

Dr. Hlavicka-Laczák Lili Eszter* – Dr. Hlavička Viktor** – Prof. dr. Károlyi György*** –
Dr. Hajdú Ferenc**** – Dr. Salem Georges Nehme***** – Vozsech István*****

Betonszerkezetek károsodása lövedékbecsapódás hatására II. rész

A megnövekedett biztonsági igények miatt, a kritikusinfrastruktúra-elemeket befogadó új, betonszerkezetű építményeknek ellen kell állniuk még egy repülőgép-becsapódás léptékű ütközésnek is. Mivel kevés ilyen jellegű kísérlet eredménye ismeretes, ezért a tervezés során nagy szerepe van az elméleti megfontolásoknak és a numerikus vizsgálatoknak, ugyanakkor különféle tapasztalati képletek alkalmazásának is. A számítások validálásához szükség van megbízható mérési eredményekre, ezért a szerzők a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és a Magyar Honvédség Modernizációs Intézet együttműködésében lőtéri tesztek segítségével vizsgálták a lövedék sebességének és a beton minőségének a hatását beton céltárgyak károsodására. Tanulmányuk első részében a lőtéri vizsgálatok előkészítéséről, a beton céltárgyak kialakításáról, a vizsgálófegyver és a vizsgálólövedék paramétereiről olvashattunk.

A VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A következőkben bemutatjuk és értékeljük a kísérleti eredményeket. A továbbiakban alkalmazott jelölésmód a következő: IA (100) jelölés az IA jelű keverékből készül betontábla 100 m/s tervezett becsapódási sebességű lövés esetén. Az előzetes számítások jól becsülték a szükséges vizsgálati paramétereket, az elhanyagolható károsodástól az átlukadásig minden lehetséges károsodási mód megjelent, a védett oldalon a lövedék nem repült tovább. A tapasztalt károsodásokat a 4. táblázat foglalja össze, a jellemző károsodási módokat bemutató képeket a 8–11. ábrák mutatják. A mérések során a lövedékek mért sebessége jó egyezést mutatott a tervezettel, a becsapódási sebességek átlagos abszolút eltérése a tervezettől 100 m/s esetén 7,1%, 150 m/s esetén 4,0%, a magasabb sebességek esetén 0,7–1,5% volt.

A 8. ábrán alacsony sebességű becsapódás következményeit látjuk. A sérülések

4. táblázat. A betontábla védett oldalán tapasztalható károsodások
(A szerzők szerkesztése)

Jel	Hatás a védett oldalon
IA	(100) a védett oldal sértetlen
	(150) két esetben kisebb repedések, egy esetben a védett oldal sértetlen
	(200) kevés, kisebb repedés
	(250) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(300) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(350) gyakorlatilag perforáció
	(400) két esetben leválás (gyakorlatilag perforáció), egy hibás mérés
IB	(100) a védett oldal sértetlen
	(150) két esetben kisebb repedések, egy esetben a védett oldal sértetlen
	(200) két esetben kisebb repedések, egy esetben a védett oldal sértetlen
	(250) kevés, kisebb repedés
	(300) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(350) két esetben leválás, egy esetben repedések
	(400) gyakorlatilag perforáció
II	(100) a védett oldal sértetlen
	(150) a védett oldal sértetlen
	(200) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(250) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(300) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(350) repedések, egy hibás mérés
	(400) két esetben leválás (gyakorlatilag perforáció), egy esetben repedés
III	(100) a védett oldal sértetlen
	(150) a védett oldal sértetlen
	(200) kevés, kisebb repedés
	(250) kevés, kisebb repedés
	(300) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(350) nehezen körülhatárolható repedt felület
	(400) egy esetben leválás, egy esetben repedések, egy hibás mérés

* Egyetemi adjunktus, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék. ORCID: 0000-0002-8435-3764

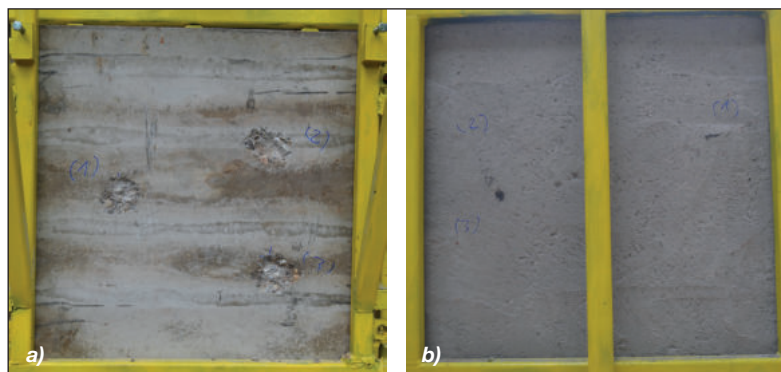
** Egyetemi adjunktus, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék. ORCID 0000-0001-5435-4400

