

ÚJGENERÁCIÓS LÖVEDÉKÁLLÓ ANYAG FEJLESZTÉSE, VIZSGÁLATA

DEVELOPMENT AND TESTING OF NEW GENERATIONAL BULLETPROOF MATERIALS

Balog Kornél⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁰⁻¹⁹¹⁵⁻⁵⁴¹⁴¹, Kovács Zsolt Ferenc⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁶⁹⁹⁵⁻⁶⁵⁰⁸^{1*},

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2025.1.ENG.004>

Kulcsszavak:

lövedékálló
vizsgálat
fejlesztés
újgenerációs
anyag

Keywords:

new generational
bulletproof
material
development
testing

Cikktörténet:

Beérkezett 2024. január 8.
Átdolgozva 2025. február 9.
Elfogadva 2025. február 11.

Összefoglalás

A történelem folyamán a testpáncélok több átalakuláson is átestek. Fejlődésük során a legnagyobb kihívást a lőpor és a lőfegyverek megjelenése jelentette. A modern időkre azonban ezeket a problémákat is sikeresen megoldotta az emberiség, és különféle lövedékálló anyagokat hozott létre. Kutatásom során elkészítettem három különböző kötőanyagú lövedékálló anyagot. Ezekhez végelelemes módszer szimulációkat készítettem különböző anyagokról, a várható eredmények megismerése érdekében. Mindezek után valós tesztek is végeztem az anyagokon a táborfalvai ballisztikai laborban. Kutatásom eredményeként megállapítottam, hogy a pillanatragasztott és az epoxy erősítésű kevlár anyag nem lövedékálló, a poliuretán erősítésű anyag pedig lövedékállónak tekinthető.

Abstract

Throughout history the body armours have been through different innovations. During their evolution, the biggest challenge they faced was the appearance of gunpowder and firearms. Modern days humanity has been able to solve this new problem, and already made different bulletproof materials. During my research, I created three kinds of bulletproof materials with different bonding materials. I created finite element simulations to predict the outcoming results. After these, I performed the real tests in the ballistic laboratory in Táborfalva. The conclusion to my research is that the glued and epoxy bonded materials were not, the polyurethane bonded material was bulletproof.

1. Bevezetés

A lőfegyverek és a lőpor megjelenése kezdetben nem szorította ki teljesen a korábban használt íjakat. Fejlődésükkel azonban az íjak már elavulttá váltak. Kezdetben a páncélok még elegendő védelmet nyújtottak, viszont a napóleoni idők végeztével a lőfegyverek olyan pontossággal és átütő erővel rendelkeztek már, amely ellen a páncélzat hatástalan volt, amely pedig képes lett volna megállítani a lövedékeket nem volt kifizetődő [1].

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: kovacs.zsolt@nje.hu

A következő áttörést az első világháború hozta, mikorra az anyagtudomány is fejlődésen ment keresztül. Ekkor már edzett acéllemezekből készítették a páncélokat. A második világháborúban a páncélok szerepe kiterjedt a repeszek megállítására is [1].

A következő lépést a polimerek fejlődése hozta el. Az 1960-as években a DuPont nevű cég által megbízott Stephanie Kwolek felfedezte az aramidot. Később ezt az anyagot Kevlar márkanéven piacra bocsájtották. Az anyag kifejlesztésének célja a gumiabroncsok védőbetétjének forradalmasítása volt [2]. Azonban a magas szilárdságára és merevségére az Amerikai Egyesült Államokbeli Országos Igazságügyi Kutatóintézet is felfigyelt. Több éven keresztül teszteltek Kevlarból készült lövedékálló mellényeket, majd 1976-ra megállapították, hogy az aramidokból készíthető olyan lövedékálló mellény, amely az akkor legelterjedtebb lövedékeket képes megállítani [3].

A kevlar és más kompozitok ballisztikus behatásra adott reakcióját, valamint az anyag mechanikai tulajdonságait számos tanulmány vizsgálta [4] [5] [6], azzal a céllal, hogy értékeljék ezek jellemzőit és hatékonyságát terhelés alatt. Ezek a vizsgálatok kísérleti tesztek [7] [8] [9] [10] [11] és numerikus modellezést [12] [13] [14] egyaránt magukban foglaltak, és megállapították a kevlar hatékonyságát, mint ütközésálló anyagot.

