

JÁRMŰVÉDELEMBEN ALKALMAZOTT FÉMES BALLISZTIKAI VÉDŐELEMENYK ANYGAI ÉS GEOMETRIÁI

MATERIALS AND GEOMETRY OF BALLISTIC ARMORS IN VEHICLE PROTECTION

GÁVAY György; TÓTH Bence

(ORCID: 0000-0003-0632-5650); (ORCID: 0000-0003-3958-187X)

gavay.gyorgy@uni-nke.hu; toth.bence@uni-nke.hu

Absztrakt

A lövedékek, repeszek elleni védőelemek illetve védőanyagok tulajdonságait tárgyalva fontos tisztázni az alapvető fogalmakat. A publikáció célja ezen túl feldolgozni és bemutatni a páncélozott járművek védőelemeinek fémes, homogén anyagait, és az egyszerűbb kialakítási formákat, az aktuális védőelem-vastagság változását a találati szög változásának függvényében.

Kulcsszavak: ballisztikai védőelem, páncéltűtés, döntött páncél, aktuális páncélvastagság

Abstract

Before discussing the properties of armor it is important to clarify the Hungarian terminology to be used. Above this, the aim of this paper is to present and discuss the homogenous metallic materials used in armored vehicles and the dependence of the actual protecting element thickness-dependence of simple shapes on the angle of the hit.

Keywords: protecting element, armor penetration, tilted armor, actual armor thickness

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): (2017.01.30.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.03.06.

BEVEZETÉS

A lövedékek, repeszek elleni védőelemeket illetve védőanyagokat a legtöbb esetben az anyagvastagságuk, összetételük és a felületi keménységük alapján jellemzik. A helyzet azonban ennél jóval bonyolultabb, és magyar nyelven kevés olyan publikus összefoglaló lelhető fel, amely feldolgozza, illetve bemutatja az anyagok és a kialakítás hatását a védelmi képességekre. A Nemzeti Közzolgálati Egyetem Haditechnikai Tanszékén működő kutatóműhely tevékenysége során jelentős publikációk készültek homogén ballisztikai acéllemezek lövedékek általi átütéséről, de a publikációk [1-2] alapját képező kísérletek alkalmával a merőleges találati szög alapkötetelmény volt. Ennek a publikációnak célja összefoglalni a homogén fém ballisztikai védőelemek legfontosabb anyagait, kialakítását és a merőleges találati szögtől való eltérés hatását az aktuális védőelem-vastagságra. A téma jelen megközelítése a kinetikai energiát alkalmazó lövedékekre fókuszál, a kumulatív hatás elvén működő lövedékek tárgyalása nem célunk.

FOGALMAK

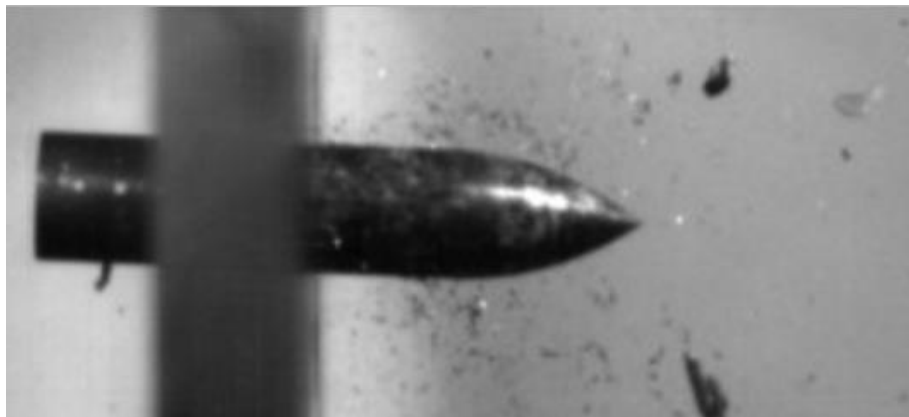
Ballisztikai pályának nevezzük azt a trajektóriát, melyen egy test a ferde hajításnak megfelelő mozgással mozog. Ez igaz a lövedékekre, melyek torkolati sebessége a levegő közegellenállása miatt folyamatosan csökken, illetve igaz bármely robbanásból eredő repesz mozgására. Jelen megközelítés figyelmen kívül hagyja a ferde hajítási pályán haladáson kívül minden egyéb mozgást. Az említett nagy sebességű tárgyak elleni védelem a ballisztikai védelem.

