



Ballistic behavior of alumina ceramic faced and polyethylene reinforced armor material: Experimental analysis

Mehmet Akif Akdoğan*^{ID}, Osman Selim Türkbaş^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Ballistic tests of alumina faced armor system
- Crack propagation in alumina ceramic
- Protection level of armor system

Keywords:

- Impact behavior
- Ballistic
- Alumina ceramic
- Composite armor system
- Experimental analysis

Article Info:

Research Article

Received: 17.02.2023

Accepted: 12.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252226

Correspondence:

Author: Mehmet Akif

Akdoğan

e-mail:

maakdogan@gazi.edu.tr

phone: +90 532 761 2960

Graphical/Tabular Abstract

As a result of the experiments, the damage mechanism occurring in the ceramic layer on the front surface of the composite armor, the deformation occurring in the 7.62mm armor-piercing bullet and the schematic representation of the test setup used in the experiments are given in Figure A.



Figure A. Alumina ceramics and bullet used in experiments and schematic ballistic test setup

Purpose: Examining the damage mechanism of the created composite armor model and determining how it provides security within the standards.

Theory and Methods: Ballistic tests were carried out in a special industrial facility laboratory with the test setup shown schematically in Figure A. The ceramics used consist of alumina (Al_2O_3) with a purity of over 99.5 percent. A 10 mm thick ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite was placed on the back of the ceramics as a support layer.

Results: It was decided that the protective performance of the given armor combination is high enough and is a suitable choice for field application. To the results of experiments, was observed that they were almost perfectly compatible regarding many features, such as occurring fracture cone, damage size and structure, crack expansion, bullet damage, and size of the dent in the back support layer. It was measured that the amount of depression formed in the UHMWPE layer on the back surface of the armor system varied between 18 and 20mm.

Conclusion: Since these obtained values are in accordance with the desired international personnel protection standards, it is understood that the armor system composition created is a preferred composition that can provide the necessary protection. In general, it is seen that the armor system created with an alumina ceramic faceplate, UHMWPE composite support plate and combined with epoxy resin provides the desired properties within the standards.



Alümina önyüzlü polietilen destekli kompozit zırhın balistik davranışlarının deneysel incelenmesi

Mehmet Akif Akdoğan*^{ID}, Osman Selim Türkbaş^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Alümina önyüzlü zırh sisteminin balistik testleri,
- Alümina seramikte çatlak yayılımı
- Zırh sisteminin koruma seviyesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.02.2023

Kabul: 12.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252226

Anahtar Kelimeler:

Darbe davranışı,
balistik,
alümina seramik,
kompozit zırh sistemi,
deneysel analiz

ÖZ

Askeri hücum teknolojisinin artan gücü nedeniyle, geleneksel zırh yöntemleri etkinliğini yitirmiştir. Bu nedenle hızla gelişen savunma uygulamaları için farklı mekanik özelliklere sahip yeni ekipmanların geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) destek tabakası ve alümina seramik yüzeyli kompozit zırh sisteminin 7,62×51mm zırh delici mermiye karşı balistik testleri yapılmış ve hasar yapıları incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki balistik testler özel bir endüstriyel tesis laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak verilen zırh kombinasyonunun koruyucu performansının yeterince yüksek olduğuna ve saha uygulaması için uygun bir seçim olduğuna karar verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, meydana gelen kırılma konisi, hasarın boyutu ve yapısı, çatlak ilerlemesi, mermi hasarı, arka destek tabakasındaki çöküntü boyutu gibi birçok özellik açısından mükemmel yakın olduğu görülmüştür. Zırh sisteminin arka yüzeyindeki UHMWPE tabakasında oluşan çöküntü miktarının 18 ile 20 mm arasında değiştiği ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler istenilen uluslararası personel koruma standartlarına uygun olduğundan oluşturulan zırh sistemi kompozisyonunun gerekli korumayı sağlayabilen, tercih edilebilecek bir kompozisyon olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak alümina seramik ön yüz, UHMWPE kompozit destek plakası ile oluşturulan ve epoksi reçine ile birleştirilen zırh sisteminin standartlar çerçevesinde istenilen özellikleri sağladığı görülmektedir.

Ballistic behavior of alumina ceramic faced and polyethylene reinforced armor material: Experimental analysis

HIGHLIGHTS

- Ballistic tests of alumina faced armor system
- Crack propagation in alumina ceramic
- Protection level of armor system

Article Info

Research Article

Received: 17.02.2023

Accepted: 12.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1252226

Keywords:

Impact behavior,
ballistic,
alumina ceramic,
composite armor system,
experimental analysis

ABSTRACT

Due to the improving strength of military offense technology, the conventional armor methods have lost their effectiveness. Thus, the necessity to develop new equipment with different mechanical features for rapidly developing defense practices has arisen. Within the scope of this study, the ballistic tests of a composite armor system with a support layer of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and an alumina ceramics face were conducted against the 7.62×51mm armor piercing bullet and the damage patterns were analyzed. The ballistic tests within the scope of this study were carried out in an industrial facility laboratory. It was decided that the protective performance of the given armor combination is high enough and is a suitable choice for field application. To the results of experiments, was observed that they were almost perfectly compatible regarding many features, such as occurring fracture cone, damage size and structure, crack expansion, bullet damage, and size of the dent in the back support layer. It was measured that the amount of depression formed in the UHMWPE layer on the back surface of the armor system varied between 18 and 20mm. Since these obtained values are in accordance with the desired international personnel protection standards, it is understood that the armor system composition created is a preferred composition that can provide the necessary protection. In general, it is seen that the armor system created with an alumina ceramic faceplate, UHMWPE composite support plate and combined with epoxy resin provides the desired properties within the framework of standards.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *maakdogan@gazi.edu.tr, turkbas@gazi.edu.tr / Tel: +90 532 761 2960

1. Giriş (Introduction)

Zırh sistemleri tasarlanırken, oluşacak tehditlere yönelik etkin bir koruma sağlayabilmesi için malzemenin mekanik özellikleri, hacim, ağırlık gibi parametreleri ve darbeye karşı davranış şekilleri büyük önem teşkil etmektedir. Bu nedenle, yüksek sertlikleri ve yüksek basma dayanımları nedeniyle seramik kompozitler üzerinde durulmaktadır. Balistik amaçlı kullanımlarda seramikler, merminin çarpma etkisi ile çok sayıda parçacığa ayrılabilen ve bu parçacıklar korunması istenen yüzeyde hasar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle seramiklerin arkasına parçacık tutucu ve destek tabakası olarak, metal ya da polimer bazlı kompozit malzemeler ilave edilmektedir. Seramik önyüzlü zırh sistemlerinde ön yüzeyde bulunan seramik katman, üzerine isabet eden yüksek kinetik enerjiye sahip merminin ucunun deforme olmasına, hatta parçalanmasına sebep olmaktadır. Arka yüzeyde bulunan polimer esaslı kompozit ya da sünek metal katman ise kinetik enerjiyi sönmülemekte ve korunmak istenen yüzeye zarar gelmesini engellemektedir [1-2]. Genellikle seramikler ve polimer kompozitler birbirlerine, ince katmanlar halinde epoksi reçine yardımıyla ya da yine polimer bazlı yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmektedir. Bu katmanlara ek olarak en dış yüzeye koruyucu ve seramik yüzeyin dağılmasını engelleyici ince bir tabaka balistik kumaş ya da polimer kompozit yerleştirilebilmektedir. Ayrıca araçlarda kullanılırken, istenildiği taktirde zırhın iç yüzeyine yangına karşı koruyucu ya da elektromanyetik girişim bozucu katmanlar eklenebilmektedir [1]. Havacılık, uzay, askeri gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış yeni parçaların düşük ve yüksek hızlarda alacakları darbelere karşı gösterecekleri davranışlar büyük önem teşkil etmektedir. Bu nedenle kullanım amaçlarına göre bu tarz parçalara düşük ya da yüksek hızda darbe testleri uygulanmalıdır. Seramik zırh sistemlerine, yüksek hızda yapılan darbe testleri için yaygın olarak kullanılan yöntemler ise Split Hopkinson basınç çubuğu, gaz tabancaları ve gerçek mermili balistik testlerdir [3].

Zırhlar tasarlanırken önemli parametrelerden biri de kütle etkinliği değeridir. Bir zırhın kütle etkinliği değeri (E_m), alan yoğunluğunun, genellikle tank zırhı için kullanılan MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarında haddelenmiş zırh çeliklerinin alan yoğunluğuna oranıdır [4]. Bu birimsiz oran, MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 çelikleri için 1 kabul edilmektedir. Aynı tehdite karşı aynı performansı gösteren sistemlerden E_m değeri büyük olan tercih edilebilir. Yüksek hızlı darbelere, seramiklerin kütle etkinliği değerlerinin zırh çeliklerinden daha fazla olduğu bilinmektedir [5, 6].