2. Az anyagok elkészítése

Az anyagok alapját aramidszálas szövet alkotta. A szöveteket 300x300 milliméter méretűre daraboltam. Összesen 20 réteg szövetet alkalmaztam. Három különböző kötőanyagot alkalmaztam a rétegek megkötésére, melyeket a következő alpontokban bemutatok.

2.1. Pillanatragszott anyag

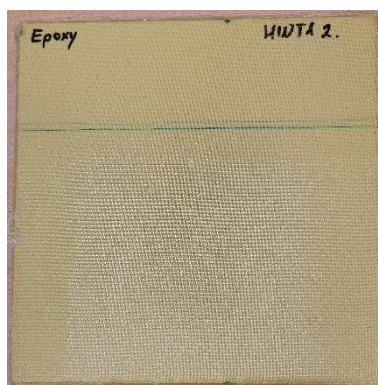
Az első anyag elkészítéséhez univerzális pillanatragsztót használtam. A szövet felületén néhány pontra felvittem a ragasztót, majd a következő szövetet ráhelyeztem. A következő réteg elkészítéséhez nem volt szükséges megvárni, hogy a pillanatragsztó megszilárduljon. Ez az anyag rendelkezett a legnagyobb flexibilitással az anyagok közül (1. ábra).



1. ábra – Pillanatragsztó kötésű próbadarab

2.2. Epoxy gyanta kötésű anyag

A második anyagot epoxy gyantával készítettem el. A szövet teljes felületére felvittem az epoxy gyantát, majd a következő réteget ráhelyeztem. Ennél az anyagnál se volt szükség a kötőanyag megszilárdulását kivárni. Ez a próbadarab rendelkezett a legnagyobb merevséggel (2. ábra).



2. ábra – Epoxy gyantával kötött próbadarab

2.3. Poliuretán öntőgumi kötött anyag

A harmadik anyag rétegeit poliuretán öntőgumival kötöttem össze. A réteg egész felületére felvittem a poliuretán öntőgumit, majd ráhelyeztem a következő réteget. Ezen anyag esetében se volt szükség a kötőanyag megszilárdulását megvárni. Tulajdonságait tekintve ez a próbadarab a pillanatragasztott és az epoxy gyanta kötött próbadarab kompromisszuma, rugalmassága nem olyan jelentős, mint a pillanatragasztottnak, azonban nem is olyan merev, mint az epoxy erősítésű (3. ábra **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**).



3. ábra – Poliuretán öntőgumi kötött próbadarab

2.4. A próbadarabok mért tulajdonságai

Az próbadarabok elkészítése után megmértem a tömegüket és az átlagos vastagságukat, amelyek a 1. táblázat tartalmaz.

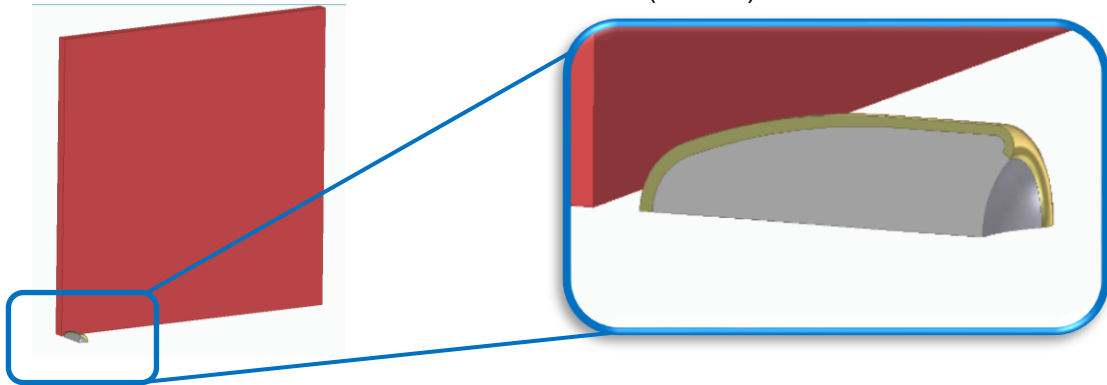
1. táblázat – Az próbadarabok fizikai tulajdonságai