A védelem valójában áthatolás elleni védelemként is felfogható, mert az említett tárgyaknak az adott védőanyagból készített védőelemeken történő áthatolását kell meggátolni.

A védőelemekből kialakítható védőelem-rendszer is, azok egymáshoz illesztésével vagy több réteggel, szendvicsszerkezetű elhelyezésével. [3]

A BALLISZTIKAI VÉDŐELEMÉK ÉS AZOK MŰKÖDÉSE

A ballisztikai védőelemek célja a lövedékek vagy repeszek áthatolásának, azaz az átütésnek a megakadályozása. Amennyiben a becsapódó tárgy áthatol a védőelemen vagy védelemrendszeren, úgy a megmaradt mozgási energiája, illetve hőenergiája káros hatást idézhet elő a védendő területen. Becsapódáskor a védőelem anyagából repeszek válhatnak/szakadhatnak le, melyek áthatolás esetén szintén a védett terület irányában haladnak tovább. (1. ábra)



1. ábra. A lövedék áthatolása és a repeszek keletkezése [4; 543. o.]

Egyéni védőfelszerelések, például védőmellények esetében a repeszek az emberi testen a lövedék által okozott sebet is szennyezik.

Eredményes áthatolásgátlás esetén a becsapódáskor a lövedék mozgási energiáját a védőelem részben elnyeli, részben a védőelem tartószerkezetének, keretének, támasztékának adja át. Ilyenkor a védőelem, vagy védelemrendszer minden esetben károsodik, ennek a károsodásnak a mértéke számos körülménytől függ. Ezek lehetnek például:

- a lövedékre jellemző fizikai tulajdonságok (kialakítás, keménység¹, tömeg),
- a lövedék sebessége,
- a védőelem felületi keménysége,
- a védőelem anyagának szakítószilárdsága,
- a védőelem megtámasztására szolgáló anyag energiaelnyelő képessége,
- a védőelem felülete és a becsapódó tárgy mozgási iránya által bezárt szög.

Az első két tulajdonság az adott lövedéket tüzelő fegyverektől függ. [5] Az utóbbi két tulajdonság a becsapódáskor megváltozhat, ez adja az okospáncélok fejlesztésének alapját. [6]

A FÉMES HOMOGEN PÁNCÉLOK ÉS SZEREPÜK AZ ELMÚLT ÉVTIZEDEKBEN

Számos anyagot, illetve anyagok kombinációját kipróbáltak már ballisztikai védőelemként. A nagy darabszámban gyártott, védettséggel rendelkező járművek esetén az ötvözött, hőkezelt acélok felhasználása napjainkban is túlnyomó többségben van. Járművek védelmének esetében jelentős az alakíthatóság igénye, és ez a fém ballisztikai védőelemek alkalmazhatóságát növeli. Ívelt felületeket például kerámialapokból nehéz előállítani, ilyen esetekben a felületet szegmensekre osztják és egyenes lapokkal borítják be. A mai napig alkalmazásban vannak olyan ballisztikai védelemmel rendelkező gépjárművek, melyeknek a külső borítása, vagy maga a jármű felépítménye azonos fém anyagból van kialakítva, illetve a jármű kontúrján belül fém anyagú védőelemet helyeznek el. A védőelemek anyagként alkalmazhatóak homogén fémlemezek, melyek egymáshoz illesztése oldható vagy nem oldható kötésekkel történik. Az oldható kötés általában csavarkötés, ezt a megoldást gyakran alkalmazzák kiegészítő védőelemek rögzítéséhez is. A nem oldható kötések kialakításának módja lehet hegesztés vagy szegecselés, illetve újabban ragasztás, mely oldószerrel oldható. A nem fém anyagú védőelemek esetében alkalmazható még például tépőzár, mely az acél esetében, annak tömege miatt, nem jöhet szóba.