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, balistik bir düzenele küresel mermi kullanarak yapılan çalışmada, 15 mm kalınlığında AA2014-T652 dövme plakalarının, 800 m/s ile 1300 m/s arasındaki hız bölgesinde darbe tepkilerini incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırıldığı çalışmada, balistik perforasyon testleri sırasında hedef malzemedeki başlıca hasar mekanizmalarının kabarma, sünek delik büyümesi ve kabuklanma olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca sayısal sonuçların balistik testlerde gözlemlenen tüm delinme mekanizmalarını yakaladığını vurgulamışlardır. Balistik sınır hızları, rijit ve deforme olabilen mermiler için sırasıyla %3 ve %4 hata ile tahmin edildiğini belirtmişlerdir. Tek bir parametreye bağlı olan modellerinin, darbeye dayanıklı yüksek mukavemetli alüminyum yapıların tasarımı için kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır [7]. Başka bir çalışmada yine benzer bir düzenele yardımıyla, kevlar ve bazalt kumaşlarla güçlendirilmiş hibrid termoplastik kompozit zırhların balistik performansını incelemişlerdir. Çalışmalarında, simetrik olmayan (H-1) ve simetrik (H-2) katman diziliminin performanslarını karşılaştırmışlardır. H-1 zırhının, matris çatlaması, fiber kopması, parçalanma ve birlikte mekanizmaları nedeniyle başarısız olduğunu

ve zırhın 9 mm FMJ'ye dayanamadığını belirtmişlerdir. H-2 zırhının ise 366,52–415,22 m/s hız aralığında başarılı olduğunu, 415,22 m/s hızın üstünde delindiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, 3D-A bazalt kumaşların ardından 2D-P bazalt ve hibrit kumaşların yerleştirilmesinin, termoplastik kompozit zırhların balistik performansı ve merminin deformasyonu üzerinde önemli bir etki gösterdiğini, H-2 zırhı için tahmin edilen artık hız ve hasar modellerinin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu sonucuna varmışlardır [8].

Literatürde yer alan çalışmalar, seramiklerin yüksek sertlikleri sayesinde üzerlerine gelen merminin ucunu aşındırarak kütleştirdiğini, böylece merminin etkinliğini azalttığını göstermektedir [9-12]. Hasar görmüş veya çatlamış seramik malzemenin, üzerindeki darbe yükünü destek plakasının yüzeyinde daha geniş bir alana dağıtmaya yardımcı olan konik bir şekilde yığılma yaptığı görülmekte ve bu şekilde kırılma konisi meydana gelmektedir [9-12]. İrili ufaklı kırılan seramik parçacıklarının merminin zırha nüfuz etmesini engellemede büyük rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca ufalanan seramik parçacıkların etrafa dağılması için seramiğin açık yüzeylerinden desteklenmesinin, zırhın etkisini artırdığı görülmektedir. Balistik uygulamalarda seramikler kadar bir arada bulunan seramik tozlarının da etkili olduğu bilinmektedir [10]. Çarpışma sonucu seramik plakada tam penetrasyon, destek plakasında ise kısmi penetrasyon oluşumu gözlemlenmektedir [1, 10]. Zırh sistemlerinde genellikle düşük fiyatları nedeniyle Al_2O_3 (alümina) seramikler kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze yapılan araştırmalara bakıldığında, zırh sistemlerinin yapımında, düşük ve yüksek saflıkta alümina (Al_2O_3), alüminyum nitrit (AlN), bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve titanyum diborür (TiB_2) gibi seramiklerin araştırma konusu olduğu görülmektedir. Alümina dışındaki seramikler, zırh sistemlerinde kullanılmakla birlikte, daha üstün mekanik özellikleri ve hafifliklerine rağmen yüksek fiyatları nedeniyle kullanım alanları daha sınırlı kalmaktadır [6]. Yapılan bir çalışmada, seramiklerin balistik testleri sırasında çekilen yüksek hızlı fotoğraflarda merminin çarpma noktasından penetrasyona geçişi incelenmiş, sonuç olarak tüm zırhların tam penetrasyonunun 200 mikrosaniyede gerçekleştiği vurgulanmıştır. Ayrıca kırılma konisinin hacminin mekanik özelliklerle nasıl değiştiği incelenmiş, kırılma tokluklarına göre; Al_2O_3 , SiC ve B_4C seramiklerde, konik kırılma hacminin toklukla birlikte arttığı sonucuna varılmıştır [13]. Literatürdeki diğer araştırmalara göre ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemenin, yapıları darbe veya patlama yüklerine karşı güçlendirmek için büyük potansiyele sahip olduğu görülmektedir [14-16]. Epoksi reçinelerin ise, düşük maliyetli, uygulanması kolay ve oldukça rahat kullanılabilir malzeme olmasından ötürü, balistik zırhlarda kullanılan seramik mozaiklerin arasında dolgu malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir [17]. Yüzey profillerine sahip alümina seramik karoları spesifik kinetik enerji absorpsiyonları (SKEA) açısından karşılaştırıldığı çalışmada düz bir seramik karoya çarpan bir mermiyi simüle eden sonlu elemanlar (SE) modelini oluşturmuş ve literatürdeki deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Daha sonra farklı yarıçap değerlerinde küresel yüzey profiline sahip seramik karoları analiz ederek SKEA değerlerini karşılaştırmışlardır. Seramik karo modelini doğrulamak için Toussaint ve Polysois'in [18] deneysel sonuçlarını kullanmışlardır. Doğrulanmış seramik karo modeliyle, küresel yüzey profili oluşturmanın ve mermi isabet yerinin etkisini araştırmışlardır. 0 ile 7 mm arasında değişen çeşitli küre yarıçap değerlerini incelemiş, küresel yüzey profilinin yarıçapı 4,5 mm olduğunda seramik karoların balistik performansının %56'ya kadar artırılabilceğini gözlemlemişlerdir. En iyi SKEA sonuçlarının, merminin dört küre arasındaki boşluğa çarptığında, en kötü SKEA sonuçlarının ise

merminin kürenin tepesine çarptığında elde edildiğini belirtmişlerdir. Vuruş noktasından bağımsız olarak en kötü sonucun bile düz plakadan 21% daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır [19]. Diğer bir yapılan çalışmada, çarpma pozisyonunun karo ile yapıştırılmış seramik/metal hedeflerin balistik performansını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Ayrıca, kullanılan yapıştırıcının boşluk genişliği ve sertliğini de ek parametreler olarak değiştirmişlerdir. Deneylerinde iki hipotezi test etmişlerdir. Bu hipotezlerden birincisi artık hız, diğeri ise kullanılan karolar arası yapıştırıcının kalınlığı ve sertliğine bağlı olarak değişen fonksiyonun şeklidir. Deneyleri 7,62 mm tungsten çekirdekli zırh delici mermi ile yapmışlardır. Mermimin darbe pozisyonunu, artık hızı ve performans sürecini yüksek hızlı kameralar yardımıyla izlemişlerdir. Dört farklı boşluk genişliği ile iki farklı yapıştırıcı sistemini (yüksek mukavemetli ve yüksek esneklikte) araştırmışlardır. Balistik testlerin sonuçlarında, bir karonun kenarına çarpıldığında, merkezi bir darbeye kıyasla daha yüksek bir artık hız oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, azalan yapışkan sertliği ve artan boşluk genişlikleri ile balistik direncin önemli ölçüde azaldığını görmüşlerdir [20]. Bir Kevlar-29 kompozit örtü tabakasının iki katmanlı bir seramik/kompozit zırh sistemi üzerindeki etkisini, deneysel test ve sonlu elemanlar (SE) simülasyonu yaklaşımıyla araştırıldığı çalışmada, tek Kevlar-29 kompozit tabaka kaplı seramik/kompozit zırh sistemlerini 884 m/s, 1070 m/s ve 1164 m/s olmak üzere üç farklı hızda vurmak için 7,62 mm APM2 mermileri kullanmışlardır. Örtü tabakasının seramik parçaları üzerindeki sınırlayıcı etkisini gözlemlemişlerdir. Kaplama tabakası ve seramik karo arasındaki arayüzde yapışkan bir yüzey davranışını analiz etmek için bir 3B-SE modeli geliştirmişlerdir. SE modelinin, seramik karodaki kaplama tabakasının soyulma davranışını ve baskın kırılma modellerini başarılı bir şekilde yakaladığını görmüşlerdir. Örtü tabakasının, kendi başına enerji kaybı ve seramik karonun kırılma sürecine etkisi olacak şekilde iki ana mekanizma ile zırh sisteminin balistik direncini iyileştirebileceğini gözlemlemişlerdir. Arayüzdeki yüksek bir bağ kuvvetinin, zırh sisteminin enerji dağıtma kabiliyetini de iyileştirebildiğini belirtmişlerdir [21]. Alümina seramikler üzerine yapılmış diğer bir çalışmada ise kırılmanın başlamasını, yayılmasını ve hedef tarafından sunulan direnci incelemek amacıyla %99,5 saflıkta alümina seramik plakalar kullanmışlardır. 100mmx100mm boyutunda ve 5 mm kalınlığındaki seramik karoları, 52–275 m/s aralığında hızlarda 10,9 mm çapında ve 30 gram kütleli sertleştirilmiş çelik 4340 mermilere maruz bırakmışlardır. Seramik parçalarını, ön ve arka yüzeylerdeki çatlama desenlerini incelemek için dikkatlice toplamışlardır. Hedefte gelişen çatlakları, kırılma mekanizması hakkında daha fazla bilgi edinmek için kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Hedef tarafından emilen enerjiyi, hedefin kırılma mekanizmasına göre incelemiş ve ilişkilendirmişlerdir. Bir sonlu elemanlar programı ile sayısal simülasyonları gerçekleştirmiş, kırılma ve parçalanma davranışını ve bunun hedefin balistik özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için deneysel bulgular ile kıyaslamışlardır. Ayrıca, seramik hedefin eğik darbe altındaki davranışını sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, mermideki hasarın eğik çarpma durumunda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Hem deneysel hem de sayısal bulgularda, merminin geliş hızındaki artışla birlikte çatlak yoğunluğunda bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Parçaların ortalama boyutunun, mermi isabet hızındaki artışla birlikte azaldığını da belirtmişlerdir [22]. Literatürde, alumina seramiklerin özellikleri ve darbe davranışları üzerine yapılmış farklı çalışmalar da mevcuttur [23-25]. Yapılan bir çalışmada SiC altıgen prizmalar ve mikrometre boyutunda B4C tozlarını kullanmışlardır. Basınçlı sızma tekniği ile güçlü arayüzey bağına sahip, yüksek mukavemetli, yüksek tokluklu ve çok ölçekli bir dizi (SiCh-p + B4Cp)/5083Al zırhı hazırlamışlardır. (SiCh-p + B4Cp)/5083Al zırhı, entegre bir zırh sistemi oluşturmak için ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve 6252 zırh çeliği ile birleştirmişlerdir. Balistik performans testlerini, 12,7 mm Zırh Delici

