



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HİBRİT KOMPOZİT ZİRH TASARIMI VE  
BALİSTİK DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

**BERK KAN ÇELİK**

**DANIŞMAN**

**DOÇ. DR. YILMAZ KÜÇÜK**

**BARTIN-2023**





**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİBRİT KOMPOZİT ZİRH TASARIMI VE BALİSTİK DİRENCİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BERK KAAAN ÇELİK**

**BARTIN-2023**

## **BEYANNAME**

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırlamış olduğum “HİBRİT KOMPOZİT ZİRH TASARIMI VE BALİSTİK DİRENCİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

21.08.2023

Berk Kaan ÇELİK

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve bu yüksek lisans tezinin bilimsel danışmanlığını üstlenen, konunun belirlenmesi ve hazırlanması sırasında yardımını ve fedakârlığını esirgemeyen, desteğini her zaman yanımda hissettiğim hocam Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK'e saygılarımı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu günlere gelmem de her zaman yanımda olarak maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Mine ÇELİK'e, babam Fethi ÇELİK'e, kardeşim Ahmet Buğra ÇELİK'e ve ayrıca eğitim sürecimin tüm aşamalarında desteğini ve varlığını hiçbir şekilde esirgemeyen eşim Damla Nur ÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hazırlanan numunelerin deneylerinin yapılması aşamasında yadsınamaz yardımları ve göstermiş olduğu özverisi için ise Sayın Müslüm KELEKÇİ'ye de teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışması 221M417 nolu Tübitak projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Berk Kaan ÇELİK

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## **HİBRİT KOMPOZİT ZIRH TASARIMI VE BALİSTİK DİRENCİNİN İNCELENMESİ**

**Berk Kaan ÇELİK**

**Bartın Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK**

**Bartın-2023, sayfa: 60**

Bu yapılan çalışma, lamine hibrit kompozit bir araç zırhı modeli tasarlamayı ve balistik direncini incelemeyi amaçlamıştır. Tasarlanan bu kompozit zırh modeline mermi çarpma ve sırt destek yüzeyi kalınlık olarak 5 mm paslanmaz çelik (AISI 304) levha kullanılmıştır. Merminin çarpma şoku enerjisini emmek için arada bulunan katman için kalınlığı 6 mm olan bir kevlar kompozit levha tercih edilmiştir. Merminin deformasyonunu arttırmak için çelik levhalara borlama işlemi uygulanmıştır. Böylece AISI 304 levhanın yüzey sertliği borlama işlemi ile yaklaşık 7 kat arttırılmıştır. Bu sürecin mermi deformasyonunu önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında çeşitli zırh modellerinin tasarımı ve prototip üretimleri gerçekleştirilerek balistik performansları değerlendirilmiştir. Balistik testler, yaklaşık 800 m/s mermi hızına sahip 7.62 mm kalibreli kurşun çekirdekli G3 tüfek mermisi ile 30 metre mesafe ayarlanarak tek atış yapılacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Borlanmamış çelik (A) ve borlanmış çeliğin (B) tek kat uygulanmasının yeterli balistik direnci sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bor içermeyen çelik ara destek ve ön destek tabakası arasında tek kat kevlar levha bulunan ZM-3 zırh tasarımı A+K+A lamine sıralı olarak kullanılarak tam penetrasyonlu balistik sınır koşulları sağlanabilmektedir.

Son olarak boronize edilmiş elik arka ve n destek katmanları arasında bulunan çift keklar plakaları içeren ve ZM-4 ile belirtilen zırh tasarımının B+K+K+B lamine sıralı modelinin atış yapılan G3 mermisini tamamen durdurduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, tasarlanan zırh modelinde borlama işleminin merminin deformasyonunu arttırdığı ve ayrıca keklar levhanın merminin kinetik enerjisini absorbe etmede etkili olduğu gözlenmiş olup, laminat olarak bu tür zırh sistemlerinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zırh sistemi, keklar levha, balistik test, lamine kompozit.

# **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

## **HYBRID COMPOSITE ARMOR DESIGN AND INVESTIGATION OF ITS BALLISTIC RESISTANCE**

**Berk Kaan ÇELİK**

**Bartın University**

**Graduate School**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK**

**Bartın-2023, pp: 60**

This study aimed to design a laminated hybrid composite vehicle armor model and to examine its ballistic resistance. 5 mm stainless steel (AISI 304) plate was used for bullet impact and back support surface thickness for this designed composite armor model. In order to absorb the impact shock energy of the bullet, a kevlar composite sheet with a thickness of 6 mm was preferred for the layer in between. In order to increase the deformation of the bullet, the steel plates were borided. Thus, the surface hardness of AISI 304 plate has been increased approximately 7 times by boronizing process. It has been observed that this process significantly affects the bullet deformation. Within the scope of the study, the design and prototype production of various armor models were carried out and their ballistic performances were evaluated. Ballistic tests were carried out with a 7.62 mm caliber lead-core G3 rifle bullet with a bullet velocity of approximately 800 m/s, with a single shot at a distance of 30 meters. It has been observed that single coat application of non-boronized steel (A) and boronized steel (B) cannot provide sufficient ballistic resistance. In addition, full penetration ballistic boundary conditions can be achieved by using the ZM-3 armor design, which has a single layer of kevlar plate between the boron-free steel intermediate support and the front support layer, A+K+A laminated sequentially.



Finally, it was determined that the B+K+K+B laminated sequential model of the armor design specified with ZM-4, containing double kevlar plates between the boronized steel back and front support layers, completely stopped the firing of the G3 bullet.

As a result, it has been observed that boriding process increases the deformation of the bullet in the designed armor model, and the kevlar plate is also effective in absorbing the kinetic energy of the bullet, and it has been determined that it can be used as a laminate in such armor systems.

**Keywords:** Armor system, kevlar plate, ballistic test, laminated composite.

# İÇİNDEKİLER

BEYANNAME .....	iii
ÖNSÖZ .....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Balistik Kavramı ve İlgili Terminoloji.....	1
1.1.1 Balistik.....	1
1.1.2 İç Balistik .....	1
1.1.3 Ara Balistik .....	3
1.1.4 Dış Balistik .....	3
1.1.5 Hedef Balistiği .....	4
1.1.6 Balistik Limit .....	6
1.2. Mermi Kinetiği ve Penetrasyon Mekanikliği.....	6
1.2.1 Mermi Kinetiği .....	6
1.2.2 Penetrasyon Mekanikliği .....	7
1.3 Zırh Çeşitleri .....	9
1.3.1 Araç Zırhında Kullanılan Zırh Malzemeleri.....	10
1.3.1.1 Zırh Çeliği .....	13
1.3.1.2 Hibrid Kompozit.....	17
1.4 Uluslararası Balistik Test Standartları.....	19
1.4.1 Araç Zırhına Yönelik Uluslararası Balistik Test Standartları .....	19
1.5 Atış Sonrası Hasar Tespiti ve Değerlendirme Süreçleri.....	22
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	23
3. MATERYAL VE METOT .....	44
3.1. Numunelerin Hazırlanması.....	44
3.1.1 Borlama işlemi.....	44

3.1.2 Kevlar Plaka Üretimi .....	45
3.2 Zırh Katmanlarının Belirlenmesi ve Balistik Testler .....	45
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	47
4.1. Borlama Sonrası Mikroyapı .....	47
4.2 Balistik Test Sonrası Hasar Analizi .....	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	52
KAYNAKLAR.....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
Şekil 1.1: Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç değişimi .....	2
Şekil 1.2: Hedef malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlere göre hedef ile mermi arasındaki etkileşimin olası sonuçları .....	5
Şekil 1.3: Merminin bir hedef üzerindeki balistik etkisinin şematik diyagramı .....	7
Şekil 1.4: Armox advance zırhının, platformdan belirli bir mesafede tasarlanmasının şeması .....	15
Şekil 1.5: Tipik bazı hibrit kompozitler: (a) C/CNF-epoksi hibrid (multi-skala) kompozitin yandan ve üstten görünüşleri, (b) C/LCP fiber/PEEK hibrid kompozit (3D), (c) C/LCP fiber/PEEK hibrid kompozit, (d) aramid/bazalt fiber/epoksi hibrid kompozit .....	19
Şekil 3.1: Kevlar plaka üretimi a) kumaş ve reçine uygulaması b) sıcak presleme sonrası kesilerek hazırlanan kevlar zırh katmanı. ....	45
Şekil 3.2: Zırh modeli kombinasyonları. ....	455
Şekil 4.1: 950 °C’de 3 saat borlama sonucu yüzeyde elde edilen borür tabakasının kesit mikroyapısı .....	47
Şekil 4.2: ZM-1 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlama işlemi uygulanmamış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş olarak görüntüsü.....	48
Şekil 4.3: ZM-2 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlama işlemi uygulanmış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş olarak görüntüsü.....	49
Şekil 4.4: Atış sonrası ZM-3 zırh modelinde oluşan hasar görüntüleri.....	49
Şekil 4.5: ZM-4 zırh modelinde atış sonrası oluşan hasar görüntüleri a) borlanmış çelik (B) b) çift katman kevlar plaka (K+K) c) borlanmış çelik (B).....	50

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
Tablo 1.1:Armox grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler .....	15
Tablo 1.2:Mars grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler .....	17
Tablo 1.3:Mars grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler .....	17
Tablo 1.4:STANAG 4569 Standardı .....	20
Tablo 1.5:Balistik koruyucu zırh standartları .....	21
Tablo 1.6:NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen koruma seviyeleri (NIJ Standard- 0101.06 2008). .....	22

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat Derece
mm	: Milimetre
Ft.	: Feet
$u_s$	: Şok Hızı
$u_p$	: Parçacık Hızı
km/sa	: Kilometre bölü saat
t/m <sup>3</sup>	: Ton bölü metreküp
HB	: Brinell sertlik birimi
MPa	: Megapascal
m	: Metre
m/s	: Metre bölü saniye
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
Al-B <sub>4</sub> C	: Alüminyum Karbür
SiC	: Silisyum karbür
GPa	: Gigapascal
Ni	: Nikel
J	: Joule
µm	: mikrometre
AP mermi	: Zırh Delici Mermi
µ:	: Mikro
ρ	: Yoğunluk

## KISALTMALAR

VBL	: Balistik Limit Hızı
NATO	: North Atlantic Treaty Organization
NIJ	: National Institute of Justice
GOST	: Gosudarstvennyy Standart (Rusya Eyalet Standartları)
HHA	: Yüksek Sertlike Çelik
HOSD	: Home Office Body Armour Standard (Birleşik Krallık Gövde Zırhı Standartları)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization
NIJ	: The National Institute of Justice (Ulusal Adalet Kurumu)
STANAG	: Standardization Agreement (NATO Standardizasyon Anlaşması)
UHMWPE	: Çok Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Balistik Kavramı ve İlgili Terminoloji

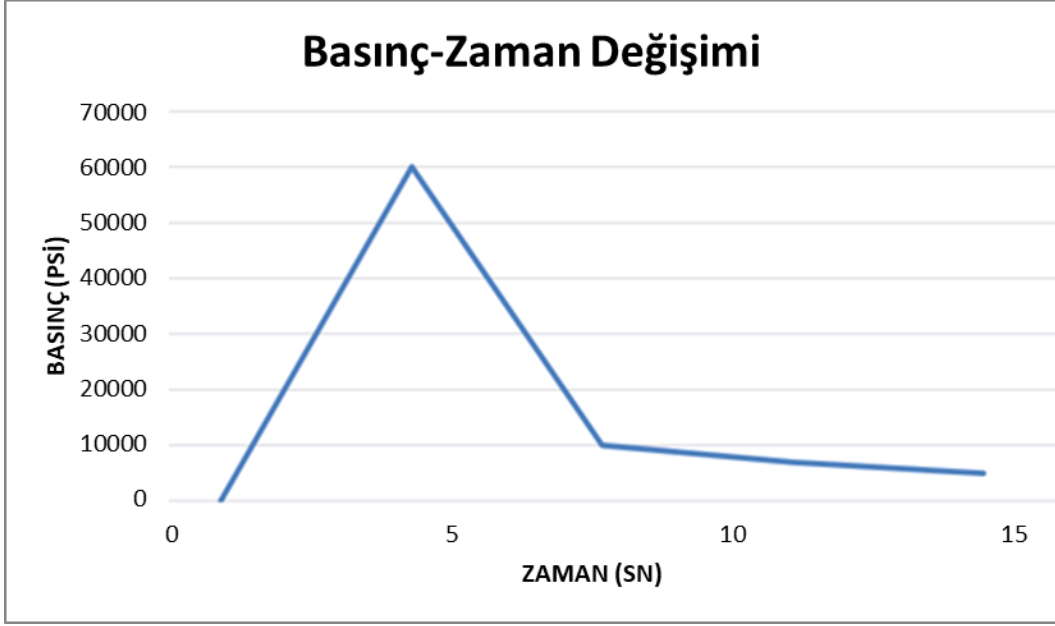
### 1.1.1 Balistik

Mekanikğin alt dallarından biri olan balistik bilimi mermi ve diğer projeksiyonların (mermi yerine geçen cisimlerin) hareketlerini konu almaktadır. Balistik, aerodinamik etkiler, mermi kinetiği, mermi-zırh etkileşimi gibi konuları kapsamaktadır. Rastgele seçilmiş bir cismin fırlatılmasıyla başlayan ve seçilen bir hedefe varışına kadar geçen zamanda oluşan durumları balistik bilimi incelemektedir. Balistik, fişegin namlu içerisinde ateşlenmesinden, hedefe ulaşmasına kadar içinde bulunduğu ortama göre iç balistik, dış balistik ve hedef balistiğini içermektedir (Yavuz, 1988).

### 1.1.2 İç Balistik

İç balistik, sevk barutunun yandığı andan, merminin namludan çıktığı süreye kadar geçen zaman diliminde ortaya çıkan olayların tümünü inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır. İç balistiğe göre bir silahın maksimum performansı, mermi çekirdeğine uygulanan en küçük gaz basıncıyla mermiye olabildiğince maksimum hızı verebilmesidir (Öztürk, 1988). İç balistik olayı tetiğe basıldığı an başlamaktadır. Merminin namluyu terk ettiği ana kadar devam etmektedir. İç balistik hesaplamaları, mermi yüksek boyutlarda olduğunda matematiksel olarak güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Mermi küçük boyutlarda olduğu zaman ise doğru tahmin etmek oldukça zorlaşmaktadır. Eski zamanlarda ise balistik veriler küçük mermiler için hesaplamalar yerine hız testi ve basınç testi metodlarıyla ya da amprik metodlar ile belirlenmekteydi (Çayiroğlu, 2004). İç balistiğin konu aldığı alanları, kapsül, kapsülün ateşlenmesi, oluşan yanmanın hızı, barutlar, yivler, yiv sayıları, dönüş dereceleri, fişek yatağı, namlu boyutları, basınç ve mermi çekirdeği hızı gibi alanlar oluşturmaktadır. Silahtan yapılan ateşleme anında kovanda oluşan sıcaklık neredeyse 2870°C'ye kadar ulaşmaktadır ve aynı zamanda mermi çekirdeğine 25 ton kadar basınç uygulanmaktadır (Güngör, 2021).





Şekil 1.1: Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç değişimi (Özbağdatlı, 2023).

Şekil 1.1’de silahtan ateşleme yapılmasının hemen ardından basınç ve zaman arasındaki değişim ilişkisi verilmektedir. Silahtan ateşleme yapılmasından hemen sonra fişek yolundaki mermi 60000 psi maksimum basıncına kadar ulaşmaktadır. En yüksek basınç değerine ulaşan mermi basıncı namlunun çıkışına kadar yaklaşık 15 saniyede 5000 psi düşüş göstermektedir (Özbağdatlı, 2023).

Silahın içindeki iç balistiği incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada namlu içerisinde oluşan yüksek basınç ve mermi sürati arasındaki ilişki ile bir model oluşturup test edilmiştir. Yapılan çalışmada testleri NATO standartlarına göre gerçekleştirilmiş ve balistik test sırasında 7,62 mm mermi kullanılmıştır. Yapılan testlerde merminin içinde kullanılan barut kütlesi ve maksimum gaz basıncının doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yani barut kütlesindeki artışla birlikte maksimum gaz basıncında da artış görülmektedir. Araştırmacıların yine bir diğer ulaştıkları sonuç ise mermi hızı ile barut kütlesi arasında ters orantı bulunmasıdır. Yani barut kütlesinin artması ile maksimum mermi hızı azalmaktadır. Namlu içerisinde oluşan gazların sıcaklığı ile namlu duvarı arasındaki sıcaklık arasında oluşan ısı taşınım katsayısını ise Noble-Abel denklemi ile hesaplamışlardır (Işık, 2016).

### 1.1.3 Ara Balistik

İç balistikten dış balistiğe geçiş bölümü olarak da adlandırılan ara balistik bilimi, merminin çekirdek bölümünün tüfek veya silah namlusundan çıkmadan önce ve çıktıktan hemen sonraki 1-2 milisaniyelik zaman dilimini inceleyen bilim dalıdır (Özer, 2017). Yani tüfek veya silah namlu ağzı bölgesinde meydana gelen olayları incelemektedir. Ara balistik bazen iç balistik ile düşünülür. Ancak ara balistik için fark oluşturduğu kabul edilen unsur; iç balistikten dış balistiğe geçiş bölümüyle ilgili olup merminin namlu ağzından çıkarken ki ilk hareketin dikkate alınması gerekir. Daha net bir ifadeyle ara balistik, kurşun çekirdeğinin namludan çıkması öncesi ve çıktıktan sonraki 1-2 milisaniyelik zaman dilimini inceleyen bir bilim dalı olarak adlandırılmaktadır.

Ara balistiğin konu aldığı başlıklar ise,

- Namlu ağzı girdapları ve patlama basıncı
- Namlu ağzı alevi
- Namlu ağzı dumanı
- Namlu ağzı sesi konularıdır.