A fém ballisztikai védőelemek anyagszerkezeti tulajdonságokból adódó jellemzői [7]:

- hegeszthetőség,
- hideg alakíthatóság,
- forgácsolhatósági szempontok,
- homogén szerkezet (állandó minőség).

Acélötvözetek, ballisztikai acélok

A ballisztikai acélok a szerkezeti acéloknál jóval nagyobb felületi keménységű és szakítószilárdságú acélok, pontosabban acél ötvözetek. Az elmúlt több mint fél évszázad tapasztalatai alapján a klasszikus fém alapanyag a nikkell- és/vagy krómötvözésű melegen hengerelt acéllemez. [8; 137. o.]

¹ a lövedéké, illetve a lövedék magjáé

A lemezeket vastagság szerint két csoportba lehet osztani: vékony, azaz legfeljebb 25 mm-es vastagságú, illetve vastag, azaz 25 mm-nél vastagabb lemezekre. A vékony lemezek felületi keménysége többnyire 300 - 400 HB, a vastag lemezeké minimum 275 - 325 HB.

Homogén ballisztikai védőelemek esetén a felületi keménység növelése az egyetlen lehetséges módja a védelmi képesség növelésének anélkül, hogy a tömeg tovább növekedne. A mai korszerű anyagok felületi keménysége a hőkezelési eljárástól függően 400 - 600 HB keménységű, vagy még keményebb is lehet. Ezeknek az anyagoknak a szakítószilárdsága eléri az 1,2 - 1,6 GPa-t.

Hajlított védőelemeket harcjárművek esetében az orr rész, illetve a torony kialakításánál alkalmaznak [8; 138. o.], illetve a jármű ülései alatt elhelyezett repeszek elleni védőelemként. A hajlított, ívelt védőelem előnye, hogy a hajlítás miatt a lövedék vagy repesz pályájának hossza gyorsabban növekszik a védőelem anyagában a merőleges találati szögtől való eltérés növelésével, mint egyenes védőelemek esetében. Ezt a pályahosszt a továbbiakban aktuális védőelem-vastagságnak nevezzük.

Más ötvözetek

Alumínium-ötvözeteket már az 1940-es évek eleje óta használtak ballisztikai védelem céljára. Al-Mg (kb. 4%) ötvözet jobb ballisztikai védelmet nyújtott az acélnál a kg/m^2 -ben mért, egységnyi felületre jutó tömegének arányát tekintve. Az M113-as harcjármű egyes változatainak páncélzata is ebből készült. A hatvanas évek közepén a brit fejlesztésű felderítő járművek esetében már igény mutatkozott a 14,5 mm-es lövedékek elleni védelemre, mely a mai meghatározás szerint a STANAG 4569 Level 4 szintnek felel meg. [9] Az AA7039 kódnevű ötvözet (Al-Zn-Mg) ellenállt a 14,5 mm-es lövedékeknek, illetve a repeszeknek. [8; 139. o.] [10; 142. o.]

A későbbiekben kipróbálásra kerültek titán-ötvözetek is, melyek kb. 30%-os tömegcsökkenést eredményeztek. A kereskedelemben kapható titán szakítószilárdsága elérheti a 400 MPa-t de megfelelő ötvözés esetében akár az 1 GPa-t is meghaladhatja. Ilyen például a Ti-6Al-4V [10; 142. o.], amely jó ballisztikai védelmet nyújtott, alkalmazása tömegcsökkenést eredményezett és jól hegeszthető volt. Az ötvözet elterjedését és széles körű katonai alkalmazását elsősorban a felmerülő költségek akadályozták.