Yangın Çıkarıcı (API) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Zırh yapısının hasar mekanizmalarını makroskobik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak (SiCh-p + B4Cp)/5083Al zırh sisteminin mükemmel genel balistik performansını gösterdiğini, yüksek mukavemetli ve yüksek tokluğa sahip B4Cp/5083Al kompozit malzemesinin, SiCh-p ile güçlü bir arayüzey bağı sergileyerek SiCh-p'ye sağlam destek sağladığını vurgulamışlardır. Zırh sırtı deformasyonunun %50 oranında azaldığını ve seramik katmanın, merminin kinetik enerjisinin %70'inden fazlasını dağıttığını gözlemlemişlerdir [23]. Hafif, yüksek performanslı kurşun geçirmez zırh tasarımını geliştirmek amacıyla üç sütunlu seramik/fiber laminat kompozit zırh tasarlanıp hazırlandığı çalışmada, 7,62 mm zırh delici mermilere karşı balistik davranışlar araştırılmıştır. Hedef numunelerin mikro-CT analizi yoluyla, B4C seramiklerinin, koruma marjında %142'lik bir iyileşme ile SiC seramiklerine göre daha kapsamlı kurşun geçirmezlik özellikleri sergilediğini saptamışlardır. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin (UHMWPE) aramid III ile birleştirilmesiyle gerçekleştirdikleri tasarımın, arka yüz imzasının (BFS) %53 oranında azaltılmasına yardımcı olabileceğini vurgulamışlardır. Seramik katmanın hasar yarıçapının, sütunlu seramiğin tasarımıyla etkili bir şekilde sınırlandırıldığını belirtmişlerdir [24]. Zırhın yapısal optimizasyon tasarımını desteklemek amacıyla, zırh yapısı ve kurşun direnci mekanizmalarının optimize edildiği çalışmada, dezavantajların üstesinden gelen yeni bir kompozit zırh kullanılmıştır. Delme sürecini simüle etmek için oluşturulmuş FEM-SPH algoritması ile seramik ünite şeklinin ve boyutunun zırh koruma performansı üzerindeki etkisi, mermi enerji kaybı, hız değişimi, delme değerleri niceliksel olarak karşılaştırılarak araştırılmıştır. Metal sınırlı seramik zırhın onarılabılır performansa sahip olduğunu ve seramik birimlerin doldurulmasının zırh arıza alanını azaltabileceğini, zırh onarım süresinden tasarruf sağlayabileceğini ve zırh servis ömrünü uzatabileceğini belirtmişlerdir. Mermimin hızı 500 m/s'den az olduğunda, küçük boyutlu birim seramiklerle doldurulmuş zırhın hasarlı alanının küçük ve onarılmasının kolay olduğunu; merminin hızı 500 m/s'den büyük olduğunda ise, büyük boyutlu birim seramiklerle doldurulmuş zırhın, merminin kalma süresini etkili bir şekilde artırdığını ve zırhın elastikiyet direncini artırdığını vurgulamışlardır [25]. Yapılan başka bir çalışmada, 12,7 mm API mermileri kullanarak hafif seramik kompozit zırh üzerinde delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme parametrelerini doğrulamak ve genişletmek için sayısal simülasyonlarla desteklemişlerdir. Penetrasyon hızı arttıkça çekirdeğin ortalama özellik boyutunun azaldığını, bunun da çekirdeğin parçalanma derecesinde bir artışa işaret ettiğini belirtmişlerdir. Ana kırılma şeklinde, merminin başının kırıldığını, merminin kuyruğu ve gövdesinin temelde sağlam kaldığını ve kırılma yüzeyi esas olarak 45°'lik bir kayma kırığı oluştuğunu vurgulamışlardır. Ayrıca açılı bir penetrasyon olduğunda API mermisinin penetrasyon verimliliğinin ve tahrip kabiliyetinin önemli ölçüde azaldığını da tespit etmişlerdir [26]. Beş grup poliüre takviyeli ve iki grup çift katmanlı seramik/metal zırhın tasarlandığı bir çalışmada, poliüre tabakasının konumu ve kalınlığının seramik/metal zırhın balistik performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmışlardır. Ön yüzdeki 1,1 mm kalınlığındaki poliüre katmanının balistik sınır hızını 27,99 m/s ve spesifik enerji emilimini %8,83 oranında etkili bir şekilde artırdığını belirtmişlerdir. Ancak bu etkinin poliüre tabakasının kalınlığına ve konumuna bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, poliüre tabakasının seramik koninin açısını artırdığını; seramiğin sınırlayıcı basıncını artırdığını ve yüksek gerinim oranında güçlendirme etkisine sahip olduğunu eklemişlerdir [27].

Savunma teknolojileri, tarih boyunca ülkelerin siyasi ve ekonomik anlamda gücünü belirleyen önemli etkenlerden biri olmuştur. Bu teknolojilerin en önemlisi ise personeli korumak amacıyla kullanılan zırh sistemleridir. Zamanla daha hızlı gelişen askeri hücum gücü ve

mermi teknolojisi, alışlagelmiş zırh yöntemlerinin etkinliğini kaybetmesine neden olmuş, bu nedenle savunma uygulamalarına yönelik değişik mekanik özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Literatürde ve mevcut kullanımlarda görüleceği gibi bu malzemelerin başında seramikler gelmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan Alümina seramikler ise diğer seramiklere göre daha kolay ve ucuz üretim olanağı sağlamaktadır. Ayrıca tek parça halinde üretilen seramik zırhlar, ilk mermi isabetinden sonra kullanılamaz hale gelmektedir. Bu çalışmada, çoklu mermi isabetinde kullanılabilir olması için karolar halinde ve modüler seramik zırh kullanımı hedeflenmiştir. Ayrıca çok fazla kompozisyonlarla kullanılacak kumaş, polietilen gibi ekstra tabakaların ek olarak nasıl etki sağlayacağı incelenmiştir.