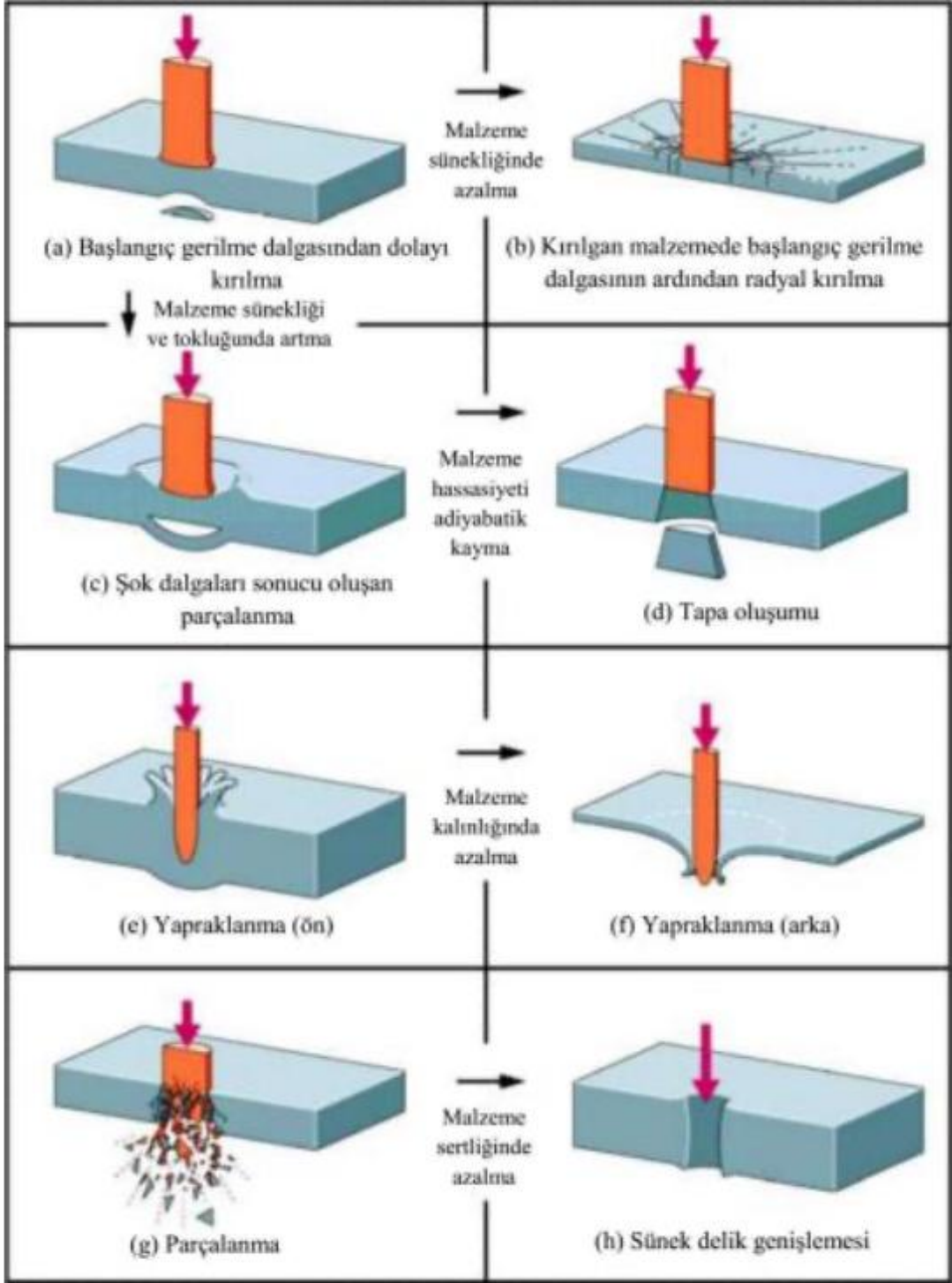
### 1.1.4 Dış Balistik

Dış balistik, ateşleme olayından hemen sonra tüfek veya silah namlusunu terk eden mermi çekirdeğinin, namludan başlayarak hedefe ulaşana kadar geçen zaman dilimi arasındaki hareketlerine, moment sistemlerinin, aerodinamik kuvvetlerin, dünyanın karakteristik özelliklerinin ve meteorolojik değişkenlerin etkilerinin inceleyen bir bilim dalıdır (Sürmeli, 2020). Bir mermi, havanın direncini yenmek, ortadan kaldırmak ve stabil yani dengesi sağlanmış bir uçuş gerçekleştirmek için havada durduğu uçuşun süresi zamanında hedefe doğru ilk hareket hizasında ilerlemelidir. Ancak, merminin pozisyonu çıkış yaptıktan hemen sonra değişiklik gösterir ya da takla atar ise, bu uçuş hedefine tam isabetle ulaşamayacaktır. Uçuş stabilitesini, dengesini ve kararlılığını korumak için iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla kanatçık stabilizasyonu ve spin stabilizasyonudur. Kanatçık stabilizasyonunda, kanatçıklar mermiye eklenip, merminin kendi etrafında dönmeden sadece hareket etmesine yardımcı olmaktadır. Bu durum kanatçıklar üzerinde açığa çıkan aerodinamik etkilerle sağlanmaktadır. Dönme hareketine sahip olan fişegin veya merminin ise kendinde içerdiği spin hareketinden dolayı devamlı ilk hedef yönü

boyunca hareketini sürdürmektedir. Söz konusu spin hareketinin ataleti, ortaya çıkması doğru eksenin aksine olan sapmaları engellemektedir (Özer, 2015).

### **1.1.5 Hedef Balistiği**

Mermi çekirdeği, av tüfeği ve şarapnel saçmalarının katı akışkan veya katı zeminler üzerinde oluşturduğu tahribatların nedenleri, hedef ve mermi çekirdeğinin hareketleri yönünden inceleyen bir alandır (Ergun, 2023). Şekil 1.2’de hedef malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlere göre, hedef ile mermi arasındaki etkileşimin olası sonuçları verilmiştir. Doğal koruma yetersiz olduğunda zırh, mermilerin veya parçalarının balistik dayanıklılığını sağlamak için kullanılan, koruyucu bir malzemedir. İlk olarak ince zırh malzemeleri ile bazı testler yapılır ve bu testlerde mermi hedefi delip geçer ve hedefin mermi üzerinde oluşturduğu etkiler incelenir. Bu testler sonucunda elde edilen veriler analiz edildikten sonra hedefin mermi üzerinde meydana getirdiği etkiler eğer iyi tanımlanırsa, gerçek bir zırh tasarımı için oldukça büyük yararları olacağı düşünülmektedir (Rosenberg, 2012).



Şekil 1.2: Hedef malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimlere göre hedef ile mermi arasındaki etkileşimin olası sonuçları (Wetzel, 2009).

### **1.1.6 Balistik Limit**

Balistik limit, merminin malzemede tamamen delinme oluşturmadığı, çarpışma sonucunda mermi hızının sıfıra kadar düştüğü kritik hız veya kinetik enerji seviyesi olarak ifade edilmektedir. Biri kısmi nüfuz sağlayan en yüksek hız, diğeri ise tam nüfuz sağlayan en düşük hızdan oluşan iki vuruş hızı ortalaması olarak tanımlanabilmektedir. Balistik limiti tespit etmek için, iki hız arasındaki farkın saniyede 50 ft.'i (15.24 m) geçmemesi gerekmektedir. Merminin hedefe bütünüyle etki edemediği hız ve bu hızın altında kalan hızlar balistik limit hızı (VBL), olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımlar arasındaki en büyük farkı, perforasyon olayının tanımlanmasındaki farklı kriterler oluşturmaktadır (Turan, 2007).

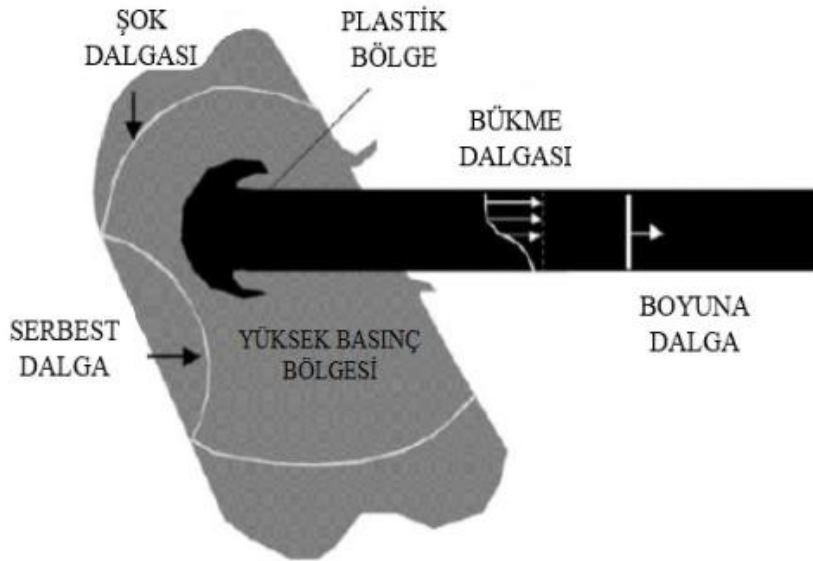
## **1.2. Mermi Kinetiği ve Penetrasyon Mekanığı**

### **1.2.1 Mermi Kinetiği**

Mermilerin hızı yani mermi kinetiği, enerji ve hareket prensipleriyle ilgilenen bir alanı ifade etmektedir (Sürmeli, 2020). Mermi kinetiği, mermi-zırh etkileşimini anlama konusunda oldukça önemlidir. Merminin kinetik enerjisi veya namlu çıkış enerjisi birinci infilak sonrası kurşunun üstünde mevcut olan enerjinin namlu içindeki zayıttan sonraki taşıdığı enerji miktarı olarak ifade edilebilir. Bu enerji sade olarak kurşun kütlesiyle, kurşun hızının karesinin çarpımıyla orantılıdır (Baran, 2018). Bundan dolayı namludan çıkış enerjisinin en önemli bir belirleyicisi merminin hızıdır. Karşılaştırmak için aerodinamik ve yerçekimi gibi unsurlar göz önünde bulundurulmadan, namlu çıkış enerjisi, belirli bir ateşli silah veya merminin yıkıcı potansiyelinin göstergesi olarak kullanılmaktadır. Kurşun özellikle ne kadar hızlı hareket ederse ve ne kadar ağır olursa, namlu enerjisi o kadar yüksek ve çok daha fazla hasar verici olmaktadır. Bu söylenen duruma karşılık mermilerin ağırlıkları çok az olsalar bile hayati tehlikeye sebep olmalarının nedeni, barındırdıkları momentum kuvvetinden kazanmış oldukları yüksek hızları olduğu bilinmektedir. Kinetik enerji özellikle atıcının, merminin hedefte oluşturduğu tahribat etkisine (öldürmek, yaralamak gibi) ve istenilen menzil hedefinin tutturulmasının önemli olduğu belirli uygulamalar için göz önünde bulundurulmaktadır (Bryan, 2015). Merminin namludan çıkış enerjisinin analitik olarak değerlendirilmesinde, fişeğe yataklık yapan namlunun uzunluğuna bağlı olarak ortaya çıkacak olan hız değişkenliği mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Carlucci, 2008).

## 1.2.2 Penetrasyon Mekanikği

Penetrasyon mekanikği, mermilerin zırha hasar verme sürecini ve penetrasyonun derinliğini ifade etmektedir (Özşahin, 2008). Projektilin hedef malzemeyi nasıl deldiği ve bunda hangi etkenlerin rol oynadığı yani penetrasyon sürecini nelerin etkilediği incelenmektedir. Mermi, hedefi delmek için kinetik enerjisini kullanır. Şekil 1.3'te kinetik enerji penetrasyon sürecinin şemasına yer verilmiştir. Çarpma sonucunda penetratör ve hedef malzemesi için basma gerilmesi oluşmaktadır. Yüzeğe dik gelen yani normal çarpmalarda, ortaya çıkan basma gerilmesi iki boyutludur. Hedef yüzeyine belirli bir açı ile gelen çarpmalarda asimetrik bükülme dalgalarını içeren üç boyutlu gerilme durumları oluşmaktadır. Artan çarpma hızı ile merminin plastik deformasyonu lokalizedir ve mermi ucu hasara uğrayarak mantar şeklini alır (Zukas, 1990).



Şekil 1.3: Mermi'nin bir hedef üzerindeki balistik etkisinin şematik diyagramı (Zukas, 1990).

Darbe olayı, malzeme özelliklerine, çarpma açısına, çarpma hızına, hedef ve mermi'nin geometrik ve gerinim hızına veya bunların farklı kombinasyonlarına göre çeşitli şekillerde özellikler kazanmaktadır.

Genel olarak, etki süreci dört rejimden oluşur:

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

### **Geçiş Fazı**

Geçiş fazında temastan sonra, serbest yüzey ve malzeme ara yüzlerinden gelen serbest dalgaların reaksiyon verecek zamanı olmaz ve bir boyutlu gerilme durumunu temsil eden ara yüzde bir basınç üretilmektedir.

$$P_H = \rho u_s u_p \quad (1.1)$$

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

### **Denge Durumu Penetrasyonu**

Denge durumu penetrasyonu aşamasında şok dalgaları temas yüzeyinden hem mermiye hem de hedefe doğru yayılmaktadır. Darbelerin düşük hızlı olanları için ilk şok genliği ihmal edilebilir seviyeye kadar zayıflatılır bu şekilde mermideki hasar gören bölgede basınç noktadan noktaya değişiklik gösterecektir. Ancak kabaca aşağıdaki formül ile kabaca tahmin etmek mümkün olacaktır,

$$P = 1/2 (\rho u_p^2) \quad (1.2)$$

## **Oyuk Oluşumu**

Oyuk oluşumunda, mermi tamamen aşındıktan sonra, hedef malzemede bulunan enerjinin sonucu olarak krater genişlemeye devam etmektedir. Devam eden bu aşamada, şok dalgasının arkasındaki enerji yoğunluğu, malzemenin mukavemetinin üstesinden gelemeyecek kadar az olana kadar devam edecektir. Bu noktada şok dalgası, sıkışan enerji dağılına kadar hedefte ilerlemeye devam eden elastik veya plastik dalgaya indirgenmiş şekilde olacaktır.

## **Geri Kazanım**

Geri kazanım sürecinde, kraterin yüzeyindeki parçalanma ve kraterin altındaki yerde metalin tekrar kristalleşmesi bu aşama da ortaya çıkan, beklenen durumdur (Bhat, 2007). Mermi kinetiği ve penetrasyon mekaniği çalışmalarında, analitik yöntemler kullanılır. Bunlar arasında Johnson-Cook modeli, deneysel verilerin analizi, hidrodinamik penetrasyon modelleri, nümerik simülasyonlar gibi teknikler yer almaktadır (Zukas, 1990).

## **1.3 Zırh Çeşitleri**

Geçmişten günümüze kadar insanlar birçok savaşa katılmışlardır. Bu savaşlarda ve savaş dışında da dışarıdan gelebilecek olası tehlikelere karşı kendini zarar görmekten korumak için ile farklı niteliklere sahip malzemeler kullanmışlardır. Koruyucu örtü birer olarak tanımlanan zırhlar, çeşitli etki veya saldırı biçimlerine karşı korunmak için oluşturulmuş ve zaman içinde sürekli değişerek geliştirilmişlerdir (Bozdoğan, 2015).

Hayvan derisinden ve kemikli yapılardan başlayarak bronz, balistik giysi, çelik, ve seramiklere kadar tarih boyunca birçok malzemeyi zırh olarak kullanılmışlardır. Ateşli silahların yaygınlaşmasıyla, ateşli silahlardan gelebilecek darbelere karşı dayanabilecek kapasite ve nitelikte zırhlar keşfedilmiştir. Zırhları delip geçme özelliği gösteren mermilerin üretilmesi ile bu mermilere karşı koymak için dayanıklı farklı zırh çeşitleri ve modelleri geliştirilmiştir. Sadece metal malzemeler ile değil, aynı zamanda polimer kompozit, tabakalı zırh ve seramik kompozit gibi birçok çeşit malzemenin kullanılmasıyla farklı zırh sistemleri ortaya çıkmıştır. Yüksek hızlı mermilere karşı koruma sağlamak amacıyla geliştirilen bu zırh sistemleri, özel tasarımlar içermektedir. Ana fikir, oldukça sert bir yüzeyle veya arkada sünek, geliştirilen zırh malzemelerinde yumuşak malzeme kullanılıp geliştirilmesi sayesinde zırh kademelerinde merminin etkisini ve hızını en aza indirip, enerjisini sönmüleyip ve hatta mümkünse yok edebilmektedir. Burada temel hedef



maksimum seviyede korunma sağlamakla birlikte hareket yeteneğinin de kısıtlanmamasıdır.

Günümüzde kullanılan farklı türlerdeki zırhlar şunlardır (Bozdoğan, 2015).

- Rulo halindeki Levha Zırhlar
- Dökme Zırhlar
- Derin Çekme Zırhlar
- Dövme Zırhlar
- Çoklu Bileşenli Zırhlar
- Şeffaf Zırhlar
- Fiber Takviye Edilmiş Plastik Zırhlar
- Seramik Zırhlar
- Patlayıcı Madde İçeren Zırhlar
- Kişisel Zırhlar

Tüm canlıların sahip olduğu bir özellik maruz kalınacak tehditleri çeşitli şekillerde ortadan kaldırma içgüdüsüdür. İnsanlar da korunma içgüdüsünü tarih boyunca maruz kaldığı tehlikelere göre güncellemiş ve kendisinin ve sahip olduğu malzemenin korunması amacıyla birçok önlemler almıştır. Bu nedenle, zırh çalışmalarında insanın korunması için personel zırhı; araçların korunması için araç zırhı üzerinde yapılan testler yoğunluk kazanmıştır. Genel olarak kullanılan zırh tipleri, kişisel zırhlar, araç zırhları ve yapısal zırhlar gibi çeşitlendirilmektedir (Meyers, 1994).

### **1.3.1 Araç Zırhında Kullanılan Zırh Malzemeleri**

Zırhlar en yoğun olarak askeri araçlarda kullanılmaktadır. Askeri araç zırhlarının tarihsel gelişimi savaş tarihinin incelenmesi ile kolay bir şekilde incelenebilmektedir. Araç zırhlarının geliştirilmesi, Birinci Dünya Savaşı'nda zırhlı aracın çıkması ile bir başlangıç olarak kabul edilmiştir. Askerleri korumak amacıyla geliştirilen bu araç, 6 ila 8 mm kalınlığında yüksek sertlikte çelikten oluşmuş zırha sahip ve azami hızı saatte 6 km olan tanktır. (Marx, Portanova ve Rabiei, 2019).

Zırhın nitelikleri kadar merminin zırha temas etme durumu da önemli olan bir diğer konudur. Yapılan araştırmalara göre eğik çarpan mermideki mermi erezyonunun daha

yüksek olduğu belirlenmiştir. Merminin zırha çarpış esnasındaki açısının artması zırhın balistik gücüne pozitif yönde bir etki gösterdiği belirlenmiştir (Shokrieh ve ark., 2008).

Zırh yapısını tamamen yüksek yoğunluk değerine sahip olan çeliğe dayandırmak savaş araçlarının ağırlaşmasına ve bu nedenle de yavaşlamasına neden olmaktadır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, savaş araçlarının tehditlerden korumak ve bekasının maksimum düzeye çıkarılması amacıyla araç yüksekliğinin azaltılması yöntemine başlanmıştır. Bunun sonucu olarak aracın görüntüsü küçültülmüş ve azalan yükseklik ile kazanılan ağırlık farkı aracın ön zırhının daha da güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu önlem bile tankın devasa görüntüsünün istenilen ölçüde azaltılmasını mümkün olmamıştır. Bununla birlikte, kalınlığı arttıkça, tutarlılığı azalan ve çalışılması çok zor olan çeliğin yerine kullanılabilir yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur (Hazell, 2015).

Son yıllarda ortaya çıkan, terör artışı ve barışı koruma operasyonlarındaki gelişmeler araç gereksinimlerinde köklü değişiklikleri de beraberinde getirmiştir. Muharebe için tasarlanmış mayın, şarapnel, taktik araçlar, mermi, EYP ve farklı tehditlere karşı koruma içerirken öncelikli görev alanları muharebe alanı olmayan taktik araçların hepsinin aynı zırh koruma düzeyine sahip olmaları gerekmemektedir. Yani, savaş alanındaki araçların zırh korumaları büyük öneme sahipken, manevra kabiliyetinin daha önemli olduğu, muharebe sahasının gerisindeki görevlerde kullanılacak araçların uygun düzeyde korunması yeterli olmaktadır. Ağır zırhlı araçların taşınması, özellikle birliklerin ağırlıkları ile bir yerden başka bir yere taşıma özelliği olan askeri yığınaklanmanın önem kazandığı günümüzde, oldukça kritik bir konudur. Bu zırhlı araçların ağırlıklarının çok olması durumunda daha fazla taşıma aracına (uçak, helikopter, gemi, taşıyıcı vb.) gereksinim duyulacaktır. Bu yüzden ortaya çıkan bu gereksinimlerdeki artış hafif zırh talebini de artırmıştır (Ash, 2016).

Zırhlarda balistik performansı olumlu yönde etkileyen diğer bir unsur ise seramiklerin kalınlıklarıdır. Kalınlık arttığında merminin yüzeye temas etme süresi de artacağından merminin enerji sönmelenmesi daha fazla olacaktır. Ve bu sayede mermideki körelme de fazla olacaktır. Yapılan bir çalışmada, seramik balistik zırhlar kullanılmış ve farklı kalınlıklardaki seramiklerle yapılan balistik testler sonucunda, kalınlığı daha fazla olan seramik zırhın mermiyi daha fazla körelttiği, seramik yüzeyindeki tahribatın daha az olduğu ortaya çıkarılmıştır (Tepeduzu, 2019).

Yapılan bir başka araştırmada  $Al_2O_3-Nb_2O_5$  seramik katmanlı zırha balistik test uygulamışlardır. Dışbükey seramik zırha, 7.62 mm zırh delici mermi ile balistik test uygularak, seramik katmanın mermideki yüksek darbe enerjisini dağıttığını gözlemlemişlerdir (Monteiro, 2016).