Megnevezés	Sorszám	Tömeg (g)	Átlag vastagság (mm)
Pillanatragasztott kevlár	1	368	5,05
Epoxy erősítés	2	654	5,482
PU erősítés	3	616	5,9226

3. Végeelem szimuláció

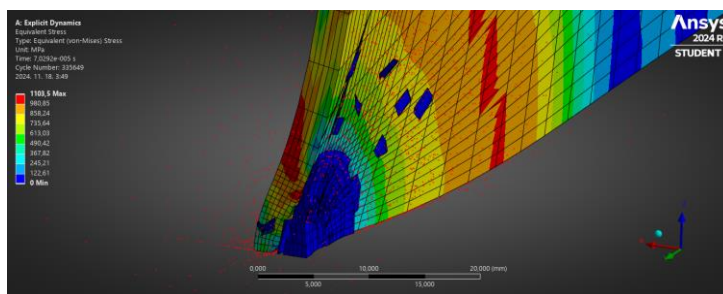
A valós vizsgálatok elvégzése előtt végeelemes módszer szimulációkat végeztem el közelítve a próbadarabokat, hogy következtethessenek a vizsgálat kimenetelére. A próbadarabok komplex felépítése miatt a szimulációkat egyszerűsítve végeztem el. A szimulációhoz a lövedéket és a próbadarabokat a Solid Edge 2024 szoftverben lemodelleztem. A lövedéket ólom magból és sárgaréz köpenyből építettem fel. A méretek a [15] forrás adataiból származnak. A próbadarabot egyszerűsítve, a valós próbadarabok átlagvastagságával (5,5 mm) és szélességével (300x300 mm)

készítettem el. Végül az egész modellt negyedeltem, a szimuláció meggyorsítása érdekében, mivel a középpontra tekintve a szimuláció szimmetrikus két síkon (4. ábra).

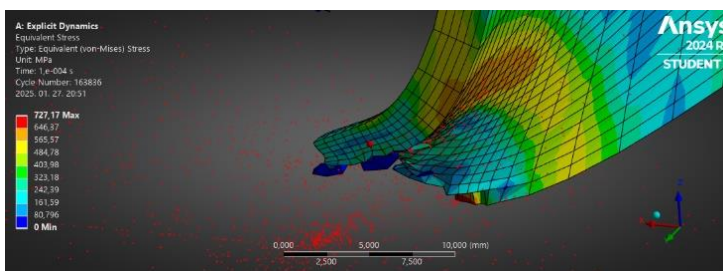


4. ábra – A modell felépítése

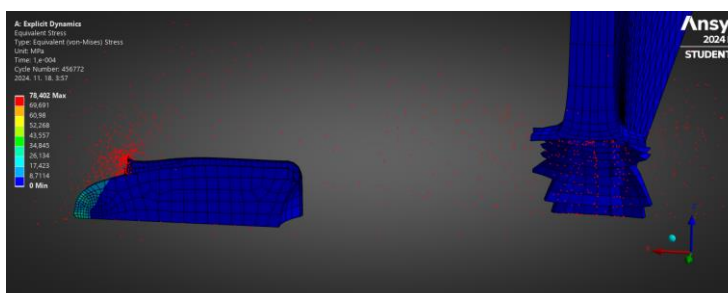
Az elkészült modellt importáltam az ANSYS 2024 R2 szoftverben, ahol a szimulációt felépítettem. A szimulációt öt különböző anyagú próbadarabra végeztem el: acél (Steel 4340), alumínium (Al 7075-T6), gumi, nylon és plexiglass. A szimuláció peremfeltételeinek a lövedék lineáris sebességének az MSZ K 1114-1 1999 által L3 lövedékállósági szint maximális megengedett lövedéksebességének értékét $10 \frac{m}{s}$ biztonsági ráhagyással állítottam, amely összesen $v = 383 \frac{m}{s}$. A fordulatszámának a kézi lőfegyverekre jellemző, $n = 1000 \text{ rpm}$ értéket adtam meg. A próbadarabot két külső felületét (vagyis nem a szimmetria síkok felületét) földhöz kötötté tettem. A szimuláció eredményeit az 5Hiba! A hivatkozási forrás nem található. ábra tartalmazza.