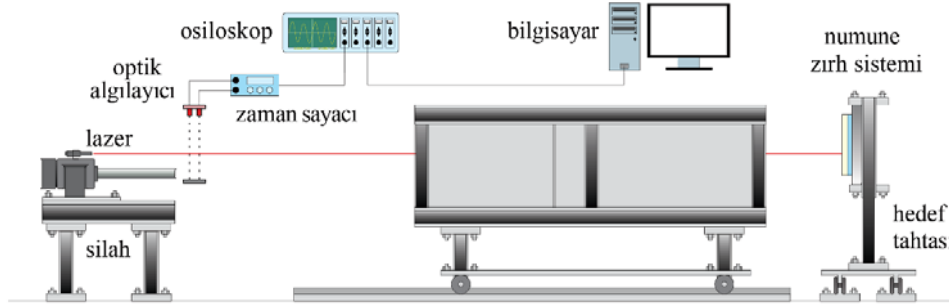
Bu çalışmada, Alümina (Al_2O_3) seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı poli-etilen (UHMWPE) destek katmanlı bir kompozit zırh sisteminin yüksek hızda darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde, Xiamen Innovacera Advanced Materials Limited Şirketi'ne ait alümina (Al_2O_3) seramik karolar ve poli-etilen destek tabakasıyla oluşturulan zırh sisteminin uluslararası standartlara göre balistik testleri yapılmış, sistemin hasar şekilleri incelenmiştir. Balistik testler Nurok Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. (Ankara) balistik test laboratuvarında yapılmıştır. Seramik karolar, 3'er adet yan yana ve 3'er adet alt alta gelecek şekilde dizilmiş, epoksi reçine yardımıyla birbirleriyle ve arka destek katmanıyla birleştirilmiş ve ardından fırınlanmıştır. Testlerde Makine Kimya Endüstrisi yapımı çelik çekirdekli 7,62×51mm AP (zırh delici) mermi kullanılmıştır. Atış testlerinde mermi hızı düzeneğe ait

sensörler yardımıyla ölçülmüş, Deneysel çalışma kısmında verilen uluslararası ilgili standartlar doğrultusunda testler gerçekleştirilmiştir.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Balistik deneylerde kullanılan düzenekler, ana hatlarıyla ateşlemenin gerçekleştiği bir silah, hedef tahtası, güvenlik ekipmanları ve ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Ateşleyici olarak, mermi türüne göre gerçek tabancalar veya tüfekler kullanılmakta ya da mermi çekirdeğini direkt fırlatan gaz silahları kullanılabilir. Namlulardan çıkan mermilerin hızları sensörler yardımıyla kayıt altına alınmaktadır. Test yapılacak numuneler ise standartlarda yer alan uzaklıklara göre ayarlanabilen hedef tahtaları üzerine yerleştirilmektedir. Merminin hedef üzerinde istenilen yere çarpmasını sağlamak amacıyla namlu üzerine bir lazer işaretçi yerleştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında da benzer bir düzene kullanılmıştır. Bu ana yapıya ek olarak kullanılan düzenekte, hedefin delinmesi ihtimaline karşı hedef arkasına ve etrafa fırlayabilecek parçalara karşı hedefin çevresine koruyucu konstrüksiyonlar yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan balistik test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

Hafif silahlara karşı kullanılan zırh sistemlerinde balistik performanslar ölçülürken genellikle Amerikan NIJ ve NATO STANAG 4569 standartları kullanılmaktadır [31, 32]. Tabanca veya piyade tüfeği gibi hafif silahlara karşı kullanılacak seramik zırh sistemleri için Tablo 1 ve Tablo 2'de belirtildiği gibi NIJ ve STANAG standartlarına göre seviye-3 kullanılmaktadır. Avrupa Balistik



Şekil 1. Balistik test düzeneği (Ballistic test setup)

Tablo 1. NIJ Standartları (NIJ Standards) [31]

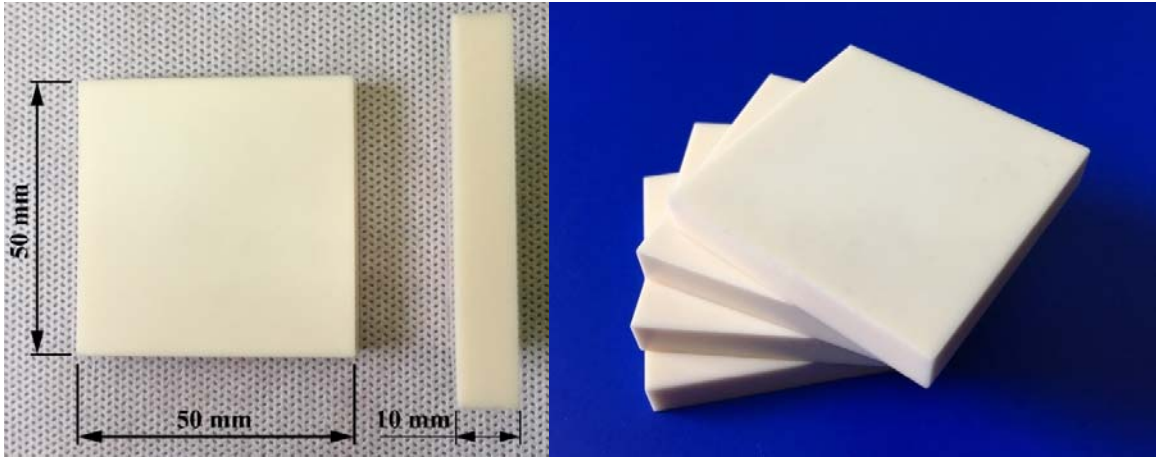
Zırh Tipi	Mermi Kalibresi	Mermi Ağırlığı	Mermi Hızı
I	.22 LRHV Lead	2,6 g (40 gr)	329 ± 15 m/s
	.380 ACP FMJ RN	6,2 g (95 gr)	322 ± 15 m/s
II-A	.40 S&W FMJ	11,6 g (180 gr)	322 ± 15 m/s
	9 mm FMJ	8,0 g (124 gr)	340 ± 15 m/s
II	.357 Magnum JSP	10,2 g (158 gr)	436 ± 15 m/s
	9 mm FMJ RN	8,0 g (124 gr)	367 ± 15 m/s
III-A	.44 Magnum SJHP	15,6 g (240 gr)	436 ± 15 m/s
	9 mm FMJ RN	8,0 g (124 gr)	436 ± 15 m/s
III	7.62mm FMJ (M80 Ball)	9,6 g (148 gr)	847 ± 15 m/s
IV	.30 Kalibre AP (M2)	10,8 g (166 gr)	878 ± 15 m/s

Tablo 2. NATO STANAG 4569 Standartları (NATO STANAG 4569 Standards) [32]

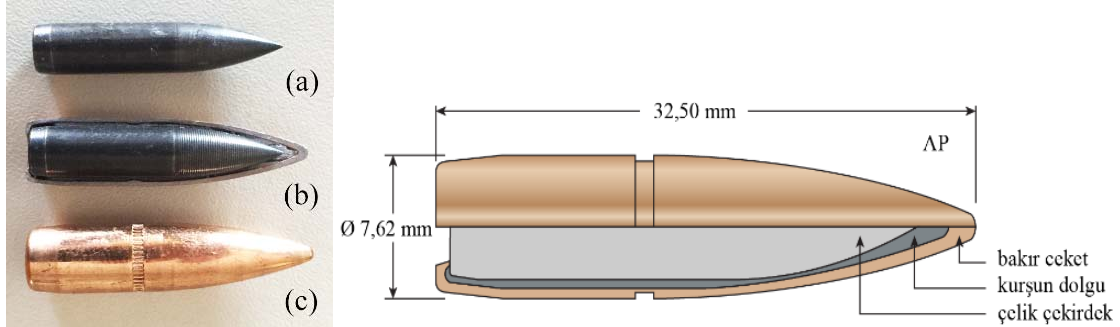
Seviye	KE Tehdit	Mermi	Mesafe	Hız
1	Tüfek	7,62×51mm NATO Ball M80	30 m	833 ± 20 m/s
		5,56×45mm NATO SS 109		900 ± 20 m/s
		5,56×45mm M193		937 ± 20 m/s
2	Piyade Tüfeği	7,62×39mm API BZ	30 m	695 ± 20 m/s
		7,62×51mm AP (WC Core)		930 ± 20 m/s
3	Keskin Nişancı Tüfeği	7,62×54R B32 API	30 m	854 ± 20 m/s
		14,5×114mm API / B32		911 ± 20 m/s
5	Otomatik Top	25 mm APDS-TM-791	500 m	1258 ± 20 m/s