Zırhların balistik anlamda incelenmesinde, ön katmanın şekli merminin enerjisini değiştirmektedir. Zırhlarda ön katmanda ileri teknoloji seramiklerin tercih edilme sebebi iyi enerji absorbe edebilmeleridir. Ön katman olarak oluşturulmuş seramik plakaların konkav olmaları çok daha avantajlı bir durumdur. Yapılan araştırmalar sonucunda en ideal zırh şekline ulaşıldığı söylenmesi mümkün olmamakla beraber araştırmalar gittikçe yaklaşıldığını göstermektedir. Akdođan ve Türkbáš yapmış oldukları çalışmada; konkav geometrili ve düz geometrili iki alümina zırha, zırh delici mermiyle balistik test uygulamışlardır. Konkav seramik zırhın hasar dağılımının daha az olduğu, konkav seramik zırhın, düz yüzeyle seramik zırha göre zırh delici merminin kinetik enerjisini daha iyi absorbe ettiği ve daha kısa zamanda daha fazla enerji sönümlendiği belirlenmiştir (Akdođan, 2016). Zırh sistemleri, zaman geçtikçe araştırmalar sonucu tek bir malzeme ile değil çoklu malzemelerle imal edildiği için balistik olarak çok daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir (Feli, 2011). İki ya da daha fazla, farklı veya aynı gruptaki malzemelerin birbiri içinde çözünmeyip daha farklı özellikler meydana getirerek bir araya gelmiş yapılar kompozit malzemeler olarak ifade edilmektedir. Yapılan alışmalar kompozit malzemelerle oluşan zırhlı sistemlerin balistik test sonuçlarının zırhlarda oldukça olumlu yönde olduğunu göstermektedir (Aboudi, 2013).

Kara, deniz ve hava araçlarının kullanım koşullarına göre en uygun zırh malzemeleri ile tasarlanmış olmaları gerekmektedir. Bu durum, geçmişten günümüze iyileşmeye devam etmekte olan zırh tasarımı ve buna bağlı olarak malzeme alanındaki gelişmeleri yakından takip ederek yeni zırh teknolojilerine hâkim olmayı ihtiyaç haline getirmektedir. Araç zırhları, mayınlara, mermilere ve diğer tehditlere yönelik koruma sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle bu zırhlar, kompozit malzemeler, elik, seramik ve bazen de seramik-metal hibrit kompozitlerden meydana gelmektedir.

Her malzemenin avantajları olduğu kadar ve dezavantajları da bulunmaktadır. Malzemelerin zırh performansı üzerinde etkileri çeşitlilik gösterebilmektedir.

### **1.3.1.1 Zırh Çeliği**

Zırh çelikleri farklı karakterli kurşunların (kinetik penetratörler, parçalayıcı savaş başlıkları ve yüksek derecede patlayıcı vb.) çok sayıdaki darbesine karşı çatlamaya, kırılmaya ve parçacıkların kopmasına mukavemet göstermesi nedeniyle zırhlı savaş araçlarında geniş kullanım alanı olduğu bilinen çeliklerdir. Armox440T, Armox500T, Armox600T zırhlı araçlarda yaygın olarak kullanılan çeliklerdir. Mars 440, Mars 500 ve Mars 600 çelikleri ise bunların muadilidir (Armox, 2017). NATO tarafından Brinell 380 metodu ile imal edilmiş 230 mm kalınlığındaki haddelenmiş çeliğin dayanıklılığı referans olarak sayılmaktadır. Kara araçlarının zırhlandırılmasında yaygın olarak dışa daha sert içe ise daha yumuşak çelik katman uygulanmasıdır. Böylelikle sert yüzey mermiyi deforme eder ve daha yumuşak olan çelik katman kalan mermi kinetik enerjisini absorbe edebilmektedir. Günümüzde zırh çelikleri genel olarak savunma amaçlı kullanılmaktadır. Zırh çeliklerinin yüksek kaynak kabiliyeti, üretim maliyetinin düşük olması ve yüksek dayanımından dolayı savunmada tercih edilen bir malzemesidir. En yaygın kullanılan zırh çelikleri, yapı olarak cam, seramik, elyaf ve alüminyum destekli zırh kompozitleri olarak bilinmektedir (Karagöz, 2007).

#### **Armox 500 T**

Yüksek toklukta yüksek sertliğe sahiptir. Armox 500T, birçok alanda kullanım için nominal 500 HB sertliğine sahip, dünyanın en sağlam koruma plakaları arasında bulunmaktadır (Armox, 2017).

#### **Armox 600 T**

Kinetik enerjili tehditlere karşı çok iyi direnç gösteren ekstra yüksek sertliktedir. Armox 600T, aplike zırh plakası olarak veya ağırlığın kritik olduğu yerlerde kullanılır. Armox 600T, 570-640 HBsertlik aralığı ile 4-20 mm arasındaki kalınlıklarda mevcuttur. Mükemmel sertlik/tokluk dengesi sayesinde hem kinetik enerjili tehditlere karşı hemde patlama tehditlerine karşı koruması sağlamaktadır (Armox, 2017).

## **ArmoX Advance**

### **Mekanik Özellikleri**

Yüksek seviyede balistik koruma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu çelik, kurşun, mermi ve şarapnel gibi tehditlere karşı yüksek direnç gösterir. Yüksek darbe dayanımına sahip olma özelliği, çelik plakaların aşınma ve yıpranmaya karşı dayanıklı olmasını sağlar. Sert bir çeliktir ve sert olması nedeniyle çelik plakaların çeşitli hasarlara karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır (ArmoX, 2017).

### **Kimyasal Özellikleri**

Yüksek mukavemetli çeliklerdendir. Bu çelik, krom, molibden, karbon, manganez ve nikel gibi çeşitli elementlerin bir araya gelmesiyle üretilir. İyi kaynaklanabilen bir çeliktir ve bu nedenle çelik plakaların birbirine kaynaklanarak büyük boyutlu zırhların oluşumunu sağlar. Yüksek aşınma direncine sahip olması ile çelik plakaların sürtünme ve darbelere karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Termomekanik haddeleme, sıcak haddeleme, soğuk haddeleme ve sıcak dövme gibi çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak MIL-DTL-46100 gibi zırh çelikleri meydana getirilmektedir. Bu işlemler, çelik plakaların istenen nitelikleri kazanmasını sağlar ve sonrasında kesilerek şekillendirilirler (ArmoX, 2017).

ArmoX advance, platformdan belirli bir mesafede apliance zırh olarak da kullanılabilir (Şekil 1.4). Gelen mermiler, delik kenarlarına veya aradaki sert malzemeye darbelerin neden olduğu mukavemet nedeniyle kırılma eğilimindedir. Zırhın üzerindeki delikler, plakanın alansal yoğunluğunu azaltır ve ayrıca armoX advance olağanüstü bir çoklu vuruş yeteneği kazandıran olası çatlakların yayılmasını sınırlar (ArmoX, 2017).



Şekil 1.4: Armox advance zırhının, platformdan belirli bir mesafede tasarlanmasının şeması (Armox, 2017).

Armox grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1: Armox grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler

Zırh Çelikleri	Kalınlık (mm)	Sertlik (HBW)	Akma Mukavemeti Rp0.2 (min. MPa)	Çekme Mukavemeti Rm (MPa)	Uzama A5 (min.%)	Uzama A50 (min.%)
Armox 500T	3-80	480-540	1250	1450-1750	8	10
Armox 600T	4-20	470-640	1500	2000	7	-
Armox Advance	4-7.9	58-63 HRC	1600	2250	9	-

### Ramor 500

Sertliği yüksek olan balistik zırh çeliğidir. Ramor 500, 2 ile 30 mm arasındaki kalınlıklarda ve 490-560 HB sertliklerde mevcut, yüksek sertlikte bir balistik koruma çeliğidir (SSAB Protection Plate, 2017).

### Mekanik Özellikleri

Yüksek darbe dayanımına sahip olan bir çeliktir. Bu özellik sayesinde çelik plakaların aşınma ve yıpranmaya karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Yüksek sertlik ve mukavemet özellikleri ile de çelik plakaların çeşitli hasarlara karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

### **Kimyasal Özellikleri**

Yüksek mukavemetli bir çeliktir. Bu çelik, krom, molibden, karbon, silikon, mangan, ve nikel gibi çeşitli elementlerin bir araya gelmesiyle üretilmektedir. İyi kaynaklanabilen bir çeliktir ve bu nedenle çelik plakaların birbirine kaynaklanarak büyük boyutlu zırhların oluşumunu sağlar. Yüksek aşınma direncine sahip olması ile çelik plakaların sürtünme ve darbelere karşı dayanıklı olmasını sağlamaktadır. MIL-DTL-32332-CL2 gibi zırh çeliklerinin üretilmesinde özel olarak tasarlanmış termomekanik haddeleme ve sıcak dövme gibi özel olarak tasarlanmış üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu işlemler, çelik plakaların istenen özellikleri kazanmasını sağlar ve sonrasında kesilerek şekillendirilirler (SSAB Protection Plate, 2017).

### **Ramor 550**

(SSAB Protection Plate, 2017).

### **Ramor 600**

Ekstra yüksek sertlikte, 3-6 mm kalınlığında ve 600 HB nominal sertlikte sunulan bir balistik koruma çeliğidir (ThyssenKrupp, 2017).

### **Mars 500**

Balistik direnç ve işlenebilirlik kombinasyonununa sahip yüksek sertlikte bir zırh çeliğidir (Arcelor, 2021).

### **Mars 600**

Yüksek tokluk, çoklu darbelere karşı direnç açısından oldukça güçlü ve 500HB'ye kadar işlenebilirlik ve bir balistik davranışa sahip çok amaçlı kullanılan ultra yüksek sert zırh çeliğidir (Arcelor, 2021).

## Mars 650

Balistik performansı koruyarak ağırlık azaltmanın gerekli olduğu yerlerde aplike zırh konfigürasyonlarda kullanılmak üzere tasarlanmış ultra yüksek sert bir zırh çeliğidir. (Arcelor, 2021).

Tablo 1.2: Mars grubu zırh çeliklerine ait mekanik özellikler

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

Tablo 1.3: Mars grubu çeliklerde balistik korumaya yönelik örnekler

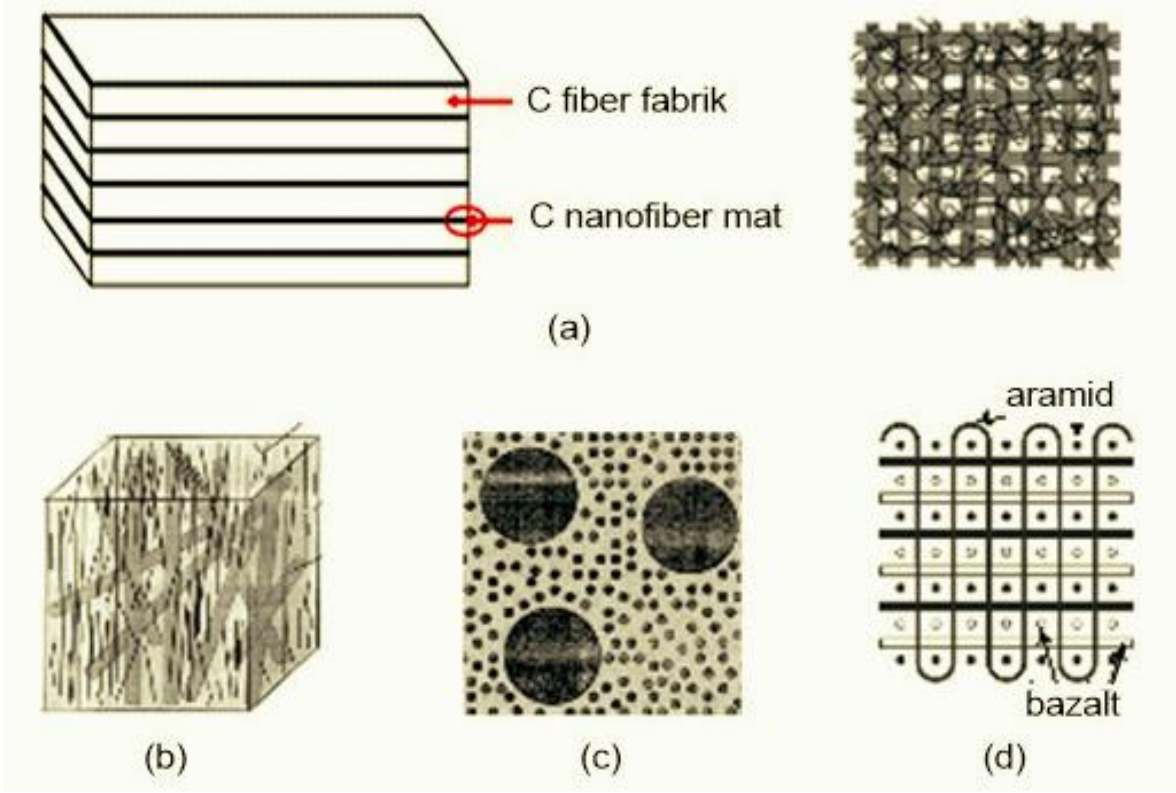
Zırh Çelikleri	Balistik Standart Tehdit Seviyesi	Mühimmat	Alansal Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Mars 500	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	133
Mars 600	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	110
Mars 650	Nato Stanag 4569 Seviye 3-a	7.62x54R API B32	102

### 1.3.1.2 Hibrid Kompozit

Değişen insan ihtiyaçları ve teknolojinin geldiği son nokta ile günümüzde çeşitli özelliklere sahip daha ergonomik malzemelere duyulan ihtiyaç artmıştır. Son yıllarda kompozit malzemelere yönelik artan talepler bu tür malzemelerin performanslarının, yapı ve özelliklerinin geliştirilmesine de ihtiyacı beraberinde getirmiştir (Jenq, 1996).



Kompozit malzemeler çeşitli kullanım alanları nedeniyle darbelere maruz kalmakta ve kullanım ömürlerini kısıtlanmaktadır. Bu yüzden kompozitlerin darbelere karşı göstermiş oldukları düşük ya da yüksek hızda karşılaştıkları dirençlere karşı gösterdikleri davranışlar oldukça önemlidir. Hibrid kompozit malzemeler, iki veya daha fazla takviyeli elemanın matris ile bir araya getirilmesi ile, daha iyi nitelikte yeni bir madde oluşturulması şeklinde tanımlanmaktadır. Tek bir fiber kompozite göre daha iyi bir özellik bileşimi gösteren hibrid kompozitlerden en yaygın kullanılanı, karbon ve cam elyaf takviyeli polimerik reçinedir. Hibrid kompozitler ayrıca konvensiyonel kompozitlerin güçlü fiziksel ve mekanik nitelikleri sayesinde mikrofil kompozitlerin düzgün yüzey oluşumlarını birleştirmek amacıyla geliştirilen kompozit yapı çeşitleridir (Jenq, 1996).



Şekil 1.5: Tipik bazı hibrit kompozitler: (a) C/CNF-epoksi hibrit (multi-skala) kompozitin yandan ve üstten görünüşleri, (b) C/LCP fiber/PEEK hibrit kompozit (3D), (c) C/LCP fiber/PEEK hibrit kompozit, (d) aramid/bazalt fiber/epoksi hibrit kompozit (Roy, 1999).

## 1.4 Uluslararası Balistik Test Standartları

### 1.4.1 Araç Zırhına Yönelik Uluslararası Balistik Test Standartları

Araç zırhlarının performansını değerlendirmek amacıyla oluşturulmuş uluslararası standartlar bulunmaktadır. Standartlar, mühimmatlar, atış mesafesi, kullanılan silahlar, mermi hızı, gibi parametreleri belirleyerek araç zırhlarının test sürecini standart bir hale getirirler. Çok önemli bir konu olan zırhların sınıflandırılması olası bir tehdit karşısında sağlanacak koruma seviyesi ve zırhın taşınabilirliği sorunları, tasarımcılar için her zaman önemli belirteçler arasında bulunmaktadır. Bu yüzden, hangi zırhın ne seviyede koruma sağlayacağına dair önceden belirlenmiş standartlar vardır ve zırh tasarımları bu standartlara göre meydana getirilmektedir. Birleşik Krallık Standartları (HOSDB- Home Office Body Armour Standard), Avrupa Balistik Standartları (CEN- European Committee for Standardization), Rusya Federasyonu Standartları (GOST- Gosudarstvennyy Standart) ve NATO Standartları (STANAG- Standardization Agreement), Amerika Birleşik Devletleri

Ulusal Adalet Kurumu standartları (NIJ- The National Institute of Justice) gibi birçok standart bulunmaktadır.

Bir Standartlaşma Anlaşması olan STANAG (Standardization Agreement), NATO'ya üye ülkeler arasında askeri alandaki standartları belirlemektedir. Üretimleri aynı standartlarda gerçekleştirildiği için bir NATO askeri birimi, araçlarını ya da mühimmatlarını diğer bir ülkenin topraklarında da rahatlıkla kullanabilmektedir. Standardization Agreement 4569 standardı, NATO'nun hafif zırhlı araçlar için belirlediği bir standarttır.

Tablo 1.4'te STANAG 4569 koruma seviyeleri bulunmaktadır.

Tablo 1.4: STANAG 4569 Standardı

Seviye	Mermi Tipi	Mermi Hız (m/s)	Tehdit Tipi	Mesafe
1	5.56 mmx45 M 193	937	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
2	5.56 mm45 NATO	900	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
3	7.62 mmx51 NATO	833	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
4	7.62 mmx39 APIBZ	695	Zırh Delici Çelik Çekirdek Tüfek	30m
5	7.62 mmx54 R B32API	854	AP Tungsten Çekirdek Tüfek	30m
6	7.62 mmx51 AP	930	AP Tungsten Çekirdek Tüfek	30m
7	14.5 mmx114 API / B32	911	Ağır Makineli Zırh Delici Mühimmat Tüfek	200m
8	25 mmx137 APDS- T	1258	Zırh Delici Sabot Mermi	500m

STANAG, NATO üye ülkelerin arasında askeri çalışmaların standartlarını belirleyen bir bildirim olması nedeniyle, ülkeler imal ettiği tüm askeri materyallerin belirtilen standartlara uyumlu olması zorunluluğundadır. Tüm ülkelerin standartlara ulaşabilmesi için, ordunun gelişmeye ihtiyacı olan ülkelere, diğer ülkeler tarafından teknoloji ve bilgi transferi paylaşımı sunulularak yardım edilmektedir. İngilizce ve Fransızca olarak iki ayrı dilde hazırlanan STANAG'a, STANAG'ın silahların kurşun ölçülerini belirleyen STANAG şarjör standardı örnek olarak gösterilebilir. Bu şekilde birçok konuda sınıflandırma kriterleri oluşturulmuş ve tüm bunlar STANAG's olarak ifade edilmektedir.

Balistik test standartlarında ise yaygın yani en çok tercih edilen NIJ (The US National Institute Of justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) standartlarıdır. Ayrıca Türk Standartları Enstitüsü ve NATO standartları da bulunmaktadır. Tablo 1.5’te balistik koruyucu zırhlar için var olan standartlar yer almaktadır.

Tablo 1.5: Balistik koruyucu zırh standartları

STANDART KISALTMASI	STANDART ADI
TS 11164	Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
TS 13349	Askeri Zırhlar- V50 Balistik Hız Deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Troops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920 UK/SC/4697	Balistic Test Method For Personnel Armor
PPAA STD-1989-05	Personnel Protective Armor Assosiation Testing Standarts For Balistic Resistance Of Personnel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements And Methods

Türk standartları Enstitüsü ise bir standart belirleme ihtiyacı duymuş ve TS 11164 ve TS 13349 standartlarını belirlemiştir. Bu standartlar ateşli silahlarda kullanılan vücut zırhları üzerinde deneysel çalışmalar test edilebilmesi için balistik koruma deney çalışmalarını içermektedir. NIJ standartları en çok kullanılan standartların arasında yer almaktadır. NIJ standart içeriğinde, zırhların büyük olmayan kalibreli silahlara karşı balistik testleri için kıstas alınmaktadır.

NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 standartları en çok kullanılan NIJ standartları arasındadır. NIJ standartları ayrıca hangi materyalin hangi mukavemet seviyesinde ve ne kadar korunma sağlayacağı hakkında dökümanlar içermektedir (Reno, 2000).

Tablo 1.6: NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen koruma seviyeleri (NIJ Standard-0101.06 2008).

<b>Koruma Seviyesi</b>	<b>Mermi Tipi</b>	<b>Mermi Ağırlığı (gr)</b>	<b>Mermi Hızı (m/s)</b>	<b>Mesafe (m)</b>
<b>SEVİYE 2A</b>	9 mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi .40S&W, Tam	124	373± 9.1	5
	Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	180	352± 9.1	
<b>SEVİYE 2</b>	9 mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN)	124	398± 9.1	5
	357 Magnum, Metal Kaplı Yumuşak Uçlu Mermi(JSP)	158	436± 9.1	
<b>SEVİYE 3A</b>	.357 SIG, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN)	125	448 ± 9.1	5
	0.44 Magnum, Yarı Kaplamalı Çi Boğ (Çukur) Mermi (SJHP)	240	436± 9.1	
<b>SEVİYE 3</b>	7.62 mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	147	847± 9.1	15
<b>SEVİYE 4</b>	.30 Kalibre Zırh Delici (AP) Mermi	166	878± 9.1	15

### 1.5 Atış Sonrası Hasar Tespiti ve Değerlendirme Süreçleri

Zırh malzemeleri atış sonrası hasarlara maruz kalabilir. Hasar tespiti, görsel inceleme, fiziksel ölçümler, ultrasonik testler, radyografi gibi yöntemlerle yapılabilir. Hasarın tespit edilmesi, zırhın güvenlik ve performansının değerlendirilmesinde önemlidir.

