



Alınış tarihi (Received): 09.06.2022

Kabul tarihi (Accepted): 22.06.2022

Alümina, Grafen/Epoksi ve UHMWPE' den Oluşan Çok Katmanlı Balistik Zırhın Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

Halil Burak MUTU¹, Alaettin ÖZER^{2*}

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*Sorumlu yazar: alaettin.ozer@bozok.edu.tr

ÖZET: Bu çalışmada Alümina, Grafen/Epoksi ve Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilenden (UHMWPE) oluşan çok katmanlı seramik/kompozit balistik zırhın 7.62x63 M2 (30-06) kalibre zırh delici (AP) mermi etkisi altındaki performansı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kompozit yapıyı oluşturan Grafen/Epoksi ve UHMWPE katmanı 3 farklı kalınlıkta kullanılmıştır. Zırhın balistik özelliklerini belirlemek için LS-DYNA'da explicit dinamik analizler yapılmıştır. Johnson-Cook, Johnson-Holmquist, Composite_Failure_Solid_Model ve Plastic_Kinematic malzeme modelleri sırasıyla mermi, seramik ve kompozit malzemeler için tanımlanmıştır. Analiz sonuçları merminin artık hızı ve zırh yapısının hasar durumu (kısmi veya tam penetrasyon) dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Toplam kalınlığı 16 mm ve 18 mm olan çok katmanlı zırhlarda çarpışma sonrası tam penetrasyon gözlenirken, 20 mm kalınlıktaki zırhta kısmi penetrasyon gözlemlenmiştir. Böylece, bu çalışmayla 20 mm kalınlıktaki zırhın NIJ 0101.06 Level IV standartlarında 7.62x63 M2 AP (30-06) mermiye karşı mevcut zırh plakalarından daha iyi koruma seviyesinde, daha dayanıklı olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Alümina, Grafen/Epoksi, UHMWPE, 7.62x63 M2 (AP), Seramik/kompozit zırh

Finite Element Analysis of Composite Layered Ballistic Plate Performance Made of Alumina, Grafen/Epoxy and Ultra High Molecular Weight Polyethylene

ABSTRACT: Finite element analysis of a composite layered ballistic plate made of Alumina, Graphene/Epoxy and UHMWPE were used for performance test under effect of 7.62x63 M2 (30-06) AP bullet. Three different composite layered plates with Graphene/Epoxy and UHMWPE were used. Explicit finite element analyses were carried out in order to determine ballistic properties of armor in Ls-Dyna. Johnson-Cook, Johnson-Holmquist, Composite_Failure_Solid_Model and Plastic_Kinematic material models were used for bullet, ceramic and composite plate, respectively. Residual speed of bullet and damage of plate were considered to analyze test results. It is seen from the analyses that full penetration was seen for thickness with 16 and 18mm armor, by the way, partial penetration was observed for thickness with 20mm. As a result, it was shown that armor with 20mm thickness has better protection level than present armors according to NIJ 0101.06 Level IV standards with 7.62x63 M2 AP (30-06) bullets.

Keywords – Alumina, Graphene/Epoxy, UHMWPE, 7.62x63 M2 (AP), Ceramic/Composite Armor

1. Giriş

İnsanlığın ilk yıllarından günümüze kadar dış tehditlere karşı koruyucu zırhlar büyük önem arz etmektedir. Tarih boyunca toplumlar birbirleri ile mücadele içine girmişlerdir. Bu mücadelelerde avantaj elde etmek için savaş teçhizatlarında sürekli gelişmeler yaşanmıştır.

Silah teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte bu gelişime karşı olarak zırh teknolojileri de günden güne gelişmektedir. Son yıllarda yeni konseptler ve tasarımlarla hafif, hasara dayanıklı, esnek, büyük enerji sönmeme kapasitesine sahip gelişmiş zırh sistemleri geliştirilmektedir.

Zırhlar, en genel anlamıyla hedefteki kişilere karşı merminin etkisini saptırma veya enerjisini sönmeme özelliğine sahip koruyucu malzemelerdir. Enerji soğurma kabiliyeti yüksek malzemeler ile oluşturulan zırh sistemlerinin kullanılması kaçınılmaz bir hal almıştır. Son yıllarda literatürde balistik zırhlarda katmanlı yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır (Luz ve ark., 2015; Rashed ve ark., 2016; de Oliveira Braga ve ark., 2018; Pereira ve ark., 2019; Oliveira ve ark., 2019; Reis ve ark., 2021).

Seramik malzemeler metal ve metal dışı bileşenlerden elde edilen inorganik metalik olmayan malzemelerdir. Yüksek sertliğe ve basınç dayanımına sahip seramikler, çeşitli mermi tehditlerini yenmek için günümüzün hafif zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Balistik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan seramiklerin başında alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) gelmektedir. Çok katmanlı zırhlarda ön katman olarak kullanılan seramiğin rolü yüksek sertliğe sahip çelik malzemeden yapılmış, hedefe yüksek hızlarda giren mermileri köreltmek ve parçalamaktır (Guo ve ark., 2021). Seramik zırhın arkasında yer alan destekleyici kompozit katman ise merminin kalan kinetik enerjisini sönmektedir (Feli ve Asgari, 2011).

Günümüzde nanoteknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte nanokompozit malzemelerin üretimi ve kullanım alanı artmaktadır. Olağanüstü sertlik ve mukavemet, düşük yoğunluk, büyük kırılma direnci ve yüksek enerji adsorpsiyonu gibi üstün özelliklere sahip nanomalzemelerin balistik zırh malzemeleri olarak kullanılması ile birlikte zırh teknolojisi gelişmektedir. En yaygın olarak kullanılan nanomalzemelere karbon nanotüpler ve grafen nano partiküller örnek olarak gösterilebilir.