*** Egyetemi tanár, az MTA levelező tagja, BME Nukleáris Technikai Intézet. ORCID: 0000-0002-1021-9554

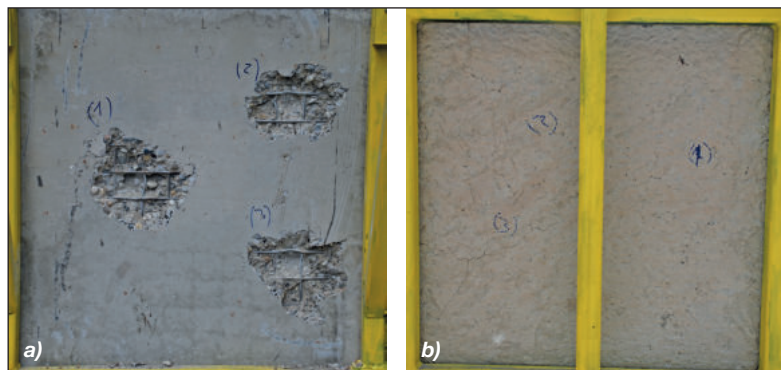
**** Egyetemi docens, NKE HHK Haditechnikai Tanszék. ORCID 0000-0003-0449-7678

***** Egyetemi docens, tanszékvezető, BME Építőanyagok és Magasépítés Tsz. ORCID 0000-0003-4729-5048

***** Gépészmérnök, Magyar Honvédség Anyagellátó Raktárbaázis. ORCID: 0000-0001-9818-7755

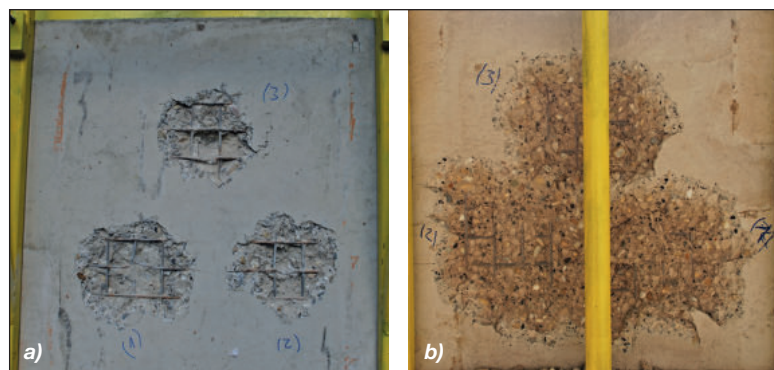


8. ábra. IA(100). próbatest becsapódás felőli és védett oldala a lövéseket követően; a védett oldal gyakorlatilag sértetlen



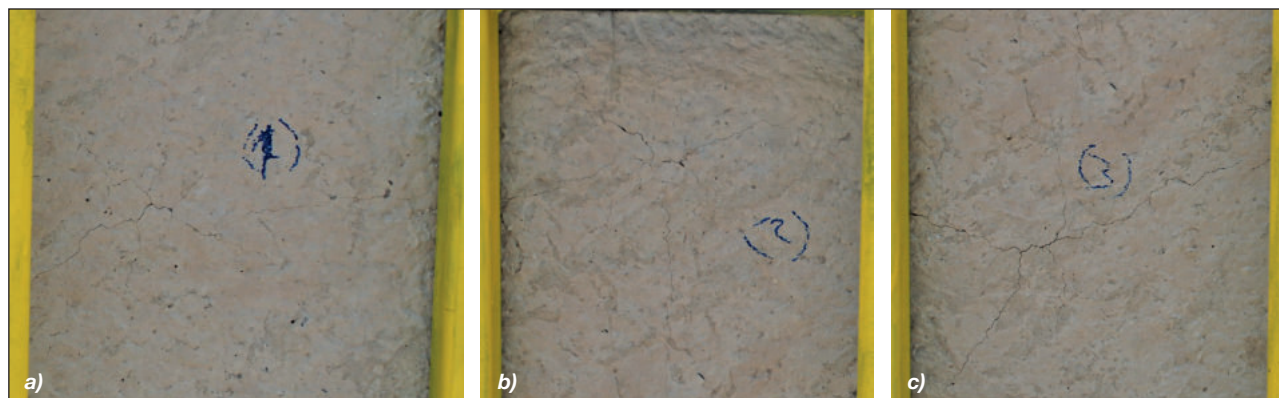
9. ábra. IB(300) próbatest becsapódás felőli és védett oldala a lövéseket követően; a védett oldalon repedések keletkeztek