Zırhın ne kadar etkili olduğunu belirlemek için atış sonrası hasarın değerlendirilmesi kritiktir. Bu süreçte, büyüklüğü, derinliği, hasarın tipi ve yayılma alanı gibi etmenler değerlendirilir. Ayrıca, zırhın tamir edilebilirlik düzeyi ve yeniden kullanılabilirlik durumu da göz önünde bulundurulmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ülkemizin stratejik konumu nedeniyle savunma sanayide yüksek teknolojiye sahip silahların ve mühimmatların tedariki ve milli kanallar ile üretimi gittikçe önem kazanmaktadır. Yaklaşık yirmi yıl kadar önce ülkemizde ihtiyaç duyulan savunma sistemlerinin çoğu ithalat ile giderilirken, 2020 yılı itibarıyla bu ihtiyaç oldukça azalmış ülkemiz yerli üretimde oldukça iyi bir duruma geldiği söylenebilmektedir (Ziylan, 2001).

Savunma sanayisinde mühimmat ve silah geliştirme ve üretimi kadar, saldırıların meydana getireceği hasarı en aza indirmek için de balistik zırh çalışmaları oldukça büyük öneme sahip olmuştur. Balistik zırh uygulamaları konusunda sadece askeri alanda değil aynı zamanda araç zırhına yönelik yapılmış ve sayısı her geçen gün artış gösteren önemli düzeyde araştırmalar olduğu dikkat çekmektedir. Temel saldırı mühimmatı, balistik araştırmalarda kullanılan zırhlar için minimum seviyede olması zırh ile sağlanmaktadır (Hazell, 2016). Zırhlar kullanım gayesine göre, ağır zırh, bireysel vücut zırhı ve az ağırlıklı araç zırhı olarak tanımlanmaktadır (Meyers, 1994). Zırh koruması askeri araçlarda, mevcut tehdidin seviyesine ve türüne yönelik oluşturulmaktadır. Genel olarak zırh uygulamaları, oluşturacağı fazla ağırlıktan dolayı aracın manevra kabiliyetini sınırlandırmaktadır. Ancak askeri kara araçlarında manevra kabiliyeti oldukça önemli olduğu için bu kabiliyeti koruyarak araca, balistik koruma sağlanabilmesi oldukça kritiktir (Ash, 2016).

İlk defa 1. Dünya Savaşı sırasında çelik, zırh malzemesi olarak tanklarda kullanılmıştır (Hazell, 2016). 2. Dünya Savaşında ise zırh çelikleri kullanımı başlamıştır. Zırh çelikleri farklı çelik türlerine göre mevcut yüksek sertliği ve tokluğundan dolayı günümüzde araç zırh malzemelerinde bulunmaktadır (Bitlisli, 2019). Çeliklerin yüksek ağırlığı, araç zırh çalışmalarında tamamı çelikten meydana gelmiş zırhların kullanımı için büyük problem oluşturmaktadır (Übeyli, 2007). Bu yüzden araç zırhlarını daha kullanışlı hale getirmek için ağırlığı azaltırken sertlik konusunda taviz vermemek adına kullanılan ilk ürün seramiklerdir. Kara araçlarında en çok bulunan seramik, göstermiş olduğu maliyet ve performans gibi avantajlar göz önünde bulundurulduğunda alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Ash, 2016). Ağırlığın çok daha önemli uygulamalarda silisyum karbür (SiC) ya da bor karbür (B<sub>4</sub>C) gibi çok daha fazla etki gösterebilen seramik yapıların kullanımı tercih edilmektedir (Güneş, 2015).

Seramiklerin tek başına bir zırh malzemesi olarak kullanılmamasının nedeni ise, seramiklerin kırılma yapısına mermi isabeti ve patlayıcı mühimmatla karşılaşması sonucunda dağılma gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir (Lopez, 2005).

Gelişmekte olan silah ve savunma teknolojisi ile hafif zırhlı askeri kara araçlarına uygun balistik koruma sunabilen hafif zırh ürünlerinde ihtiyaç gittikçe fazlaşmıştır (Lopez, 2005). Diğer yandan savunma sanayinde balistik risklere yönelik hafif zırh ürünlerinin kullanımının yaygınlaştırılması bilhassa yakıt tasarrufu sağlamak ve araçların manevra güçlerinin artırılması yönünden de çok büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden, hafif zırh uygulamalarının geliştirilebilmeleri için çeliklere seçeneğe olabilecek zırh malzemelerinin en az çelikler kadar balistik koruma sağlayabilen ancak çelik kadar ağır olmayan, az maliyete sahip üretiminin ve kullanılabilirliğinin fazla olması bu alanda bulunması gereken en önemli unsurdur. Bu saydığımız hususların hepsine sahip olabilecek ürünlerin temelini de kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Balistik tehditlere yönelik koruyucu zırh üretimine yönelik yapılan araştırmalar neticesinde monolitik metallerden başka lamine zırh, polimer kompozit zırh, seramik kompozit zırh gibi farklı kompozit zırh ürünleri geliştirilmiştir. Yapılan uygulamaların temeli, mermiyi oldukça sert bir şekilde kırdıktan sonra sünek ve yumuşak bir arka destek ürünü ile mermi ya da zırhta kalmış enerjiyi sıfırlamaktır (Meyers, 1994).

Yapılan bir çalışmada seramik zırhların sahip olduğu nitelikler ve balistik vuruşlarda kırılma durumları kullanılması ile çoklu vuruş gücü bulunan ucuz ve hafif zırhların elde edilebileceği vurgulanmıştır (Medvedovski, 2010). Bir çalışmada çeliğin önünde seramik tabaka kullanarak monolitik metalik ürünlere kıyasla daha kuvvetli bir balistik kuvvet ortaya koyduğunu bildirmiştir (Übeyli, 2011). Flores ve ark. (2011), yaptıkları araştırmalarında Aralık olarak 775-950 m/s hız seviyelerinde 7.62 mm APM2 mermisinden etkilenebilen alüminyumdan ya da çelikten meydana gelmiş monolitik, çift ve üç katmanlı metal katmanların ya da bu ürünlerin kombinasyonunun balistik gücünü sayısal modelleme ile çalışmışlardır. Benzer üründen yapılan çok katmanlı tabakalara göre monolitik yani tek katlı tabakaların, balistik güç değerinin diğerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Rahman ve ark. (2016) birbirinden farklı katman konfigürasyonlarının, başlangıç hızlarının ve ağırlıklarının, 7.62 mm kalibreli APM2 kurşun darbesine karşı balistik limit hızına, kalıcı deformasyona ve penetrasyon sürecine olan etkisi üzerine çalışmışlardır. Al7075 T6 alüminyum alaşımı ve HSS çelik plaka katmanlarının, çift katmanlı kullanılmasına kıyasla üç katmanlı kompozit yapının balistik gücünün daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Polimer esaslı malzemeler ile birleştirilerek elde edilen katmanlı kompozit plakalar balistik

testlerde başarılı olmamıştır. Borlanmış çelik plakalar arasına metal tozları yerleştirilerek sıcak presleme yöntemi ile üretilen tabakalı kompozit plakalar balistik testlerde başarılı sonuç vermiş olup, proje hedefine başarıyla ulaşılmıştır.

Yapılan bir araştırmada polimer yapıştırıcı, borlanmış çelik plakalar ve metal tozlarından oluşan metal tabakalı borür kompozit zırhın, BR2 riskine yönelik gerekli olan balistik performansı ortaya koyamadığını ifade etmiştir (Gençer, 2016). Bu durumun nedenini ise çelik tabakaların yeterince kalın olmaması, uygulanan borürün çelik katmanların süneklik ve tokluğunu düşürmesi ile açıklamışlardır. Bir başka araştırmada tungsten alaşımı merminin Alümina/603 zırh çeliği kompozitine penetrasyonuna yönelik simülasyon ve deneyler yaparak çalışmışlardır. Ve araştırma sonucunda, seramik kalınlık arttıkça arka çelik plakada meydana gelen penetrasyon derinliğinde azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca seramiğin mermi etki bölgesinde çok ciddi şekilde ufalandığı ortaya çıkmıştır. Bu gibi dezavantajların etkisini en aza indirmek için kompozit zırhlara, polimer kompozitlerin eklendiği araştırmalarda yapılmıştır (Jinzhu ve ark., 2017).

Literatüre bakıldığında reçine ve cam lifi karışımından meydana getirilen polimer katmanlar, seramik veya yüksek mukavemetli fiber astarlar, lamine polietilenlerle yapıştırılıp kompozit zırh prototipini oluşturulduğu görülmektedir.

Polimer lamine kompozit zırhlarda en sık aramid elyaftan üretilmiş reçine ve örgü kumaşın sıcak preslenmesiyle yapılan monolit plakalar kullanımda tercih edilen ürünlerdir. İlk olarak, 1960'lı yıllarda ticarileştirilen Aramidler, 1973'lerde Kevlar ismi ile piyasada bulunmuştur. Günümüzde hala en çok tanınan ve en çok kullanılan aramidlerden biri Kevlardır. Aramid elyaflar günümüzde vücut zırhı, koruyucu eldivenler, askeri kasklar, araç zırhı ve yanmaz olarak tasarlanan kıyafetlerde kullanıldığı görülmektedir.

Üneler çalışmasında, poliestere reçineler ve cam elyaf kumaştan meydana gelmiş kompozit laminalar tasarlamıştır. Ayrıca kompozit yapının balistik performansını artırabilmek için alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tabakaları ve alüminyum (Al) plakaları kullanılarak çok tabakalı sandviç laminalar oluşturulmuştur. Bu plakalar, parça benzetimli mermi, 7.62 mm zırh delici (AP) ve ball mermi kullanılarak 420-1173 m/s hızlarında balistik test süreçlerine sokulmuştur. Bu testler sonucunda, polimer kompozitlerin 7.62 mm parça benzetimli mermeğe yönelik 1001 m/s mermi süratına kadar dayanıklı ama bir destek tabakası olmaksızın AP mermileri durdurmada oldukça zayıf kaldığını tespit etmişlerdir.

Seramik tabakalı sandviç paneller de AP ve FSP mermilerine yönelik gerçekleştirilen tüm sürat aralıklarında sadece kısmi penetrasyon göstermiş olup bunların sonucunda çok



tabakalı kompozit oluşumların balistik risklere yönelik hafif zırh ürünleri olarak kullanışlı olduğu vurgulanmıştır (Ünaler, 2005).

Başaran 2007’de yaptığı tez çalışmasında silikon karbür ve kevlar zırh birleşimi için optimum seramik-kompozit kalınlık oranını yaklaşık olarak 2 tespit etmiştir. Feli ve ark. (2011), tungsten mermi etkisinde seramik ön yüzlü kompozit plakaların balistik perforasyonunun simülasyonunu LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile yapmışlardır. Dinamik eksplisit analizlerinde, iki boyutlu, plaka üst katmanını Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşturmakta arka katmanını ise aramid elyaf takviyeli kompozit meydana getirmektedir. Artan mermi hızıyla birlikte merminin koniklik açısının azaldığını ve artan darbe hızıyla ara katmanlarda delaminasyonun etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Zırh üzerinde kullanacak materyal olarak borür esaslı seramik/metal katmanlı kompozit materyaller imal eden Gençer, bunun için AISI 1010 çeliğinin yüzeyi kutu borlama tekniğiyle borlanarak hazırlanan borür-metal plakalar iki farklı yol ile çok katmanlı kompozit ürünlere dönüştürülmüştür. Birinci bölümünde, borür-çelik plakalar arasına metal tozları konularak sıcak presleme yolu ile lamine kompozitler oluşturulmuştur. Araştırmanın ikinci bölümünde ise, plakalar polimer esaslı yapıştırıcılar ile birbirlerine yapıştırılarak tabakalı kompozitler meydana getirilmiştir. Son olarak çok katmanlı kompozit plakalar, Kevlar destek üzerine yerleştirilmiştir. Araştırmanın sonunda DIN EN 1063 standardında ve BR2 tehdit seviyesinde balistik testler uygulanmıştır. Polimer esaslı ürünlerle yapıştırılarak meydana getirilen kompozit plakaların yapılan balistik testlerde başarısız olduğu ve tabakalı kompozitlerle birleştirilen metal tozların ise yapılan testlerde başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Gençer, 2016). Demircioğlunun yaptığı çalışmada 9 mm’ lik mermi riskine yönelik askeri araçların zırhlandırılması amacıyla Kevlar ve St37 sac ürün kullanılarak oluşturulan zırh malzemesini balistik testlere tabi tutmuşlardır. Araştırma sonunda zırhlı araç için en kullanışlı konstrüksiyonun 11 kat Kevlar ve St37 sac’tan meydana gelen zırh malzemesinin olduğu sonucuna varılmıştır (Demircioğlu, 2011). Yapılan bu tez çalışmasında da 7.62mm kalibreli kurşun çekirdekli G3 mermisini durdurmak amacıyla katmanlı hibrit kompozit zırh oluşumu ve balistik direncinin incelenmesi planlanmıştır. Literatürden farklı önerilen zırhlarda borlama işlemi uygulanmış çelik ön katman ve arka tarafa destek olarak çelik levha arasına yerleştirilen kevlar plaka bulunmaktadır.

Bu sayede borlamadan kaynaklanan sertliğin artması ve kurşun bozulması artarken bütün kesitte sünekliğin ve tokluğun etkisinin devam ettiği, mermi karşılama tabakası oluşturulması hedeflenmektedir. Daha sonra esnek bir ara tabaka olan Kevlar-epoksi polimer kompozit tabakası ile beraber darbe şokunun sıfırlanması ve rijit olan bir arka

tarafı çelik olan destek katmanı ile tam balistik kuvvetin oluşturulabilmesi amaçlanmaktadır.

Bir diğer çalışmada, zırhlı kara araçlarında kullanılan kompozit malzemelerine takviye sağlaması için kullanılan Cam Elyafı, Hibrit, Çok Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE), Karbon ve Aramid ile matris malzemesi olarak reçine kullanılmadan PE film tabakaları ile kat kat yerleştirilmesinin ardından ayarlanabilir bir pres altında sıcaklık ve basınç ile birleştirilerek çok katmanlı bir yapı meydana getirilmiştir (Bitlisli, 2019). Meydana getirilen bu farklı materyal özelliklerini barındıran çok katmanlı plakalara, balistik uygulamalardaki NIJ standartlarına uygun, 8 gram ağırlığında çekirdeği olan 9x19, 5 metre mesafeden Parabellum FMJ fişekler ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Atışların sonucunda 5 farklı türde kumaş takviyeli katmanlı kompozit malzemelerin balistik güçleri, ölçülmüş ve karşılaştırılarak analizlere tabi tutulmuştur. Kumaş takviyeler üretim yöntemi ile ince bir polietilen film, basınç ve sıcaklıkta kompozit plaklar meydana getirilmiştir. Araştırmalar neticesinde, kritik sonuçlardan biri kompozit plakaların eğilme rijitlikleri artması ile birlikte delinme ihtimalinin de artması olduğudur. Diğer bir sonuç, alansal yoğunluk katmanlı, kompozit yapının performansına etkileyebilen önemli bir unsur olduğudur. Yapılan araştırma neticesinde UHMWPE katmanlı kompozitlerin en düşük kalınlığa ve en düşük alansal yoğunluğun mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları göstermektedir ki eğilme rijitliği yüksek olması nedeniyle, merminin numunede plakayı ön yüzünden delmesiyle başlayan bölgesel hasar meydana getirmektedir. Ancak mermi fazla hasara uğramış bir halde çıkış deliğinde kalmıştır. Kompozit plakada delinme gerçekleşmiş olsa da mermi enerjisinin tamamının plakada sönmüldüğü görülmüştür. Bu yüzden kompozitlerin bilhassa araç zırhlama konusunda araç ağırlığında oldukça yüksek bir artış meydana getirmeyeceği düşünülmektedir. Karbon elyaf esaslı kumaşlardan meydana gelen katmanlı kompozit yapı üzerinde ise delinme meydana gelmemiştir. Ancak yine de alansal yoğunluğun oldukça yüksek olmasından kaynaklı araç zırhlamada sıkça tercih edilir olması anlamlıdır. Bitlisli (2019) yapmış olduğu çalışma kapsamında katmanlı kompozitler için UHMWPE, Aramid+UHMWPE, Karbon, Hibrit ve Cam elyafı numuneler üzerinde balistik testler gerçekleştirmiştir.

Testlerin sonucunda UHMWPE ve Karbon elyafı numunelerin kurşun çekirdeğini durdurduğu, Aramid+UHMWPE ve Cam elyafı numunelerde kurşun çekirdeğinin geçtiği ve son olarak Karbomid elyaf numunede de kurşun çekirdeğinin numunenin tam arka yüzeyinden çıkıp orada kaldığı gözlemlenmiştir. İşlemlerde kullanılan basıncın artmasıyla birlikte ürünün sertliği de artmakta ve oluşan hasar azalmaktadır.

Mermi giriş deliğinin UHMWPE’de büyüklüğü, birinci katmanda merminin kritik seviyede hasar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Aramid+UHMWPE diziliminde birinci katmanın UHMWPE olması, uç geometrisini önemli düzeyde bozmuş ve çıkış delik genişliği büyük bulunmuştur. Hibrit Kompozitler için kalın çelik telli, ince çelik telli ve St37 Sac’lı numunelerde uygulanan balistik testler sonucunda içinde ince çelik tel barındıran tasarımdan merminin geçtiği, içinde St37 sac ve aynı zamanda kalın çelik tel barındıran örnek maddelerin ise mermiyi geçirmediği tespit edilmiştir. Ayrıca bu merminin geçmediği tasarımlar su jeti ile bazı yerlerden kesilerek ve hasar tespiti numunenin içyapısına bakılarak tespit edilmiştir. Burada iki ayrı durdurma sistemi belirlenmiştir. Kalın çelik telli numunede, birinci durdurma mekanizmasına göre kurşun çekirdeğindeki hasar oldukça az seviyede, bu da kurşun çekirdeğinin ise daha çok materyallerin kefaset farkı etkisinden dolayı süratini kaybettiğini göstermektedir. İkinci durdurma mekanizmasında da içinde kalın çelik tel bulunan örnekten çıkan kurşun çekirdeklerinde telden kalan izler gözlemlenmiştir. Meydana gelen hasarın az olmasının nedeni temas edilen bölge alanının düşük olmasıdır. Sac plakalı örnekteki durdurma sisteminde ise kurşun çekirdeği ile daha fazla temas meydana getirdiği için kurşun çekirdeğindeki hasar daha fazla olmuş ve malzeme, daha sert malzeme etkisi ortaya çıkarmıştır.

Alarçin (2014) tarafından yapılan “Savunma Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli çalışmada savunma sanayiinde kullanımı yaygın olan bazı kompozit malzemelerin balistik nitelikleri yaptığı deneyler ile gözlemlenmiştir. Birincil olarak farklı yapılarıdaki polietilen ve aramid kumaşlar birleştirilmiş kompozit malzemelere atış hızları farklı olarak deneylere tabi tutulmuştur. Birtakım kompozit materyallere şartlandırma işlemi uygulanmış ve şartlandırmanın balistik performansa olan etkileri gözlemlenmiştir. Deneyler, laboratuvar şartlarında NIJ 0101.04 ve STANAG 2920 standartlarına göre uygulanmıştır. Sonuç olarak, kompozit materyallerde katman sayısında artış meydana geldikçe V50 hızlarının ekseriyetle yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompozit materyallere uygulanan şartlandırmanın balistik performansta negatif bir etki meydana getirmemiştir.

