik epoksiye göre daha serttir. Darbe olaylarında tokluk mukavemetten daha önemlidir ve bu nedenle fenolik reçineli kompozit yapılar daha iyi balistik performans gösterir. Fenolik reçinenin kompozit yapılarda bir dezavantajı emici mekanizmaya sahip olmasıdır (Sapozhnikov, Kudryavtsev ve Zhikharev, 2015).

Delaminasyon, elyaf ve reçine tipinden doğrudan etkilenmektedir. Balistik uygulamalar için en çok kullanılan elyaf türleri S-Glass, aramid ve polietilen elyaflardır. S-Glass cam elyaf türlerinden biridir ve "S" harfi mukavemet anlamına gelmektedir. S-Glass'ın diğer cam elyaf türlerine göre avantajı daha yüksek mukavemet ve elastik modül özellikleridir. Diğer balistik elyaflar aramid ve polietilen ile karşılaştırıldığında yoğunluğu daha yüksektir ve daha kırılgan bir yapıya sahiptir. Sıkıştırma ve çekme yükleri, elyaf kırılması ve kesme tapası, darbe sırasında S-Cam elyaf takviyeli kompozitler için ana deformasyon mekanizmalarıdır (Liu ve ark. 2018).

S- Glass elyaflar genellikle termoset reçine malzemeler ile kullanılmaktadır. Termoset reçineler ile kullanılan diğer elyaf türü ise aramid elyaftır. Aramid elyaflar S-Glass elyaflara kıyasla çok daha hafiftir. Elastikiyetleri nedeniyle aramid elyafların ana deformasyon mekanizması matris çatlaması, bükülme ve delaminasyondur. Aramidler ayrıca iplikler arasında yüksek sürtünme özellikleri ile de bilinmektedirler. Düşük yoğunlukları nedeniyle aramidler, vücut zırhı ve kask gibi kişisel koruma amaçlı olarak tercih edilmektedir. S-Glass ve aramid elyaflara ek olarak polietilen de balistik için kullanılmaktadır. Bunlar arasında en düşük yoğunluğa sahip olan polietilen lifler, genellikle poliüretan ve kauçuk gibi termoplastik reçinelerle birlikte kullanılmaktadır (Liu ve ark. 2018).

Yüksek elastikiyete sahip polietilen lifler, S-Glass ve aramid liflere göre çok daha iyi balistik performansa sahiptir, ancak polietilen en pahalı olanıdır. Balistik uygulamalarda ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lifler tercih edilmektedir (Liu ve ark. 2018). Yüksek balistik performansa sahip düşük yoğunluğu nedeniyle polietilen, aramidlerle birlikte kişisel koruma için de kullanılmaktadır. UHMWPE elyafların kişisel koruma için tek dezavantajı arka yüzünde büyük bir çıkıntıya sahip olmasıdır. Bu çıkıntı arka yüz travmasına neden olabilir ve bunu önlemek için karbon lifleri ile hibridizasyon kullanılır (Liu ve ark. 2018).

Yapıya daha fazla sertlik sağlamak için Karbon fiberler tercih edilmektedir. Bu şekilde şişkinlik azaltılabilmekte ve arka yüz travması önlenmektedir. Reçine tipi de kompozit yapıların balistik performansı için önemlidir. Termoplastik reçineler termoset reçinelere göre daha serttir. Termoplastiklerle üretilen kompozitlerde daha fazla delaminasyon gözlemlenebilir. Termoset reçineler arasında epoksi ve fenolik en çok kullanılan türlerdir. Epoksi fenoliğe göre daha yüksek mukavemet ve elastikiyet modülüne sahiptir, ancak fenolik epoksiye göre daha serttir. Darbe olaylarında tokluk mukavemetten daha önemlidir ve bu nedenle fenolik reçineli kompozit yapılar daha iyi balistik performans gösterir. Fenolik reçinenin bir dezavantajı vardır (Liu ve ark. 2018).

### **3.3.2. Elyaf dokusu**

Elyaf ve reçine türüne ek olarak, bazı durumlarda doku da kompozitlerin balistik özelliklerini etkilemektedir. En temel doku tipleri tek yönlü (UD) ve dokumadır. Bazı çalışmalarda, tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerin dokuma kumaş takviyeli kompozitlerden daha iyi balistik performansa sahip olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni olarak, UD kompozit yapıların kinetik enerjiyi 36 ikincil ipliğe iletme kabiliyetinin daha fazla olduğudur. Dokuma kompozitlerde örgü noktaları enerji transferini engelleyebilmekte ve enerjinin bir kısmı bu noktalardan geri dönmektedir. Ancak elyaflar arasındaki sürtünmeden dolayı dokuma kompozitlerin daha iyi balistik performansa sahip olduğu çalışmalar da mevcuttur (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

### **3.3.3. Tehdit geometrisi ve darbe hızı**

Tehdidin geometrisi ve çarpma hızı, fiber takviyeli kompozit yapıların balistik darbe davranışını belirleyen diğer faktörlerdir. Kevlar kompozitler ile yapılan bir çalışmada, keskin uçlu tehditlerin kinetik enerjisinin düşük hızlarda daha kolay absorbe edildiği gözlemlenmiştir. Yüksek darbe hızlarında ise keskin uçlu tehditlerin penetrasyon performansı artmaktadır. Keskin uçlu tehditler düşük darbe hızlarında küresel tepkiye neden olmakta, bu nedenle kompozit yapı için kinetik enerjiyi absorbe etmek daha kolaydır. Bununla birlikte, künt uçlu tehditler ters bir duruma sahiptir ve düşük hızlarda bu tip tehditler daha etkilidir (Zhang ve Matinlinna, 2012).

### **3.3.4. Hedef kalınlık**

Kalınlık, çarpma olayı sırasında deformasyon mekanizmalarını etkilemektedir. İnce kompozit yapılar için kinetik enerjinin birincil ipliklerden ikincil ipliklere aktarılması için yeterli zaman yoktur, bu nedenle delaminasyon ana deformasyon mekanizması değildir. Bu durumda kesme tapası ve elyaf kopması ana deformasyon mekanizmalarıdır. Kompozit plaka kalınlaştıkça, ipliklerin matris çatlaması ve delaminasyon yoluyla kinetik enerjiyi ikincil ipliklere aktarmak için yeterli zamanı olmaktadır. Bu nedenle daha fazla kinetik enerji absorbe edilebilmekte ve daha fazla şişkinlik ve delaminasyon gözlemlenebilmektedir. Kesme tıkaçı ve elyaf kopması arka planda deformasyon mekanizmaları haline gelir (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

Yukarıda belirtildiği gibi, kompozit yapıların balistik performansını ve deformasyon mekanizmalarını etkileyen çeşitli faktörler vardır. İnce kompozit plakalar için deformasyon mekanizmaları tüm tipler için benzer olduğundan, kompozitlerin balistik performansında büyük bir fark olmayacaktır. Epoksi reçineli aramid kompozitler ile polipropilen matrisli aramid kompozitlerin balistik performansları benzerdir. Kalınlık arttıkça, ana deformasyon mekanizmaları değiştiğinden, fark daha net hale gelmektedir. Sonuç olarak, düşük yoğunlukları, yüksek enerji emme kabiliyetleri ve esneklikleri nedeniyle kompozit yapılar balistik uygulamalarda hafif zırh yapıları için uygun bir seçenek haline gelmektedir.

## **3.4. Zırh için Malzeme Kombinasyonları**

Literatürde seramik-metal ve seramik-kompozit olmak üzere iki farklı malzeme kombinasyonu öne çıkmaktadır. Bunlar aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

### **3.4.1. Seramik-metal**

Seramikler 1960'ların sonu ve 1970'lerin başında zırh uygulamaları için kullanılmıştır. W Lanz tarafından balistik darbeye maruz kalan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiklerinin davranışına ilişkin ilk deneyimlerin 1979 yılında belgelendiğini bilinmektedir. Zırh uygulamaları için yaygın olarak kullanılan seramiklerden bazıları Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, B<sub>4</sub>C, SiC, TiB<sub>2</sub> ve WC'dir. Zırh seramikleri yoğunluk temelinde sınıflandırılabilir. RHA'dan daha yüksek yoğunluğa sahip seramikler yüksek yoğunluklu seramiklerdir. Yoğunluğu RHA'dan

düşük olanlar ise düşük yoğunluklu seramiklerdir. Tipik yüksek yoğunluklu seramik WC iken, düşük yoğunluklu seramikler  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $B_4C$ ,  $SiC$  ve  $TiB_2$  içermektedir. Seramikleri sınıflandırmanın bir diğer yöntemi de üretim sürecine dayanmaktadır (Akella ve Naik, 2015).

Seramik zırhlar için yaygın olarak kullanılan bazı süreçler sinterlenmiş, preslenmiş-sinterlenmiş, reaksiyon-bağı ve jelkattır. Presleme tek eksenli ve izostatik yada oda sıcaklığında veya ısıtılmış koşullar altında olabilir. Seramiklerin özellikleri iki veya daha fazla seramiğin karıştırılmasıyla (heterojen seramikler) veya seramik-kompozitlerin yapılmasıyla geliştirilebilir. Galanov ve ark. (2002)  $B_4CTiB_2$ ,  $B_4C-ZrB_2$ ,  $B_4C-W_2B_5$  ve  $B_4C-TiB_2-W_2B_5$  sistemleri gibi çeşitli seramik kompozitler üzerinde çalışmıştır. Farklı fazların yüzdeleri değiştirilerek, mekanik özelliklerde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca bu kompozitlerin eğilme mukavemetinin 450 MPa  $B_4C$ 'den 700 MPa'ya yükseldiğini bildirmişlerdir.

$Al_2O_3-TiB_2$  kompozitleri Adams ve ark. (2001) tarafından çalışılmıştır. DOP çalışmaları kompozitlerle sağlanan iyileşmenin ticari zırh seramikleri tarafından gösterilen deneysel dağılım dahilinde olduğunu göstermiştir. Medvedoski (2006)  $SiC-Al_2O_3-Si_3N_4$  bileşimlerini incelemiş ve bunların üstün balistik performansa sahip olduğunu tespit etmiştir.  $TiC$ -çelik kompozitleri Zaretsky ve ark. (2003) tarafından yapılmıştır. Strassburger ve Lexow (2000) DOP testlerini kullanarak tane boyutunun balistik direnç üzerindeki etkisini incelemiştir. Yazarlar, mikron altı alüminanın DOP'ta piyasada bulunan alüminaya göre daha iyi performans gösterdiğini gözlemlenmiştir. Ancak, seramik-alüminyum hedeflere karşı 14.5 mm zırh delici (AP) çelik çekirdekli mermiler kullanıldığında balistik dirençte önemli bir fark gözlenmemiştir (Akella ve Naik, 2015).