Zırh bileşenlerini oluşturan malzemelerin maliyetlerinin yüksek olmasına ek olarak her bir tasarım için üretim ve test sürecinin uzun zaman almasından dolayı tasarımcılar tasarladıkları zırh sistemlerinin doğruluğunu belirlemek için sayısal modelleri kullanmaktadırlar. Tahmine dayalı modeller, balistik performansın tasarımı ve optimizasyonunda önemli bir araçtır. Literatürdeki birçok çalışma, balistik kalkanlar üzerindeki yüksek hızlı etkiyi simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayanan sayısal modeller kullanmıştır. Feli ve Asgari (2011) LS-Dyna programında ön katmanı 20 mm kalınlıkta Al_2O_3 ve arka katmanı 20 mm kalınlıkta Twaron kumaştan oluşan seramik/kompozit zırha silindirik Tungsten merminin etkisini aksel simetrik olarak incelemiştir. SEY simülasyonuna göre, Tungsten merminin seramik ön plakaya çarpmasıyla, seramik karodan parçalanmış seramik konoid oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Chabera ve ark. (2015) ön katmanı Al_2O_3 destekleme katmanı ARMOX500T olan bir seramik/metal zırhın yüzey yoğunluğunu optimize etmek için aksel simetrik bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Oluşturdukları modeli 850 m/s hıza sahip 7.62x54 AP mermisine dayanıklı balistik kalkan tasarlamak için bir tahmin aracı olarak kullanmışlardır. Tepeduzu ve Karakuzu (2019), farklı kalınlık ve kombinasyonlardaki S2 Cam/Epoksi, Aramid/Epoksi ve Karbon-Aramid/Epoksi seramik/kompozit plakaların balistik davranışlarını sayısal simülasyonlarla araştırmış, Aramid/Epoksi ile daha yüksek balistik performans elde etmişlerdir.

Tasdemirci ve ark. (2012) 3 farklı ara katmanın (teflon, kauçuk ve alüminyum köpük) kompozit zırhın balistik performansına etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılmışlardır. Ara katmanın varlığının, katmanlar arasındaki gerilme dalgası iletimini değiştirdiğini belirlemişlerdir. Kauçuk ara katmanın, balistik plakada başlangıç gerilmesi oluşumunu geciktirmeye önemli bir etkisi olmamasına rağmen, alüminyum köpük ve teflon ara katmanın, kompozit arka plakaya iletilen gerilmenin büyüklüğünde önemli bir gecikmeye ve azalmaya neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Xu ve ark. (2022) Bor Karbür (B_4C)/STF/Twaron hibrit kompozit yapının balistik performansını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Farklı katman kalınlıklarında ve farklı kombinasyonlarda yaptıkları deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar birbirleri ile uyum göstermiştir.

Saleem ve ark. (2021) epoksi/5074 Al alaşımı ile desteklenmiş çok katmanlı seramik/kompozit zırhların balistik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Zırh ve merminin sonlu elemanlar modelinin tasarımını ANSYS Workbench kullanarak yapmışlardır. Modelin sonlu elemanlar analizini ise Ansys AUTODYN modülü ile yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kinetik ve sönmülenen enerji miktarını, zırhın deformasyon miktarını belirleyerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Lu ve ark. (2020) Al, B_4C ve UHMWPE levhaların farklı kombinasyonları ile oluşturdukları çok katmanlı zırhın balistik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırmışlardır. B_4C /UHMWPE kompozit zırhın alüminyum arka destekli zırha kıyasla çok daha üstün balistik koruma performansı sergilediğini her iki yöntemle de doğrulamışlardır.

Shen ve ark. (2019) ön katmanı 50 mm x 50 mm x 8 mm SiC karolardan, arka katmanı $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ diziliminde ve boyutu 200 mm x 200 mm x 8 mm olan UHMWPE' den oluşan SiC/UHMWPE kompozit zırhın balistik özellikleri başlangıç hızı 776 ile 791 m/s arasında değişen 7.62 mm çelik çekirdekli mermi ile deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Balistik testlerde, hedefler daha yüksek bir mermi hızı altında kısmi penetrasyona uğrarken daha düşük bir mermi hızı altında tam penetrasyona maruz kaldığını belirlemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile malzeme parametrelerinin doğru şekilde karakterize edilmesi gerektiği çıkarımına ulaşmışlardır.

Wang ve ark. (2021) çalışmalarında mermi hızının ve mermi açısının B_4C /UHMWPE'den oluşan seramik/kompozit hedefin hasar modu ve anti-penetrasyon performansı üzerindeki etkisini belirlemek ve test verilerini doğrulamak için sonlu elemanlar hesaplama programı LS-Dyna kullanmışlardır. Merminin başlangıç hızının ve giriş açısının artmasıyla mermi ve seramik panelin parçalanma derecesinin önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir.

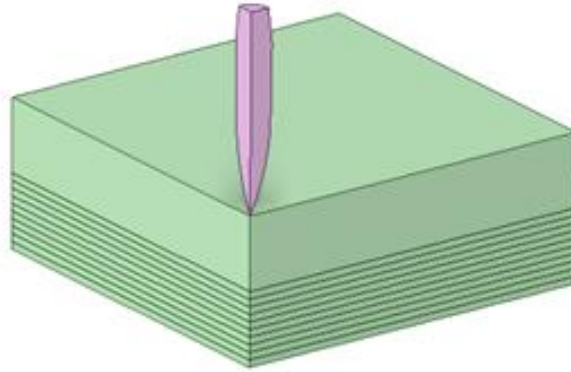
Yazıcı ve ark. (2021) orta katmanı Al5083-H116 alüminyum alaşımı levhadan üst ve alt katmanı karbon-aramid/epoksi kompozit levhadan oluşan sandviç bir levhanın balistik özelliklerini sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelemişlerdir. Karbon-aramid/epoksi kompozit malzemeden oluşan alt ve üst yapının kalınlıkları 10 mm iken orta kısmı oluşturan Al5083-H116 alüminyum katman 20 mm kalınlıktadır. Balistik analizlerinde 9x19 mm Parabellum FMJ (Full Metal Jacket) mermi kullanmışlardır. Yapılan balistik test sonuçlarında 344 ve 370 m/s hızlardaki 9x19mm parabellum mermi enerjisi zırh tarafından sönmülmüştür.