NIJ0101.04 standardına göre III standartlarında koruma sağlaması düşünülen polietilen materyallerden imal edilmiş sert zırh katmanlar üzerine atışlar yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalarda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir. Aramid materyallerden üretilmiş yumuşak zırhların çarpma faktörüne göre V50 hızlarının belirlenmesi için testler uygulanmıştır. Katman sayıları 16 ve 34 kat olan zırhlara uygulanan testlerde 422 ve 683 m/s arasında değişik çıktılar tespit edilmiştir. STANAG 2920’ye göre balistik kompozit

yeleklerde V50 hızı olarak düşünölen değer 620 m/s'dir. Bu belirtilen değer birincil olarak 30 katta görölmüştür ama sınır değer olduğundan çarpma faktörü arttırılması yolu tercih edilmiştir. 31.katta V50 hızı 600 m/s, 32.katta V50 hızı 610 m/s, 33.katta V50 hızı 623 m/s ve 34.katta ise V50 hızı 645 m/s olarak tespit edilmiştir. Bu işlemlerden sonra sağlama yapmak için 34.kat bir test daha tabi tutulmuş, V50 hızı 683 m/s'ye artış göstermiş ve kompozit yelek tasarımında kullanılan yumuşak zırhın 34 kat olmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Balistik kompozit yelek olarak kullanılan tasarımda 34 kat netleştirildikten sonra, NIJ 0101.04 standartlarına göre III-A sınıflandırmasında koruma sağladığı ve NIJ 0101.04 standardına göre III-A sınıflandırmasında koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuca ek olarak; balistik koruyucu özelliği barındıran yeleklerin genellikle NIJ 0101.04 standardına göre III sınıflandırmasında koruma sağladığı, çok az da olsa tehdidin yüksek olduğu zamanlarda farklı özelliklere sahip olan zırhlar kullanılarak (bor-karbür veya seramik zırhlar vb.) IV seviyesinde koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmada ise III seviyesinde koruma sağlayan polietilen katmanlar üzerinde deneyler uygulanmıştır. 34 kat aramid ve 45 kat polietilen katmanlara atış yapılmış, 829 m/s hızda delinerek başarılı olamamış, 34 kat aramid ve 50 kat polietilen katmanlara atış yapılmış, 836 m/s hızda delinerek başarılı olamamış, 34 kat aramid ve 60 kat polietilen plaka üzerine atışlar yapılmış, delinme gerçekleşmemiştir. Fakat çöküntü miktarları (III seviyesinde maksimum 44 mm. olmalı) atışların hepsinde 38 mm seviyesine ulaşıldığından dolayı plakanın daha güvenilir olması için 5 kat daha fazla polietilen kumaş ilave edilerek atışlar gerçekleşmiştir. 34 kat aramid ve 65 kat polietilen plakalara uygulanan atışlara, delinme meydana gelmemiş, en yüksek çöküntü miktarı 35 mm olduğundan 65 kata karar verilerek netleştirilmiştir. Yapılan testin sağlamlasının yapılması için 34 kat aramid ve 65 kat polietilen plaka üstüne 10 mm yüzdürücü malzeme eklenerek bir teste daha tabi tutulmuş ve yine olumlu sonuçlar elde edilmiş, ama test sonuçlarına bakıldığında yüzdürücü materyalin balistik koruma noktasında bir yarar sağlanmadığı tespit edilmiştir.

Fakat daha sünek yani yumuşak malzeme olduğu dolayı, plakada oluşan çöküntünün personel üzerinde oluşabilecek etkiyi azaltabileceği düşünölmüş, daha sonra 34 kat aramid ve 65 kat polietilen 10 dakika süre boyunca suda bekletilip atış yapılmış ve güvenli olduğu tespit edilmiştir. Bahse konu materyalin kötü hava şartlarında da (yağmur vb.) kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Aydın ve ark. (2015) tarafından yapılan "*Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Yükü Altındaki Davranışı Üzerinde Farklı Seramik*

*Bileşenlerinin Etkisinin İncelenmesi*“ isimli bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada katmanlı yapıya seramik ön yüzlü kompozit zırhları yüksek dayanımları ve yüksek rijitlikleri sebebiyle balistik sistemlerde çoğunluk olarak kullanılan ve gerilmeler nedeniyle oluşan ayrılmalar (delaminasyon) incelenmiştir. Belirtilen negatif etkiler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM) kullanılarak azaltılabileceği ya da ortadan kaldırılabileceği ön görülmüştür. Bu çalışma ile farklı seramik bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda balistik darbe yüklemesi altında meydana gelen hasar mekanizmaları ve deformasyonları deneysel olarak incelenmiştir. Plakalarda, seramik yoğun tabakaların çarpma yüzeyine yakın olarak yerleştirilmesi sonucu merminin sahip olduğu enerjinin bir kısmı ön yüzeyde bulunan seramiği kırmak için harcanacak ve sert bir yüzeyle karşılaşan mermi kalınlaşarak nüfuziyet gücünü kaybedecektir. Metal oranının arttığı plaka arka yüzeyi ise mermi enerjisinin büyük bir kısmını sönmeyecektir. Bu mekanizma göz önünde bulunarak yapılan balistik testlerde %70 seramik %30 metal karışıma sahip katman, atış yönünde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Atış sonrası deformasyon görüntülerine bakıldığında mermi Al-B4C fonksiyonel kademelendirilmiş plaka içerisine geçmiş ve plaka içerisinde kalmıştır, bu kalıntıyı plakanın arka yüzeyinde ise şişme meydana getirmiştir. Çarpma etkisi ile bu kuvvete maruz kalan plakalarda kalınlıkları boyunca bir şok dalgası ortaya çıkar. Arka yüzeyde oluşan şok dalgası plaka ön tarafında basma gerilmesi meydana getirirken arka yüzeye ulaşan bu dalgalar çekme gerilmesine neden olur. Eğer bu arka yüzeylerde meydana gelen çekme gerilmeleri plakanın akma dayanımından daha yüksek değerlere kadar ulaşırsa materyalin kırılmasına neden olurlar. Al-B4C plaka arka yüzeyinde ortaya çıkan radyal şekillerde ki çatlaklarda bu duruma örnek olarak verilebilir. Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda ise tam delinme meydana gelmiş olup Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşenlere haiz plaka daha fazla bozulmaya uğramıştır. Tüm veriler incelenip sonuca bakıldığında ise alüminyum ile seramik tozları arasındaki reaktivite açısından SiC tozunun diğer seramik tozlara oranla daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

MIL-STD-662F standardında tam nüfuziyet, merminin hedefe çarpma sonrasında, mermiye ait bir parçacığın veya hedef malzemesine ait bir parçacığın şahit plakayı delmesi olarak tanımlanır. Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada, Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaya göre katmanlar arası delaminasyonun daha fazla olduğu ve arka yüz deformasyon çapının arttığı görülmektedir. Al-B4C plakada mermi yaklaşık olarak plaka kalınlığının yarısına kadar nüfuz etmiş ve plaka arka yüzeyinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca plakada seramik %70 bor karbür %30

alüminyum karışıma sahip katman ile altındaki katman arasında delaminasyon olduğu görülmektedir. Kalaycıoğlu ve ark. (2021) “*Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlarda Balistik Hasar Sonrası Çelik Kısımında Oluşan Deformasyonun İncelenmesi*” isimli çalışmalarında, ön yüzünde seramik katman bulunan çelik zırh tasarımının 7,62 mm kalibreye sahip olan kurşun etkisi sonucu arka bölgesindeki çelik tabakada meydana gelen plastik bozulmanın sonucu analitik ve sayısal analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Zırh sisteminde seramik ön yüzey için 10 mm kalınlığında Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) altıgen seramikler kullanılmış ve arka yüzey için S235JR çeliğinden üretilmiş 6 mm kalınlığında plaka tercih edilmiştir. Analitik hesaplamalarda çelik plakada oluşan deformasyona ait sehim eğrisi matematiksel model yardımıyla hesaplanmış ve Matlab programında geliştirilen bir ara yüz ile çizdirilmiştir. Plakanın mermi darbesine karşı göstermiş olduğu balistik davranışın sayısal analizleri Ansys/Explicit Dynamic sonlu eleman programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde çelik malzeme modeli olarak yüksek hızlarda plastik şekil değişimine imkân sağlayan Johnson-Cook malzeme modeli, seramik malzeme modeli olarak ise Johnson-Holmquist malzeme modeli seçilmiştir. Seramik ön yüzlü çelik zırh sisteminin balistik deneyleri, sayısal analiz modeline uygun olarak üretilen zırh numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda çelik plakada oluşan sehim eğrileri ve maksimum deformasyon değerleri deney sonuçları ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu deneyde seramik ön yüze sahip olan çelik zırh tasarımına gelen mermi darbesinin zırh tasarımı üzerinde ki çelik plakada ortaya çıkan plastik bozulma durumu birçok şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler analitik, sayısal ve deneysel olarak yapılmıştır. Yapılan bu incelemelerle beraber zırh tasarımının S235JR (St 37) çelik plakasında ortaya çıkan plastik Von Mises efektif gerilme durumu ise balistik sayısal analiz yöntemi ile tespit edilmiş ve S235JR (St 37) zırh üzerinde bulunan çelik tabakanın alçak olmayan gerinim hızlarında haiz olduğu karşı koyma gücü değerleri ile kıyaslanmıştır.

7,62 mm kalibreli merminin etkisi sonrası zırhın çelik tabakasında meydana gelen plastik bozulmaya ait azami yer değiştirme değeri; deneysel bakıldığında 14,87 mm, analitik bakıldığında; 17,11 mm ve sonlu elemanlar analiz yönteminde ise 12,74 mm olarak belirlenmiştir. Tespit edilen sonuçlar mütalaa edildiğinde analitik yöntemi %15, sonlu elemanlar yöntemi ise %14'lük istenmeyen sapma nicelikleri deneysel sonuçlarda bir limite doğru yaklaşmıştır. Zırh tasarımının atış bilimindeki sayısal analizi yapıldığında çelik tabakada mermi darbesi neticesi üst limit 698 MPa von Mises efektif plastik gerilmesinin meydana geldiği, bu meydana gelen değerde tabakada herhangi bir delik oluşumunun ve yırtılmanın oluşmadığı saptanmıştır. S235JR çelik tasarımının 42.296,5 s-1

şekil değiştirme hızında malzeme modeli yardımıyla çizdirilen plastik gerçek gerilme-birim şekil dönüşüm çizgesinde (JC-Dinamik) materyalin akma dayanımının 602 MPa ve en yüksek güç ile karşılaştığı andaki gerilmenin 751 MPa olduğu saptanmıştır. Plakada oluşan 698 MPa von Mises efektif plastik gerilmenin analitik olarak saptanan S235JR materyalinin 42.296,5 s-1 gerinim hızında kazandığı akma ve çekme dayanım değerlerinden ne yüksek ne alçak olduğu yani arada bir değerde kaldığı saptanmıştır. Çelik tabakada meydana gelen gerilme değerinin analitik olarak hesaplanmış materyale haiz en yüksek kuvvet ile karşılaştığı andaki gerilme değerinden daha küçük olması, tabakada sadece plastik bozulma meydana geleceği ve herhangi bir delik oluşma ve yırtılmanın meydana gelmeyeceği anlamı çıkarılmaktadır. Oluşan durumun ayrıca yapılan sayısal analiz neticesi ve deney sonuçları ile de ahenk içerisinde olduğu saptanmıştır.

Lo'pez-Puente, ve ark. (2005) “*The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study*” isimli makalelerinde, yapışkan tabaka kalınlığının alümina/alüminyum zırhların verimlilik durumları üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Zırh delici mermiyi, mermiyi tutmaya yetecek kalınlıkta ve aynı zamanda balistik sınıra yakın panellere karşı atışla tam ölçekli testler yapılmış ve farklı kalınlıktaki yapışkan tabaka için sertleştirilmiş epoksi reçinesinden yararlanılmıştır. Deneysel sonuçları analiz etmek için sayısal simülasyonlar kullanılmış ve analizler dikkate alınan hafif korumanın ideal performansı için en iyi yapışkan tabaka kalınlığının nasıl olması gerektiği ve yapıştırıcı katman kalınlığının hafif seramik zırhların verimliliği üzerindeki etkisi üzerine yapılan deneysel testler ve sayısal simülasyonla analiz edilen çalışma, zırhın etkinliğinin yapışkan kalınlığıyla ilgili üç farklı etkiden etkilendiğini göstermiştir.

- Yapışkan üzerindeki kesme gerilimi kalın bir tabaka ile azalır, bozulmasını önler ve darbe sonrası destek plakasına tutturulan seramik malzemeyi tutar,
- Sert karonun bükülmesini engelleyen ince yapışkan tabakalar ile seramik dökülmeleri azalır ve destek levhası tarafından enerji emilimi kalın bir tabaka ile sağlanır.
- Bu nedenle, yapışkan tabakanın kalınlığındaki bir değişiklik, zırhın etkinliğini etkiler ve dikkate alınan her alümina/alüminyum konfigürasyonu için 0.3 mm'lik bir değerin optimum olduğu bulunmuştur.

Zaera ve ark. (2000) “*Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact*” isimli çalışmalarında seramik karoları metalik bir plakaya yapıştırmak için kullanılan yapışkan tabakanın seramik/metal karışık zırhların balistik performansı üzerindeki etkisi hem matematiksel hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmada iki tür yapıştırıcı, poliüretan, kauçukla modifiye edilmiş epoksi reçine ve farklı kalınlıklar ele alınmıştır. Bir alüminyum plaka ile desteklenen alümina karoları etkileyen düşük kalibreli mermilerin sayısal simülasyonları yapılmıştır. Yapıştırıcı tabakasının seramik/metal zırh kaplamasının balistik verimliliği üzerindeki etkisine ilişkin mevcut yetersiz bilgiler ışığında, bu çalışma diğer yazarlar tarafından kabul edilen etkisini analiz etmeye çalışılmıştır. Çalışma, zırhın performansını en çok etkileyen iki değişkene odaklanmış ve bunları seramik malzemenin parçalanma derecesi ve itici enerjinin destek plakasına iletimi olarak belirlemiştir. Bunlardan ilki seramiğin aşındırma kapasitesini olumsuz etkilemekte, ikincisi ise metalin plastik deformasyonunda enerjinin dağılmasına olumlu bir etki sağlamıştır. Çalışma, daha kalın yapışkan tabakasının, merminin kinetik enerjisini emmeye yardımcı olan metal destek plakasında daha geniş bir plastik deformasyon alanına yol açtığını göstermiştir. Öte yandan, yapıştırıcı katman kalınlaştığında seramik karo daha erken parçalandığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı, parçalanmalarını geciktirmek ve merminin aşınmasını arttırmak için özellikle daha kalın karolarda mümkün olduğu kadar azaltılmalıdır. Ayrıca, deneysel sonuçlar, daha kalın bir yapışkan tabakasının bitişik karolar üzerindeki etkiyi azalttığını ve parçalanma riskinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Hetherington ve ark. (1991) tarafından yapılan “*An Investigation Into The Energy Absorbed During Ballistic Perforation Of Composite Armours*” isimli çalışma makalesinde, 0,5 inçlik mermilerin bir dizi seramik kompozit hedefi deldiği bir deneysel çalışma programını açıklamaktadır. Perforasyon sırasında emilen enerji miktarı, teorik bir modeldeki tahminlerle ve kompozit zırhların optimal tasarımında yapılan bazı çıkarımlarla karşılaştırmaktadır.

- (1) Belirli bir tehdit seviyesi kullanan deneysel bir çalışma programı, bir dizi seramik / GFRP kompozit zırh tarafından emilen enerji ile Florence modeli tarafından öngörülen enerji arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermiştir.
- (2) Bu modelin diğer tehdit kategorileri için eşit derecede etkili bir şekilde çalışıp çalışmadığını araştırmak için daha fazla denemeye ihtiyaç vardır.
- (3) Bir kompozit zırh tasarımını optimize etmek için Floransa modeline dayalı bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin tüm tehdit seviyeleri ve zırh türleri için genel uygulanabilirliği hala belirlenmelidir.

Zaera ve ark. (1998) “*Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on Ceramic/Metal Light Weight Armours*” isimli makalelerinde, mermilerin seramik/metal ilave zırhlar üzerindeki balistik etkisini simüle etmek için geliştirilmiş yeni bir analitik



model sunmuşlardır. Model, merminin seramik karoya nüfuz etmesi için Tate ve Alekseevskiis denkleminde dayanırken, metalik desteğin tepkisi Woodward ve Den Reijer modellerinin fikirleri izlenerek modellenmiştir. Sonuç, orta kalibreli mermilerin seramik/metal ek zırhlar üzerindeki gerçek ön testlerinin artık kütlesi ve artık hızı verileriyle kontrol edilen tamamen yeni bir analitik modeldir. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında gözlemlenen uyum, modelin geçerliliğini doğrulamıştır. Bu nedenle geliştirilen model, seramik/metal zırh tasarımının optimizasyonu için faydalı bir araç olabilir. Seramik/metal zırhlar üzerindeki balistik etkiyi simüle etmek için yeni bir analitik model sunulmuştur. Model, seramik/metal zırhlar için çok kullanışlı bir tasarım aracı olarak, balistik sınırların, artık hızların ve artık kütlelerin çok hızlı bir şekilde hesaplanmasına izin verir. Model hem küçük kalibreli mermiler hem de orta kalibreli mermiler için kullanılmış, farklı seramik/metal hedefleri farklı çarpma açılarında delinmiş, analitik sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir.

Benloulou ve ark. (1998) “*A New Analytical Model To Simulate Impact Onto Ceramic/Composite Armors*” isimli çalışmalarında ise seramik / kompozit zırhlara karşı çok basit, tek boyutlu ve tamamen analitik bir balistik etki modeli sunulmuştur. Sunulan model bozulmamış seramik, kırık seramik ve kompozitin ilk tepkisi ve kumaş tepkisi ve başarısızlığı olarak üç aşamaya bölünmüştür. Her aşamada modelin varsayımları ayrıca kontrol edilerek mühendislik alanında makul sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar; birleşik modelden elde edilen sonuçların daha önce elde edilmiş sınırlı deneysel verilerle kısmen uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Fawaz ve ark. (2004) “*Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours*” isimli makalelerinde, 7.62 AP mermi ile normal ve eğik darbelere maruz kaldığında seramik-kompozit zırhların performansını araştıran üç boyutlu sonlu eleman modellerini sunmuşlardır. Sonlu eleman sonuçları, sırasıyla hem normal hem de eğik etki için farklı kaynaklardan alınan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Penetrasyon süreçlerinin simülasyonunun yanı sıra darbe bölgeleri içindeki enerji ve gerilme dağılımlarının değerlendirilmesi, normal ve eğik balistik etki fenomeni arasındaki farkı vurgulamaktadır. Bulgular, zamana karşı küresel kinetik, iç ve toplam enerji dağılımlarının normal ve eğik etki için benzer olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, seramik-kompozit ara yüzdeki interlaminar gerilmeler ve eğik darbe için mermi-seramik ara yüzündeki kuvvetlerin normal çarpma için olanlardan daha küçük olduğu bulunmuştur. Son olarak, eğik darbeye mermi erozyonunun normal çarpışmadakinden biraz daha fazla olduğu gözlenmiştir. 7.62 AP merminin seramik-kompozit zırhlar üzerindeki normal ve

eğik etkilerinin sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, mermi erozyonunu, seramik oluşumunu ve ayrıca seramik ve kompozit plakaların hatalarını tespit etme yeteneğine sahiptir. İlk hesaplamalar, mevcut deneysel verilerle makul bir korelasyon göstermiş ve bu sayısal modellerin hafif zırhların geliştirilmiş bir tasarımı için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Çeşitli sayısal simülasyonlar, 315 m/s hızda normal ve eğik etkinin penetrasyon süreçleri, enerji dağılımları, gerilmeler vb. konusunda ayrıntıları öğrenmeye yardımcı olmuştur. Özellikle, küresel kinetik, iç ve toplam enerjinin zamana göre dağılımlarının normal ve eğik etki için benzer olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, seramik-kompozit ara yüzdeki interlaminar gerilmeler ve eğik darbe için mermi-seramik ara yüzündeki kuvvetler, normal çarpma için olanlardan daha küçük bulunmuştur. Ayrıca, bir merminin zırh üzerine eğik bir şekilde çarptığı zaman, delme sırasında açısını değiştirerek merminin ucunda eliptik bir boşluk oluşturduğu bulunmuştur. Son olarak, eğik çarpışmadaki mermi erozyonunun normal etkiden biraz daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Vemuri (2011) “*Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles*” isimli çalışmasında, metalik, seramik ve kompozit zırh malzemelerindeki çeşitli yaklaşımları ve ilerlemeleri ve savaş senaryolarında zırhlı araçların beka kabiliyetini iyileştirmek için gerekli olan yeni dinamik zırh sistemlerini incelemiştir. Sonuç olarak ana muharebe tankları için zırhın, üzerinde seçici KE mermilerini büyük ölçüde bozmak için bir akıllı dinamik zırh (IDA) modülleri katmanının ve şişkin zırh modüllerinin bulunduğu temel pasif zırh modülleri (PAM) içeren çok katmanlı bir zırh koruma sistemi olarak oluşturulabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca Taretin üst ve yan taraflarına eklenen bir aktif koruma sisteminin (APS), HEAT ve diğer tehditlerin vurma şansını azaltabileceğini söylemişlerdir.