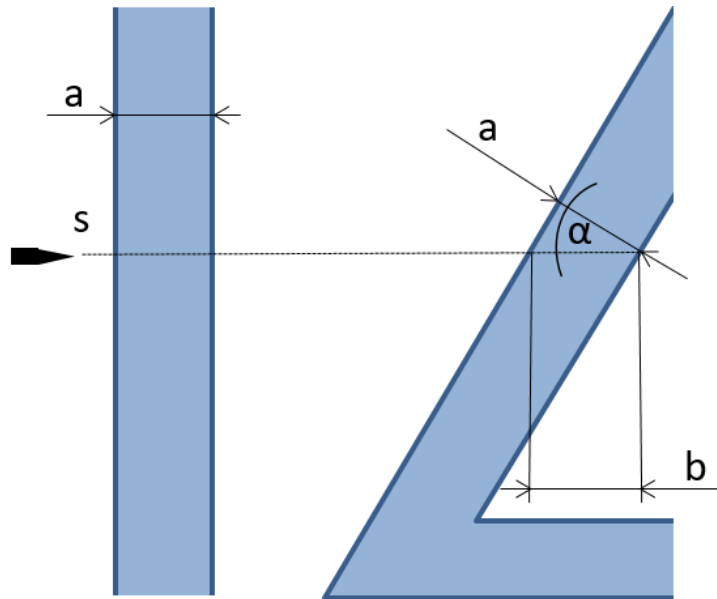
A VÉDŐELEM GEOMETRIÁJÁNAK JELENTŐSÉGE

A ballisztikai védőelemek geometriájának a jelentősége a várható és valós támadási iránytól függ. [8; 136. o.] A támadási irányok valószínűségét a második világháborútól kezdve vizsgálják.² Az támadó eszközök találati hatékonysága a célzás pontosságától és a becsapódás irányától. [11] A támadás várható iránya befolyásolja a becsapódás irányát, de egyértelmű, hogy a valószínűséget és a tényleges folyamatot külön kell kezelni egy ballisztikai védőelem védelmi képességének értékelésekor. A haditechnikai eszközök, járművek kiválasztásánál a védelmi szempontok is meghatározóak. [12]

Becsapódáskor a lövedékek pályája a ballisztikai védőelemen halad át. A védelmi szempontokat figyelembe véve a merőleges találati szög a legrosszabb érték. A találati szög a védőelem egyenes felületének síkja, illetve az ívelt felület érintősíkja és a lövedék vagy repesz mozgási iránya által bezárt szög, melyet a következőkben α -val jelölünk. A 2. ábra szemlélteti az aktuális védőelem-vastagság változását a találati szög változásának függvényében. Amennyiben a lövedék pályája (s) és a védőelem felülete a találkozási pontban

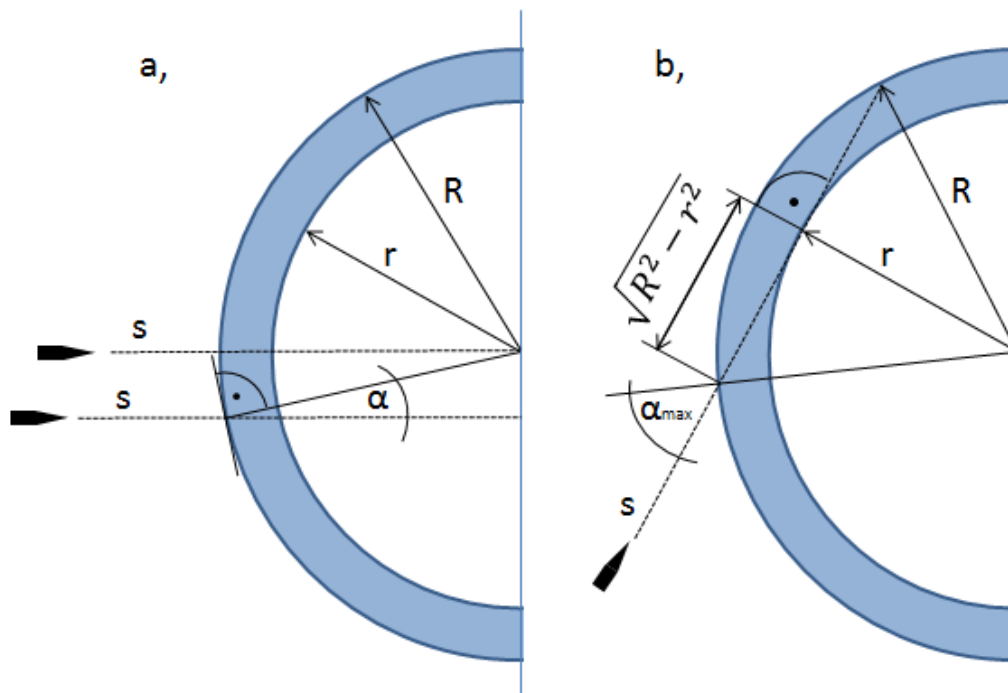
² Lt-Col Whittaker tett először komoly kísérletet arra, hogy elemezze a valószínűségét az egyes irányokból érkező támadásoknak. A módszere a DPV, azaz directional probability variation – azaz irányvalószínűségi variáns meghatározta a harckocsik fejlődését. A mai korszerű analitikai módszerek már sokkal komplexebbek, és pontosabbak.