Standartlarında ise BR6 ve BR7 kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde, mermi çeşidi, mermi özellikleri, atış mesafesi, mermi hızı gibi özellikler bu standartlar doğrultusunda uygulanmıştır. Standartlara göre yapılan balistik testlerde, zırh sisteminin arkasına insan vücudunu temsil eden bir macun yerleştirilmektedir. Bu yöntemle gerçekleştirilen testler sonucunda, zırh sisteminin arkasında meydana gelen çıkıntı, yani macunda oluşan çöküntü miktarının 44 mm'nin altında olması istenmektedir. Bu değer, hayati organları koruma amaçlı belirlenmiş bir büyüklüktür [31, 32]. Bu çalışma kapsamında, seramik önyüzlü kompozit bir zırh sisteminin balistik darbe davranışları incelenmiştir. Seramik ön yüz olarak, Şekil 2'de görülen Xiamen Innovacera Advanced Materials Limited Şirketi'ne ait Alümina (Al_2O_3) tercih edilmiş, arka destek katmanında ise Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. üretimi olan ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozit malzeme kullanılmıştır. Seramikler yüzde 99,5'in üzerinde saflıkta

alüminyum oksitten yani "alümina"dan (Al_2O_3) oluşmaktadır. Oldukça yüksek elektrik yalıtımına sahip alümina seramiklerin elastisite modülü 370-380 MPa aralığındadır. Mekanik dayanımı 380 MPa, basma dayanımları ise 2450 MPa'dır. Alümina seramiklerin ergime sıcaklığı 2070°C'dir. Her bir seramik karo, $10 \pm 0,05$ mm kalınlığa ve $50 \times 50 \pm 0,05$ mm kare yüzey alanına sahiptir. Hacmi yaklaşık 25 cm^3 olan seramik karoların ağırlıkları 95-97 gram gelmekte ve özkütleleri ise $3,85-3,88 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Polietilen malzemenin yoğunluğu 950 kg/m^3 , kesme modülü ise 400 MPa'dır. Seramik önyüzlü zırh sistemlerinin balistik koruma seviyeleri belirlenirken Amerikan NIJ standartlarında Seviye-III, NATO Standartları STANAG 4569'a göre ise yine Seviye-3 esas alınmaktadır. Her iki standartta da $7,62 \times 51 \text{ mm}$ (AP) zırh delici mermi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, MIL-C-60617 standartlarına uygun olarak MKE Gazi Fişek Fabrikası'nda üretilmiş zırh delici mermiler kullanılmıştır (Şekil 3). Mermi özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan Alümina (Al_2O_3) seramik karo (Alumina ceramic tile)



Şekil 3. Zırh delici mermi a) çelik çekirdek b) kurşun dolgu ve çelik çekirdek c) bakır ceket ile birlikte tüm çekirdek. (Armor Piercing Ammo a) steel core b) core and lead filling c) entire bullet with copper jacket)

Tablo 3. MKE yapımı $7,62 \times 51 \text{ mm}$ zırh delici mermi özellikleri (Features of MKE-made $7.62 \times 51 \text{ mm}$ armor-piercing (AP) bullet)

Fişek Boyu	71,12 mm
Fişek Ağırlığı	~24 g
Hız (23.7 m)	$838 \pm 9,1 \text{ m/s}$
Ort. Namlu Basıncı	min. 550 bar
Ort. Kovan Ağız Basıncı	max. 3800 bar
Dağılım (100m)	Ort. Dağ. Yarıçapı Max. 3,1 cm
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 27 kgf (265N)
Harekete Geçme Zamanı	max. 4 ms
Kovan Model Numarası	7,62 mm x 51 Kovan
Kovan Boyu	51,18 -0.30 mm
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Mermi Malzemesi	Bakır Kaplanmış Çelik Çekirdek ve Kurşun Çekirdek (Kurşun-Antimon Alaşımı)
Kapsül	7,62 mm Kapsül, Boxer
Barut	Küresel Barut
Mermi Ağırlığı	$9,45 \pm 0,15 \text{ g}$

Deneyler sırasında seramik önyüzlü zırh sistemi oluşturulurken, seramiklerin arka kısmında yer alan destek katmanı olarak 10 mm kalınlığında ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozit yerleştirilmiştir. Ayrıca bazı numunelerin ön yüzeyine, darbe sonrası kırılan seramik parçalarının dağılmaması için bir kat cam-fiber kumaş yerleştirilmiştir. Seramik önyüzlü zırh sisteminde, basma dayanımı, korozyon direnci ve sertliğinin yüksek olması nedeniyle alümina seramik kullanılarak üzerine isabet eden yüksek kinetik enerjiye sahip merminin ucunun deforme olması, hatta parçalanması hedeflenmiştir. Arka yüzeyde ise, belirli bir hız kadar yavaşlayan ve körelen merminin artık kinetik enerjisini sönmülemek ve oluşan parçacıkların dağılmasını engellemek amacıyla ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit kullanılmıştır. Şekil 4'de şematik olarak görülen zırh sisteminde parçalar birbirlerine epoksi reçine yardımıyla yapıştırılmıştır.

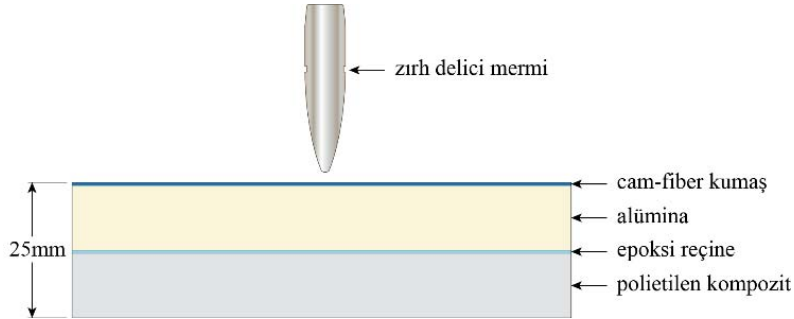
Standartlar belirlenirken, belirli uzaklıklarda aynı kaynaktan çıkmış iki merminin, hedef üzerinde 100mm çapında bir alana aynı anda isabet etme olasılığının çok düşük olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla zırh tasarımında ilk isabetten sonra deformasyonun bu alanla sınırlı kalması ve ikinci mermi isabetinde korumaya devam etmesi beklenmektedir [31, 32]. Aynı zamanda modüler zırh sistemi tasarlanırken deforme olan parçaların değiştirilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında kullanılan seramikler, Şekil 5a'da görüldüğü gibi 3x3 olacak şekilde toplam 9 adet olarak dizilmiştir. Bu sayede hasarın, ilk isabetin olduğu karodan sonra 100mm çapında sınırlı kalıp kalmayacağı incelenecektir. Seramiklerin arka yüzeylerine gelecek şekilde yerleştirilen ve destek tabakası olarak kullanılan ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit, epoksi reçine yardımıyla karolara birleştirilmiştir. Karoların üst yüzeyine, Şekil 5b'de görüldüğü gibi çarpışma sırasında seramiklerin dağılmasını önlemek ve vakumlama yapabilmek

amacıyla bazı numuneler sadece çok ince bir film kaplanmıştır. Diğer numunelere ise Şekil 5c'de görüldüğü gibi epoksi reçine emdirilmiş bir kat cam-fiber dokuma kumaş yapıştırılmış ve onun üzerine aynı ince film katmanı yerleştirilmiştir. Tamamı epoksi reçine yardımıyla birleştirilen zırh sistemi, fırınlanma sırasında bir arada durmaları ve birbirlerine daha iyi yapışmalarını sağlamak amacıyla vakumlanmaktadır.

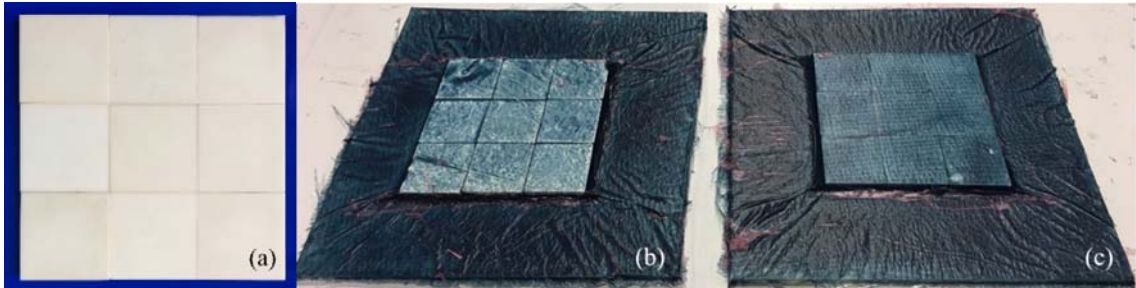
Hazırlanan alümina seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit destek tabakalı zırh sistemleri Şekil 6'da görüldüğü gibi test düzeneğine yerleştirildikten sonra, 7,62×51mm (AP) zırh delici mermiler kullanılarak atışlar gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde standartlar çerçevesinde testler yapılırken, kısa mesafeden sabit namlulu ve gaz beslemeli bir düzenek yardımıyla lazerle işaretlenerek ateşleme yapıldığı için mermilerin sapma oranı çok düşüktür. Atışların tamamı, istenildiği gibi 5x5cm'lik ortadaki karo içerisinde kalmaktadır. Numune bağlanan hedef tahtası kaydırılarak, mermilerin isabet etmesi istenilen yer ayarlanabilmektedir. Standartlar gereği oluşturulan her bir zırh numune şekline (kumaş takviyeli ya da kumaş takviyesiz) 3'er adet test yapılmıştır. Yapılan deneylerde, silah namlusundan çıkan ve optik okuyucular ile ölçülen mermi hızlarının 838±3 m/s arasında değiştiği görülmüştür (Tablo 4).