Cortes ve ark. (1992) araştırmasında ise “*Numerical Modelling Of Normal Impact On Ceramic Composite Armours*” isimli makalelerinde, silindirik mermiler tarafından çarpıldığında metalik plakalarla desteklenen seramik hedeflerin penetrasyonu incelemiştir. Bunu başarmak için, normal çarpma probleminin iki boyutlu aksel simetrik sayısal analizi yapılmıştır. Delicinin önündeki ince öğütülmüş seramik bölgesindeki makroskopik malzeme davranışı, iç sürtünme ve hacimsel genişlemeyi hesaba katan yapısal bir model aracılığıyla modellenmiştir. Hesaplama miktarı, bir hasar gelişimi denklemi aracılığıyla değerlendirilir ve akma geriliminin, hidrostatik basınç, iç sürtünmenin bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır.

İlgili metalik malzemeler için, kopma durumu olan bir elasto-plastik davranış dikkate alınmıştır. Dahası, bir erozyon durumu, yırtılmış malzeme penetrasyon sürecindeki rolünü

tamamen eylemsiz etkilerle sınırladığında bir sınır durumu olarak dahil edilmiştir. Bu şekilde, vuran merminin hedefe nüfuz etme sürecinin ayrıntılı bir resmi elde edilmiş ve sonra sayısal analizin sonuçları, daha önce Reijer tarafından X-ışını tekniği kullanılarak yapılan proje-hedef etkileşiminin deneysel gözlemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, 730 ila 1070 m/s arasında değişen hızlarda, silindirik mermilerin kompozit seramik zırhlar üzerindeki normal etkisinin tam iki boyutlu sayısal modellemesini sunmaktadır. Bu çalışmanın belirli koşullarında, hasar gelişim denkleminin zırhın balistik verimliliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Aslında, dinamik kırılma parametrelerindeki bir değişikliğin zırh performansının tahminini önemli ölçüde değiştirebileceği gözlenmiştir. Aksine, iç sürtünme katsayısı, kırılma kinetiğine benzer bir öneme sahip gibi görünmemektedir. Bunun nedeni, sayısal simülasyonlarda (deneylerde olduğu gibi) merminin esas olarak seramiği delmek yerine önündeki seramiği itmesi ve ufulanmış seramikte sadece orta dereceli basınçlara yol açması olabilir. Hesaplamaların deneysel verilerle karşılaştırılması, zırh tepkisinin ana eğilimlerinin sayısal model tarafından oldukça iyi temsil edildiğini düşündüren dikkate değer bir uyum göstermektedir. Çekme altındaki seramik kırılmasının hasar kinetiği, çarpma probleminin tam sayısal modellemesinde temel bir husus olduğundan, gelecekte bu konuda ek araştırmalara ihtiyaç duyulacağı belirtilmiştir.

Wilkins (1978) ise “*Mechanics Of Penetration And Perforation*” isimli çalışmasında hedeflerin perforasyon mekanizmaları açısından analiz etmek için bir bilgisayar programı kullanmıştır. Hesaplamaları, mutlak sonuçlara ulaşmak için değil fiziksel bir süreci izole etmek ve önemli malzeme parametrelerini tanımlamak için yapmıştır. Sonuç olarak hâkim mekanizmaların hedef ve mermi geometrisinden etkilendiğini ve mekanizmanın kullanılan malzemelerin özelliklerindeki küçük değişimlere karşı duyarlı olabileceğini söylemiştir.

Shockey (1990) “*Failure Phenomenology Of Confined Ceramic Targets And Impacting Rods*” konulu araştırma üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada uzun bir çubuğun çelik kaplı bir seramik bloğa nüfuz ettiği mekanizma, çeşitli hızlarda darbe deneyleri yapılarak ve geri kazanılan hedeflerdeki kırılma ve deformasyon incelenmiştir. Ana işlemler, ilerleyen penetranın ön yüzeyine bitişik küçük bir seramik hacminin ezilmesi ve ardından ince parçaların hücum yönüne yan ve sonra ters yönde akışıdır.

Sonuçlar, dinamik sıkıştırma kırılma enerjisi ve ince parçalanmış malzemenin sürtünme, akış ve aşındırıcı özellikleri gibi geleneksel olmayan malzeme özelliklerinin, sınırlı seramiklerin penetrasyon direncini yönettiğini göstermektedir. Bu penetrasyon

mekanizmaları anlayışı, sırasıyla ilgili malzeme özelliklerini ölçmek ve penetrasyon davranışını tahmin etmek için özel testlerin ve başarısızlık modellerinin geliştirilmesine rehberlik etmek için kullanılabilir. Bu penetrasyon kavramına göre, penetrasyon direncini yöneten bir seramiğin özellikleri arasında basınç dayanımı ve sertliği, toz haline getirme özellikleri, ince parçaların sürtünme akış özellikleri ve parça aşındırıcılığı bulunmaktadır. Penetrasyona karşı ilk direnç, bir seramiğin basınç dayanımı veya sertliği ile sağlanır. Etkilenen bir cismi deforme etmek, kırmak ve saptırmak için yüksek basınç mukavemeti arzu edilir. Düşük en-boy oranlarına sahip mermiler, seramiğin gücü merminin gücünü aşarsa durdurulabilir. Uzun çubuklar gibi yüksek en-boy oranlı mermiler, uçta ağır deformasyona ve kırılma hasarına maruz kalabilir, ancak sağlam uzak kısım ilerlemeye ve seramiğe girmeye devam edecektir. Bu nedenle, yüksek seramik basınç dayanımı, penetrasyona ancak belirli bir dereceye kadar dayanabilir. Uzun bir çarpma çubuğunun uyguladığı gerilmeler sonunda seramik malzemeyi penetranın ön yüzeyinin hemen önündeki küçük bir bölgede toz haline getirecektir. Aşağıdaki paragrafta açıklandığı gibi, bir nüfuz edicinin sınırlı bir seramik hedefte ilerlemesi için toz haline getirilmiş bir bölgenin üretimi gerekli bir koşuldur. Bu nedenle, penetrasyon direnci için ufalanmaya direnç arzu edilir. Çoğu seramik için özgül kırılma yüzey enerjisi gerilim açısından küçük olsa da büyük dinamik sıkıştırma ve kesme kuvvetleri altında bir birim kopma yüzey alanı üretmek için gereken enerji önemli ölçüde daha büyük olabilir. Bu nedenle, tozun yüzey alanını oluştururken emilen enerji, penetrasyon direnci için önemli bir seramik özelliği olabilir. Bir delici, yalnızca yolundaki malzeme onun önüne veya yanına itilirse ilerleyebilir. Ağır arka hapsetme nedeniyle, ezilmiş seramik, metal zırh plakalarının tıkanarak bozulacağı şekilde arka yüzeyden ileri ve dışarı itilemez. Seramik gözeneksiz ve yanlamasına sıkı bir şekilde hapsedilmişse, toz haline getirilmiş malzeme yana itilemez. Gerçekte, tek çare, tozun nüfuz edici tarafından üretilen boşluk boyunca nüfuz etme yönünün tersine akmasıdır. Bu nedenle, toz haline getirilmiş ve genişlemiş seramik yüksek basınç altında akmalıdır ve bu nedenle, ufalanmış seramiğin sürtünme akış özelliği penetrasyon direncini etkilemelidir. Bu özelliğin basınca, gerinim oranına ve parçaların boyutuna ve şekline bağlı olmasını ve bir Mohr-Coulomb tipi eğri ile tanımlanabilmesini bekliyoruz. Kalın, oldukça sınırlı seramik bloklar için, seramik parçaların sürtünme akış özelliği, penetrasyon direnci için en önemli malzeme özelliği olabilir.

Son olarak, bir seramiğin nüfuz eden bir çubuğu aşındırma yeteneği, penetrasyon direnci için istenen bir özelliktir. Erozyon, öndeki çubuk yüzeyinin brüt yerel plastik akışı ile olabilirken, çubuk malzemesini oyan, çizen, kesen veya başka şekilde aşındıran seramik

parçalar, gelen kütleyi azaltabilir ve aşındırıcı olmayan hedef malzemelerden daha erken penetrasyonu sonlandırabilir. Aşınma ve erozyon, nüfuz ediciye ve hedef malzemeye, parça geometrisine ve boyutuna, basınca, sıcaklığa ve akış hızına bağlı olarak bir dizi mekanizma ile meydana gelebilir. Bu nedenle, bir seramik malzemenin aşındırıcı özelliklerini tehditle eşleştirerek optimal aşındırıcı davranış elde edilebilir. Burada bildirilen gözlemler ve çıkarılan penetrasyon, çubukların penetrasyon kabiliyetini yöneten özellikleri tanımlamak için de kullanılabilir. Penetratör olarak etkili olabilmesi için, bir malzemenin hedefte yüksek gerilimler üretmek için yüksek yoğunluğa, ön kenarda mantar oluşumuna direnmek için yüksek akma mukavemetine, kayma bandı ve perdeleme eğilimini bastırmak için yüksek bir sertleşme oranına sahip olması gerekir. Çubuk şaftı arızasına karşı eğilime direnmek için kırılma tokluğu ve seramik parçacıkların neden olduğu çizilme ve aşınmaya karşı yüksek aşınma direnci. Gelecekteki çalışmalarda, bu penetrasyon fenomenolojisi anlayışı, yüksek sınırlama basıncı altında bozulmamış ve parçalanmış seramik malzemenin dinamik kesme mukavemetini ve akış direncini ölçen testler geliştirmek ve seramik tasarımına yardımcı olmak için kullanılacak hesaplamalı penetrasyon modelleri geliştirmek için kullanılacaktır.

Galvez ve ark. (2009) “*Analysis Of Failure Of Add-On Armour For Vehicle Protection Against Ballistic Impact*” isimli çalışmalarında barış gücü güçlerinin çatışma bölgelerine konuşlandırılması açısından sahip oldukları bazı zırh sistemlerinin gelişmiş tehditleri karşılayabilecek yeterlilikte olmadığını ifade etmişlerdir. Bu durum özellikle yalnızca düşük kalibreli mühimmatlara karşı korumaya sahip zırhlı hafif araçlar için geçerlidir. Dolayısıyla bu problemin çözümü için ek zırhların geliştirilmesinin ve üretilmesinin göreve göre ayarlanacak koruma sistemi olarak kullanabileceğini söylemişlerdir. Ayrıca geliştirilen ek zırhların, hafif zırhlı araçların balistik darbeye karşı korunmasını iyileştirmek için uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Navarro ve ark. (1993) “*Some On Observations On The Normal Impact Ceramic Faced Armours Backed By Composite Plates*” isimli çalışmalarında 7.62 NATO mermisinin elyaflı bir zırhla desteklenen seramik yüzlü kompozit zırhlara çarptığı deneylerin sonuçlarını açıklamaktadır. Değerlendirilen seramikler AD-96 alümina ve bir bor nitrür ve silikon nitrür karışımıdır.

Destek, ya bir matris içine gömülü aramid elyaflardan ya da bir polietilen reçine matrisine gömülü polietilen elyaflardan yapılmış kompozit bir plaka denek olarak kullanılmıştır. Kompozit plakadan bir hava odasıyla ayrılmış, yüksek mukavemetli aramid kumaş katmanlarından oluşan ek bir paket de dâhil edilmiştir. Zırhların tasarımı, kompozit zırhlar

için Hetherington ve Rajagopalan tarafından önerilen bir enerji soğurma modeline dayanıyordu. Seçilen konfigürasyonlar için gerçekleştirilen normal darbe deneyleri, modelin lifli bir zırhla desteklenen kompozit zırhların balistik sınırını oldukça iyi tahmin edebildiğini ortaya çıkardı. Bu çalışma, ek bir lifli zırhla desteklenen seramik yüzü bir kompozit zırh üzerindeki normal etkinin deneysel bir çalışmasını sunmaktadır. Zırhlar, balistik sınırı tahmin etmek için bir enerji modeline göre 7.62 NATO mermisini yenmek için tasarlandı ve daha sonra Hetherington ve Rajagopalan tarafından yeniden çalışılmıştır. Modellerine göre tasarlanan zırhların oldukça iyi balistik performansı bulunmuş ve bu da modelin hafif zırhlar için tasarım kriteri olarak yeteneklerini göstermektedir.

Woodward (1990) ise “*Simple One-Dimensional Approach To Modelling Ceramic Composite Armour Defeat*” isimli çalışmasında, seramik kompozit zırhın delinmesi için temel fiziksel süreçleri vurgulayan ve balistik direncin fiziksel özellikleri ve darbe parametrelerine yaklaşık olarak bağımlılığını gösteren basit bir model seti geliştirmiştir. Seramik kompozit zırh başarısızlığının temel özellikleri (örneğin, çatlak oluşumu, ince destek plakalarının çanak çatlama, kalın paketlenme plakalarının delinmesi ve mermi erozyonu) hesaplamalara izin veren basit modeller üretmek için malzeme ivmesini yığınla birleştirilir. Hem ince hem de kalın metalik arkalıklara sahip seramik hedefler üzerinde hesaplamalar geniş bir deneysel veri yelpazesi ile karşılaştırılır ve aynı zamanda deliciler ile seramik kompozit zırhların etkileşiminin yönlerini tartışmak için kullanılır. Modellerin deney ile iyi korelasyonu, seramik kompozit zırh yenilgisini incelemek için mevcut yaklaşımın yararlılığını göstermektedir. Bu çalışma, seramik kompozit zırhların delinmesi için iki model sunmuştur. Bunlardan biri, seramik çatlak etkisi altında bükülerek deforme olan ve çift eksenli bir gerilme kırılmasıyla başarısız olan hedeflerin ince destek plakaları ile delinmesi için, diğeri ise seramik aşınırken arkalığın deforme olmadığı ve ardından kalan mermi parçası tarafından delindiği kalın arkalıkları hedefler içindir. Malzeme bloklarının hareket dinamiklerini hem seramik hem de arkalık için makroskopik başarısızlık kriterleri ile işleyen modelde seramik parçalanmanın detaylarından kaçınılmıştır. Hesaplamaların deneysel verilerle karşılaştırılması, iyi bir korelasyon olduğunu gösterir ve modeller, deneysel verilerin analizine yardımcı olmak ve tasarım için parametrik çalışmalar için kullanılabilir.

Mukavemet parametresi olarak seramik sertliği kullanılır, ancak balistik darbeye uygun seramik mukavemetinin dikkate alınması, daha ileri araştırmalar için önemli bir husus olarak kabul edilir.

Hetherington (1992) isimli bilim insanı “*The Optimization Of Two Component Composite Armours*” isimli makalesinde, iki bileşenli kompozit zırhların araçlar için yüksek ağırlık koruması sağlama potansiyeline dikkat çekmekte ve bu tür sistemlerin tasarımını optimize etmek için bir yöntem oluşturmayı amaçlamaktadır. Mevcut bir teorik model kullanılarak, ön plakanın arka plaka kalınlığına oranının optimum değeri için ifadeler geliştirilmiştir. Bir dizi alümina /alüminyum hedefe 7.62 mm ateşlenen bir programının sonuçları sunulmuştur.

Deneysel olarak;

- Zırh sistemlerini optimize etmek, zırhlı savaş araçlarının beka kabiliyetini artırmak için çok önemlidir.
- Florence modelinin geliştirilmesi, iki bileşenli zırh sisteminin optimum performansı için ön, arka plaka kalınlığının oranının tahmin edilmesine izin verir.
- Alümina/alüminyum kombinasyonuna karşı 7.62AP mühimmatlı bir deneme programı, modelin kullanılabilirliğini doğrulamıştır.
- Diğer malzeme kombinasyonları için modelin geçerliliğini değerlendirmek için daha fazla çalışma yapılmaktadır.

Lemieux ve ark. (1994) “*The Effect Of Obliquity On The Ballistic Performance Of Two Component Composite Armours*” isimli çalışmalarında, kompozit zırhların eğik darbeye maruz kaldıklarındaki performanslarını incelemektedir. Deneysel sonuçlar, 7.62 mm top mühimmat kullanılarak seramik-alüminyum hedefler üzerinde yapılan bir deneme programından yapılmıştır. Sonuçlar, eğimli bir seramik kompozit zırh plakasının, çarpma hattına dik olarak düzenlenmiş olandan daha iyi performans göstereceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu şekilde elde edilen iyileştirme derecesi, çelik zırhlardan çok daha azdır. Dahası, seramik kompozit zırhlar kullanılarak savunmasız bir bölgeye minimum ağırlık koruması sağladığı gösterilmiştir. Seramik kompozit zırhların açıldırılmasıyla elde edilen kalınlık azaltma derecesi, çelik zırhlara göre çok daha azdır. Eğik etkinin teorik bir modeli sunulmakta ve deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyon gösterdiği gösterilmiştir.

- (1) Deneysel kanıtlar, eğimli bir kompozit zırh plakasının, kalınlık bazında, darbeye dik yönlendirilmiş bir zırh plakasından daha etkili olduğunu doğrulamaktadır.
- (2) Seramik kompozit zırhlar söz konusu olduğunda, zırhı tehdede dik olacak şekilde düzenleyerek, hassas bir bölgeye minimum ağırlıkta koruma sağlanır.
- (3) Kalınlık temelinde performanstaki gelişme, çelik zırhlardan daha azdır.
- (4) Çarpma enerjisinin eliptik bir alana yayılmasına dayanan teorik bir model, deneysel verilerle iyi korelasyon gösterir.

Prasad ve ark. (2014) “*Investigations On Mechanical Properties of Aluminum Hybrid Composites* “ isimli çalışmalarında ağırlıkça %2,4,6 ve 8 ağırlıkça SiC partiküllerinin çeşitli hacim ile güçlendirilmiş alüminyum kompozitlerin eşit oranlarda imal edilmesi için çift karıştırmalı döküm işlemi kullanmışlardır.

Kompozitlerin mikro yapısal karakterizasyonunu incelemek için taramalı elektron mikroskobu (model JSM-6610LV) kullanılmıştır. Artan takviye hacim ile hibrit kompozitin sertliğinin ve gözenekliliğinin arttığı ve artan partikül içeriği ile yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Takviye partiküllerinin ağırlık yüzdesi fraksiyonunun artmasıyla akma dayanımının arttığı, takviyedeki artışla uzamanın azaldığı görülmüştür. Hibrit kompozitlerin artış enstrümanı muhtemelen dislokasyon yoğunluğundaki artıştan kaynaklanmakta olduğu düşünülmüştür. Brinell sertlik ölçümü kullanılarak baz alaşımı ve kompozitler üzerinde sistematik bir çalışma yapılmış ve karşılık gelen yaş sertleşme eğrileri elde edilmiştir. Baz alüminyum alaşımına göre takviye ilave edilerek kompozitlerin çökme kinetiğinin hızlandığı görülmüştür. Bu, yaşlanma ısıl işlemiyle maksimum sertliği elde etme süresini etkili bir şekilde azaltmıştır.

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- %8'e kadar pirinç külü ve SiC partikülleri içeren hibrit metal matris kompozitler, çift karıştırma döküm işlemi kullanılarak kolayca üretilebilir.
- Pirinç kabuğu külü ve SiC'nin matriste düzgün dağılımı gözlenmiştir.
- Donatı yüzdesindeki artışla hibrit kompozitlerin yoğunluğu azalırken parazite ve sertlik artmıştır.
- Akma dayanımı ve nihai gerilme dayanımı, SiC içeriğindeki artışla artar. Hibrit kompozitlerin güç artışı, dislokasyon yoğunluğundaki artışa bağlanabilir.



- Baz alüminyum alaşımına göre donatı eklenerek çökme kinetiğinin hızlandığı görülmüştür. Bu etki, yaşlandırma ısıl işlemiyle maksimum sertliği elde etme süresini kısaltmıştır. İyileştirmenin nedeni, ısıl uyumsuzluğa bağlı olarak metal matrisin daha yüksek çıkma yoğunluğu ile ilgilidir.