nem 90°-os szöget zár be, úgy nem a védőelem vastagsága (a) hanem az aktuális védőelem-vastagság (b) a mérvadó. Az ábra alapján a lemez felületének vízszintessel bezárt szögét alapul véve, és az egyszerűség kedvéért feltételezve, hogy a lövedék mozgási iránya is vízszintes, az aktuális védőelem-vastagság értéke koszinusz szögfüggvény alapján számítható.



2. ábra Az aktuális védőelem-vastagság változása egyenes és döntött felület esetén (saját szerkesztés)

$$b = \frac{a}{\cos \alpha} \quad (1)$$



3. ábra Az aktuális védőelem-vastagság változása ívelt felület esetén (saját szerkesztés)

Első eset - merőleges becsapódás

Ívelt védőelem-felület esetén (3. ábra) több becsapódási esetet kell különválasztani. A legegyszerűbb eset, amikor a lövedék mozgási iránya és a felület érintője egymásra merőlegesek, ekkor az aktuális védőelem-vastagság értéke a szelvény külső (R) és belső sugarának (r) a különbsége (ahol természetesen $r < R$):³

$$b = R - r \quad (2)$$

Második eset - ferde becsapódás

A második eset, amikor a lövedék mozgási iránya nem 90° -os szöget zár be az felület érintősíkjával, de a védőelem belső kontúrvonalán is áthalad, azaz $0 < \alpha$. Ebben az esetben az aktuális védőelem-vastagság a 3/a. ábra alapján a koszinusztétel segítségével számítható:

$$r^2 = b^2 + R^2 - 2bR \cos \alpha, \quad (3)$$

ahol r , R és α ismert. Az egyenletet rendezve és b -re megoldva kapjuk:

$$b^2 - (2R \cos \alpha)b + (R^2 - r^2) = 0 \quad (4)$$

$$b_{1,2} = \frac{2R \cos \alpha \pm \sqrt{(2R \cos \alpha)^2 - 4(R^2 - r^2)}}{2} \quad (5)$$

$$b_{1,2} = \frac{2R \cos \alpha \pm \sqrt{4R^2 \cos^2 \alpha - 4(R^2 - r^2)}}{2} \quad (6)$$

$$b_{1,2} = R \cos \alpha \pm \sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - R^2 + r^2}, \quad (7)$$

ahol a két megoldás közül csak a negatív előjelű ad fizikailag értelmes megoldást: α helyére pl. 0-t helyettesítve a pozitív előjeles megoldás a két görbületi sugár összegét adja maximális pályahossznak, ami nyilvánvalóan csak az egyenlet matematikai megoldása és nem a fizikai problémáé.

A negatív előjelet használva $\alpha = 0$ esetén visszakapjuk az előző eset $R - r$ megoldását, illetve α -t folytonosan növelve egy folytonosan növekvő függvényt kapunk eredményül. Az α szög azonban nem növelhető 90° -ig, mivel akkor a négyzetgyök alatt $r^2 - R^2$ állna, ami nyilvánvalóan negatív. Kell tehát lennie egy α_{\max} -szal jelölt határszögnek, ahol a négyzetgyök alatt álló kifejezés éppen nulla. Ez a második eset érvényességét tehát az $0 < \alpha < \alpha_{\max}$ szögtartományra korlátozza.