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Al₂O₃ seramik önyüzlü polietilen kompozit zırh sistemlerinin 7,62 mm zırh delici mermi ile gerçekleştirilen balistik testleri sonucu mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızları 838±3 m/s olarak ölçülmüştür. Atışlar sonrası mermi çekirdeklerinin isabet ettiği noktalar Şekil 7'de gösterilmiştir. Mermi çekirdekleri genellikle, merkezde bulunan seramiklerin ortasına ve kenarlarına doğru bir



Şekil 4. Deneylerde kullanılan seramik kompozit zırh modeli (Ceramic composite armor system used in experiments)



Şekil 5. a) 3x3 Dizilmiş alumina karolar b) kumaşsız fırınlanmış zırh sistemi c) kumaşlı fırınlanmış zırh sistemi
(a) Lined alumina tiles 3x3 (b) baked armor system without fabric (c) baked armor system with fabric)

Tablo 4. Atış deneylerinde ölçülen mermi hızları (Bullet velocities measured in tests)

Atış	1. Atış	2. Atış	3. Atış	4. Atış	5. Atış	6. Atış
Hız	837 m/s	841 m/s	839 m/s	838 m/s	840 m/s	838 m/s
Numune	Yüzeyi e-cam fiber kumaş takviyesiz 3-adet			Yüzeyi e-cam fiber kumaş takviyeli 3-adet		

noktaya isabet ettirilmişlerdir. Atış sonrası, yüzeyi bir kat fiber kumaşla desteklenmeyen numunelerden ikisi tamamen bütünlüğünü kaybettiği için kayıt altına alınamamıştır. Bir tanesi ise Şekil 7a'da gösterilmiştir. Yüzeyi bütünlüğü koruması amacıyla bir kat e-cam kumaş kaplanan numuneler ise amacına ulaşarak bütünlüğünü korumuş ve Şekil 7b-Şekil 7d'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Test düzeneğine bağlanmış zırh numunesi
(Armor sample attached to test setup)

Zırh delici mermi, sert seramik yüzeye çarptığında çelik çekirdeğin üzerindeki bakır ve kurşun tabakalar sıyrılmakta, merkezdeki ucu sivri çelik çekirdeğin ise ucu deforme olmakta ve hatta parçalanmaktadır. Mermi çekirdeğinde ve seramikte oluşan bu parçalanmaya, yüksek gerinim hızıyla birlikte oluşan ani çeki ve bası gerilmeleri neden olmaktadır. Atışta kullanılan merminin atıştan önceki hali ve atıştan sonra geriye kalan çelik mermi çekirdeğine ait görüntüler Şekil 8'de verilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar dikkate alındığında, fiber takviyeli polimer kompozitlerin tek başlarına zırh delici mermiyi engelleyemediği, merminin kompozit malzemeyi delip geçtiği, hatta merminin ucunu deforme bile etmediği görülmektedir [33]. Buna göre yapılan deneylerde, zırh sisteminin ön yüzeyine seramik bir katman eklenmesinin, merminin ucunu kırarak deforme ettiği ve kırılma sırasında kinetik enerjinin çok büyük bir kısmını sönmülediği anlaşılmaktadır. Bu bakımdan, ön yüzeyde kullanılan seramik katmanın koruma düzeyine çok büyük fayda sağladığı görülmektedir. Ayrıca seramik katmanın üzerine bir kat e-cam kumaş serilmesinin de, Şekil 7'de görüldüğü gibi kırılan parçaları bir arada tutmak için fayda sağladığı gözlemlenmiştir.

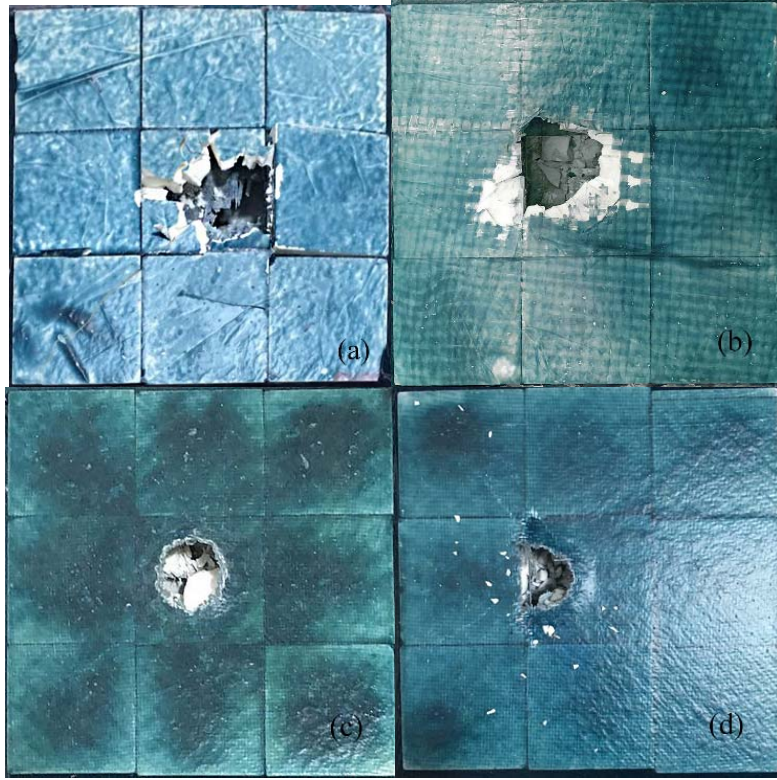
Deneyler sonucu alümina seramik katman incelendiğinde ilk olarak, seramiğin ön yüzeyindeki deformasyonun arka yüzeyden daha az olduğu görülmektedir. Merminin isabet ettiği karonun bütünlüğü

incelendiğinde, tam ortaya isabet alan karonun bütünlüğünün kenarına isabet alan karoya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı şekilde çatlak yayılımının merminin kinetik enerjisiyle orantılı olmasından kaynaklı olarak isabetin olduğu yere yakın olan karolarda deformasyonun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Arka yüzey incelendiğinde ise, merminin isabet ettiği seramiğin arka yüzeyinde Şekil 10'da görüleceği gibi kırılma konisinin olduğu dikkat çekmektedir. Seramik üzerindeki kırılmaların çarpışma noktasından itibaren radyal yönde oluştuğu görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda da aynı şekilde oluşmuş kırılma konisi ve radyal yöndeki ana çatlaklar bariz şekilde örtüşmektedir [29, 30]. Komşu seramiklerde oluşan deformasyonun ise çarpışma noktasına yakın olan kısım haricinde düşük seviyede kalarak, düzensiz kılcak çatlaklar şeklinde geliştiği görülmektedir. Komşu seramik karolarda oluşan kılcak çatlaklar merminin kinetik enerjisinin emiliminde rol oynamaktadır, ancak balistik standartlarda istenildiği gibi 100 mm'lik bir çap içerisinde kalarak komşu seramik diziliminin kenarlarına etki etmediği görülmektedir. Bu çatlak yayılımının 9x9 karo dizilimin kenarlarına ulaşmaması ve 100mm çapında bir alan içerisinde kalması gelecek olan ikinci bir isabete karşı zırh sisteminin korumasını sürdürebileceğini göstermektedir. Jiusti vd. [17] yaptığı çalışmada benzer yöntemlerle yapılan testlerde altıgen alümina karoların da benzer bir çatlak yayılımı izlediği ve 115 mm lik bir çap içerisinde kaldığı görülmektedir. Kırılma boyutunun da geometriden bağımsız olarak merminin kinetik enerjisi ile doğru orantılı olduğu Wu vd. [29] yaptığı çalışmada görülmektedir.

Çarpışma sonrası mermi ve seramikte deformasyon birlikte gelişmektedir. Seramiğin ön yüzünde oluşan kırılma sonucunda, kopan küçük parçalar zırhın dışına doğru fırlamaktadır. Seramik yüzeyin üzerine bir kat e-cam kumaş ilave edilmesi, seramikten ayrılan büyük parçaların dağılmasını ilave edilmeyene oranla daha fazla engellediği görülmüştür. Şekil 7'de ön yüzüne bir kat cam-fiber kumaş ilave edilmiş ve ilave edilmemiş zırh sistemi numunelerinin testler sonrasında çekilen fotoğrafları görülmektedir. Üzerinde kumaş olmayan seramiklerden daha fazla parça koştugu, hatta deformasyona uğramamış bir seramik karonun oluşan basıncın etkisiyle yapıştırdığı yerlerden kurtularak zırhın bütününden ayrıldığı gözlenmektedir (Şekil 7a). Ön yüzüne kumaş yerleştirilen sistemin ise oluşan deformasyonlara rağmen bütünlüğünü koruduğu görülmektedir (Şekil 7b-Şekil 7d). Şekil 9'da, Şekil 7b'de yer alan kumaş destekli numunenin yüzeyi kumaştan ayrıştırılmış hali görülmektedir. Zırh numunelerinin yüzeyleri temizlendiğinde çatlak oluşumları biraz daha belirginleşmiştir. Çarpışma noktasından kenarlara doğru oluşan radyal çatlaklar daha rahat görülmektedir. Hatta kumaş kaplı numunede daha büyük parçaların koştugu, ancak kumaş tarafından tutulduğu gözlemlenmiştir. Kumaş ayrıldığında kopan bu parçalar da ana gövdeden ayrılmıştır.