Bu çalışmanın amacı NIJ 0101.06 Level IV standartlarında 7.62x63 M2 AP (30-06) mermiye karşı dayanıklı, mevcut zırh plakaları ile karşılaştırıldığında en az onlar kadar veya daha yüksek koruma seviyesinde, daha hafif ve maliyeti daha uygun yeni bir zırh modeli geliştirmektir. Ön katmanı alümina seramikten oluşan balistik zırha destekleyici katman olarak 6, 8 ve 10 mm kalınlıkta Grafen/Epoksi-UHMWPE kompozit plakalar eklenmiş ve balistik özellikleri nümerik olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Alümina, Grafen/Epoksi ve UHMWPE' den oluşan çok katmanlı seramik/kompozit balistik zırhın boyutları 100x100 mm olup, balistik zırhın ön katmanı olarak 10 mm kalınlıkta alümina seramik kullanılmıştır. Destekleyici katman olarak kullanılan kompozit yapıyı oluşturan Grafen/Epoksi ve UHMWPE 3 farklı kalınlıkta (6, 8 ve 10 mm) ele alınmıştır. Bu katmanlar, seramik tabakadan sonra 1'er mm Grafen/Epoksi-UHMWPE olacak şekilde tasarlanmıştır.

Oluşturulan çok katmanlı balistik zırhın 3B modellemesi ANSYS/SpaceClaim modülü ile yapılmıştır. Zırhın balistik özelliklerini belirlemek için doğrusal olmayan sonlu elemanlar programı LS-DYNA kullanılmıştır. Zırhın balistik analizinde zamandan tasarruf etmek için çeyrek eksenel simetrik model kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Çok katmanlı balistik zırhın 3B çeyrek eksenel simetrik modeli.
Figure 1. 3D quarter axisymmetric model of multilayer ballistic armor.

Sonlu elemanlar analizinde NIJ 0101.06 Level IV standartlarına uygun 10.8 g kütleli ve hızı 878 m/s olan 7.62x63 M2 (30-06) kalibre zırh delici (AP) mermiler kullanılmıştır. Johnson-Cook yapısal modeli, mermiyi oluşturan çelik çekirdeğin davranışını sonlu elemanlar analizinde tanımlamak için kullanılmıştır. Bu modelde eşdeğer gerilme şu formülasyonla ifade edilir:

$$\sigma_y = \left| A + B\varepsilon_p^n \right| \left| 1 + C \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right| \left| 1 - \left(\frac{T - T_r}{T_{melt} - T_r} \right)^M \right| \quad (1)$$

σ_y malzemenin akma gerilmesini, ϵ_p eşdeğer plastik şekil değişimini, $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ boyutsuz şekil değişim oranını; A, B, C, n ve M malzeme sabitlerini ifade etmektedir. T, T_r ve T_{melt} sırasıyla mevcut sıcaklığı, oda sıcaklığını ve erime sıcaklığını temsil etmektedir. Analizde kullanılan Steel 4340 çelik mermi çekirdeğinin malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Khan ve ark., 2020).

Tablo 1. Mermi için MAT_JOHNSON_COOK malzeme parametreleri (Khan ve ark., 2020).
Table 1. MAT_JOHNSON_COOK material parameters for the bullet (Khan et al., 2020).

Parametre	Notasyon	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	ρ	7770
Elastisite Modülü (Pa)	E	20.9 x 10 ¹⁰
Kayma Modülü (Pa)	G	7.7 x 10 ¹⁰
Poisson Oranı	ν	0.28
Statik Akma Gerilmesi (Pa)	A	7.92 x 10 ⁸
Deformasyon Sertleşmesi Modülü (Pa)	B	5.1 x 10 ⁸
Deformasyon Sertleşmesi Üssü	n	0.26
Şekil Değiştirme Oranı Katsayısı	C	0.014
Termal Yumuşama Üssü	m	1.03
Erime Sıcaklığı (°K)	T _m	1790
Oda Sıcaklığı (°K)	T _r	300
Özgül Isı (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	CP	477
Efektif Plastic Şekil Değiştirme Oranı (s ⁻¹)	EPSO	1
Hasar Parametreleri	D ₁₋₂₋₃₋₄₋₅	-0.8; 2.1; -0.5; 0.002; 0.61
EOS_LINEAR_POLYNOMIAL (Pa)	C ₁	1.59 x 10 ¹¹

Johnson-Holmquist hasar modeli, seramik gibi kırılabilir malzemelerin büyük darbe yükleri karşısındaki deformasyon davranışlarını tanımlamak için tasarlanmıştır (Johnson ve Holmquist, 1999). Seramik malzemeler için kullanılan Johnson Holmquist modelinde normalize eşdeğer gerilme; hasar öncesi gerilme, hasar durumundaki gerilme ve hasar parametreleri kullanılarak hesaplanır. (D=0 hasarsız, D=0.5 hasarlı, D= 1 kırılma)

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2)$$

$$\sigma_i^* = A|P^* + T^*|^N |1 + C \ln(\epsilon^*)| \quad (3)$$

$$\sigma_f^* = B|P^*|^M |1 + C \ln(\varepsilon^*)| \quad (4)$$

$$D = \frac{\Delta \varepsilon_p}{D_1 |P^* + T^*|^{D_2}} \quad (5)$$

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 \quad (6)$$

A, N, B, M, N hasarsız ve kırılma dayanımı sabitleri olup, C şekil değiştirme hızı sabitini ifade etmektedir. P ve T sırasıyla normalize basınç gerilmesi ve maksimum hidrostatik çekme gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. D₁ ve D₂ seramik malzemenin hasar sabitlerini, K₁ hacimsel elastisite modülünü, K₂ ve K₃ durum malzeme sabitlerini vermektedir. Alüminaya ait Johnson Holmquist malzeme parametreleri tablo 2’de verilmiştir (*Feli ve Asgari, 2011*).