Başlangıçta, monolitik veya metal levhalardan oluşan katmanlar zırh üretiminde sıklıkla kullanılmıştır. Araştırmacılar seramiklerin daha düşük yoğunluğa, yüksek sertliğe ve yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Ancak gerilimde zayıftırlar. Bu nedenle, monolitik metallere daha hafif bir zırh tasarımına ulaşmak için seramik bir yüz plakasına sahip bir metal plaka üzerinde çalışılmışlardır. Bu tür hedeflerde önemli ağırlık tasarrufları gözlemlenmiştir.

Wilkins (1978) metal ve seramik-metal hedefler üzerine çalışmalar sunmuştur.  $AD85^{TM}$  alümina, 6061-T6 alüminyum alaşımına bağlanmıştır. Alümina ve

alüminyum kalınlığının balistik limit üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çoklu doğrusal bir tepki gözlenmiştir. Seramik kalınlığındaki artış, balistik limitte alüminyum kalınlığındaki artıştan daha yüksek bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, mermi şeklinin etkisi de değerlendirilmiştir. Künt mermiler keskin mermilere göre daha fazla hasar ve penetrasyona neden olmuştur. Mayseless (1987) seramik-metal hedefler için deneysel sonuçlar sunmuştur. Alansal yoğunluk temelinde, seramik plakalarla öncelenmiş metal plakaların düşük hız aralığında balistik olarak verimsiz olduğunu, 250 m/s'den daha yüksek hızlarda ise bunun tersi olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, mermiyi aşındırmak için gereken enerjinin, seramik plakanın kırılma sürecinde tüketilenden birkaç büyüklük mertebesi daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

### **3.4.2. Kompozit-seramik zırhlar**

Modern teknolojiler, araçları ve askerleri korumak için daha etkili zırhlar ortaya çıkarmıştır. Bir zırhın etkinliğini ölçmek için yararlı bir kavram, belirli bir tehdidi yenmek için belirli bir zırh çözümünün birim alanı başına kütle olarak tanımlanan alansal yoğunluktur. Kompozit zırh genellikle organik matrislere gömülü daha yumuşak ama güçlü (kompozit) liflerle desteklenen sert (seramik) malzemelerden oluşan bir mozaikten oluşan modüller veya karolar halinde sağlanmaktadır. Gelişmiş Kompozit Zırh (ACA) ve vücut zırhı, yapısal benzerliklere ve farklılıklara sahiptir. Godinez-Azcuaga ve ark. ve Bruchey ve ark. açıklandığı gibi, mermi yenilgisi için iki temel sorun vardır:

- 1) Mermi altında basınçlı yükleme;
- 2) Balistik yük altında seramik karoların sapması ve arka yüzey gerilimi.

İlk sorun sadece sıkıştırmada güçlü olan yeni seramik malzemelerle ele alınabilse de, ikinci sorun tasarım iyileştirmesi yoluyla, örneğin seramik karoları desteklemek için sert ve yüksek eğilme mukavemetli kompozit yapılar kullanılarak ele alınabilmektedir. Gelişmiş kompozit zırhlar (ACA'lar) tipik olarak seramik, fiber takviyeli polimerler, metalik ekranlar ve muhtemelen kauçuk malzemelerden oluşan çok katmanlıdır (Fink, 2002). Bu katmanlar, mermilerin etkisiz hale getirilmesinde ve zırhın yapısal bütünlüğünün korunmasının yanı sıra zırhın araç yapılarının geri kalanıyla etkileşiminin ele alınmasında belirli amaçlara hizmet etmektedirler.



ACA'nın dış katmanı, yapısal bütünlüğü korumak için genellikle fiber takviyeli bir polimerdir. Ayrıca alttaki seramiği normal aşınma ve yıpranmaya karşı korumaktadır. Bir sonraki katmandaki seramik malzeme, merminin ucunu yok etmek, darbe yükünü kompozitin geniş bir alanına dağıtmak ve mermiyi yavaşlatmak gibi işlevlere sahiptir. İç kompozit katmanlar seramiği desteklemekte ve seramik döküntüleri bir arada tutmak ve mermiye daha fazla direnç göstermek gibi diğer işlevleri yerine getirmektedir. Her bir katmanın performansı zırhın genel performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Fink, 2002; Kaufmann ve ark. 2003).

Naik ve ark. (2013) ana enerji emiliminin seramik tarafından sağlandığını tespit etmiştir. İdeal bir durumda, hasarın kompozit destek plakasına yayılmaması gerekmektedir. Bunun nedeni, kompozit plakanın yapısal gereklilikleri sağlayabilmesi ve seramikte hasar meydana geldikten sonra bile darbe sonrası dönemde yük taşıyan bir eleman olarak hareket edebilmesidir. Kompozit plaka da enerjiyi absorbe edebilir ve bu gibi durumlarda hasar görebilir. Seramik ve kompozit arasındaki kauçuk tabaka penetrasyon sürecini geciktirmekte ayrıca seramik ve kompozit içindeki hasarların birleşmesini önlemektedir. Ön kompozit örtü tabakası seramiğin mikro hasarlardan korunmasını sağlamaktadır.

Seramik tabakadaki başlıca hasar ve enerji emici mekanizmalar şunlardır: Bölge 1 olarak adlandırılan merminin hemen altındaki hedefin sıkıştırılması; Bölge 2 olarak adlandırılan çevre bölgede sıkıştırma; çekme arızasına yol açan halka çatlaklarının ve radyal çatlakların oluşumu; kesme tıkanması; toz haline getirme ve ısı üretimi. Kompozit destek plakasındaki ana hasar ve enerji emici mekanizmalar şunlardır: Bölge 1 olarak adlandırılan merminin hemen altındaki hedefin sıkıştırılması; Bölge 2 olarak adlandırılan çevre bölgede sıkıştırma, ipliklerde gerilim; kesme tıkanması; delaminasyon ve matris çatlaması; arka yüzde çıkıntı oluşumu; hedef ile mermi arasındaki sürtünme ve ısı üretimi (Akella ve Naik, 2015).

Daha yüksek çarpma hızlarında, merminin ucunda erozyon meydana gelmektedir. Merminin hızı azaldıkça, merminin deformasyonu gerçekleşmektedir. Merminin aşınması ve deformasyonu, balistik darbe olayı sırasında bir miktar enerji emmektedir. Bu da merminin hızında ve kinetik enerjisinde azalmaya yol açmaktadır. Balistik darbe olayı sırasında seramik-kompozit zırhlardaki farklı hasar ve enerji emme mekanizmalarını göstermektedir. Mermi hedefe çarptığında, hedef merminin hedefe nüfuz etmesi için direnç göstermektedir. Merminin hemen altındaki malzeme Bölge 1

olarak adlandırılırken, penetrasyon için direnç sunan çevredeki malzeme Bölge 2 olarak adlandırılmaktadır. Mermi hedefe çarptığında, boylamsal ve kayma gerilme dalgaları oluşmakta ve tüm yönler boyunca ilemektedir. Hedefin sadece bu dalgaların ulaştığı kısmı penetrasyon için direnç gösterecektir. Hedefin geri kalan kısmı uygulanan darbe yükünü algılamaz. Zaman ilerledikçe, gerilme dalgası daha da yayılır ve hedefin daha büyük bir kısmı direnç gösterir (Akella ve Naik, 2015).

Mermi hedefe çarptığında, merminin hemen altındaki malzeme sıkıştırma altında olmaktadır. Çevresindeki bölgedeki malzeme de kalınlık yönü boyunca sıkıştırma altındadır. Eğer indüklenen basınç gerilmesi izin verilen sınırı aşarsa, seramikte basınç hatası meydana gelecektir. İndüklenen basınç gerilmesi, seramikteki deformasyona ve boylamsal gerilme dalgasının kalınlık boyunca kat ettiği mesafeye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ek olarak, üretilen darbe kuvveti nedeniyle, merminin çevresi etrafındaki hedef içinde kayma gerilmeleri de üretilmektedir (Naik ve ark. 2013).

Kesme kırılması için direnç sadece hedefin kesme dalgasının ulaştığı kısmı tarafından sağlanmaktadır. Balistik çarpma olayı sırasında seramiğin sıkışması hedefin hemen altında gerçekleştiğinden, radyal yön boyunca seramik gerilim altında olmaktadır. Bu durum halka çatlaklarının ve radyal çatlakların oluşmasına yol açabilmektedir. Mermi seramiğe çarptıkça, seramikte mikro çatlaklar oluşmaktadır. Balistik darbe olayı ilerledikçe, mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşebilmektedir. Bu aşamada ilave mikro çatlaklar oluşmaktadır. Başka bir deyişle, seramik granüllere ve daha sonra da toza dönüşmektedir. Seramik tozunun basınç dayanımı seramik plakaninkinden önemli ölçüde daha yüksektir. Bu da penetrasyon ilerledikçe seramik/seramik tozu tarafından sunulan basınç direncinin artacağını göstermektedir (Akella ve Naik, 2015).

Seramik plakadan ince toz parçacıklarının oluşması sürecine toz haline getirme denilmektedir. Sıkıştırma, kesme tıkanması, gerilim ve toz haline getirme gibi farklı hasar mekanizmaları enerji emilimine yol açmaktadır. Enerji hedef tarafından emildikçe, merminin kinetik enerjisi de buna bağlı olarak azalmaktadır. Bu da merminin hızında azalmaya yol açmaktadır. Mermi hedefe çarptığında, merminin hedefe nüfuz etmesi için hedef tarafından direnç gösterilmektedir. Hedef tarafından sunulan direnç daha fazlaysa, merminin aşınması gerçekleşebilir. Bu süreç aynı zamanda merminin kinetik enerjisinin bir kısmını emerek merminin hızının azalmasına neden olmaktadır. Hız azaldıkça, erozyon durmakta ve merminin

deformasyonu gerçekleşmektedir. Balistik darbe olayı ilerledikçe, kalınlık boyunca, normal ve kayma gerilme dalgaları kauçuk tabakaya ve kompozit destek plakasına girmektedir. Bu sayede, kauçuk tabakanın yanı sıra kompozit destek plakası da penetrasyon ve delinmeye karşı direnç göstermektedir (Akella ve Naik, 2015).