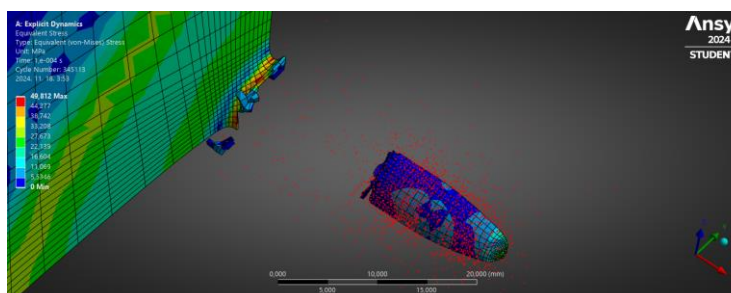
Anyag: Steel 4340; Átütés: NEM; Lövedék alakváltozása: Szétlapulás



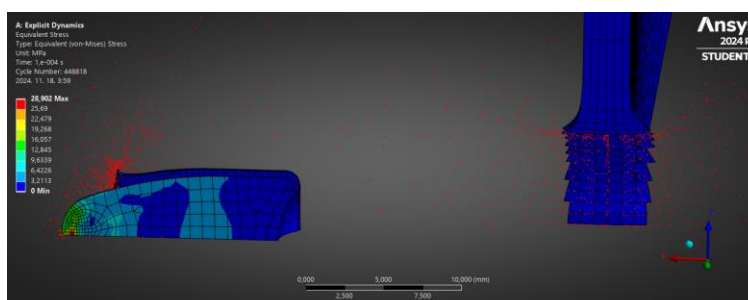
Anyag: Al 7075-T6; Átütés: IGEN; Lövedék alakváltozása: Széttörés



Anyag: Gumí; Átütés: IGEN; Lövedék alakváltozása: Köpeny felszakadt



Anyag: Nylon; Átütés: IGEN; Lövedék alakváltozása: Köpeny teljes mértékben levált



Anyag: Plexiglass; Átütés: IGEN; Lövedék alakváltozása: Köpeny felszakadt

5. ábra A szimuláció eredményei különböző anyagtipusok esetében

4. A lövedékállósági vizsgálat

A lövedékállósági vizsgálatokat a táborfalvai ballisztika laborban végeztem el. A lövedék 9x19 mm FMJ Parabellum volt (6. ábra). A lövedéket fegyvercsőből lőttem ki, így kizárhatóak voltak a mechanikai és az emberi hibák.



6. ábra – 9x19 mm FMJ Parabellum lövedék

A vizsgálat előírásait az MSZ K 1114-1 1999 szabvány tartalmazza. A vizsgálatot ezen előírások alapján állítottam be: a fegyvercső és a próbadarab közötti távolság $5 \pm 0,1$ m volt (7. ábra), a lövedék sebessége $358 \pm 15 \frac{m}{s}$ volt. Összesen 6 lövést kellett volna elvégezni, azonban ehelyett az első lövésnél, amelynek nem felelt meg a próbadarab, abbahagytam a lövést [5].