Tablo 2. Al₂O₃ için MAT_JOHNSON_HOLMQUIST malzeme parametreleri (*Feli ve Asgari, 2011*).

Table 2. MAT_JOHNSON_HOLMQUIST material parameters for Al₂O₃ (*Feli and Asgari, 2011*).

Parametre	Notasyon	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	ρ	3920
Kayma Modülü (MPa)	G	152400
HasarsızDayanım Parametresi	A	0.93
KırılmaDayanım Parametresi	B	0.31
Şekil Değişim Oranı	C	0
Kırılma Dayanım Üsseli	M	0.6
Hasarsız Dayanım Üsseli	N	0.6
Referans Şekil Değiştirme Oranı	EPSO	1
Maksimum Çekme Dayanımı(MPa)	T	200
Maksimum Kırılma Mukavemeti	SFMAX	0.2
Hugoniot elastik limiti (MPa)	HEL	1900
HELBasinç Bileşeni(MPa)	PHEL	1460
Hasar Sabitleri	D ₁₋₂	0.005; 1
Bulk Modülü(MPa)	K ₁	254000
Malzeme Sabiti	K ₂₋₃	0; 0

MAT_PLASTIC_KINEMATIC malzeme modeli şekil değiştirme oranına bağlı bir elastik-plastik modeldir. Oran etkilerini dahil etme seçeneği ile izotropik ve kinematik sertleştirme

plastisitesini modellemeye uygundur. Bu modelde şekil değiştirme hızı, aşağıda gösterildiği gibi şekil değiştirme hızına bağlı faktörle akma gerilmesini ölçekleyen Cowper-Symonds modeli kullanılarak hesaplanmaktadır (Hallquist, 2006).

$$\sigma_Y = 1 + \dot{\epsilon} C^{1P} \sigma_0 \quad (7)$$

burada σ_0 başlangıç akma gerilmesidir, $\dot{\epsilon}$ şekil değiştirme hızı, C ve P Cowper-Symonds şekil değiştirme hızı parametreleridir. Grafen/Epoksi için plastik kinematik model sabitleri Tablo 3'te verilmiştir (Prolongo ve ark., 2018)

Tablo 3. Grafen/Epoksi için MAT_PLASTIC_KINEMATIC malzeme parametreleri (Prolongo ve ark., 2018).

Table 3. MAT_PLASTIC_KINEMATIC material parameters for Graphene/Epoxy (Prolongo et al., 2018).

Parametre	Notasyon	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	ρ	1133
Elastisite Modülü (GPa)	E	3.48
Poisson Oranı	ν	0.30
Akma Dayanımı (MPa)	σ_Y	113

Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit levhalar için MAT59_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model kompozit malzemenin kademeli olarak hasarını 3B gerilmeye dayalı bir kırılma kriteri temelinde modelleyebilmektedir.

Malzeme kartında yer alan X_t, Y_t ve Z_t sırasıyla boyuna, enine ve normal yöndeki çekme dayanımını; X_c, Y_c ve Z_c ise sırasıyla boyuna, enine ve normal yöndeki basma dayanımını; S_{12} düzlem içi kesme dayanımını; S_{23} ve S_{31} enine kesme dayanımını göstermektedir. UHMWPE levha için malzeme modelleri tablo 4' te verilmiştir (Wen ve ark., 2013).

Literatürdeki benzer çalışmada olduğu gibi (Tepeduzu ve Karakuzu, 2019) CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE kartı tüm kontaklar arasında uygulanmıştır. Tüm yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı 0.3 olarak tanımlanmıştır. Grafen/Epoksi ve UHMWPE için MAT_ADD_EROSION malzeme kartı kullanılmıştır.

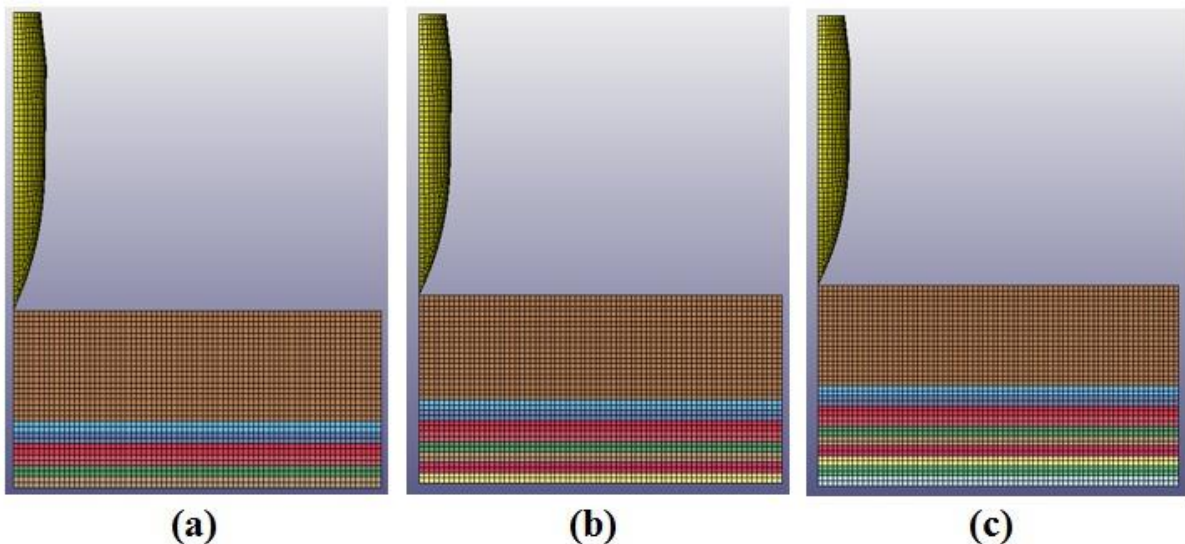
Tablo 4. UHMWPE için MAT59_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL malzeme parametreleri (Wen ve ark., 2013).