Kauçuk tabakadaki enerji emici mekanizmalar sıkıştırma ve kayma tıkanmasıdır. Kalınlık boyunca boylamasına gerilme dalgası kompozitin içine girdiğinde, kompozitin Bölge 1'inin yanı sıra Bölge 2'sinde de sıkıştırma gerçekleşmektedir. Darbe kuvveti nedeniyle, merminin çevresi etrafındaki kompozitte kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Merminin altındaki iplikler gerilim altında olmaktadır. Eğer indüklenen basınç gerilmesi, kayma gerilmesi veya çekme gerilmesi izin verilen sınırı aşarsa, kompozitte başarısızlık meydana gelecektir. Delaminasyon, matris çatlaması ve kompozitin arka yüzünde ipliklerin olası gerilme başarısızlığına yol açan çıkıntı oluşumu diğer hasar ve enerji emici mekanizmalardır. Balistik çarpma olayının sonraki kısmında, merminin hızı çok düşüktür. Bu süre zarfında, sürtünme enerjisi hedef tarafından absorbe edilmektedir. Tüm bu hasar ve enerji emici mekanizmalar bir miktar enerji emerek merminin kinetik enerjisinin daha da azalmasına bu da merminin hızının daha da azalmasına yol açmaktadır (Akella ve Naik, 2015).

Basınç dalgaları kompozit destek plakasının arka yüzüne kalınlık boyunca ulaştığından, kompozitte şişkinlik meydana gelmektedir. Mermi ve tapa ilerlemeye başlar. Hetherington ve Rajagopalan (1991) farklı hedef kalınlıklarına sahip seramik-kompozit hedefler üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Aynı olay balistik darbe parametreleri için, hedef kalınlığının bir fonksiyonu olarak merminin artık hızlarını ölçmüşlerdir. Darbe hızı arttıkça sınırların etkisi azalmaktadır. Daha ince hedefler ve daha kalın hedefler için geçiş mekanizmalarını incelemişlerdir. Daha ince hedefler, uygun bir penetrasyon mekanizması olarak dishing göstermektedir. Daha kalın hedefler için, tıkaç oluşumu uygun bir penetrasyon mekanizmasıdır.

### **3.5. Hafif Zırh Sistemleri**

Düşük kalibreli tehditlere karşı koruma için metal, seramik ve fiber takviyeli kompozitler herhangi bir destek olmadan yeterli olabilmektedir. Zırhlı araçların gövde yapısı genellikle 7.62 mm veya 5.56 mm kalibreli tehditlere karşı koruma sağlayan çelik veya alüminyumdur. Kişisel koruma için (vücut zırhı, kask) seramik veya kompozit yapılar tercih edilmektedir. Ancak daha yüksek kalibreli tehditler için

genellikle bu malzemeler birlikte kullanılmaktadır. Seramik ve metal veya seramik ve kompozit zırh sistemleri hafif zırhlar için en bilinen örneklerdir.

Hafif zırh sistemlerinde her bileşenin kendine ait bir görevi vardır. Seramikler sertliklerinden dolayı ön katman olarak kullanılmaktadır. Bu sayede mermi zırha çarptığında önce seramik tabaka ile karşılaşır ve mermi çekirdeği seramik tarafından kırılarak kinetik enerjinin çevreye yayılması sağlanır. Daha sonra mermi seramik yapıdan geçtikten sonra kalan kinetik enerji, destek katmanı olarak kullanılan fiber takviyeli kompozitin metali tarafından emilmektedir. Kompozitler genellikle metallere daha düşük yoğunluğa sahip oldukları için destek katmanı olarak tercih edilmektedirler. Bu durum toplam zırh sisteminin alansal yoğunluğunu azaltacak ve zırhlı aracın hareket kabiliyetini artıracaktır. Ancak proje maliyet açısından hassas ise kompozitler yerine metaller kullanılabilir (Siengchin, 2023).

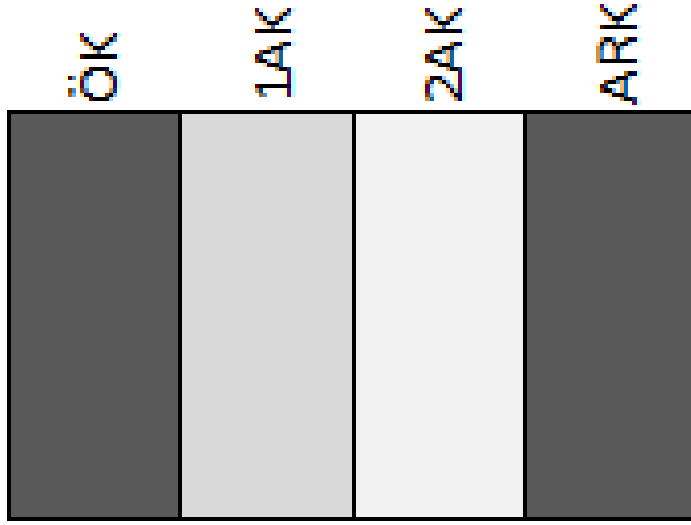
Fiber takviyeli kompozitler olarak en çok aramid, cam ve polietilen fiber takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Seramik katmanlar için alümina ( $Al_2O_3$ ) veya silisyum karbür ( $SiC$ ) en popüler türlerdir. Seramik malzemeler monolitik plaka ve karo olarak kullanılabilir. Monolitik plakalar kinetik enerjiyi absorbe etmek için daha iyidir, ancak bir mermi plakaya çarptığında mikro ve makro çatlaklar plakanın diğer taraflarına yayılmaktadır. Bu nedenle monolitik seramik plakalar çoklu vuruş uygulamaları için uygun değildir. Seramik karolar daha küçüktür ve farklı geometrilerde üretilmektedirler. Bu durumda, tüm zırh sisteminde birçok seramik karo olacaktır ve bunlardan birine bir mermi isabet ederse, kırık bitişik karolara aktarılacaktır. Ancak diğer seramik karolar hasar almaz, böylece tüm sistem çoklu vuruş uygulamaları için uygun hale gelir. Seramik karoların dezavantajı, monolitik seramiklere göre daha kötü enerji emme kabiliyetine sahip olmasıdır. Aynı tip mermi için daha kalın seramik karolar kullanılmalıdır. Bu da zırh sisteminin daha ağır olmasına neden olur. Kare ve altıgen geometriler seramik karolar için en çok tercih edilen geometrilerdir (Silveira ve ark. 2021).

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 4.1. Kavramsal Tasarım

Zırh görevi için önerilecek yapının tasarımı için monoblok bir malzeme yerine farklı malzemelerin uygun bir yapıştırıcı ile bir araya getirilmesi ile kompozit bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır. Buna göre, zırh tasarımında yer alan katmanların görevi ve bu katmanlarda kullanılacak malzemelere ait temel özellikler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Ön Katman (ÖK), mermi uç profilini bozarak körleştirecek bu sayede penetrasyonu engelleyecek. Malzemenin yeteri toklukla birlikte, mümkün olduğunca sert olması istenir.
- 1. Ara Katman (1AK): Düşük yoğunluklu nispeten sert malzeme ÖK ile 2. Ara Katman arasında geçişi sağlayacak malzeme.
- 2. Ara Katman (2AK): Düşük yoğunluklu ve yüksek darbe sönümleme özelliğine sahip malzeme. Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen malzeme kullanımı öngörülmüştür.
- Arka Katman (ARK): 2AK destekleyecek ve eğilmeye karşı destek amaçlı sert malzeme.



**Şekil 4.1.** Katmanların şematik görünümü.

## 4.2. Katmanlarda Kullanılan Malzemeler

### 4.2.1. ÖK-ön katman ve ARK- arka katman

Bu katman için Ck 75 çelik sac kullanılacaktır. SAE J403-2014 standardına göre 1070 kalite olarak adlandırılmakta ve sıcak hadde yöntemi ile üretilmektedir. Standarda göre kimyasal kompozisyon ve kullandığımız ürünün spektral analizi tablo 4.1’de sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Ck 75 sacın kimyasal kompozisyonu.

|                    | C             | Mn            | P     | S max  | Si            | Ni   | Cr   | Mo   | V    |
|--------------------|---------------|---------------|-------|--------|---------------|------|------|------|------|
|                    |               |               | max.  |        |               | max. | max. | max. | max. |
| SAE J403           | 0.65-<br>0.75 | 0.60-<br>0.90 | 0.03  | 0.035  | 0,15-<br>0,30 | -    | -    | -    | -    |
| Kullanılan<br>ürün | 0,691         | 0,588         | 0,009 | 0,0015 | 0,249         | 0,03 | 0,01 | 0,01 |      |

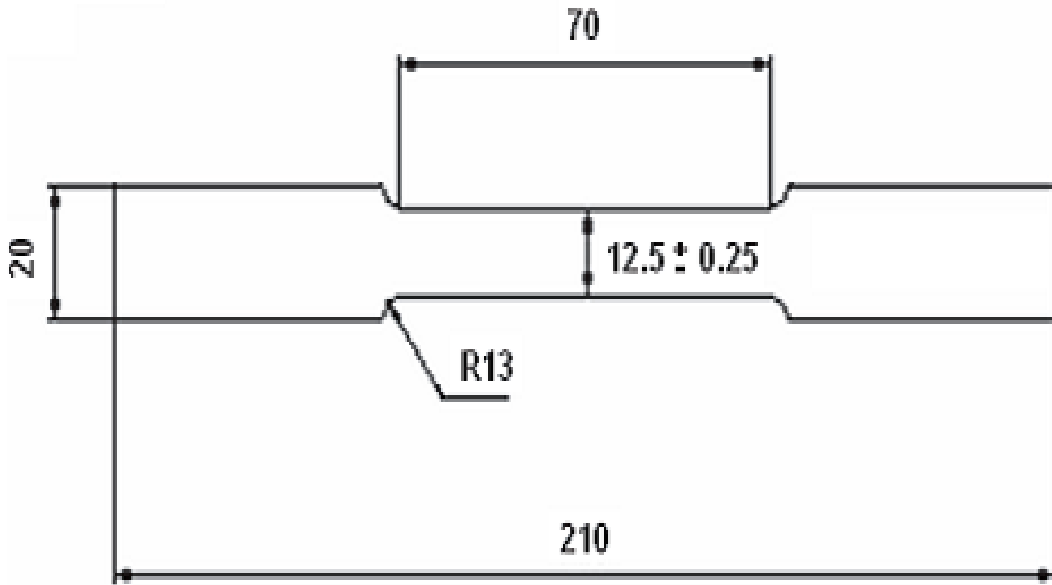
Bu malzeme piyasada hazır olarak sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş halde 0,15mm den 4 mm kalınlığa kadar tedarik edilebilmektedir. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı ve yüksek karbon oranına sahip olup yay çeliği ve bıçak malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Kullanılan malzemenin sertlik değeri DIGIROCK-RSR-M sertlik

ölçüm cihazı ile 5 noktadan ölçülmüş ve sertliği 41-43 HRC aralığında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Sac malzemenin sertlik ölçümü.