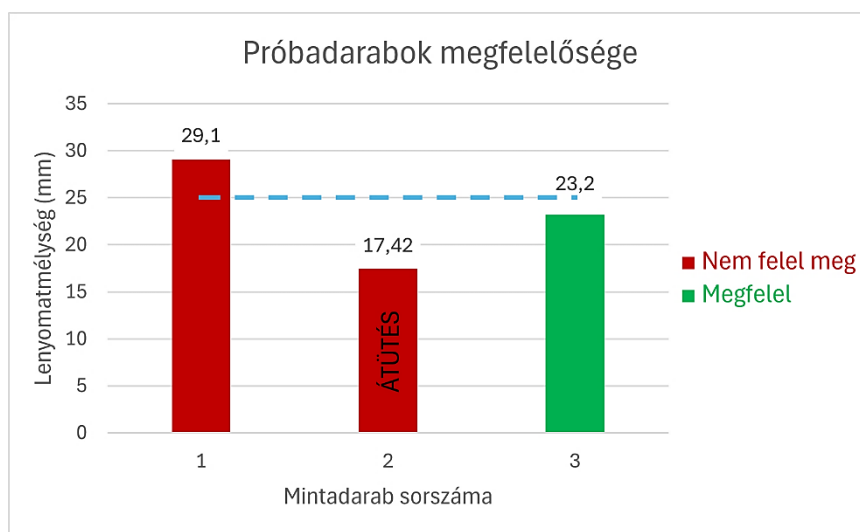
7. ábra – A vizsgálat összeállítása

A lövedékállóság feltétele, hogy a próbadarab 6 lövést meg tudjon állítani, illetve a megállított lövedékek okozta lenyomatmélység (amely a próbadarab mögött elhelyezett ballisztikai gyurmában mérhető le) ne haladja meg a 25 millimétert. Az első három lövést 0° -os, a negyedik lövés $+30^\circ$ -os, az ötödik -30° -os, a hatodik pedig újra 0° -os becsapódási szöggel kell elvégezni. A lenyomatmélységet csak az első lövésnél mértem le [16].

5. A vizsgálat kiértékelése

A vizsgálat alapján a pillanatragasztó és epoxy gyanta kötésű próbadarab nem nevezhető lövedékállóknak. A pillanatragasztott próbadarab megállította a lövedéket, azonban a lenyomatmélység meghaladta a megengedettet. Az epoxy gyanta kötésű próbadarab csökkentette legnagyobb mértékben a lenyomatmélységet, azonban a második lövés átütötte. A poliuretán

öntógumi erősítésű anyag azonban megfelelően csökkentette a lenyomatmélységet, és átütés sem következett be. A vizsgálat kiértékeléseit a 8. ábra mutatja.

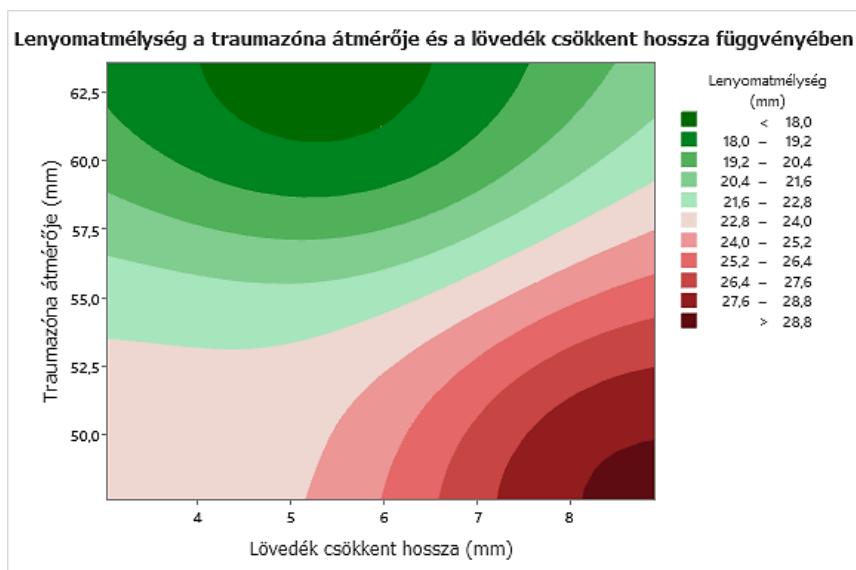


8. ábra – A vizsgálatok értékei összesítve

6. Következtetések

Kutatómunkám eredményei alapján az alábbi következtetéseket határoztam meg:

- I. A pillanatragasztó kötésű próbadarab nagy flexibilitása miatt nem tudta elengedően csökkenteni és elvezetni a lövedék becsapódási energiáját.
- II. Az epoxy gyanta kötésű próbadarab túl nagy merevsége révén nem tudott kellően deformálódni a lövedék becsapódásakor, így a lövedék átütötte.
- III. A poliuretán öntógumi kötésű próbadarab tökéletes kompromisszumot nyújt az előző próbadarabokhoz képest. Kellően rugalmas, így a lövedék nem ütötte át ridegen, viszont elegendő merevsége van, hogy a becsapódást felfogja.
- IV. A próbadarabokból vizsgálat után a lövedékeket eltávolítottam, azok csökkent hosszát lemértem. Szintén a vizsgálat után, a becsapódáskor jelentkező traumazóna átmérőjét is lemértem. A lenyomatmélységet ezen adatok függvényében ábrázolva arra következtethetek, hogy a lenyomatmélység a traumazóna átmérőjével fordítottan arányos, a lövedék hossz csökkenésével egyenesen arányos (9. ábra).