Table 4. MAT59_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL material parameters for UHMWPE (Wen et al., 2013).

Elastisite Modülü	(GPa)	Kayma Modülü	(GPa)	Poisson Oranı	
E ₁	93	G ₁₂	4.6	V ₁₂	0.006
E ₂	93	G ₂₃	5	V ₂₃	0.06
E ₃	11.5	G ₁₃	5	V ₁₃	0.06
Çekme Dayanımı	(GPa)	Basma Dayanımı	(GPa)	Kayma Dayanımı	(MPa)
X _T	3	X _C	2	S ₁₂	700
Y _T	3	Y _C	2	S ₂₃	700
Z _T	3	Z _C	2	S ₁₃	700

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde Al₂O₃-Grafen/Epoksi-UHMWPE'den oluşan seramik/kompozit balistik zırhın 7.62x63 M2 (30-06) kalibre zırh delici (AP) mermi etkisi altındaki performansı incelenmiş ve simülasyon sonuçları merminin artık hızı ve zırh yapısının hasar durumu dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada Sonlu elemanlar modellerin eleman boyutları, malzeme kartları, sınır şartları ve kontak yapıları gibi özellikleri LS-PrePost ön işlemcisi ile tanımlanmıştır. Mermi ve plakaların eleman boyutu, ağ optimizasyonundan sonra 0.5 mm olarak ayarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Mermi ve seramik/kompozit balistik plakanın analizlerde kullanılan çeyrek eksenel simetrik SEY modelleri: (a) 16 mm (b) 18 mm (c) 20 mm.

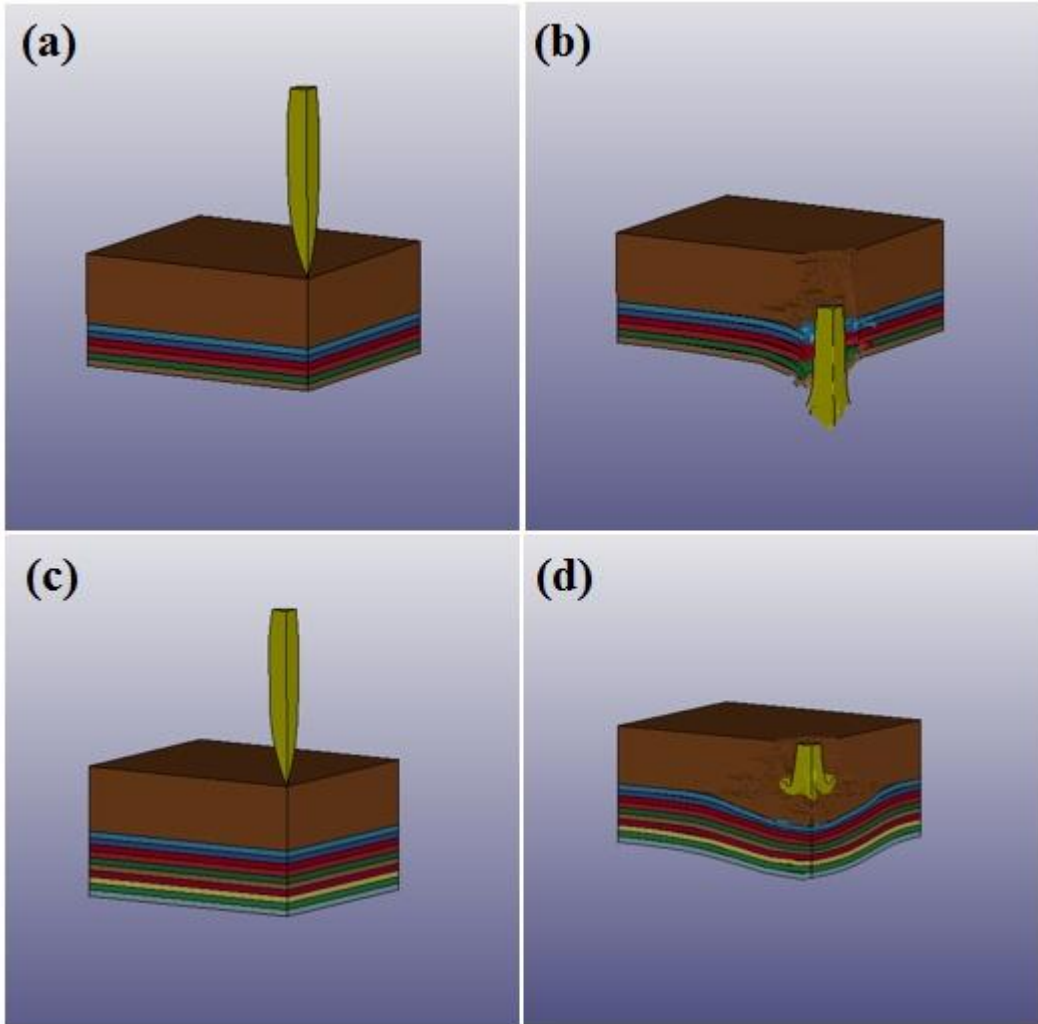
Figure 2. Quarter axisymmetric FEM models of bullet and ceramic/composite ballistic plate used in the analysis: (a) 16 mm (b) 18 mm (c) 20 mm.

3 farklı balistik zırh konfigürasyonunun tabaka bileşenleri ve kalınlıkları Tablo 5’te ve Şekil 2’de verilmiştir. A-1, A-2 ve A-3 konfigürasyonlarında Al₂O₃ seramik plaka arkasında Grafen/Epoksi-UHMWPE’den oluşan sırasıyla 6, 8 ve 10 mm kalınlığında kompozit tabakalar bulunmaktadır. Balistik zırhların toplam kalınlık değerleri sırasıyla 16, 18 ve 20 mm’dir.

Tablo 5. Balistik zırh konfigürasyonları.
Table 5. Ballistic armor configurations.