Ck 75 malzemenin çekme eğrisini elde etmek için ASTM-E8 standartlarına uygun hadde yönünde ve hadde yönüne dik yönde numuneler hazırlanmıştır. Çekme testi ölçüleri Şekil x.3’de verilmiştir. Numune ısı etkilerinin altında olmaması için su jeti ile kesilmiş ayrıca çentik etkisine maruz kalmaması için yan yüzeyler parlatılmıştır.



Şekil 4.3. ASTM E8 çekme testi numunesi ölçüleri.



**Şekil 4.4.** Ck 75 sacdan hazırlanan çekme numuneleri.

Çekme testleri, TIRA test 28100 marka çekme test cihazında mekanik deformasyon ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Hadde yönüne dik ve hadde yönünde hazırlanan numunelerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

**Tablo 4.2.** Ck75 sacın mekanik özellikleri.

|                  | Akma Mukavemeti<br>[MPa] | Çekme Mukavemeti<br>[MPa] | Kopma<br>Uzaması [%] |
|------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| Hadde Doğ.       | 1270,3                   | 1404,3                    | 10,3                 |
| Haddeye Dik Doğ. | 1219,0                   | 1366,3                    | 12,1                 |

#### 4.2.2. 1AK-1. ara katman

Bu katman için Al 7075 T6 sacın kullanılması ön görülmüştür. Bu malzeme başta havacılık olmak üzere düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet ve orta tokluk istenen yerlerde kullanılmaktadır. Cr içeriği sayesinde yüksek stres ve korozyon çatlağı direncine sahiptir. Bu malzeme ye ait mekanik ve kimyasal özellikler aşağıda verilmiştir. Standarda göre kimyasal kompozisyon ve kullandığımız ürünün spektral analizi Tablo 4.3’de sunulmuştur.



**Tablo 4.3.** Al 7075 T6 sacın kimyasal kompozisyonu.

|                     | Si Max | Fe<br>Max | Cu      | Mn max | Mg      | Zn      | Cr.           | Ti max. |
|---------------------|--------|-----------|---------|--------|---------|---------|---------------|---------|
| Al 7075             | 0.40   | 0.50      | 1.2-2.0 | 0.30-  | 2.1-2.9 | 5.1-6.1 | 0.18-<br>0.28 | 0.2     |
| Kullanıl<br>an ürün | 0.30   | 0.35      | 1.8     | 0.22   | 2.4     | 5.6     | 0.21          | 0.06    |

Al 7075 T6 malzemenin mekanik özelliklerini elde etmek için ASTM-E8 standartlarına uygun hadde yönünde ve hadde yönüne dik yönde numuneler hazırlanmıştır. Numune ölçüleri Şekil x.3’de verilmiştir. Numuneler ısı etkilerinin altında olmaması için su jeti ile kesilmiş ayrıca çentik etkisine maruz kalmaması için yan yüzeyler parlatılmıştır.

Çekme testleri, aynı cihazla aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Hadde yönüne dik ve hadde yönünde hazırlanan numunelerin akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama değerleri Tablo 4.4’de sunulmuştur.



**Şekil 4.5.** Al 7075 T6 sacdan hazırlanan çekme numuneleri.

**Tablo 4.4.** Al 7075 T6 sacın mekanik özellikleri.

|                     | Akma Mukavemeti<br>[MPa] | Çekme Mukavemeti<br>[MPa] | Kopma Uzaması<br>[%] |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| Hadde Doğ.          | 472                      | 548                       | 9,6                  |
| Haddeye Dik<br>Doğ. | 468                      | 543                       | 9,9                  |

**4.2.3. 2AK-2. ara katman**

Bu katmanın mermiyi durdurmada önemli bir rol üstlenmesi beklenmiyor. Bu katmanın görevi 1AK'na destekleyici olmaktır. Bu yüzden yüksek eğilme mukavemeti ve yüksek eğilme toparlanmasına sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda zırh ağırlığını önemli ölçüde arttırmayacak şekilde düşük yoğunluklu olması beklenmektedir. Bu istekler sonucunda HDPE malzeme bu katman için uygun görülmüştür. HDPE malzemeye ait teknik özellikler Tablo 4.5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.5.** HDPE malzemenin teknik özellikleri.

| ÖZELLİK                             | DEĞER |
|-------------------------------------|-------|
| Özgül Ağırlık [gr/cm <sup>3</sup> ] | 0,96  |
| Çekme Mukavemeti [MPa]              | 22    |
| Kopma Dayanımı [MPa]                | 33    |
| Kopma Uzaması [%]                   | >550  |
| Elastik Modülü [MPa]                | 942   |
| Sertlik [Skala D]                   | 60-70 |

**4.2.4. Yapıştırıcı**

Kompozit zırh sistemlerinde farklı özellikteki bileşenlerin birlikte ve tek malzeme gibi hareket etmesini sağlamak için yapıştırıcı seçimini doğru yapmak çok önemli bir husustur. Bu çalışmada EMS 58-15 epoksi yapıştırıcı tercih edilmiştir. Bu yapıştırıcıya ait teknik özellikler Tablo 4.6'da sunulmuştur.

**Tablo 4.6.** Epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri

| ÖZELLİK                             | DEĞER       |
|-------------------------------------|-------------|
| Özgül Ağırlık [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,1         |
| Yapışma Mukavemeti (Çelikte)[MPa]   | 16,2        |
| Viskozite [cps]                     | 10000-15000 |
| Karışım Oranı                       | 1:1         |
| Sertlik [Skala D]                   | 85          |
| Fonksiyonel Kuruma Süresi [Saat]    | 3-4         |

#### 4.3. Çelik Zırh Atış Testleri

**Atışlı testlerde kullanılacak mühimmat:** Atışlı testlerde 7.62 mmx51 M61 AP (Armor Piercing / Zırh Delici) fişek kullanılacaktır. Bu fişegin tombak kaplı çelik gömlek içinde kurşun gömlek ve sertleştirilmiş çelik çekirdek bulunmaktadır. Bu mermi 9.45 g ağırlığa sahip olup 24 m'deki hızı  $V_{24}$ : 838 m/sn dir. Merminin tombak gömleği içinde kurşun gömlek ve onunda içinde sertleştirilmiş çelik çekirdeği bulunmaktadır.

Atışlar NATO AEP-97 5,56 mm, 7,62 mm 9 mm ve 12,7 mm Mühimmatlar İçin Çok Maksatlı Muayene Ve Test Dokümanına uygun olarak yapılacaktır. Atışlar sabit test namlusu ile yapılacaktır. Hedef namludan 91 m (100 yarda) uzaklıkta sabit kaideye bağlı olacaktır. M61 AP mermiler 91 m uzaklıktaki 10 mm kalınlığındaki 1010 veya 1020 çeliğini tamamen delip geçebilmektedir. Bu sebeple tasarlanan zırhın bu mesafede M61 AP mermiyi durdurabilmesi hedeflenmektedir.

Atış testleri öncelikle Ck75 kalite ve kalınlıkları 1 ve 2 mm olan sac ile gerçekleştirilmiştir. İstenen kalınlığın elde edilebilmesi için saclar birbirine epoksi ile yapıştırılmıştır. Atışlara 15 mm kalınlıktan başlanacak ve tam delinme sağlanana kadar kalınlıkta 1mm azaltmaya gidilerek atışlar tekrarlanmıştır. 15mm Ck75 sac 2+1+2+1+2+1+2+1+2+1 olacak şekilde dizilmiş ve epoksi yapıştırıcı ile her katman yapıştırılmış ve şekil 1'de gösterilmiştir. Tam kuruma için 1 gün beklenmiştir. Hedeflerin kaideye bağlanmış şekli Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Atış sonuçlarını gösterir şekillerden üstteki şekil zırhın ön yüzünü (strike face), alttaki şekil arka yüzeyini belirtmektedir.



**Şekil 4.6.** Katmanlı numune örneği (15 mm Ck 75).

**15 mm ile atış:** Numuneye atış yapılmış ve mermi hedefte dağılmıştır. ÖK'da 0,5mm çökme olmuş fakat ARK'da bombe olmamıştır. Mermi hızı 836,7 m/sn'dir. Numunenin ön ve arka yüzüne ait Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7.** 15 mm numunenin ön ve arka yüzü.

**14 mm ile atış:** 15mm'lik numunede delinme olmadığı için kalınlığı 14 mm olan numune ile atış testi yapılmıştır. Bu test sonucunda arka yüzde 2.4 mm bombe oluşmuştur. Saclarda delinme olmamıştır. Mermi hızı 838,2 m/sn'dir. Numunenin ön ve bombe yapan kısım kırmızı daire içine alınmış halde arka yüzü şekil 4.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8.** 14 mm numunenin ön ve arka yüzü.

**13 mm ile atış:** 13 mm'lik numune ile yapılan atış sonucunda 3 mm kalınlığındaki sac delinmiştir. Arka yüzde oluşan bombe ise 4.5 mm'de kalmıştır. Mermi hızı 839,1m/sn'dir. Şekil 4.9'da ön yüz ve delinen saclar görülmektedir.



**Şekil 4.9.** 13 mm numune ön yüz ve delinmiş 2mm sac

**12mm ile atış:** Bu numune ile yapılan atış testinde 7 mm kalınlığında sac delinmiş ve arkada 6,2mm bombe olmuştur. Mermi hızı 837,6 m/sn'dir. Şekil 4.10'da ön ve arkayüz görülmektedir.



**Şekil 4.10.** 12 mm numunenin ön ve arka yüzü.

**11mm ile atış:** Bu numune ile yapılan atış testinde 11 mm kalınlığında yani tüm saclar delinmiş ve arkada 9,8mm bombe olmuştur. Mermi hedef içinde kalmıştır. Mermi çekirdeği ucunda penetrasyon sonucu oluşan bozulma net olarak görülmektedir. Mermi hızı 838.9 m/sn'dir. Şekil 4.11 ve Şekil 12'de ön ve arkayüz görülmektedir.