Gururaja ve ark. (2012) “*A Review on Recent Applications and Future Prospectus of Hybrid Composites*” isimli çalışmalarında hibrit kompozit malzemelerin, mukavemet-ağırlık oranı, düşük maliyet ve imalat kolaylığının gerekli olduğu kapsamlı mühendislik uygulamalarına sahip olduğunu belirlemiştir. Hibrit kompozitler, kompozit malzemelerde gerçekleştirilemeyen çekme modülü, basınç dayanımı ve darbe dayanımı gibi özelliklerin kombinasyonunu sağladığı ve hibrit kompozitler genellikle, farklı tipte liflerin özelliklerinin bir kombinasyonunun elde edilmesi gerektiğinde veya uzunlamasına ve yanal mekanik performanslar gerektiğinde kullanıldığı belirlenmiştir. Bu makale, hibrit kompozit malzeme teknolojisinin mevcut malzemeler ve özellikler açısından mevcut durumunun bir incelemesini ve akıllı hibrit kompozitlerin bazı ayrıntıları da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalara vurgu yaparak açık ve spekülatif bazı eğilimlerin ana hatlarını açıklamıştır. Hibrit Kompozitlerin çeşitli uygulamaları ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlara varılabilir. İlk olarak, ulaşım endüstrisi, havacılık, denizcilik, otomotiv endüstrileri ve elektronik endüstrisi için bileşenler gibi çeşitli endüstrilere uygulanabilen hibrit laminatların üretim sürecinin detayları sağlanmıştır. En son teknolojiyle ilişkili olguların daha iyi anlaşılması için Hibrit kompozitlerin uygulamalarına önemli çabalar odaklanmıştır. Materyal söz konusu olduğunda, cam ve karbon fiber takviyeli kompozitler eşit olarak incelenmiş bununla birlikte, matris malzemesi olarak epoksi reçinesi tercih edilmektedir. Hibrit kompozitler üzerine bu literatüre yönelik bir çaba, hibrit kompozit teknolojisi üzerinde çalışma peşinde olan araştırmacılara ve bilim insanlarına yol göstereceği düşünülmektedir.

Safri ve ark. (2018) “*Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review*” isimli çalışmalarında doğal elyaf bazlı polimer kompozitlerin, düşük darbe performansları nedeniyle gelişmiş yapısal sistemlerde sınırlı uygulamalara sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, doğal lifler, ürün ağırlığını azaltma, malzeme maliyetini düşürme ve yenilenebilirlik için büyük potansiyele sahiptir. Doğal/sentetik lifler, doğal/doğal lifler veya sentetik liflerin bir kombinasyonundan yapılan hibrit kompozitler, bu malzemelerin özel mekanik ve darbe özelliklerinden dolayı yapısal uygulamalar için hem araştırmacıların hem de endüstrinin ilgisini çekmektedir. Hibridizasyon süreci,

kompozit malzemelerin performansını güçlendirmenin ve iyileştirmenin en önemli ve daha verimli yollarından biridir. Bu makale, yapısal özelliklerini iyileştirmek amacıyla üretilen hibrit kompozitlerin darbe özelliklerini incelemekte ve özellikle doğal ve sentetik elyaflarla güçlendirilmiş hibrit kompozitlerin darbe dayanımı ve penetrasyon davranışının yanı sıra modern yapıya uygunluğuna odaklanmaktadır. Son zamanlarda, hibrit kompozitler, şu anda kullanılan malzeme olan metal ile karşılaştırıldığında mükemmel özellikleri nedeniyle yapısal endüstriler tarafından kapsamlı bir şekilde kabul görmüştür. Bu makale, darbe performansı ve penetrasyon davranışı dahil olmak üzere sentetik-sentetik, doğal-sentetik ve doğal-doğal elyaf kompozit malzemelere odaklanan araştırmayı gözden geçirmiştir. Sentetik-sentetik elyaf hibrit kompozitler, metalik malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek spesifik malzeme özelliklerine sahip kompozitler sağlayabilir. Hem yüksek hem de düşük hızlı darbe testleri altında sentetik sentetik fiber hibrit kompozitlerin performansını iyileştirmeye yönelik birçok araştırma yapılmıştır; ancak, aynı zamanda mükemmel yapısal özelliklere sahip olduğundan, darbe testlerinde doğal-sentetik elyaf kompozit malzemelerin performansı üzerindeki etkiyi değerlendirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Numunelerin Hazırlanması

Metal ön ve arka katman malzemesi olarak AISI 304 paslanmaz çelik seçilmiş olup, 100x100x5 mm ölçülerinde kesilerek hazırlanmıştır. Bu seçimde alaşımsız karbon çeliği yerine (27J) paslanmaz çelik (155J) tercih edilmesinin sebebi 5 kat daha fazla yüksek darbe enerjisine dayanabilmesidir. Hazırlanan paslanmaz çelik plakalar kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Böylece yüzeyde oldukça sert bir borür katmanı oluşturulurken iç bölgesinin ise tokluğunu muhafaza etmesi mümkün olacaktır. Borlama işlemi sonucunda oluşturulan bu sert borür katman ile mermi daha fazla deforme edilebilecek ve kinetik enerjinin azaltılması mümkün olacaktır.

##### 3.1.1 Borlama işlemi

Kullanılacak olan ve üretici firma tarafından belirtilen paslanmaz çelik numunelerin kimyasal bileşimi % 18-20 krom , % 8-10 nikel, % 2,0 magnezyum, % 0,75 silisyum, % 0,08 karbon , %0,045 potasyum, 0.03 wt% kükürt ve geri kalan demir elementlerinden meydana gelmektedir.

Hazırlanan numunelerin bütün yüzeyleri düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için ( $R_a < 0.25 \mu\text{m}$ ) zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi SiC (800 grit) zımpara kâğıdına kalından inceye olarak ve sıralı şekilde zımpara kâğıtları tercih edilerek uygulanmıştır. Zımparalama işlemi bittikten sonra asetonda temizlenen numuneler 15 dakika süresince damıtılmış su ile ultrasonik temizleme işlemi uygulanarak olası yağ ve diğer kirlerden arındırılmıştır. Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler, ağzı hiçbir şekilde hava almayacak şekilde kapatılabilen inconel 718 Ni esaslı süper alaşımdan yapılan potanın ortasına yerleştirilmiştir. Daha sonra bu pota ağzı sıkıca kapatılarak 950°C olarak ısıtılan fırına 3 saat boyunca yerleştirilmiş ve orada bekletilmiştir. Numunelere uygulanacak borlama işlemi için % 90 B<sub>4</sub>C + % 10 NaBF<sub>4</sub> içeriğe sahip borlama tozları tercih edilmiştir. Numunelerin sıcaklıkları 950 °C'den 700 °C kadar düşürülmesi için her yapılan borlama işlemi sonrasında fırında bekletilerek her 1 dakikada 10 °C lik soğuma sağlanmıştır. Bu soğuma işleminden sonra numuneler için doğal soğuma sağlanması için açık havada bekletilerek numunelerin soğuması sağlanmıştır. Bu oluşan borür katmanların mikroyapı incelemesi SEM ve EDS analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmiş, ölçülmesi istenen katman sertlik değerleri için ise nanoindentasyon yöntemi kullanılmıştır.

### 3.1.2 Kevlar Plaka Üretimi

Kevlar (Kevlar 29) materyal örgü kumaş formundaki 12 kat olacak bir şekilde üst üste dizilen ve her bir katman yüzeyine prepreg reçinesi kullanılarak el yatırma tekniği ile kompozit katman hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yüzey alanına göre 10-15 ton basma kuvveti altında ve 120°C de uygulanan sıcak presleme işlemi sonrasında 6 mm kalınlıktaki kevlar plakalar üretilmiştir.

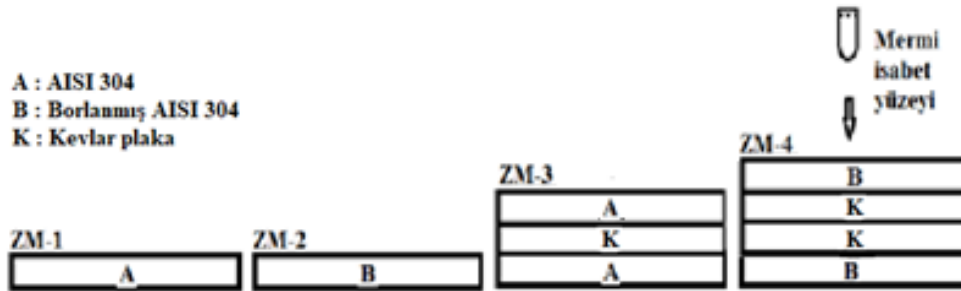


Şekil 3.1: Kevlar plaka üretimi a) kumaş ve reçine uygulaması b) sıcak presleme sonrası kesilerek hazırlanan kevlar zırh katmanı.

Numune Kevlar plaka haline getirildikten sonra (Şekil 3.1) 100x100x6 mm ölçülerinde su jeti ile kesilerek 1 Kevlar zırh katmanı (Şekil 3.1) elde edilmiştir.

### 3.2 Zırh Katmanlarının Belirlenmesi ve Balistik Testler

Hazırlanan zırhın balistik performansının değerlendirilmesi için tasarlanan zırh modeline ait (ZM) ait şema gösterimi Şekil 3.2'da verilmiştir.



Şekil 3.2: Zırh modeli kombinasyonları.

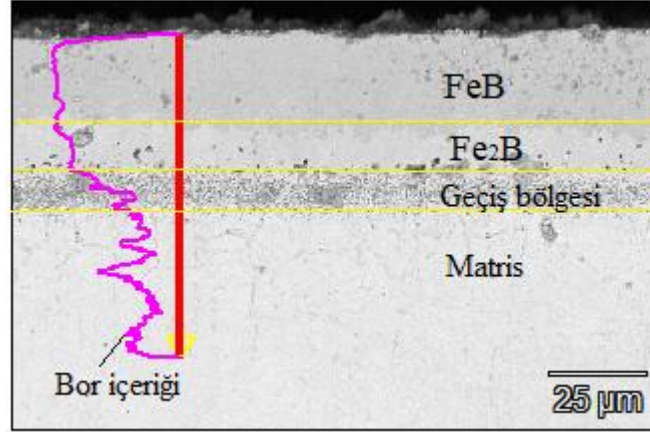
Çarpma açısı 90 derece olacak şekilde kontraplak üzerine her bir zırh kombinasyonu ayrı ayrı vidalanarak, yüksekliği atış yüksekliği standartlarında ayarlanmış bir platform

oluşturulmuştur. Tek katmanlı olan ZM-1 ve ZM-2 zırh modelleri tasarlanan atış platformuna direkt vidalanmıştır. Tek katmanlılara göre çok katman içeren ZM-3 ve ZM-4 zırh modelleri etrafına 1 mm kalınlığında elik sac (St 37) ile ereve monte edilerek bu çok katman içeren zırhların kayması nlenmiştir. Hazırlanan platform üzerinde bulunan zırhlara yapılan atışlar 30 m mesafeden tek atış olarak belirlenmiş NATO STANAG 4569 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan atışlar 3 defa tekrarlanmıştır. Bu tekrarın yapılmasının amacı ise oluşan hasarların doğruluğunun karşılaştırılmalı olarak daha doğru şekilde değerlendirilmesinin istenmesidir. Balistik testlerde ortalama 800 m/s hıza sahip kurşun çekirdekli 7.62 mm kalibrelik G3 mermisi kullanılmıştır. Yapılan atışlar standartlarda belirtilen merminin hızı ve atış mesafesi standart değerlerine uyumlu olarak yapılmıştır.

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1. Borlama Sonrası Mikroyapı

Numuneler üzerinde uygulanan borlama uygulaması sonrasında parçada meydana gelen parça mikroyapısına ait SEM görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: 950 °C’de 3 saat borlama sonucu yüzeyde elde edilen borür tabakasının kesit mikroyapısı

Şekil 4.1’de gösterilmiş bor difüzyonuna göre, paslanmaz çeliklerin borlanma işlemi üzerine uygulanan sistemlerle ahenkli olacak şekilde, bor içeriğine baktığımızda yüzeyden içeriye doğru olacak şekilde derinlik boyunca azalan biçimde 3 temel alan oluştuğu gözlenmiştir.

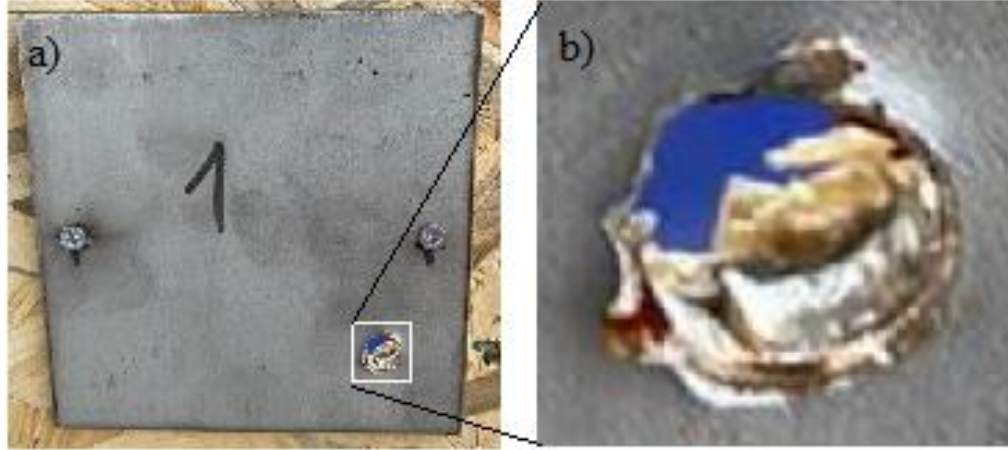
Bu bölgelere baktığımızda Şekil 4.1’de sırasıyla FeB tabakası (daha koyu renkli) Fe<sub>2</sub>B tabakası (daha açık renkli) ve geçiş bölgesi (gözenekli yapıya sahip) olarak sıralanmıştır. Şekil 4.1’de tabakaların kalınlıklarını incelediğimizde FeB tabakası 25 µm, Fe<sub>2</sub>B tabakası 12 µm ve geçiş bölgesi katmanlarının kalınlıkları 14 µm civarındadır. Yukarıda belirtilen tabaka ve katmanların sertlik değerlerine baktığımızda ise 28 GPa, 27 GPa, 9GPa olarak analiz edilmiştir. Borlama etkisi dışında kalan AISI 304 paslanmaz çeliğin matris yapısına baktığımızda ise sertliğinin ise ortalama 4 GPa olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu şartlarda mermi karşılama yüzeyinin sertlik değerinde oluşan yaklaşık 7 kat artış mermi deformasyonunu elde etme açısından önemli bir yarar sağladığı söylenebilir.

Numuneler hazırlanırken bütün çelik kesiti borlanmadığı için, numunelerin iç bölgelerinde ki tok ve sünek yapı korunmuş ve bu koruma sayesinde deformasyon enerjisi (darbe enerjisi) sönümlenme yeterliliğinden taviz verilmemiştir.

Ayrıca oluşturulan borür tabakasının tüm yüzey boyunca devamlı olması, FeB ve Fe<sub>2</sub>B katmanları arasında herhangi bir ayrılma ve aralık oluşmaması, numuneler üzerinde uygulanan borlama adımlarının doğru seçildiğini belirtmektedir.

#### 4.2 Balistik Test Sonrası Hasar Analizi

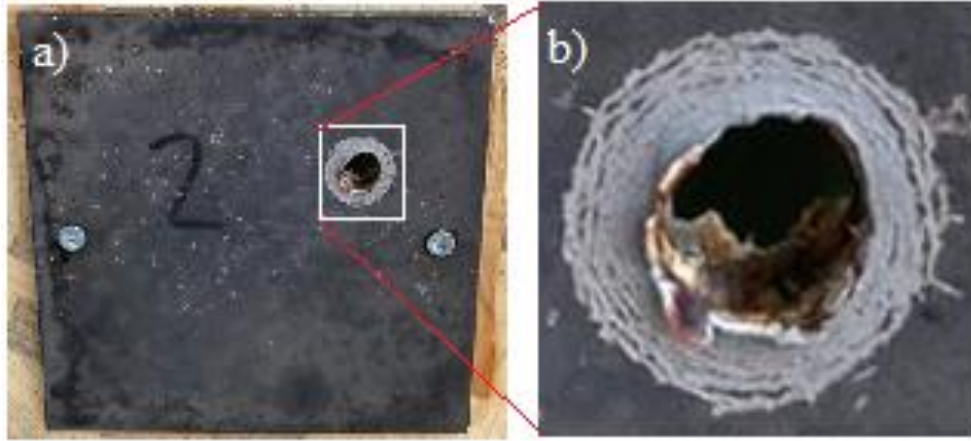
Şekil 4.2’de ZM-1 zırh modelinin atış sonrası fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.2: ZM-1 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlama işlemi uygulanmamış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş olarak görüntüsü

Şekil 4.2’de belirtildiği gibi 7.62 kalibrelik mermi ölçüleri 100 mm x 100 mm x 5 mm olan AISI 304 paslanmaz çelik levhayı delerek geçmiş yani perforasyon meydana getirmiştir. Şekil 4.2’de belirtilen merminin isabet ettiği noktanın büyütülmüş görüntüsünde, mermi ceketine ait olan kenar çapağı ve sıyrma artığı meydana gelmiş, delik çevresine bakıldığında ise sünek malzemenin yırtılma karakteristiği ile uyumlu daha düzgün kontura sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak mermi isabet çevresinde çarpma doğrultusuna bakıldığında ek bir bozulma ve bükülmenin ortaya çıkmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuca göre çoklu isabet alması durumunda kullanılan çok katmanlı zırh modelindeki çelik plakanın bir zayıflık oluşturmayacağı belirtilebilir.

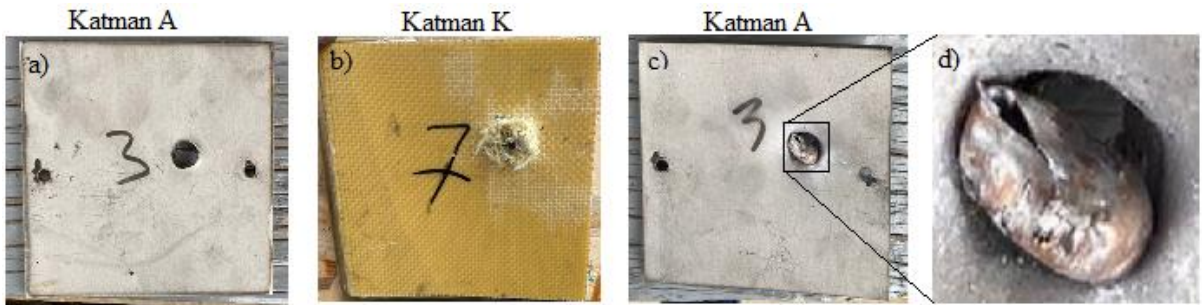
Şekil 4.3’te ise ZM-2 ye ait atış sonrası fotoğraflar gösterilmiştir.



Şekil 4.3: ZM-2 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlama işlemi uygulanmış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş olarak görüntüsü

Şekil 4.3'te belirtildiği gibi 7.62 kalibrelik mermi ölçüleri 100 mm x 100 mm x 5 mm olan AISI 304 paslanmaz çelik levhayı delerek geçmiş yani perforasyon meydana getirmiştir ve oluşan delik düzgün bir kontura sahiptir. Şekil 4.3b'de verilmiş olan merminin isabet noktasının büyük resmine bakıldığında, mermi ceketine haiz kenar çapağı ve sıyrma artığının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, delik çevresinde uygulanan borlama işlemi ile yüzeyde oluşan yaklaşık 40 mikron ince sert bor katmanının etkisini gösteren bozulmaya bağlı radyal yönde çoklu olacak şekilde halka izleri meydana geldiği görülmektedir.