Harmadik eset - a határszög esete

A harmadik eset a határeset, amikor a lövedék pályája éppen érinti a belső kontúrvonalat, azaz amikor a találati szög és a határszög értéke megegyezik ($\alpha = \alpha_{\max}$). Ekkor az aktuális védőelem-vastagság a 3/b. ábra alapján Pitagorasz tétel segítségével számolható: a derékszögű

³ Az aktuális védőelem-vastagság matematikai leírása a szerzők saját munkája.

háromszög átfogója R , egyik befogója r , másik befogója pedig az aktuális védőelem vastagság fele, azaz

$$R^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2 + r^2. \quad (8)$$

Ebből b -t kifejezve:

$$b_{max} = b = 2\sqrt{R^2 - r^2}. \quad (9)$$

Ez az érték az aktuális védőelem vastagság maximális nagysága (b_{max}). Ezt felhasználva a derékszögű háromszögre felírva a koszinusztételt az esetre jellemző határszög, α_{max} értéke is számítható:

$$r^2 = R^2 + (R^2 - r^2) - 2R\sqrt{R^2 - r^2} \cos(\alpha_{max}) \quad (10)$$

$$\alpha_{max} = \arccos\left(\frac{2R^2 - 2r^2}{2R\sqrt{R^2 - r^2}}\right). \quad (11)$$

Negyedik eset - átütés nélküli becsapódás

A negyedik esetben a lövedék olyan lapos szög alatt érkezik, hogy pályája a belső kontúrvonal érintése nélkül teljes egészében a védőelem anyagában van (azaz $\alpha > \alpha_{max}$), ezért ekkor a védőelem vastagsága a védett terület szempontjából már nem játszik szerepet.

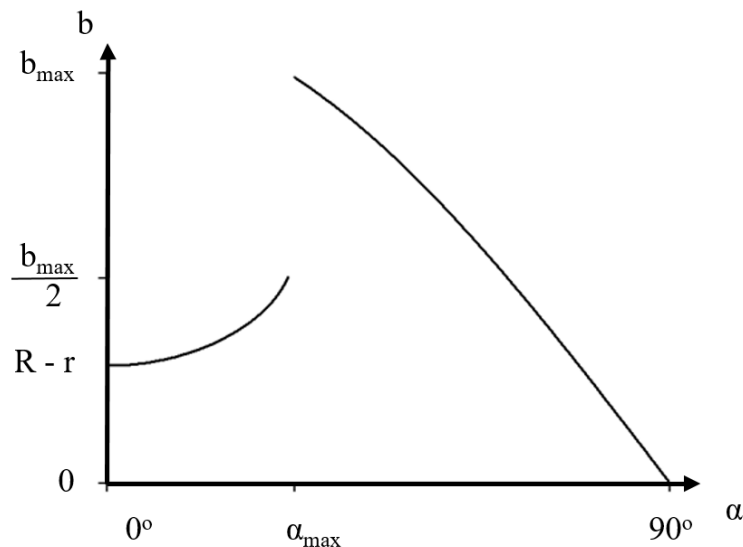
Ebben az esetben a lövedék pályájának és az R sugarú körnek a két metszéspontja az R sugarú kör középpontjával egy olyan egyenlő szárú háromszöget alkot, melynek két oldala R , harmadik oldala b nagyságú. Mivel egy háromszög belső szögeinek összege 180° , α ismeretében az ismeretlen harmadik belső szög is kifejezhető. Erre a háromszögre is felírva a koszinusztételt, az aktuális védőelem-vastagság meghatározható:

$$b^2 = R^2 + R^2 - 2RR \cos(180^\circ - 2\alpha) \quad (12)$$

$$b = \sqrt{2R^2 - 2R^2(-\cos(2\alpha))} \quad (13)$$

$$b = \sqrt{2R^2(1 + \cos(2\alpha))} \quad (14)$$

Az aktuális védőelem-vastagság változását a becsapódási szög függvényében ívelt védőelem esetén a 4. ábrán mutatjuk be grafikusán (az $R = 2r$ esetre). Látható, hogy az aktuális védőelem-vastagság a becsapódási szög növelésével eleinte növekszik, majd az α_{max} határszög elérése után folytonosan csökken nulláig, ami annak az esetnek felel meg, amikor a lövedék pályája éppen elkerüli a védőelemet. Az α_{max} határszög elérésekor az aktuális védőelem-vastagság ugrásszerűen a kétszeresére nő: ez a 3/b. ábra esete, amikor a lövedék védőelembeli pályája már éppen nem metszi a belső kontúrvonalat.