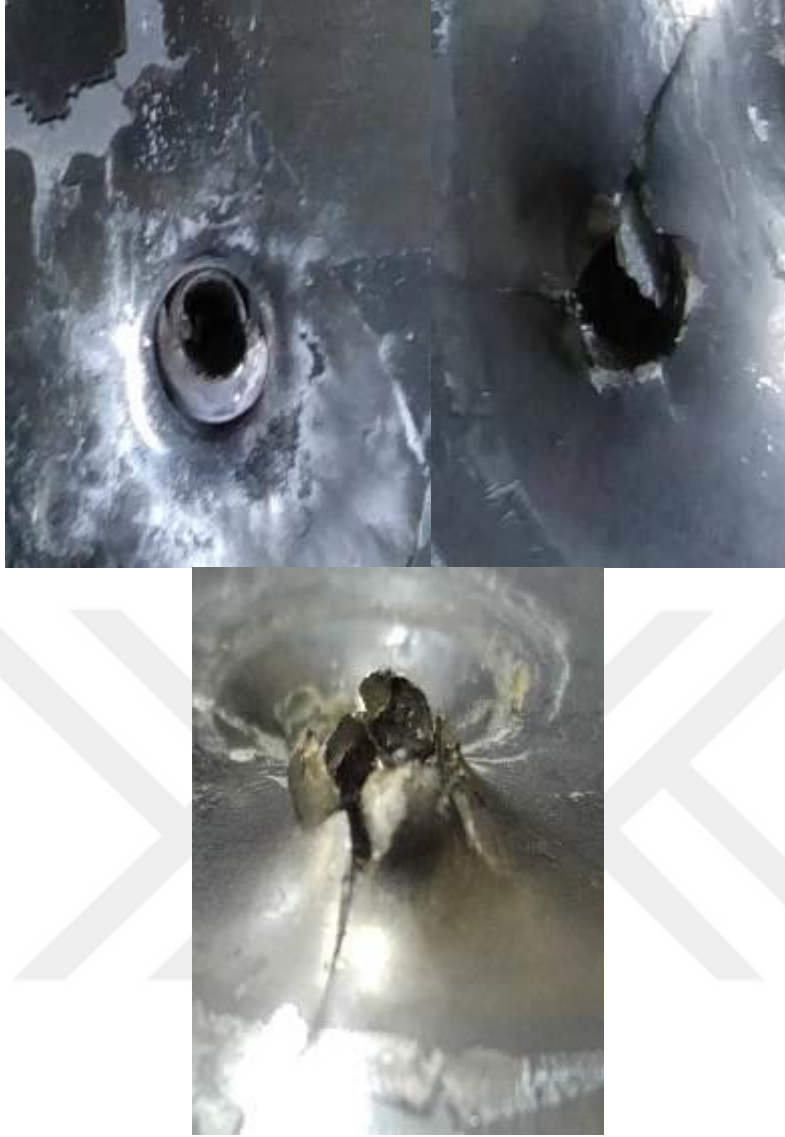


**Şekil 4.11.** 11 mm numune ön yüzü



**Şekil 4.12.** 11 mm numune arka yüzü.

**10 mm ile atış:** Bu numune ile yapılan atış testinde 10 mm kalınlığında yani tüm saclar delinmiş ve arkada 10,3mm bombe olmuştur. Numune başarısız olmuş mermi hedefi delip geçmiştir. Hedefi delip geçerken oluşan yırtılmalar görülmektedir. Mermi hızı 837.1 m/sn'dir. Şekil 4.13'de ön ve arkayüz görülmektedir.



**Şekil 4.13.** 10 mm numune ön ve arka yüzü.

Ck75 ile yapılan deneyler 10 mm'lik numunenin tam delinmeye uğraması ile son bulmuştur. Bu deneyler sonucunda 11 mm'lik Ck75 sacın kısmi koruma sağladığı 12 mm sacın ise tam koruma sağladığı görülmüştür. Bizim referans aldığımız STANAG 2310 Standardına göre testin başarısız olma şartı delinmesi olduğu için 11 mm kalınlığı başarılı 10 mm kalınlığı başarısız kabul edeceğiz. Kompozit numuneler için referans kalınlığımız 11 mm ve alan yoğunluğumuz  $8,58 \text{ g/cm}^2$  olmuştur. tüm atış testleri özet olarak Tablo 4.7'de sunulmuştur.

**Tablo 4.7.** Tüm atış testleri özet.

| Kalınlık (mm) | Arka Bombe (mm) | Alan Yoğunluğu (g/cm <sup>2</sup> ) | Mermi Hızı (m/sn) | Sonuç     | Açıklama          |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|-------------------|
| 15            | 0               | 11,70                               | 836,7             | Başarılı  | Lokal deformasyon |
| 14            | 2,4             | 10,92                               | 838,2             | Başarılı  | Lokal deformasyon |
| 13            | 4,5             | 10,14                               | 839,2             | Başarılı  | 3 mm sac delindi  |
| 12            | 6,2             | 9,36                                | 837,6             | Başarılı  | 7 mm sac delindi  |
| 11            | 7,5             | 8,58                                | 839,3             | Başarılı  | 11 mm sac delindi |
| 10            | 9,8             | 7,85                                | 838,9             | Başarısız | Tam delinme       |

#### 4.4. Kompozit Zırh Atış Testleri

Kompozit zırh tasarımında 4 farklı sette bileşenlerin zırhın başarısına etkileri incelenecektir.

SET 1: Bu testlerde ÖK CK 75 kalınlık 4 mm, 1AK Al 7075 7 mm ve 2AK HDPE 10 mm sabit tutulup ARK çelik levhanın kalınlığı 4 mm'den 1 mm 'ye kadar azaltılarak zırhın performansına ARK katmanının etkileri gözlenecektir.

SET 2: Bu testlerde ÖK ve ARK katmanları CK 75 3 mm ve 2AK HDPE 10 mm sabit tutulup 1AK'nın 11.2 mm'den 5.6 mm'ye kadar azaltarak 1AK'nın zırhın performansına etkileri gözlenecektir.

SET 3: Bu testlerde 1AK Al 7075 7 mm ve 2AK HDPE 10 mm ARK Ck 75 4 mm sabit tutulup ÖK 4 mm'den 2 mm'ye azaltılarak zırhın performansına ÖK katmanının etkileri gözlenecektir.

**SET 1:** bu set için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları Tablo 4.8.'de sunulmuştur.

**Tablo 4.8.** SET 1 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları.

| Numune | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş sırası - kalınlık | Çelik katman kalınlığı [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] |
|--------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1-1    | 25                   | 4 +7+10 +4                | 8                           | 9,15                          |
| 1-2    | 24                   | 4 +7+10 +3                | 7                           | 8,37                          |
| 1-3    | 23                   | 4 +7+10 +2                | 6                           | 7,58                          |
| 1-4    | 22                   | 4 +7+10 +1                | 5                           | 6,81                          |

**1-1. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 4+7+10+4 (toplam elik kalınlığı 8 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir, numune başarılı olmuştur. Mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 3,6mm olmuştur. şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,5mm, al levhada ise 7 mm olmuştur. mermi hızı 837,9m/sn'dir. Numunenin nden arkadan ve üstten grntş şekil 4.14'de sunulmuştur.



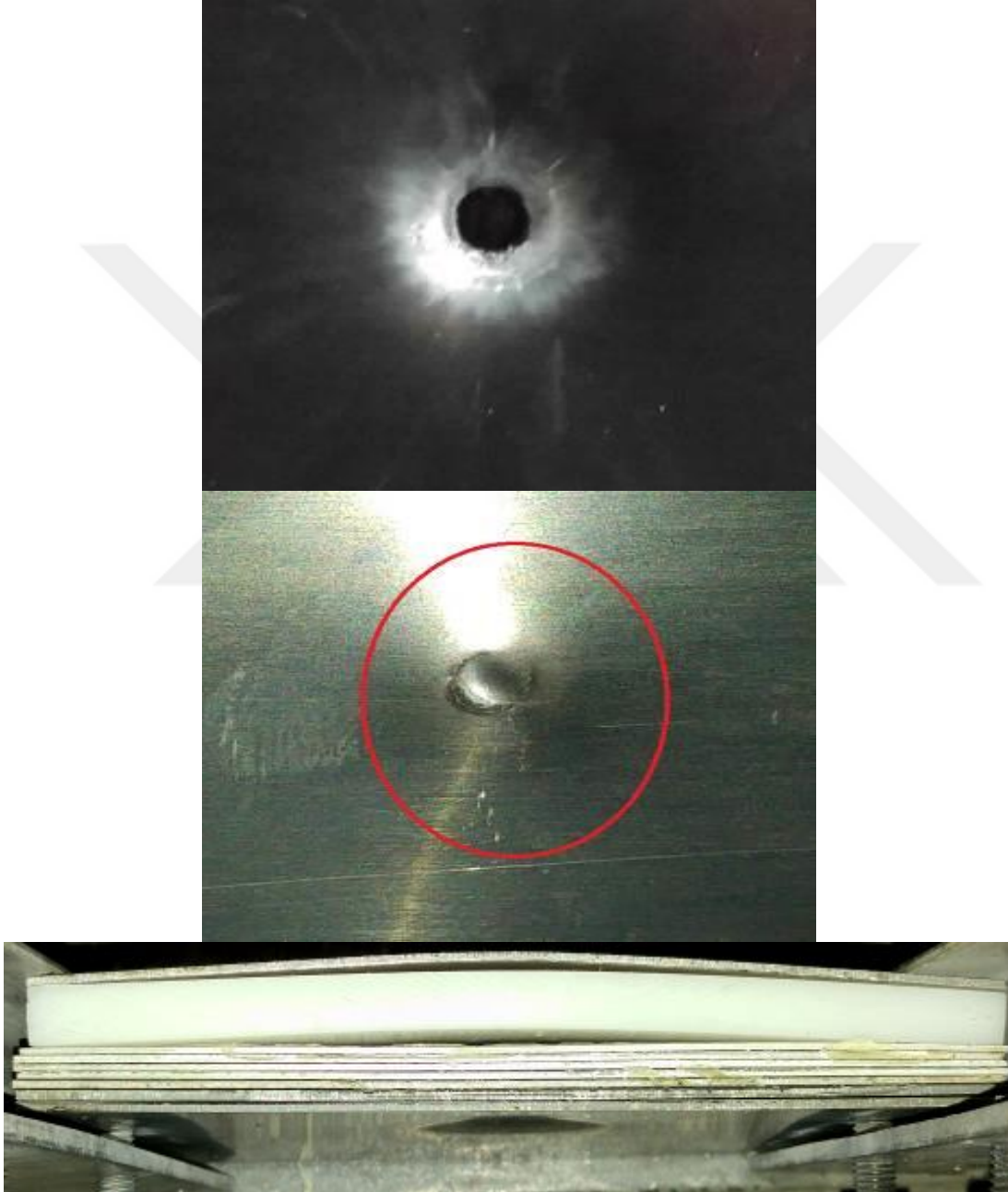
**şekil 4.14.** 1-1. kodlu numunenin ön, arka ve st yüzü.