Seramik ön tabaka, zırh sisteminden ayrılarak arka yüzeyi incelendiğinde çarpışma sonucu oluşan kırılma konisi bariz bir şekilde görülmektedir. Zırh sisteminden ayrılan seramik tabakanın arka yüzeyinde meydana gelen kırılma dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'da görülen bu kırılma konisi, merkezde bulunan ve mermi çarpışmasına maruz kalan seramik karonun tüm arka yüzeyini kapsamaktadır. Ayrıca deformasyon komşu seramiklere kadar uzanmaktadır. Oluşan radyal kırıklar arka yüzeyde çok daha belirgindir. Çarpışma noktasına uzak çevre seramiklerde ise kırılmaya nazaran daha çok kılcak çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar çoğunlukla gelişigüzel dağılmaktadır (Şekil 11).

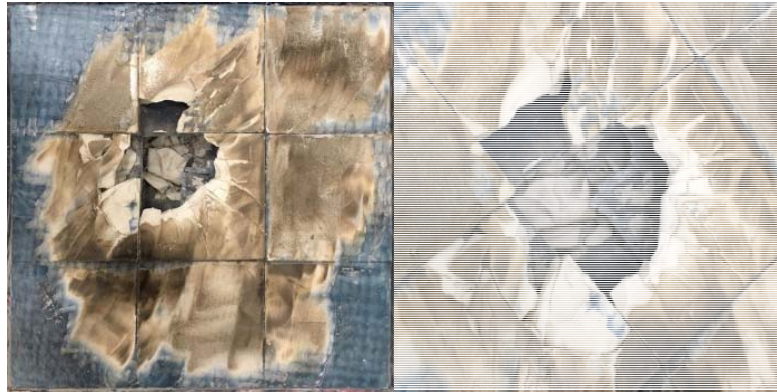
Merminin çarpması ile oluşan kırılmaların, çarpışmanın ilk gerçekleştiği seramikte ve 50 mm çapında bir alan içerisinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kırılma konisi de bu alan içerisinde yoğun olarak oluşmakta ve merminin kinetik enerjisinin çok büyük bir kısmı bu kırılma sonucu absorbe edilmektedir.



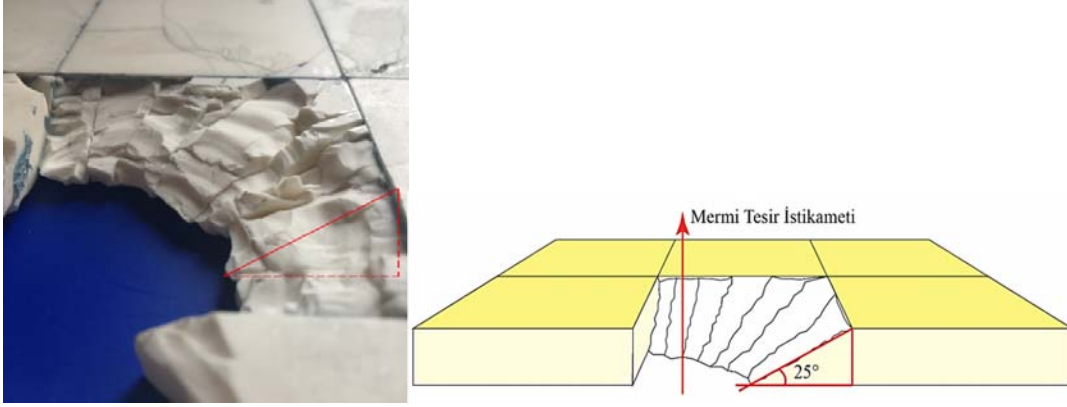
Şekil 7. Balistik test sonucu deney numunelerinin görüntüleri a) Kumaş desteksiz b-d) Kumaş destekli
(Appearances of test samples as a result of ballistic testing a) Without fabric reinforcement b-d) With fabric reinforcement)



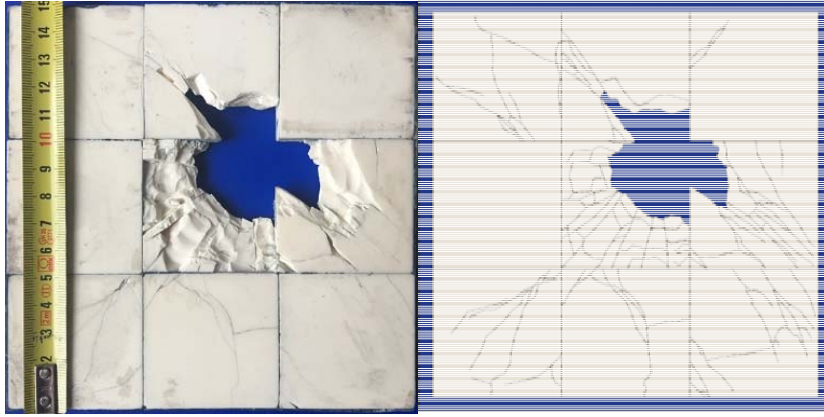
Şekil 8. a) Atış öncesi mermi b) Atış sonrası 7.62×51mm zırh delici mermi
(a) Bullet before the test b) 7.62×51mm bullet after the test)



Şekil 9. Kumaştan ayrıştırılan seramik zırh ön yüzeyi (Ceramic armor front surface separated from the fabric)



Şekil 10. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan kırılma konisi (Fracture cone formed on the back surface of the ceramic)



Şekil 11. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımı (Crack distribution on the back surface of the ceramic)



Şekil 12. Zırh sisteminin arka yüzeyinde oluşan çöküntü (The depression formed on the back surface of the armor system)

Çevre seramik karolardaki kılcal çatlak ilerleyişleri dikkate alındığında, çoğunlukla çatlakların 3×3 dizilimdeki seramik kompozisyonun dış kenarlarına kadar ulaşmadığı görülmektedir (Şekil 11). Komşu seramiklerin bağlanma kuvvetleri, yüksek hızda çarpan mermiye karşı direnmek için merkez seramik karoya destek sağlamaktadır ve çarpışma sonrası merminin kinetik enerjisinin emilimine yardımcı olmaktadır. Çatlakların bir bölümü, penetrasyon sırasında seramik tabakasının eğilme deformasyonu nedeniyle de oluşabilmektedir. Çatlakların komşu seramik karoların dışına kadar etki göstermemesi, uygulamada oluşturulacak daha fazla seramik karoya sahip ve daha geniş alanlı bir alümina seramik tabakanın tamamının hasar görmeyeceğini ve standartlarda beklenen çoklu atış performansına göre istenilen korumayı sağlayabileceğini kanıtlar

niteliktedir. Tabanca, otomatik tabanca, piyade tüfeği ve benzeri gibi hafif silahlara karşı kullanılan zırh sistemleri için belirlenen standartlara (NIJ, STANAG...) göre, zırhı kullanacak personelin hayati organlarını koruyabilmesi için zırh arka yüzeyinde meydana gelecek çöküntü miktarının 44 mm'yi geçmemesi gerekmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda, seramik önyüzlü kompozit zırh sisteminin arka yüzeyinde bulunan poli-etilen kompozit tabakada oluşan çöküntü miktarının 18-20 mm arasında değiştiği ölçülmüştür (Şekil 12). Elde edilen bu değerler de istenilen uluslararası personel koruma standartlarına uygun olduğundan, oluşturulan zırh sistemi kompozisyonunun, gerekli korumayı sağlayabilecek ve tercih edilebilir bir kompozisyon olduğu anlaşılmaktadır.