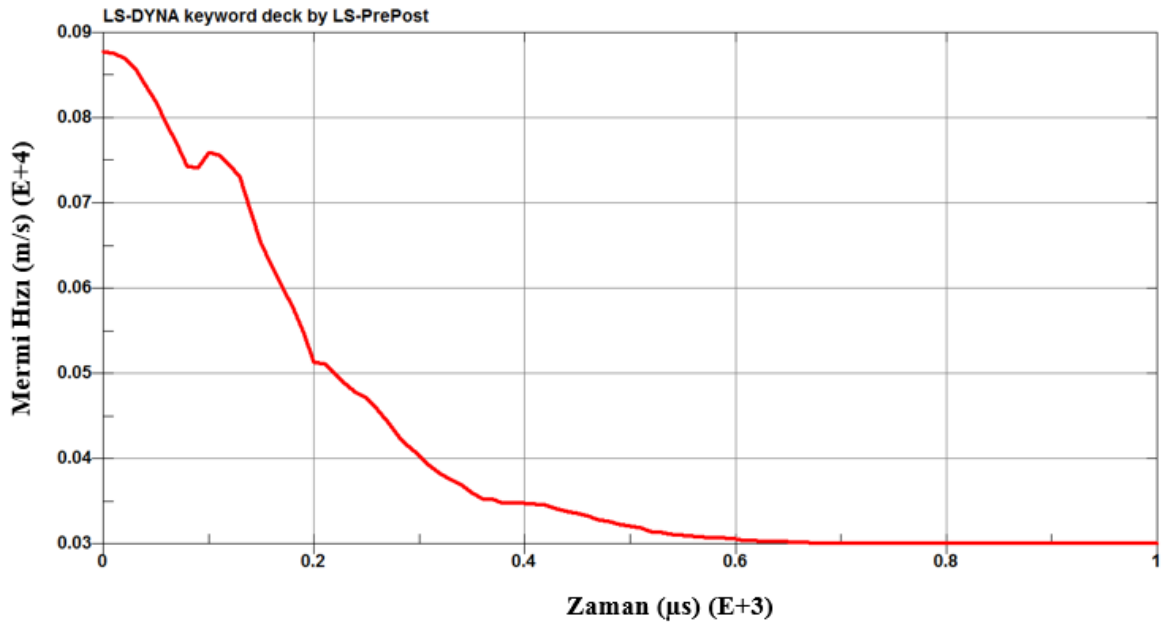
Konfigürasyon Numarası	Plakanın Bileşimi	Kalınlık	Toplam Kalınlık
A-1	Al ₂ O ₃	10 mm	16 mm
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
A-2	Al ₂ O ₃	10 mm	18 mm
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
A-3	Al ₂ O ₃	10 mm	20 mm
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
	UHMWPE	1 mm	
	Grafen/Epoksi	1 mm	
UHMWPE	1 mm		

878 m/s hızda 7.62x63 M2 (30-06) kalibre zırh delici (AP) merminin seramik/kompozit balistik zırh üzerindeki tam ve kısmi penetrasyon yapısı Şekil 3’te gösterilmektedir. Şekil 3a’da 16 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik zırhın çarpışma öncesi hali, Şekil 3b’de mermi ve zırhın deformasyon durumu görülmektedir. Merminin 16 mm kalınlıktaki balistik zırhı deldiği ve çarpışma etkisiyle mermide mantarlaşıma etkisi gözlemlenmiştir. 20 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik zırhın çarpışma öncesi ve sonrası hali Şekil 3c ve Şekil 3d’de verilmektedir. Şekil 3d’de çarpma etkisi sonucunda merminin köreldiği gözlemlenmektedir. 878 m/s hızda 7.62x63 M2 (30-06) kalibre zırh delici (AP) merminin 16, 18 ve 20 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik zırhlara karşı hız-zaman grafiği sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmektedir.



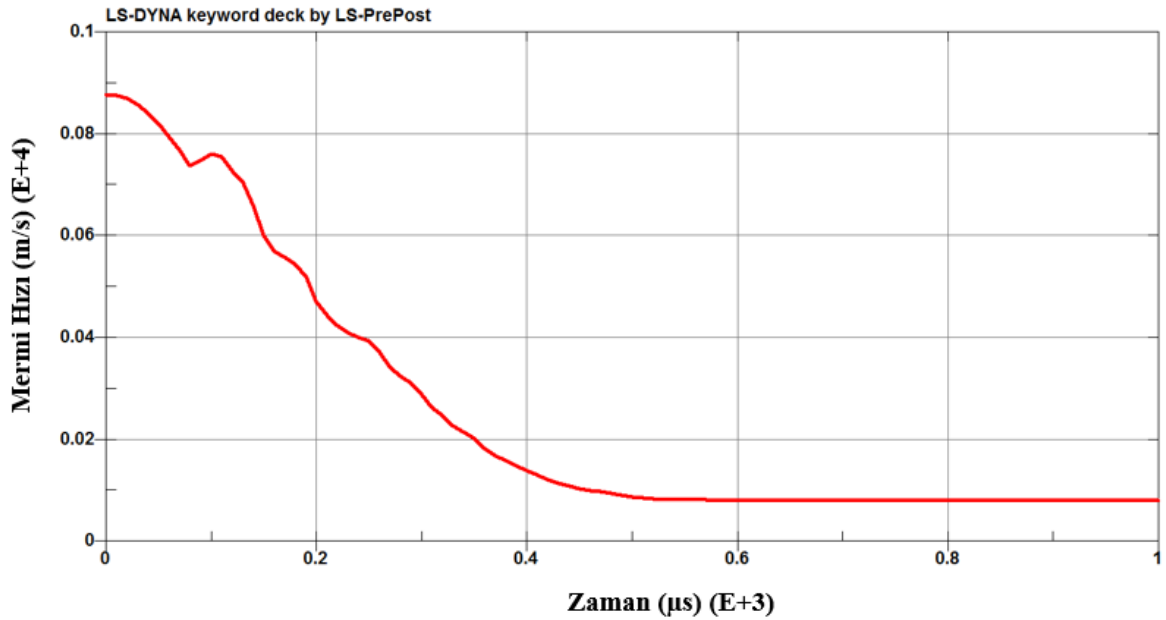
Şekil 3. Seramik/kompozit balistik plakaların tam ve kısmi penetrasyonu (16 mm kalınlıktaki balistik plakanın çarpışma öncesi (a) ve sonrası (b) hali) (20 mm kalınlıktaki balistik plakanın çarpışma öncesi (c) ve sonrası (d) hali).