**1-2. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 4+7+10+3 (toplam elik kalınlığı 7 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir, numune başarılı olmuştur. Mermi mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 5,3mm olmuştur. şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,7mm, al levhada ise 7,7 mm olmuştur. mermi hızı 835,6m/sn'dir. Numunenin nden arkadan ve üstten grntş şekil 4.15'de sunulmuştur.



**şekil 4.15.** 1-2. kodlu numunenin ön, arka ve st yüzü.

**1-3. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 4+7+10+2 (toplam elik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir, numune başarılı olmuştur. Mermi mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 6,2mm olmuştur. şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,7mm, al levhada ise 8,1mm olmuştur. mermi hızı 840,9 m/sn'dir. Numunenin nden arkadan ve üstten grntş şekil 4.16'da sunulmuştur.



**şekil 4.16.** 1-3. kodlu numunenin ön, arka ve st yüzü.

**1-4. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 4+7+10+1 (toplam elik kalınlığı 5 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçmiştir, numune başarısız



olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 7,1mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,7mm, al levhada ise 8mm olmuştur. mermi hızı 839,7 m/sn'dir. Numunenin önden arkadan ve üstten görüntüsü Şekil 4.17'de sunulmuştur.



**Şekil 4.17.** 1-4. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

SET 1 atışları tamamlanmış olup sonuçlar toplu olarak Tablo 4.9. da sunulmuştur.

**Tablo 4.9.** SET 1 değerlendirmesi.

| Numune | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş Sırası - Kalınlık | Çelik K. K. [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] | Mermi hızı [m/s] | Sonuç     | Açıklama            |
|--------|----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------|---------------------|
| 1-1    | 25                   | 4 +7+10<br>+4             | 8                | 9,15                          | 837,9            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 1-2    | 24                   | 4 +7+10<br>+3             | 7                | 8,37                          | 835,6            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 1-3    | 23                   | 4 +7+10<br>+2             | 6                | 7,58                          | 840,9            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 1-4    | 22                   | 4 +7+10<br>+1             | 5                | 6,81                          | 839,2            | Başarısız | Tam delinme         |

**SET 2:** Bu set için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları Tablo 4.10. 'da sunulmuştur.

**Tablo 4.10.** SET 2 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları.

| Numune | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş sırası - kalınlık | Çelik K. K. [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] |
|--------|----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|
| 2-1    | 27,2                 | 3+11,2+10+3               | 6                | 8,77                          |
| 2-2    | 25,8                 | 3+9,8+10+3                | 6                | 8,37                          |
| 2-3    | 24,4                 | 3+8,4+10+3                | 6                | 7,98                          |
| 2-4    | 23                   | 3+7+10+3                  | 6                | 7,59                          |
| 2-5    | 21,6                 | 3+5,6+10+3                | 6                | 7,19                          |

**2-1. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 3+11,2+10+3 (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir. Mermi son çelik levhayı delememiş ve mermi hedefte kalmıştır, numune başarılı olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 6,8mm olmuştur. şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,7mm, al levhada ise 7,5 mm olmuştur. Mermi hızı 840,2m/sn'dir. Numunenin önden, arkadan ve üstten görünüşü şekil 4.18'de de sunulmuştur.





**Şekil 4.18.** 2-1. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**2-2. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları  $3+9,8+10+3$  (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir. Mermi son sacıda delmiş fakat mermi hedefte kalmıştır bu sebeple numune başarılı olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 7,3mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,7mm, al levhada ise 7,9 mm olmuştur. Mermi hızı 842,7m/sn'dir. Numunenin önden, arkadan ve üstten görünüşü Şekil 4.19'da sunulmuştur.



**Şekil 4.19.** 2-2. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**2-3. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 3+8,4+10+3 (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir. Mermi son sacıda delmiş fakat mermi hedefte kalmıştır bu sebeple numune başarılı olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 7,5mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,7mm, al levhada ise 7,7 mm olmuştur. Mermi hızı 837,1m/sn'dir. Numunenin önden, arkadan ve üstten görünüşü Şekil 4.20'de sunulmuştur.



**Şekil 4.20.** 2-3. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü

**2-4. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 3+7+10+3 (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçmiştir ve bu sebeple numune başarısız olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 8,8mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,7mm, al levhada ise 7,9mm olmuştur. Mermi hızı 835,6m/sn'dir. Numunenin önden, arkadan ve üstten görünüşü Şekil 4.21'de sunulmuştur.



**Şekil 4.21.** 2-4. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**2-5. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları  $3+5,6+10+3$  (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçmiştir ve bu sebeple numune başarısız olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 8,6 mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,6 mm, al levhada ise 8,6 mm olmuştur. Mermi hızı 838,2 m/sn'dir. Numunenin önden, arkadan ve üstten görünüşü Şekil 4.22'de sunulmuştur.



**Şekil 4.22.** 2-5. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**2-6. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları  $3+2,8+10+3$  (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçmiştir, numune başarısız olmuştur. Arka sacda oluşan bombe miktarı 8,2mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhadaki 2,1mm, al levhada ise 9,2 mm olmuştur. mermi hızı 839,7m/sn'dir. Numunenin önden arkadan ve üstten görüntüsü Şekil 4.23.'de sunulmuştur.



**Şekil 4.23.** 2-6. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

SET 2 atışları tamamlanmış olup sonuçlar toplu olarak Tablo 4.11. de sunulmuştur.

**Tablo 4.11.** SET 2 değerlendirmesi.

| Numune | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş Sırası - Kalınlık | Çelik K. K. [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] | Mermi hızı [m/s] | Sonuç     | Açıklama            |
|--------|----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------|---------------------|
| 2-1    | 27,2                 | 3+11,2+10+3               | 6                | 8,77                          | 840,2            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 2-2    | 25,8                 | 3+9,8+10+3                | 6                | 8,37                          | 842,7            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 2-3    | 24,4                 | 3+8,4+10+3                | 6                | 7,98                          | 837,1            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 2-4    | 23                   | 3+7+10+3                  | 6                | 7,59                          | 835,6            | Başarısız | Tam delinme         |
| 2-5    | 21,6                 | 3+5,6+10+3                | 6                | 7,19                          | 838,2            | Başarısız | Tam delinme         |
| 2-6    | 20,2                 | 3+2,8+10+3                | 6                | 6,41                          | 839,7            | Başarısız | Tam delinme         |

SET 3: bu set için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları Tablo 4.12.’de sunulmuştur.

**Tablo 4.12.** SET 3 için hazırlanan numunelerin katmanlarının kalınlıkları.

| Numune | Toplam kalınlık | Diziliş sırası - kalınlık | Çelik katman kalınlığı [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] |
|--------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 3-1    | 25              | 4+7+10+4                  | 8                           | 9,15                          |
| 3-2    | 24              | 3+7+10+4                  | 7                           | 8,37                          |
| 3-3    | 23              | 2+7+10+4                  | 6                           | 7,58                          |

**3-1. Numune:** Bu kombinasyon numune 1-1 ile aynı olduğu için tekrar atış yapılmamıştır. Numune 1-1 in değerleri bu set içinde geçerlidir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir, numune başarılı olmuştur. Mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 3,6mm olmuştur. şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,5mm, al levhada ise 7 mm olmuştur. mermi hızı 837,9m/sn’dir. Numunenin önden arkadan ve üstten görüntüsü şekil 4.24.’de sunulmuştur.





**Şekil 4.24.** 3-1. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**3-2. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 3+7+10+4 (toplam çelik kalınlığı 7 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçememiştir, numune başarılı olmuştur. Mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 5,3mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,7mm, al levhada ise 7,7 mm olmuştur. mermi hızı 835,6m/sn'dir. Numunenin önden arkadan ve üstten görüntüsü Şekil 4.25.'de sunulmuştur.





**Şekil 4.255.** 3-2. kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**3-3. Numune:** Bu numunedeki malzeme kalınlıkları 2+7+10+4 (toplam çelik kalınlığı 6 mm) dir. Bu atış testinde mermi numuneyi delip geçmiştir, numune başarısız olmuştur. Mermi hedefte kalmıştır. Arka sacda oluşan bombe miktarı 5,3mm olmuştur. Şekil değiştirme miktarı hdpe levhada 2,7mm, al levhada ise 7,7 mm olmuştur. mermi hızı 835,6m/sn'dir. Numunenin önden arkadan ve üstten görüntüsü Şekil 4.26.'de sunulmuştur.



**Şekil 4.26.** kodlu numunenin ön, arka ve üst yüzü.

**Tablo 4.13.** SET 3 Değerlendirmesi

| Numune | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş Sırası - Kalınlık | Çelik K. K. [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ] | Mermi hızı [m/s] | Sonuç     | Açıklama            |
|--------|----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------|---------------------|
| 3-1    | 25                   | 4+7+10+4                  | 8                | 9,15                          | 840,2            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 3-2    | 24                   | 3+7+10+4                  | 7                | 8,37                          | 842,7            | Başarılı  | Mermi hedefte kaldı |
| 3-3    | 23                   | 2+7+10+4                  | 6                | 7,59                          | 837,1            | Başarısız | Tam delinme         |

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan atışlarda öncelikle kompozit zırhın performansını karşılaştırabilmek amacıyla çelik levhalardan oluşturulmuş zırhlara atışlar yapılmış ve tehditi durdurma başarısını yakalayan referans zırh kalınlığı belirlenmiştir. 11 mm kalınlığındaki zırh levhası 8.58 g/cm<sup>2</sup> alan yoğunluğu ile başarılı olup mermiyi durdurmuştur.