9. ábra – Lenyomatmélység a traumazóna átmérője és a lövedék csökkent hossza függvényében

Köszönetnyilvánítás

Jelen „Újgenerációs lövedékálló anyag fejlesztése, vizsgálata” kutatás a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 projekt keretében jött létre.

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Z. Williamson, „Baen,” 2019. [Online]. Available: <https://www.baen.com/bodyarmor>. [Hozzáférés dátuma: 21 10 2024].
- [2] „The History of Kevlar®,” [Online]. Available: <https://www.safeguardclothing.com/blogs/news/the-history-of-kevlar>. [Hozzáférés dátuma: 12 11 2024].
- [3] „The History of the Bulletproof Vest,” [Online]. Available: <https://bulletproofsafe.com/pages/the-history-of-bulletproof-vests?srltid=AfmBOopxS8UqQEzkQXgKI3KjvOei2qVxTa4j6VQSHaj4hYNv2n928jh>. [Hozzáférés dátuma: 11 11 2024].
- [4] Filipe DPB, Khrissy ARM, Carlos R, Hall B.: Systematic method for evaluating the performance of three-dimensional optical scanners by structured light projection applied to ballistic vests tests. *Measurement* 190 (2022) 110784 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110784>
- [5] Riaan S, Sarp A: Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles. *Defence Technology Volume 15, Issue 2, 2019, Pages 186-192* <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.08.006>
- [6] P. Soorya Prabhaa, I.G. Ragavia, R. Rajesha, M. Pradeep Kumar: FEA analysis of ballistic impact on carbon nanotube bulletproof vest. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021) 3937–3940 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.424>
- [7] Lee YS, Wetzel ED, Wagner NJ. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *J Mater Sci* 2003;38:2825e33.
- [8] Sikarwar RS, Velmurugan R, Madhu V. Experimental and analytical study of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates. *Cent Eur J Eng* 2012;2(4):638e50. <https://doi.org/10.2478/s13531-012-0029-x>.
- [9] Nayak N, Banerjee A, Datta D. Ultrasonic assessment of bullet inflicted damage in aramid laminated composites. *Defence Sci J* 2012;62(3):153e8. <https://doi.org/10.14429/dsj.62.1467>.
- [10] Sikarwar RS, Velmurugan R, Gupta NK. Ballistic performance of Kevlar/epoxy composite laminates. *Proceedings of Indian National Science Academy* 2013;79(4):789e99. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2013/v79i4/48001>.
- [11] Joselin R, Wilson WJ. Investigation on impact strength properties of Kevlar fabric using different shear thickening fluid composition. *Defence Sci J* 2014;64(3):236e43. <https://doi.org/10.14429/dsj.64.7322>.
- [12] Zhu D, Vaidya A, Mobasher B, Rajan SD. Finite element modeling of ballistic impact on multi-layer Kevlar 49 fabrics. *Compos B* 2014;56:254e62. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.051>.
- [13] Nilakantan G, Nutt S. Effects of ply orientation and material on the ballistic impact behavior of multilayer plain-weave aramid fabric targets. *Defence Technol* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.002>.
- [14] Kumar S, Gupta DS, Singh I, Sharma A. Behaviour of Kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact. *J Reinforc Plast Compos* 2010;29(13):2048e64. <https://doi.org/10.1177/0731684409343727>.
- [15] A. W. Michał Gmitrzuk, „Validation of Numerical Model of the Twaron® CT709 Ballistic Fabric,” Zielonka, 2014. „Magyar Katonai Szabvány - Testpáncélok”. Magyarország Szabadság száma: MSZ K 1114-1, 09 1999.