Figure 3. Full and partial penetration of ceramic/composite ballistic plates (pre-(a) and post-impact (b) state of the 16-mm-thick ballistic plate) (pre-(c) and post-impact (d) state of the 20-mm-thick ballistic plate).



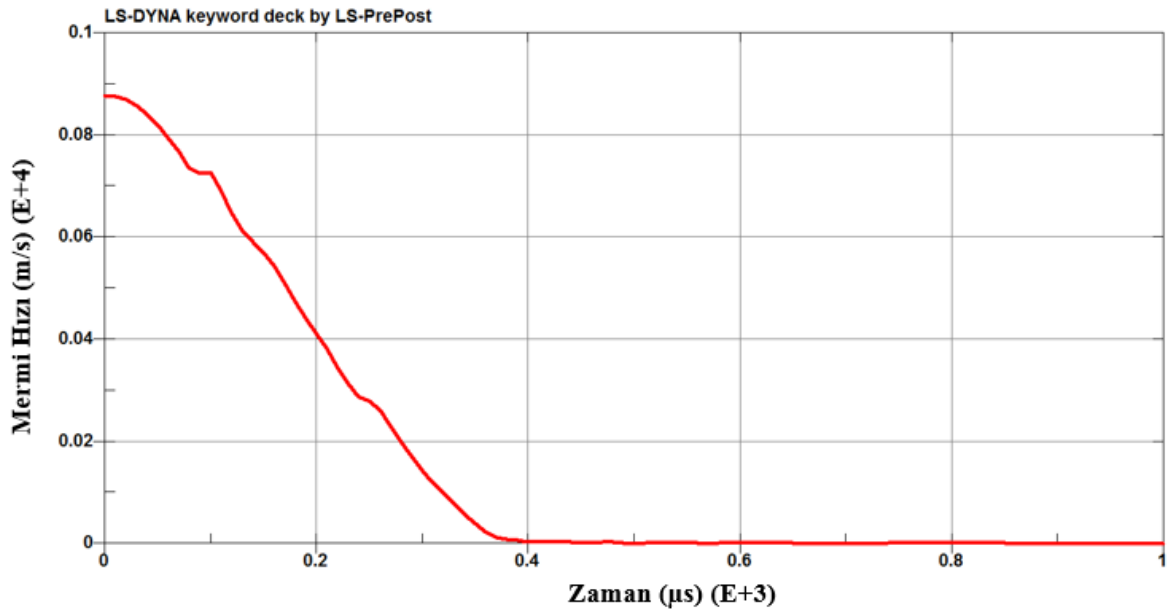
Şekil 4. Merminin 16 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik plakaya karşı hız-zaman grafiği.

Figure 4. Velocity-time graph of the bullet against a 16 mm thick ceramic/composite ballistic plate.



Şekil 5. Merminin 18 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik plakaya karşı hız-zaman grafiği.

Figure 5. Velocity-time graph of the bullet against a 18 mm thick ceramic/composite ballistic plate.



Şekil 6. Merminin 20 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik plakaya karşı hız-zaman grafiği.

Figure 6. Velocity-time graph of the bullet against a 20 mm thick ceramic/composite ballistic plate.

A-1, A-2 ve A-3 konfigürasyonları için 878 m/s çarpma hızındaki merminin artık hızları ve penetrasyon tipleri Tablo 6’da verilmiştir. A-1 ve A-2 konfigürasyonunda mermi balistik zırhı delmiş ve sırasıyla 315 m/s ve 89 m/s hızla zırhtan çıkmıştır. A-3 konfigürasyonunda merminin enerjisi zırh tarafından sönmülmüş, zırhta kısmi penetrasyon gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Seramik/kompozit balistik plakaların analiz sonuçları.

Table 6. Analysis results of ceramic/composite ballistic plates.

Konfigürasyon Numarası	Hız (m/s)	Artık Hız (m/s)	Sonuç
A-1	878	315	Tam Penetrasyon
A-2	878	89	Tam Penetrasyon
A-3	878	0	Kısmi Penetrasyon

A-3 konfigürasyonu, NIJ 0101.06 Level IV standardına göre atılan mermiyi tuttuğu (kısmi penetrasyon) için daha önce yapılan çalışmalarda geliştirilen zırhlara göre koruma durumunu belirlemek amacıyla farklı atış hızlarında simülasyonlar yapılmaya karar verilmiştir. Bunun üzerine, Feli ve Asgari (2011) ile Tepedüzü ve Karakuzu (2019)’ nun çalışmalarında yaptığı atış hızları ile karşılaştırmak amacıyla, A-3 konfigürasyonuna ilave atışlar gerçekleştirilmiştir. Bu atışlar ve zırh çıkış hızları (artık hız) tablo 7’ de verilmiştir. 5 farklı hızla yapılan atışlar sonucunda A-3 konfigürasyonunun artık hızları diğer iki referans çalışmaya göre daha az çıkmıştır. Buna göre, A-3 konfigürasyonunun 7.62x63 M2 AP (30-06) mermiye karşı mevcut zırh plakalarından daha iyi koruma sağladığı görülmektedir.

Tablo 7. Bu çalışmadaki zırh giriş ve çıkış hızları ile referans sistemlerin (Ref-1 (*Tepeduzu ve Karakuzu, 2019*), Ref-2 (*Feli ve Asgari, 2011*)) karşılaştırılması.