Yapılan çalışmalar neticesinde yukarıda Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te ki fotoğraflarda belirtildiği üzere borlanmamış ZM-1 katmanı ve borlanmış ZM-2 katmanı, zırh modellerinin 7.62 kalibrelik G3 mermisini geçirmeme noktasında başarılı olmadığı tespit edilmiştir. Daha sonra Kevlar ara katman kullanılarak, mermiyi durdurmaya amacıyla ZM-3 zırh modeli tasarlanmıştır. ZM-3 zırh modeli üzerinde yapılan atışlar sonucunda oluşan hasar durumu Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4: Atış sonrası ZM-3 zırh modelinde oluşan hasar görüntüleri



Şekil 4.4'te görüldüğü üzere atış yapılan mermi karşılama yüzeyinde borlama işlemi uygulanmamış A katmanında düzgün kontura sahip bir delik meydana getirmiştir. Ara katman olarak kullanılan Kevlar plakayı da delip geçmiştir. Mermi Kevlar ara katmanını geçtikten sonra ise Şekil 4.4c'de belirtilen arka destek plakasına gelmiş o destek plakasının da delmiştir. Fakat bu delme işlemi sonrasında tam perforasyon yerine tam penetrasyon olduğu Şekil 4.4d'de görülmüştür. Başka bir ifade ile anlatırsak mermide herhangi bir çıkış hızı oluşmamış yani sıfırdır. Balistik limit, atış yapılan merminin atış yapılan hedefi delip geçemediği maksimum hızdır veya diğer bir deyişle belirtilen balistik limit hızının altındaki hızlarda mermi tam perforasyonu yani hedefi delip geçmeyi başaramamaktadır (Carlucci ve Jacobson, 2008). Bu durum göz önüne alındığında oluşturulan ZM-3 modeli için balistik limiti sağlayabilen zırh modeline işaret etmektedir denebilir.

Şekil 4.5'te ise ZM-4 zırh modeline ait mermi hasarı verilmiştir.



Şekil 4.5: ZM-4 zırh modelinde atış sonrası oluşan hasar görüntüleri a) borlanmış çelik (B) b) çift katman kevlar plaka (K+K) c) borlanmış çelik (B)

Yukarıda belirtilen şekil 4.5'e bakıldığında merminin ilk karşılaştığı veya başka bir deyişle karşılama yüzeyi olarak kullanılmış olan borlanmış çelik (B) katmanını ve sonrasında çift katman olarak kullanılan kevlar (K+K) katmanlarının delindiği tespit edilmiştir.. Fakat en arka tarafta destek olarak kullanılmış olan borlanmış çelik katmanının (B) delinmeden kaldığı görülmüştür. Başka bir deyişle yukarıdan aşağıya doğru B+K+K+B olarak katmanlanmış ZM-4 olarak kodlanan zırh kombinasyonu G3 mermisini tam olarak durdurmuş, delip geçmesine müsaade etmemiştir.

Oluşan durum gözlemlenip değerlendirildiğinde, borlama işlemi uygulanarak sertliği 7 kata kadar yükseltile B katmanının merminin bozulmasını sağlayarak, mermi enerjisinin dağılmasında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca örgü kumaş ve reçine ile katmanlar haline getirilen ve maksimum sürtünme yüzeyi sağlayan esnek yapısı ile çift katman olarak tasarlanan (K+K) kevlar plakaların belirtilen standartlarda atış yapılan merminin kalan kinetik enerjisini tamamen sönmüleyebildiği söylenebilir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tasarlanan numulere standartlarda belirtilen atışların yapıldığı çalışmada, tahrip gücü yüksek 7.62 mm kalibrelik G3 mermisine yönelik balistik koruma sağlayan, yeni bir araç zırhının tasarlanması, bu tasarlanan zırh modelinin bir prototipinin üretilmesi ve standartlarda belirtilen balistik testlerinin gerçekleştirilerek oluşan sonuçların gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında kurşun çekirdekli 7.62 mm ve yaklaşık olarak namludan 800 m/s ilk çıkış hızına sahip G3 mermisinin, 30 m mesafeden atış yapıldıktan sonra elde edilen bulguları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür.

- Karbon çeliği ve alaşımlı çeliklere oranla 5 kata kadar daha yüksek darbe sönümlenme enerjisi sağlayan AISI 304 paslanmaz çelik tasarlanan ve tasarlanacak araç zırh uygulamalarında bulunan katmanlardan metal katman olarak tercih edilebilir.
- Borlama işlemi uygulanarak AISI 304 paslanmaz çelik plakanın yüzey sertliği 7 kata kadar artırılmıştır. Yüzey sertliğinde olan bu artış mermi deformasyonunda çok önemli bir etkiye sahip olmuş ve borlama işleminin avantajları görülmüştür.
- Tek katman olarak tasarlanan ve borlanma işlemi uygulanmayan çelik (A) ve borlanma işlemi uygulanan çelik (B) katmanlarının balistik dirençlerinin yeterli olmadığı gözlenmiştir.
- ZM-3 olarak kodlanan A+K+A lamine sıralı borlama işlemi uygulanmamış çelik ön destek ve arasında tek katman olan arka destek katmanının arka destek katmanının tam penetrasyon sağlayarak, balistik limit şartlarını karşıladığı tespit edilmiştir.
- B+K+K+B lamine sıralı ZM-4 olarak tasarlanan zırh modelinde 7.62 mm kalibreli G3 mermisini tam anlamıyla durdurduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, hem uygulanan borlama işleminin mermi deformasyonu üzerinde hem de çift katman olarak kullanılan kevlar plakanın mermi kinetik enerjisini absorbe etmede başarılı olduğu ve ZM-4 zırh tasarım modelinde sonuçların olumlu olduğu gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Aboudi, Jacob, Steven Arnold ve Brett Bednarczyk. (2013). Micromechanics Of Composite Materials Micromechanics Of Composite Materials.
- Alarçin, S. (2014). Savunma Sanayinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi.
- Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 600 Ürün Açıklaması, <https://Industeel.Arcelormittal.Com/Wp-Content/Uploads/2021/02/Ds-Protection-Mars-600-En-2021.Pdf> (02.2021).
- Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 650 Ürün Açıklaması, <https://Industeel.Arcelormittal.Com/News/Fichier/Ds-Protection-Mars-650-En-2021/> (02.2021).
- Arcelor Mittal Mars Protection Stels, Mars 650 Ürün Açıklaması, <https://industeel.arcelormittal.com/news/fichier/ds-protection-mars-650-en-2021/> (02.2021).
- Armox Protection Plate, Armox 500t Ürün Açıklaması, <https://www.Ssab.Com.Tr/Api/Sitecore/Datasheet/Getdocument?ProductId=Acd3681501884ba2b09d742fe19a0f7f&Language=Tr-Tr> (19.04.2017)
- Armox Protection Plate, Armox 600t Ürün Açıklaması, <https://www.Ssab.Com.Tr/Api/Sitecore/Datasheet/Getdocument?ProductId=536790c1De7542739d0782fc748eb295&Language=Tr-Tr> (19.04.2017)
- Armox Protection Plate, Armox Advance Ürün Açıklaması, <https://www.Ssab.Com.Tr/Api/Sitecore/Datasheet/Getdocument?ProductId=53d6e1a71424472195d91564577a0f3b&Language=Tr-Tr> (19.04.2017)
- Ash R.A. (2016). Vehicle Armor. Lightweight Ballistic Composites: Military ve Law-Enforcement Applications. Elsevier Ltd., head Publishing, New York.

- Ateş, E. (2023). Polimer Kompozitlerin Savunma Amaçlı Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi İçin Hafif Silahlarla Atış Denemeleri. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 6 (2), 74-86 . DOI: 10.34248/bsengineering.1240694
- Aydın, M., Apalak, M.K., Güneş, R., ve Reddy, J.N. (2015). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Yükü Altındaki Davranışı Üzerinde Farklı Seramik Bileşenlerinin Etkisinin İncelenmesi.
- Baran, D. (2018). Namlularda Kendi Kendine Ateşleme Süresinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Başaran B. (2007). Computational Analysis Of Advanced Composite Armor Systems. Y. Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Benloulo, IS ve Sánchez-Gálvez, V. (1998). Seramik/kompozit zırhlar üzerindeki etkiyi simüle etmek için yeni bir analitik model. *Uluslararası Darbe Mühendisliği Dergisi*, 21, 461-471.
- Bhat, A. R. (2007). Finite Element Modeling And Dynamic Impact Response Evaluation For Ballistic Applications. M.Sc Thesis, Mumbai University, India.
- Bitlisli B. (2019). Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E. ve Mengüç, G. (2015). Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, özellikleri ve balistik performans testleri. *Tekstil ve Mühendis*, 22(98), 84-103.
- Bryan Litz. (2015). Applied Ballistics For Long Range Shooting 3rd Edition, Isbn:978-0-9909206-1-8.
- Candan C. (2005). Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. Zırh Teknolojileri Semineri, 10-11 Mart, Ankara, Millî Savunma Bakanlığı Arge ve Teknoloji D. Başkanlığı.
- Carlucci, D.E., ve Jacobson, S.S. (2008). Ballistics Theory And Design Of Guns And Ammunition, Crc Press.

- Cortes, R., Navarro, C., Martínez, MA, Rodríguez, J., ve Sánchez-Gálvez, V. (1992). Seramik kompozit zırhlar üzerindeki normal etkinin sayısal modellemesi. *Uluslararası Etki Mühendisliği Dergisi*, 12, 639-650.
- Çayiroğlu, İ. ve Dizdar, E. (2004). Kapsülsüz ve Barutsuz Mermi Atan Hafif Silah Tasarımı. *Teknoloji*. 7 (2), 339-344 s.
- Demircioğlu T.K., Candan, C. ve Kasım, İ.A. (2011). Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu.
- Fawaz, Z., Zheng, W. ve Behdinin, K. (2004). Numerical Simulation Of Normal And Oblique Ballistic Impact On Ceramic Composite Armours. *Composite Structures*. 63. 387-395. 10.1016/S0263-8223(03)00187-9.
- Feli, S., ve Asgari, M.R. (2011). Finite Element Simulation Of Ceramic/Composite Armor Under Ballistic Impact". *Composites Part B: Engineering* 42(4): 771–80.
- Fernández-Fdz, D. ve Zaera, D. (2008). A New Tool Based On Artificial Neural Networks For The Design Of Lightweight Ceramic–Metal Armour Against High-Velocity Impact Of Solids. *International Journal Of Solids And Structures*, 45, 6369-6383.
- Flores-Johnson, E.A., Saleh, M. ve Edwards L. (2011). Ballistic Performance Of Multi-Layered Metallic Plates Impacted By A 7.62-Mm Apm2 Projectile. *International Journal Of Impact Engineering*, 38(12), 1022-1032.
- Forrestal, M.J., Borvik, T. ve Warren, T.L. (2010). Perforation Of 7075-T651 Aluminum Armor Plates With 7.62 Mm Apm2 Bullets. *Experimental Mechanics*, 50(8), 1245-1251.
- Gálvez, V. ve Paradela, L. (2009). Analysis of Failure of Add-On Armour For Vehicle Protection Against Ballistic Impact. *Engineering Failure Analysis*. 16. 1837-1845. 10.1016/j.engfailanal.2008.09.007.
- Gençer Y. (2016). Zırh Malzemesi Olarak Borür/Metal Tabakalı Kompozitlerin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu. *Tübitak Projesi*, Proje No. 213m166.

- Gururaja, M. N. ve Rao, A. H. (2012). A review on recent applications and future prospectus of hybrid composites. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 1(6), 352-355.
- Güneş, R. (2015). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Etkisi Altında Lineer Olmayan Mekanik Analizleri. *Tübitak Projesi*, Proje No: 112m917.
- Hazell, P.J. (2016). *Armour Materials, Theory And Design* (First Edition). Crc Press, Taylor & Francis Group, New York.
- Hetherington, J.G. (1992). The optimization of two component composite armours. *International journal of impact engineering*, 12(3), 409-414.
- Hetherington, J.G. ve Lemieux, P.F. (1994). Eğikliğın İki Bileşenli Kompozit Zırhların Balistik Performansına Etkisi. *Uluslararası Darbe Mühendisliği Dergisi*, 15, 131-137.
- Hetherington, J.G. ve Rajagopalan, B. (1991). Kompozit Zırhların Balistik Delinmesi Sırasında Emilen Enerjinin Araştırılması. *Uluslararası Etki Mühendisliği Dergisi*, 11, 33-40.
- Işık, H. (2016). Namlu içerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi The Journal Of Defense Sciences* Kasım 15(2): 157–77.
- Jenq, Syh-Tsang ve Mo, JJ. (1996). Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites. *Aiaa Journal- AIAA J.* 34. 375-384. 10.2514/3.13074. Thyssenkrupp Steel Europe, Secure 500 ürün Açıklaması, [https://www.Thyssenkruppsteel.Com/Media/Content\\_1/Publikationen/Grobblech\\_Migration/Secure/Werkstoffblaet\\_Ter\\_4/Secure\\_500\\_Wbl\\_1943\\_Englisch.Pdf](https://www.Thyssenkruppsteel.Com/Media/Content_1/Publikationen/Grobblech_Migration/Secure/Werkstoffblaet_Ter_4/Secure_500_Wbl_1943_Englisch.Pdf) (01.2016).
- Jinzhu, L., Liansheng, Z. ve Fenglei, H. (2017). Experiments And Simulations Of Tungsten Alloy Rods Penetrating Into Alumina Ceramic/603 Armor Steel Composite Targets. *Int. Journal Of Impact Engineering*, 101, 1-8.

- Kalaycioglu, B. ve Ongun, A. (2021). Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlarda Balistik Hasar Sonrası Çelik Kısımında Oluşan Deformasyonun İncelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*. 68-95. 10.17134/khosbd.913681.
- Karagöz, Ş. ve H. Atapek. (2007). Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul-Türkiye
- Küçük, Y. ve Çelik, B. (2023). Kompozit Zırh Tasarımı ve Balistik Direncinin İncelenmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 6 (1), 13-21. DOI: 10.55930/jonas.1275151
- Lo'Pez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R. ve Navarro C. (2005). The Effect Of The Thickness Of The Adhesive Layer On The Ballistic Limit Of Ceramic/Metal Armours. An Experimental And Numerical Study. *International Journal Of Impact Engineering*, 32, 321–336.
- Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş. (2021). 12.7 Mm X 99 Fişek (M2 Ap) Mühimmatı Ürün Bilgileri. [https://Urunler.Mke.Gov.Tr/Urunler/12.7-Mm-X-99-Fi%C5%9fek-\(M2-Ap\)/30/443](https://Urunler.Mke.Gov.Tr/Urunler/12.7-Mm-X-99-Fi%C5%9fek-(M2-Ap)/30/443)
- Medvedovski E. (2010). Ballistic Performance Of Armour Ceramics: Influence Of Design And Structure. Part 1. *Ceramics International*, 36 (7), 2103-2115.
- Akdoğan, M.A. ve Türkbaş, O.S. (2016). Konkav ve Düz Yüzey Şekilli Seramik Zırhların Balistik Performansının Sayısal Modellenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*.
- Meyers, M.A. (1994). *Dynamic Behavior Of Materials*. John Wiley&Sons Inc, New York, Pp. 597.
- Meyers, M. A. (1994). *Dynamic Behavior Of Materials*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., Nj, Usa, 688 S.
- Monteiro, Sergio Neves ve ark. (2016). How Effective Is A Convex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Ceramic Armor *Ceramics International* 42(6): 7844–47.



- Navarro, C., Martinez, M. A., Cortes, R. ve Sanchez-Galvez, V. (1993). Some observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates. *International journal of impact engineering*, 13(1), 145-156.
- Nij Standard-0101.06. (2008). Ballistic Resistance Of Personal Body Armor. Nij Standards: 89.
- Özbağdatlı, E. (2023). Alümina seramik plakaların şekillendirilmesi ve balistik incelenmesi (Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Özer, İ. (2015). Balistik Çarpma Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. Mustafa Kemal Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hatay, 67 S. (Yüksek Lisans Tezi)
- Özer, M. T. (2017). Yüksek Kinetik Enerjili Ateşli Silah Yaralanmalarında Yara Balistiği ve Cerrahi Tedaviye Yansımaları. *Okmeydanı Tıp Dergisi* 33 (Ek sayı), 40-47.
- Özşahin, E. (2008). Response Of Aluminum Plates Subjected To High Velocity Impact Loads, Ph.D. Thesis, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 11-42.
- Öztürk, A. R. (1988). Dış Balistik. Ankara: Makine Kimya Endüstrisi Kütüphanesi.
- Prasad, D., Shoba, C. ve Ramanaiah, N. (2014). Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 3. 79–85. 10.1016/j.jmrt.2013.11.002.
- Puente, J., Arias, A., Zaera, R. ve Navarro, Christopher. (2005). The Effect of the Thickness of the Adhesive Layer on the Ballistic Limit of Ceramic/Metal Armors. An Experimental and Numerical Study. *International Journal of Impact Engineering*. 32. 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.
- Rahman, N.A., Abdullah, S., Zamri, W.F.H., Abdullah, M.F., Omar, M.Z. ve Sajuri Z. (2016). Ballistic Limit Of High-Strength Steel And Al7075-T6 Multi-Layered Plates Under 7.62-Mm Armour Piercing Projectile Impact. *Latin American Journal Of Solids And Structures*, 13, 1658-1676.
- Reno, Janet, Daniel, M., Mary, L. L. ve Julie, E.S. (2000). Ballistic Resistance Of Personal Body Armor Nij Standard–0101.04". 50: 2369–80.

- Rosenberg, Z. ve Dekel, E. (2012). Terminal Ballistics. Berlin: Springer Heidelberg
- Roy, A. K. (1999). Engineered interfaces in fiber reinforced composites. *Materials Today*, 2(1), 22-22.
- Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M. ve Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112-121.
- Shockey, DA, Marchand, A., Skaggs, SR, Cort, GE, Burkett, MW ve Parker, R. (1990). Kapalı seramik hedeflerin ve çarpan çubukların başarısızlık fenomenolojisi. *Uluslararası Etki Mühendisliği Dergisi*, 9, 263-275.
- SNA, S., MTH, S., ve Kandasamy, J. (2018). Yapısal uygulamalar için hibrit kompozitlerin darbe davranışı: Bir inceleme. *Bileşikler Bölüm B: Mühendislik*, 133:112–121. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.008
- Ssab Protection Plate, Ramor 500 Ürün Açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/datasheet/getdocument?productid=64dcb50c93d4458187619f4379c9bba5&language=tr-tr> (19.04.2017)
- Ssab Protection Plate, Ramor 550 Ürün Açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/datasheet/getdocument?productid=3a1405d3563a4cb9a13a10b3a6d59a4d&language=tr-tr> (19.04.2017)
- Ssab Protection Plate, Ramor 600 Ürün Açıklaması, <https://www.ssab.com.tr/api/sitecore/datasheet/getdocument?productid=264986c3dba84154b05b0eedc1880989&language=tr-tr> (19.04.2017)
- Sürmeli, D., & Neşeli, S. (2020). Mermi Namlu Çıkış Hızı ve Enerjisini Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 19(3), 156-169.
- Turan, M. (2007). Tabakalı kompozit malzemelerde yüksek hızlı darbe hasarı. *Mühendis ve Makina*, 48(575), 3-8.
- URL-1, (2020) <https://ayam.com.tr/arastirma/turkiyede-son-5-yilda-yasanan-gelistmeler-savunma-sanayi>, (2015-2020)

- Übeyli, M., Deniz, H., Demir, T., Ögel, B., Gürel, B. ve Keleş, Ö. (2011). Ballistic Impact Performance Of An Armor Material Consisting Of Alumina And Dual Phase Steel Layers. *Materials & Design*, 32 (3), 1565-1570.
- Übeyli, M., Yıldırım, R.O. ve Ögel B. (2007). On The Comparison Of The Ballistic Performance Of Steel And Laminated Composite Armor. *Materials And Design*, 28, 1257–1262.
- Ünaler E. (2005). Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials. Y. Lisans Tezi, İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Madhu, V. ve Bhat, T.B. (2011). Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles. *Defence Science Journal*, 61(4).
- Yavuz, M. (1988). Silah Bilgisi ve Atış Kültürü. Ankara: Başkent Klişe Matbaacılık Yayınları, 297-313.
- Zaera, R. ve Sánchez-Gálvez, V. (1998). Seramik/metal hafif zırhlar üzerindeki normal ve eğik balistik etkinin analitik modellemesi. *Uluslararası Etki Mühendisliği Dergisi*, 21, 133-148.
- Zaera, R., Sanchez-Saez, S., Pérez-Castellanos, J. ve Navarro, C. (2000). Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 31. 10.1016/S1359-835X(00)00027-0.
- Ziylan A. (2001). Savunma Nereden Nereye Türkiye’de Savunma Sanayii Tarihçesi. *Ulusal Strateji Dergisi*,1-7.
- Zukas, J.A., John, W. ve Sons. (1990). *Inc High Velocity Impact Dynamics*. New York.
- Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11), 793-807.
- Woodward, R. L. (1990). A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *International Journal of Impact Engineering*, 9(4), 455-474