Genel olarak deney sonuçlarına bakıldığında; oluşturulan alümina seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit destek plakalı ve epoksi reçine ile birleştirilmiş zırh sisteminin standartlar çerçevesinde istenilen özellikleri sağladığı görülmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Al₂O₃ seramik önyüzlü polietilen kompozit zırh sistemlerinin 7,62 mm zırh delici mermi ile gerçekleştirilen balistik testleri sonucu mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızları 838±3 m/s olarak ölçülmüştür. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre;

- Zırh delici mermi, sert seramik yüzeye çarptığında çelik çekirdeğin üzerindeki bakır ve kurşun tabakalar sıyrılmış, merkezdeki ucu sivri çelik çekirdeğin ise ucu deforme olmuş ve parçalanmıştır.
- Merminin isabet ettiği seramiğin arka yüzeyinde belirgin bir şekilde kırılma konisi oluşmuştur.
- Seramik üzerindeki çatlaklar çarpışma noktasından itibaren radyal yönde oluşmuştur. Komşu seramiklerde oluşan deformasyon çarpışma noktasına yakın olan kısım haricinde düşük seviyede kalmış, düzensiz kılcal çatlaklar şeklinde gelişmiştir.
- Oluşan radyal kırıklar arka yüzeyde çok daha belirgindir.
- Çatlak ilerleyişinin, 3×3 dizilimdeki seramik kompozisyonun dış kenarlarına kadar ulaşmadığı görülmüştür.
- Merminin çarpması ile oluşan kırılmaların, çarpışmanın ilk gerçekleştiği seramikte ve 50 mm çapında bir alan içerisinde yoğunlaştığı görülmüştür.
- Komşu seramik karolarda oluşan bu çatlaklar 100mm'lik bir çap içerisinde kalarak komşu seramiklerin dışına etki etmediği için ikinci bir tehdite karşı zırh sisteminin korumasını sürdürebileceğini göstermiştir.
- Seramik yüzeyin üzerine bir kat e-cam kumaş ilave edilmesinin, seramikten ayrılan büyük parçaların dağılmasını engellediği görülmüştür.
- Üzerinde kumaş olmayan seramiklerden daha fazla parça koptuğu, hatta deformasyona uğramamış bir seramik karonun oluşan basıncın etkisiyle yapıştırıldığı yerlerden kurtularak zırhın bütününden ayrıldığı gözlemlenmiştir.
- Arka yüzeyde bulunan poli-etilen kompozit tabakada oluşan çöküntü miktarının 20±5 mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre, oluşan çatlakların davranışı, uygulamada oluşturulacak daha fazla seramik karoya sahip ve daha geniş alanlı bir alümina seramik tabakanın tamamının hasar görmeyeceğini ve standartlarda beklenen çoklu atış performansına göre istenilen korumayı sağlayabileceğini; poli-etilen kompozit tabakada oluşan çöküntü miktarının, uluslararası personel koruma standartlarına uygun olduğu ve deneylerde kullanılan zırh sisteminin gerekli korumayı sağlayabilecek ve tercih edilebilir bir kompozisyon olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları zırh yapısının optimal tasarımı için bir referans sağlayabilir.

Zırh sisteminin kalınlıklarının optimize edilmesi, seramik ve poli-etilen malzemeler değiştirilerek sonuçların karşılaştırılması, zırh sisteminin farklı mühimmatlara karşı tepkisinin incelenmesi ve sayısal bir model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalardır.

Kaynaklar (References)

1. Jung W.K., Lee H.S., Jung J.W., Ahn S.H., Lee W.L., Kim H.J., Kwon J.W., Penetration mechanisms of ceramic composite armor made of Alumina-GFRP, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 8 (4), 38-44, 2007.
2. Mahdi S., Gama B.A., Yarlagadda S., Gillespir J.W., Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural

- performance of multi-functional composite structures, *Composites: Part A*, 34, 635-647, 2003.
3. Hamouda A.M.S., Hashmi M.S.J., Testing of composite materials at high rates of strain: advances and challenges, *Journal of Materials Processing Technology*, 77 (1-3), 327-336, 1998.
4. National Research Council, Opportunities in protection materials science and technology for future army applications, The National Academies Press, Washington D.C., 12-13, 2011.
5. American National Standards Institute, MIL-DTL-12560 Armor plate, steel, wrought, homogeneous (for use in combat-vehicles and for ammunition testing), Washington D.C., 2009.
6. American National Standards Institute, MIL-DTL-46100 Armor plate, steel, wrought, high-hardness, Washington D.C., 2008.
7. Sharma P., Chandel P., Bhardwaj V., Singh M., Mahajan P., Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles, *Thin-Walled Structures*, 126, 205-219, 2017.
8. Bandaru A.K., Ahmad S., Bhatnagar N., Ballistic performance of hybrid thermoplastic composite armors reinforced with Kevlar and basalt fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 97, 151-165, 2017.
9. Walley S.M., Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour. *Advances in Applied Ceramics*, 109 (8), 446-466, 2010.
10. Chen W.W., Rajendran A.M., Song B., Nie X., Dynamic fracture of ceramics in armor applications, *Journal of the American Ceramic Society*, 90 (4), 1005-1018, 2007.
11. Lundberg P., Renström R., Lundberg B., Impact of metallic projectiles on ceramic targets: translation between interface defeat and penetration, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 259-275, 2000.
12. Kaufmann C., Cronina D., Worswicka M., Pageaub G., Bethc A., Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour, *Journal of Shock and Vibration*, 10 (1), 51-58, 2003.
13. Dateraksa K., Sujirote K., McCuiston R., Atong D., Ballistic performance of ceramic/s-glass composite armor, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 22 (2), 33-39, 2012.
14. Chen L., Zheng K., Fang Q., Effect of strain rate on the dynamic tensile behaviour of UHMWPE fibre laminates, *Polymer Testing*, 63, 54-64, 2017.
15. Lässig T., Bagusat F., Pfänder S., Gulde M., Heunoske D., Osterholz J., Stein W., Nahme H., May M., Investigations on the spall and delamination behavior of UHMWPE composites, *Composite Structures*, 182, 590-597, 2017.
16. Fallah A.S., Micallef K., Langdon G.S., Lee W.C., Curtis P.T., Louca L.A., Dynamic response of Dyncema® HB26 plates to localised blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 73, 91-100, 2014.
17. Jiusti J., Kammer E.H., Neckel E., Löh N.J., Trindade W., Silva A.O., Montedo O.R.K., De Noni Jr. A., Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials, *Ceramics International*, 43 (2), 2697-2704, 2017.
18. Toussaint G., Polyzois I., Steel spheres impact on alumina ceramic tiles: Experiments and finite element simulations, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 16, 2131-2152, 2019.
19. Çelikbaş D., Acar E., Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile, *Procedia Structural Integrity*, 35, 269-278, 2022.
20. Seiferta W., Strassburger E., Dolak M., Schaare S., Experimental study on the dependency of the ballistic performance of tiled ceramic/metal targets on inter tile gap width and projectile impact position, *International Journal of Impact Engineering*, 122, 50-59, 2018.
21. Guo G., Alam S., Peel L.D., An investigation of the effect of a Kevlar-29 composite cover layer on the penetration behavior of a ceramic armor system against 7.62 mm APM2 projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 157, 104000, 2021.
22. Khan M.K., Iqbal M.A., Bratov V., Morozov N.F., Gupta N.K., An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target, *Thin-Walled Structures*, 154, 106784, 2020.
23. Erçetin A., Özgün Ö., Aslantaş K., Powder metal Al₂O₃ reinforced Mg₃Sn matrix composites: Production and characterization, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 1003-1012, 2022.
24. Arkan R., Wear Behaviour of ZA-12 Alloy Composites Reinforced with Saffil (δ -Al₂O₃) Fibres, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (3), 359-368, 2013.

25. Gulcimen Cakan B., Ensarioglu C., Küçükakarsu V.M., Tekin İ.E., Çakır M.C., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1657-1668, 2021.
26. Du S.Q., Chao Z.L., Wang Z.W., Luo T., Jiang L.T., Chen S.P., Zhao Q.Q., Zhang R.W., Han B.Z., Han H.M., Chen G.Q., Li W.L., Wu G.H., Study on the protective performance of high-performance multi-scale (SiCh-p+B₄Cp)/5083Al ceramic array armor with excellent ballistic properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 6756-6768, 2023.
27. Jiang Y., Qian K., Zhang Y., Xia Y., Xiong Z., Zhang Z., Yu K., Experimental characterisation and numerical simulation of ballistic penetration of columnar ceramic/fiber laminate composite armor. *Journal of Materials & Design*, 224, 111394, 2022.
28. Pan G., Su H., Li X., Wang J., Coupled FEM-SPH simulation of the protective properties for metal/ceramic composite armor. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 6 (4), 543-551, 2023.
29. Wu Y., Wang X., Ma M., Yu Y., Lu W., Wang B., Gao G., Breaking behavior and stress distribution of T12A hard steel core penetrating ceramic/aluminum alloy lightweight composite armor, *Journal of Materials Today Communications*, 37, 107115, 2023.
30. Si P., Liu Y., Yan J., Bai F., Shi Z., Huang F. Effect of polyurea layer on ballistic behavior of ceramic/metal armor, *Journal of Structures*, 48, 1856-1867, 2023.
31. National Institute of Justice, Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06, U.S. Department of Justice, Washington D.C., 1-75, 2008.
32. Nato Standardization Office, AEP-55 Procedures For Evaluating The Protection Level Of Logistic And Light Armoured Vehicles, STANAG Standart-4569, 1-25, 2005.
33. Ramadhan A.A., Abu Talib A.R., Mohd Rafie A.S., Zahari R., High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels, *Materials and Design*, 43, 307-321, 2013.