Table 7. Comparison of armor initial and residual velocities and reference systems (Ref-1 (*Tepeduzu and Karakuzu, 2019*), Ref-2 (*Feli and Asgari, 2011*)) in this study.

Giriş Hızı (m/s)	1400	1250	1100	900	800
Ref-1 Artık Hız (m/s)	940	732	595	526	489
Ref-2 Artık Hız (m/s)	995	721	630	550	470
A-3 Artık Hız (m/s)	863	350	200	0	0

4. Sonuçlar

Bu çalışmada NIJ 0101.06 Level IV standartlarında 15 m mesafeden atılan 7.62x63 M2 AP (30-06) mermiye karşı dayanıklı, farklı bir kompozit malzeme ve tabaka yapısına sahip, seramik/kompozit zırh modeli tasarımı yapılmış ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ön katmanı 10 mm kalınlıktaki alüminadan arka katmanı 3 farklı kalınlıktaki (6 mm, 8 mm ve 10 mm) Grafen/Epoksi-UHMWPE'den oluşan çok katmanlı zırhın balistik analizinden elde edilen sonuçlara göre:

1. 16 mm ve 18 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik zırhta çarpışma sonrası tam penetrasyon gözlemlenmiş, mermi zırhtan sırasıyla 315 m/s ve 89 m/s hızlarla çıkmıştır.
2. 20 mm kalınlıktaki seramik/kompozit balistik zırhta çarpışma sonrası kısmi penetrasyon yani merminin zırhtan çıkamadığı gözlemlenmiştir.

Böylece, bu çalışmayla 20 mm kalınlıktaki zırhın NIJ 0101.06 Level IV standartlarında 7.62x63 M2 AP (30-06) mermiye karşı mevcut zırh plakalarından daha iyi koruma seviyesinde, daha dayanıklı olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu çalışmayla mevcut zırh plakalarından daha iyi koruma seviyesinde daha hafif ve maliyeti daha uygun zırh imal edilebilmesi planlanmaktadır.

5. Kaynaklar

- Chabera, P., Boczkowska, A., Morka, A., Kędzierski, P., Niezgoda, T., Oziębło, A., Witek, A., 2015. Comparison of numerical and experimental study of armour system based on alumina and silicon carbide ceramics. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 63(2).
- de Oliveira Braga, F., Milanezi, T. L., Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., Gomes, A. V., Lima Jr, É. P., 2019. Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems. *Journal of materials research and technology*. 7(4), 541-549.
- Feli, S., Asgari, M. R., 2011. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. *Composites Part B: Engineering*. 42(4), 771-780.
- Guo, G., Alam, S., Peel, L. D., 2021. 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.
- Hallquist, J. O., 2006. LS-DYNA theory manual. Livermore software Technology Corporation. 3, 25-31.
- Johnson, G. R., Holmquist, T. J., 1999. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Journal of applied physics*. 85(12), 8060-8073.
- Khan, M. K., Iqbal, M. A., Bratov, V., Morozov, N. F., Gupta, N. K., 2020. An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target. *Thin-Walled Structures*. 154, 106784.

- Lu, Y., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, W., Long, R., 2020. High-velocity impact performance of aluminum and B₄C/UHMW-PE composite plate for multi-wall shielding. *Applied Sciences*. 10(2), 721.
- Luz, F. S. D., Lima Junior, E. P., Louro, L. H. L., & Monteiro, S. N., 2015. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research*. 18, 170-177.
- Oliveira, M. S., da Costa Garcia Filho, F., Pereira, A. C., Nunes, L. F., da Luz, F. S., de Oliveira Braga, F., Monteiro, S. N., 2019. Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the Weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6), 5899-5908.
- Pereira, A. C., de Assis, F. S., da Costa Garcia Filho, F., Oliveira, M. S., da Cruz Demosthenes, L. C., Lopera, H. A. C., Monteiro, S. N., 2019. Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(5), 4221-4226.
- Prolongo, S. G., Jiménez-Suárez, A., Moriche, R., Ureña, A., 2018. Influence of thickness and lateral size of graphene nanoplatelets on water uptake in epoxy/graphene nanocomposites. *Applied Sciences*. 8(9), 1550.
- Rashed, A., Yazdani, M., Babaluo, A. A., & Hajizadeh Parvin, P., 2016. Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3561-3576.
- Reis, R. H. M., Nunes, L. F., da Luz, F. S., Candido, V. S., da Silva, A. C. R., Monteiro, S. N., 2021. Ballistic performance of guaruman fiber composites in multilayered armor system and as single target. *Polymers*. 13(8), 1203.
- Saleem, I. A., Ahmed, P. S., Abed, M. S., 2021. Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*.
- Shen, Z., Hu, D., Yang, G., Han, X., 2019. Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet. *Composite Structures*. 213, 209-219.
- Tasdemirci, A., Tunusoglu, G., Güden, M., 2012. The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*. 44, 1-9.
- Tepeduzu, B., Karakuzu, R., 2019. Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*. 45(2), 1651-1660.
- Wang, H., Wang, J., Tang, K., Chen, X., Li, Y., 2021. Investigation on the Damage Mode and Anti-penetration Performance of B₄C/UHMWPE Composite Targets for Different Incident Velocities and Angles. In *Journal of Physics: Conference Series*. 1855(1), 012010.
- Wen, Y. K., Xu, C., Chen, A. J., Wang, S., 2013. Experimental and numerical study of ballistic impact performance on UHMWPE composites. In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd. 818, 30-36.
- Xu, Y. J., Zhang, H., Huang, G. Y., 2022. Ballistic performance of B₄C/STF/Twaron composite fabric. *Composite Structures*. 279, 114754.
- Yazıcı, M., Boztoprak, Y., Uygun, S. 2021. Kompozit Yüzey Plakalı ve Alüminyum Çekirdekli Sandviç Levhaların Balistik Performanslarının Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (31), 933-942.