4. ábra Az aktuális védőelem-vastagság változása a becsapódási szög függvényében ívelt védőelem esetén (saját szerkesztés)

KÖVETKEZTETÉSEK

A publikáció röviden bemutatta a homogén fém ballisztikai védőelemek legfontosabb anyagait, kialakítását, a merőleges találati szögtől való eltérés hatását az aktuális védőelem-vastagságra. Matematikai levezetéssel pontosan meghatározható a találati szög fontossága a ballisztikai védőelemek védelmi képességeinek tekintetében. A publikáció csak olyan esetekkel foglalkozott, amikor a lövedék pályája a becsapódás után egyenes vonalúnak tekinthető, és nem tér ki a feltételezett vízszintes síkból. A találati szög, a cikkben tárgyalt egyszerűsített esetben meghatározó függőleges, és vízszintes síkokhoz képest a valóságban eltér. A jellemző összefüggéseket célszerű a most tárgyalt összefüggések alapján kifejtetni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SZAKÁL Z., KALÁCSKA G., GÁVAY GY., GYARMATI J.: Evaluation Methods for Different Armors Hit by Bullets; International Multidisciplinary Conference: 11th Edition. Nyíregyháza: Bessenyei Publishing House, 2015., 151-156. o.
- [2] GÁVAY GY., GYARMATI J., SZAKÁL Z., KALÁCSKA G.: Evaluation of bullet resistance of different steel alloys in army application; Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014). Debrecen: University of Debrecen Faculty of Engineering, 2014. pp. 34-42.
- [3] BOMBAY J., GYARMATI J., TURCSÁNYI K.: Harckocsik 1916-től napjainkig, Zrínyi kiadó, Budapest, 1999., 14-15. o.
- [4] BØRVIK, T., HOPPERSTAD, O.S., PEDERSEN, K.O.: Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminium plates; International Journal of Impact Engineering vol. 37 pp. 537-551, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.11.001 (letöltve: 2016.12.20.)
- [5] GYARMATI J.: A nehézpuskát jellemző szempontok fontosságát kifejező súlyszámok számítása és statisztikai vizsgálata, HADITECHNIKA 2006:(2) 11-16. o.
- [6] Army TARDEC, Warren, Michigan: Reactive Structure and Smart Armor for Future Ground Vehicles <http://www.aerodefensetech.com/component/content/article/12841> (letöltve: 2016.12.01.)
- [7] FRANK GY.: Páncélozott pénz és értékszállító biztonsági gépkocsik. Budapest : Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2000., 53. o.

- [8] TYTLER, I.F.B.: Vehicles and bridging; Brassey's Defence Publication, 1985.
- [9] NATO STANAG 4569 - PROCEDURES FOR EVALUATING THE PROTECTION LEVELS OF LOGISTIC AND LIGHT ARMoured VEHICLES FOR KE AND ARTILLERY THREATS, p. 6., http://www.alternatewars.com/BBOW/Ballistics/STANAG_4569_Ed2.pdf (letöltve: 2016.12.21.)
- [10] Opportunities in protection materials science and technology for future army applications. Washington D.C.: The National Academic Press. DOI: 10.17226/13157
- [11] GYARMATI J., KENDE GY., TURCSÁNYI K., Tüzérségi tűzvezető rendszerek összehasonlítása KATONAI LOGISZTIKA 2002:(2) 137-161. o
- [12] TURCSÁNYI K., KENDE GY., GYARMATI J.: Haditechnikai eszközök összehasonlításának korszerű módszerei és ezek alkalmazása: HM 2002. évi kutatási terv 6.1. program 1. alprogram Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2002. 64 o.