**Tablo 5.1.** Sonuçların Genel Değerlendirmesi

| Numune     | Toplam kalınlık (mm) | Diziliş Sırası - Kalınlık | Çelik K. K. [mm] | Yoğunluk [g/cm <sup>2</sup> ] | Mermi hızı [m/s] | Sonuç           | Açıklama                   |
|------------|----------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| 1-1        | 25                   | 4 +7+10 +4                | 8                | 9,15                          | 837,9            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 1-2        | 24                   | 4 +7+10 +3                | 7                | 8,37                          | 835,6            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| <b>1-3</b> | <b>23</b>            | <b>4 +7+10 +2</b>         | <b>6</b>         | <b>7,58</b>                   | <b>840,9</b>     | <b>Başarılı</b> | <b>Mermi hedefte kaldı</b> |
| 1-4        | 22                   | 4 +7+10 +1                | 5                | 6,81                          | 839,2            | Başarısız       | Tam delinme                |
| 2-1        | 27,2                 | 3+11,2+10+3               | 6                | 8,77                          | 840,2            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 2-2        | 25,8                 | 3+9,8+10+3                | 6                | 8,37                          | 842,7            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 2-3        | 24,4                 | 3+8,4+10+3                | 6                | 7,98                          | 837,1            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 2-4        | 23                   | 3+7+10+3                  | 6                | 7,59                          | 835,6            | Başarısız       | Tam delinme                |
| 2-5        | 21,6                 | 3+5,6+10+3                | 6                | 7,19                          | 838,2            | Başarısız       | Tam delinme                |
| 2-6        | 20,2                 | 3+2,8+10+3                | 6                | 6,41                          | 839,7            | Başarısız       | Tam delinme                |
| 3-1        | 25                   | 4+7+10+4                  | 8                | 9,15                          | 840,2            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 3-2        | 24                   | 3+7+10+4                  | 7                | 8,37                          | 842,7            | Başarılı        | Mermi hedefte kaldı        |
| 3-3        | 23                   | 2+7+10+4                  | 6                | 7,59                          | 837,1            | Başarısız       | Tam delinme                |

Yukarıdaki tabloda sonuçlar toplu halde sunulmuş en başarılı numune koyu vurgulanmış olup başarısız numuneler italik vurgulanmıştır.

3 ayrı set olarak yapılan atışlarda Set 1’de 7.58 g/cm<sup>2</sup> alan yoğunluğuna sahip numune, Set 2’de 7.98 g/cm<sup>2</sup> alan yoğunluğuna sahip numune, Set 3’de 8.37 g/cm<sup>2</sup> alan yoğunluğuna sahip numune kendi setleri içinde alan yoğunluğu açısından en başarılı numuneler olmuştur. Atışlar değerlendirildiğinde ön katmandaki sert malzeme miktarı

arttıkça numunlerin daha düşük alan yoğunluklarında başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Aynı çelik kalınlığına sahip (6 mm) 2-4. numune (3+7+10+3) ve 3-3. numune (2+7+10+4) başarısız olurken 1-3. numune (4+7+10+2) başarılı olmuştur. Bu bize ön katmanın sertliğinin ve kalınlığının önemini göstermiştir. ÖK'sertliğinin ve malzeme miktarının fazlalığı merminin uçuşu köreltme ve merminin malzemelere uyguladığı basıncı düşürmekte ve delinmeye karşı direnci arttırmaktadır.

1AK ve 2AK'da kullanılan malzemeler ÖK'da oluşan çökmenin sonraki katmalara ulaşmasını engellemiş merminin arka arkaya sacları delmesi yerine arada esnemeye de enerji harcamasına bu sayede daha düşük alan yoğunluğu ile başarılı numuneler elde etmemize olanak sağlamıştır.

Bunun yanında 1AK ve 2AK katmanların mermiyi durdururken sadece çelik kullanılan zırh levhasına göre %11.6 oranında hafifleme sağlanmıştır. Bu oran kişisel koruma için çok önemli olmasada zırhlı araç ve bina zırhlandırmalarda anlamlı sayılabilecek değerdedir.

İleri çalışmalarda farklı sertliklerdeki ÖK'lar ile deneler yapılabilir, 60 HRC üstü 1 mm kalınlığında çok sert levha arka kısımları kısmen sert levhalar ile denemeler yapılabilir. Bu çok sert levha ile mermi ucunun ilk aşamada köreltilmesi ve hatta değişik açılı sert levhalar ile saptırılması hedeflenebilir.

## KAYNAKLAR

- Adams, J. W., & Glide, G. (2001). Microstructure development of aluminum oxide/titanium diboride composites for penetration resistance. *Ceramic Transactions (USA)*, 134, 629-634.
- Akella, K., & Naik, N. K. (2015). Composite armour—A review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95(3), 297-312.
- Arslan, O. (2023). Hertzian crack propagation in graded glass/ceramic composites. *Journal of the American Ceramic Society*.
- Ash, R. A. (2016). Vehicle armor. In *Lightweight Ballistic Composites* (pp. 285-309). Woodhead Publishing.
- Anderson Jr, C. E., & Royal-Timmons, S. A. (1997). Ballistic performance of confined 99.5%-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 19(8), 703-713.
- Anderson Jr, C. E., & Morris, B. L. (1992). The ballistic performance of confined Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 12(2), 167-187.
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2022). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Elsevier.
- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (2021). *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier.
- Bhat, A., Naveen, J., Jawaid, M., Norraahim, M. N. F., Rashedi, A., & Khan, A. (2021). Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications—A Review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1300-1317.
- Bhatnagar, A. (Ed.). (2016). *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. Woodhead Publishing.
- Bhatnagar, A., Arvidson, B., & Pataki, W. (2006). Prepreg ballistic composites. In *Lightweight ballistic composites* (pp. 272-304). Woodhead Publishing.
- Bishop, C. (2002). *The Encyclopedia of weapons of World war II*. Sterling Publishing Company, Inc..
- Black, J. (2013). *War and technology*. Indiana University Press.
- Blundell, S. (2001). *Magnetism in condensed matter: oxford master series. Condensed Matter Physics (Oxford Series Publications, 2001)*, 29.
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

- Cao, J., Lai, J., Zhou, J., Kang, N., Du, L., & Miao, Y. (2020). Experiments and simulations of the ballistic response of ceramic composite armors. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 2783-2793.
- Cavallaro, P. V. (2011). Soft body armor: an overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics.
- Cheeseman, B. A., & Bogetti, T. A. (2003). Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite structures*, 61(1-2), 161-173.
- Chen, S., & Ravi-Chandar, K. (2022). Nonlinear poroviscoelastic behavior of gelatin-based hydrogel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 158, 104650.
- Chen, J., Zeng, Y., Liang, X., Hou, Y., Wang, Y., Sun, Z., & Cui, S. (2022). Lightweight Design and Experimental Study of Ceramic Composite Armor. *Processes*, 10(6), 1056.
- Chocron, S., Figueroa, E., & King, N. (2009). Review of Body Armor Materials, Engineering Design, Modeling, and Performance. *Journal of Materials Science*, 44(12), 3189-3205.
- Clegg, W. J., Kendall, K., Alford, N. M., Button, T. W., & Birchall, J. D. (1997). A simple way to make tough ceramics. *Nature*, 389(6651), 457-458.
- Cormie, D., Mays, G., & Smith, P. (2020). *Blast Effects on Buildings: Design of Buildings to Optimize Resistance to Blast Loading*. Thomas Telford.
- Courtney, A., & Courtney, M. (2008). A thoracic mechanism of mild traumatic brain injury due to blast pressure waves. *Nature Precedings*, 1-1.
- Crouch, I. G. (2019). Body armour—New materials, new systems. *Defence Technology*, 15(3), 241-253.
- David, N. V., Gao, X. L., & Zheng, J. Q. (2009). Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *Applied Mechanics Reviews*, 62(5).
- Dikshit, S. N., Kutumbarao, V. V., & Sundararajan, G. (1995). The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. *International journal of impact engineering*, 16(2), 293-320.
- Edge, D., & Paddock, J. M. (1988). *Arms & armor of the medieval knight: an illustrated history of weaponry in the Middle Ages*. Crescent.
- Ellis, R. L., Lalande, F., Jia, H., & Rogers, C. A. (1998). Ballistic impact resistance of SMA and spectra hybrid graphite composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 17(2), 147-164.
- Feng, J., Sun, W., Wang, L., Chen, L., Xue, S., & Li, W. (2020). Terminal ballistic and static impactive loading on thick concrete target. *Construction and Building Materials*, 251, 118899.
- Fink, B. K. (2002). *Composite Armor: Providing Multifunctional Materials for Future Ground Vehicles*. ARL website.
- Flanagan, M. P., Zikry, M. A., Wall, J. W., & El-Shiekh, A. (1999). An experimental investigation of high velocity impact and penetration failure modes in textile composites. *Journal of composite materials*, 33(12), 1080-1103.
- Fridlund, J. T. (2022). *Integration of Hadfield Steel into Modern Body Armor*.

- Forrestal, M. J., & Tzou, D. Y. (1997). A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets. *International Journal of Solids and Structures*, 34(31-32), 4127-4146.
- Galanov, B. A., Grigoriev, O. N., Ivanov, S. M., & Kartuzov, V. V. (2002). Structure and properties of shock-resistant ceramics developed at the institute for problems in materials science, NAS of Ukraine. *Ceramic transactions*, 134, 73-81.
- Gellert, E. P., Cimpoeu, S. J., & Woodward, R. L. (2000). A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites. *International Journal of Impact Engineering*, 24(5), 445-456.
- Genson, K. (2022). Build Quality in Laser Powder Bed Fusion of AISI 4340 Steel as a Function of Process Window and Feedstock (Doctoral dissertation, South Dakota School of Mines and Technology).
- Golan, G., & Katz, U. (2011). A practical method for calculating ballistic trajectories of spin-stabilized projectiles. *Journal of Applied Mechanics*, 78(6), 061
- Gooch, W. A. (2002). An overview of ceramic armor applications. *Ceramic transactions*, 134, 3-21.
- Goodno, B. J., & Gere, J. (2018). *Statics and mechanics of materials*. Cengage Learning.
- Guo, G., Alam, S., & Peel, L. D. (2022). An investigation of deformation and failure mechanisms of fiber-reinforced composites in layered composite armor. *Composite Structures*, 281, 115125.
- Gupta, N. K., & Madhu, V. (1997). An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates. *International journal of impact engineering*, 19(5-6), 395-414.
- Griffiths, D. J., & Inglefield, C. (2017). *Introduction to Electrodynamics*, 4th edition.
- Hazell, P. J., & Appleby-Thomas, G. J. (2012). The impact of structural composite materials. Part 1: ballistic impact. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(7), 396-405.
- Hazell, P. J., & Appleby-Thomas, G. (2009). A study on the energy dissipation of several different CFRP-based targets completely penetrated by a high velocity projectile. *Composite structures*, 91(1), 103-109.
- Hazell, P. J., Appleby-Thomas, G. J., & Willis, P. A. (2012). The dynamic response of ceramic materials to shock loading. *Journal of Materials Science*, 47(24), 8317-8335.
- Hazell, P. J., Roberson, C. J., & Moutinho, M. (2014). On the design of composite sandwich panel armour for protection against long rod penetrators. *Composite Structures*, 111, 147-155.
- Hetherington, J. G., & Rajagopalan, B. P. (1991). An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours. *International Journal of Impact Engineering*, 11(1), 33-40.
- Holmquist, T. J., Johnson, G. R., & Cook, W. H. (2002). A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *Journal of Applied Physics*, 91(10), 6377-6391.

- Holmquist, T. J., & Johnson, G. R. (2002). Response of silicon carbide to high velocity impact. *Journal of applied physics*, 91(9), 5858-5866.
- Huang, C., Cui, L., Qiu, Y., & Liu, Y. (2023). Study on low-velocity impact behavior of Twaron® fabric subjected to double-impactor impact from a numerical analysis perspective. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6, pp. 408-409). New York: Wiley.
- Johnson, G. R. and Cook, W. H. A. (1983) 'A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures', *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, pp. 541-547.
- Kaufmann, C., Cronin, D., Worswick, M., Pageau, G., & Beth, A. (2003). Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour. *Shock and Vibration*, 10(1), 51-58.
- Kingery, C. N., & Bulmash, G. (2020). Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. U.S. Army Ballistic Research Laboratory.
- Kuchta, J. M. (2019). Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining, and Fuel-Related Industries. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Lawton, B. (2004). Weapons Technology. In *Various and Ingenious Machines. Volume Two: Manufacturing and Weapons Technology* (pp. 1207-1274). Brill.
- Lee, S. W., Lee, W., Hong, Y., Lee, G., & Yoon, D. S. (2018). Recent advances in carbon material-based NO<sub>2</sub> gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 1788-1804.
- Liu, P., He, G., & Wu, L. H. (2009). Impact behavior of entangled steel wire material. *Materials characterization*, 60(8), 900-906.
- Liu, X., Li, M., Li, X., Deng, X., Zhang, X., Yan, Y., ... & Chen, X. (2018). Ballistic performance of UHMWPE fabrics/EAMS hybrid panel. *Journal of materials science*, 53, 7357-7371.
- Liu, L. G., Du, G., & Sun, M. (2020). Aerodynamic-force production mechanisms in hovering mosquitoes. *Journal of Fluid Mechanics*, 898, A19.
- Mangenello, S., & Abbott, K. H. (2012). Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets. *J MATER*, 7(2), 231-239.
- Maweja, K., Stumpf, W., & van der Berg, N. (2009). Characteristics of martensite as a function of the Ms temperature in low-carbon armour steel plates. *Materials Science and Engineering: A*, 519(1-2), 121-127.
- Mayseless, M., Goldsmith, W., Virostek, S. P., & Finnegan, S. A. (1987). Impact on ceramic targets.
- Medvedovski, E. (2006). Silicon Carbide-Based Ceramics for Ballistic Protection. *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151, 19-35.



- Movahedifar, E., & Remennikov, A. M. (2021). An overview of high-speed train derailment: A comprehensive review of risk, causes and prevention. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105007.
- Mehara, M., Goswami, C., Kumar, S. R., Singh, G., & Wagdre, M. K. (2021). Performance evaluation of advanced armor materials. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6039-6042.
- Meyers, M.A., 1994. *Dynamic Behavior of Materials*, (John Wiley Inc.) p.597
- Muhi, R. J., Najim, F., & de Moura, M. F. (2009). The effect of hybridization on the GFRP behavior under high velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 40(8), 798-803.
- Murray, C. B., Sun, S., Doyle, H., & Betley, T. (2001). Monodisperse 3d transition-metal (Co, Ni, Fe) nanoparticles and their assembly into nanoparticle superlattices. *Mrs Bulletin*, 26(12), 985-991.
- Naik, N. K., Kumar, S., Ratnaveer, D., Joshi, M., & Akella, K. (2013). An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(2), 145-187.
- Ogorkiewicz, R. M. (2004). *Armor and future urban warfare*. Fort Knox, Kentucky, *Armor*, 113(2), 22-25.
- Palaci, Y., & Arikan, M. M. (2021). Layer thickness optimization of ceramic composite for body armor by considering volume, weight, and cost. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 7152-7160.
- Pandya, K. S., Kumar, C. V. S., Nair, N. S., Patil, P. S., & Naik, N. K. (2015). Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of 2D woven fabric composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(4), 471-511.
- Peinado Seligrat, J. (2022). Analysis of the Impact Behavior of Personal Protections Manufactured with Ultra High Molecular Weight Poly-Ethylene (UHMWPE).
- Prevorsek, D. C., Kwon, Y. D., & Sharma, R. D. (1977). Structure and properties of Nylon 6 and PET fibres: the effects of crystallite dimensions. *Journal of materials science*, 12, 2310-2328.
- Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools—a review: part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1235-1256.
- Remennikov, A. M., & Carolan, D. (2019). Dynamic response of reinforced concrete slabs to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 127, 146-163.
- Rittel, D., Ravichandran, G., & Lee, S. (2002). Large strain constitutive behavior of OFHC copper over a wide range of strain rates using the shear compression specimen. *Mechanics of Materials*, 34(10), 627-642.
- Rosenberg, Z., & Dekel, E. (2012). *Terminal ballistics* (pp. 267-291). Berlin: Springer.

- Salman, S. D., & Leman, Z. B. (2018). Physical, mechanical and ballistic properties of kenaf fiber reinforced poly vinyl butyral and its hybrid composites. In *Natural fibre reinforced vinyl ester and vinyl polymer composites* (pp. 249-263). Woodhead Publishing.
- Saeedifar, M., Najafabadi, M. A., Zarouchas, D., Toudeshky, H. H., & Jalalvand, M. (2018). Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission. *Composites Part B: Engineering*, 144, 206-219.
- Sapozhnikov, S. B., Kudryavtsev, O. A., & Zhikharev, M. V. (2015). Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites. *International Journal of Impact Engineering*, 81, 8-16.
- Shahkarami, A., Cepus, E., Vaziri, R., & Poursartip, A. (2006). Material responses to ballistic impact. In *Lightweight ballistic composites* (pp. 72-100). Woodhead Publishing.
- Shepherd, J. E. (2021). Explosions, Blast Waves, and Detonations. In *Handbook of Shock Waves* (pp. 63-105). Elsevier.
- Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: A present and future developments. *Defence Technology*.
- Si, P., Liu, Y., Yan, J., Bai, F., Shi, Z., & Huang, F. (2023, February). Effect of polyurea layer on ballistic behavior of ceramic/metal armor. In *Structures* (Vol. 48, pp. 1856-1867). Elsevier.
- Si, P., Liu, Y., Yan, J., Bai, F., & Huang, F. (2022). Ballistic Performance of Polyurea-Reinforced Ceramic/Metal Armor Subjected to Projectile Impact. *Materials*, 15(11), 3918.
- Silveira, P. H. P. M. D., Silva, T. T. D., Ribeiro, M. P., Rodrigues de Jesus, P. R., Credmann, P. C. R. D. S., & Gomes, A. V. (2021). A brief review of alumina, silicon carbide and boron carbide ceramic materials for ballistic applications. *Acad. Lett*, 3742, 1-11.
- Siviour, C. R. (2016). High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2(1), 15-32.
- Siviour, C. R., & Jordan, J. L. (2016). High strain rate mechanics of polymers: a review. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2, 15-32.
- Sorensen, B. R., Kimsey, K. D., Silsby, G. F., Scheffler, D. R., Sherrick, T. M., & De Rosset, W. S. (2010). High velocity penetration of steel targets. *International Journal of Impact Engineering*, 11(1), 107-119.
- Strassburger, E., Lexow, B., Beffort, O., & Jeanquartier, R. (2000). Behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al ceramic metal composites under projectile impact. *Le Journal de Physique IV*, 10(PR9), Pr9-605.
- Tehrani, A. M., & Spaldin, N. A. (2021). Untangling the structural, magnetic dipole, and charge multipolar orders in Ba<sub>2</sub>MgReO<sub>6</sub>. *Physical Review Materials*, 5(10), 104410.
- Thomas, H. L. (2006). Non-woven ballistic composites. In *Lightweight Ballistic Composites* (pp. 240-271). Woodhead Publishing.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for scientists and engineers*. Macmillan.

- Udatha, P., Sesha Kumar, C. V., Nair, N. S., & Naik, N. K. (2012). High velocity impact performance of three-dimensional woven composites. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(7), 419-431.
- Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11), 793-807.
- Woodward, R. L. (1977). A Rational Basis For The Selection Of Armour Materials.
- Zaretsky, E., Frage, N., & Dariel, M. P. (2003, December). Dynamic failure and fracture of the TiC-steel composite. In *Ceramic Armor and Armor Systems, Proceedings*.
- Zhang, M., & Matinlinna, J. P. (2012). E-glass fiber reinforced composites in dental applications. *Silicon*, 4, 73-78.
- Zhao, W., & Guo, Q. (2018). Experimental study on impact and post-impact behavior of steel-concrete composite panels. *Thin-Walled Structures*, 130, 405-413.
- Zhao, Z. N., Han, B., Li, F. H., Zhang, R., Su, P. B., Yang, M., ... & Lu, T. J. (2020). Enhanced bi-layer mosaic armor: experiments and simulation. *Ceramics International*, 46(15), 23854-23866.
- Zook, J. A., Frank, K., & Silsby, G. F. (1992). Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground Md.
- Zukas, J. (2004). *Introduction to hydrocodes*. Elsevier.
- Zukas, J. A. (2018). *High Velocity Impact Dynamics*. Wiley.



## ÖZGEÇMİŞ

Ad – Soyad : Ahmet ÖZTEMÜR

## ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2010, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER

- 2010-2011 Petes Makine, Makine Mühendisi
- 2011-2012 TSK KKK Komando Asteğmen
- 2012-2014 Sakarya Üniversitesi, Araştırma Görevlisi
- 2014-2020 MKE Gazi Fişek Fabrikası Üretim Mühendisi
- 2020-2023 MKE Gazi Fişek Fabrikası Fişek Üretim Müdürü
- 2023- MKE Gazi Fişek Fabrikası Mühendislik Hizmetleri Müdürü
- 2017 Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Verimlilik Proje Ödülleri Kamu Kategorisi Birinciliği (12.7 mm Mermi gömleği imalatının revize edilmesi projesi)
- 2017 MKE Genel Müdür Takdirnamesi (12.7 mm Mermi gömleği imalatının revize edilmesi projesi)
- 2019 MKE Genel Müdür Takdirnamesi ve Aylıkla Ödüllendirme(Keskin nişancı fişeği geliştirme projesi)

## TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- OZTEMUR A. GENEL K. 2023 "Development of composite armour resistant to armour piercing bullet" 15th International Istanbul Scientific Research Congress Online, Engineering, And Applied Sciences, İstanbul Türkiye ISBN: 978-625-6879-40-9