csak a becsapódás felőli oldalon jelentkeznek, a védett oldal sértetlen annak ellenére, hogy a céltárgy anyaga a leggyengébb volt az összes vizsgált minta közül. A 9. ábra már jelentősen magasabb becsapódási sebesség esetén mutatja a keletkező sérüléseket egy, a 8. ábrával közel azonos tulajdonságú betonmintán. Látható, hogy a becsapódás felőli oldalon jelentős sérülések keletkeztek, és a védett oldalon is megjelennek repedések. Ezeket a repedéseket nagyítva mutatja a 10. ábra. A 11. ábrán a sebesség további növelésének hatását látjuk. A markáns, acélhálót is átszakító becsapódási oldali sérülések mellett jelentős mélységű és kiterjedésű leválások keletkeznek a védett oldalon is.



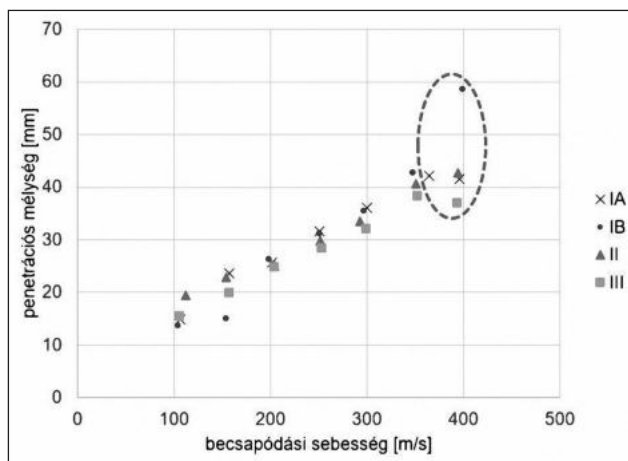
11. ábra. IA(350) próbatest becsapódás felőli és védett oldala a lövéseket követően; a védett oldalon jelentős leválás látható

10. ábra. IB(300) próbatest védett oldali repedései

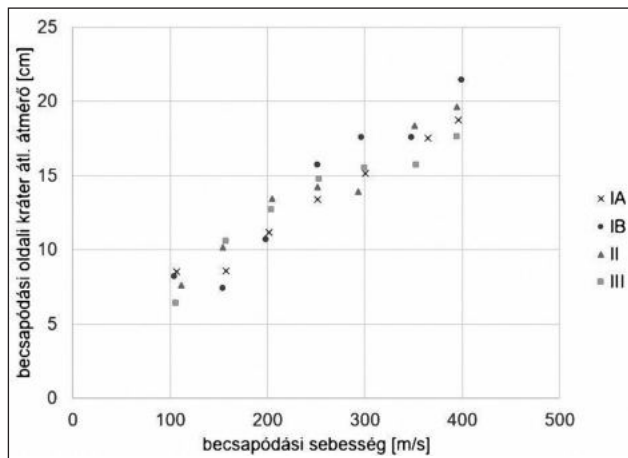


A vizsgálat során a becsapódási oldalon a penetrációs mélységet (a kráter maximális mélysége), illetve a becsapódási kráter átmérőjét mértük, utóbbi két egymásra merőleges irányban mért érték átlagát jelenti. A kimeneti oldalon szintén a kráter maximális mélységét, illetve két érték átlagaként a kráter átmérőjét mértük. Amennyiben nem alakult ki a védett oldalon kráter, úgy a repedések által érintett zóna méretét rögzítettük, a kráter mélysége pedig 0 mm. Ezeknek a mért értékeknek a becsapódási sebességtől való függését mutatják be a 12–15. ábrák az egyes keverékek esetén. Összesen 3 esetben tapasztaltuk a lövedék elfordulását – IA(400), II(100), III(400) –, egy esetben pedig a tervezettől jelentősen eltérő becsapódási sebességet – II(100) eset –, ezeket a méréseket kizártuk az értékelésből, minden más esetben a diagramokon látható pontok 3-3 mérés átlagát jelenti. A diagramokon látható, hogy a becsapódási sebesség növekedésével nő a penetrációs mélység, a becsapódási oldali kráter átmérője, illetve a védett oldalon az érintett zóna.

A 11. ábrán látható, hogy 350 m/s és 400 m/s becsapódási sebesség esetén már csak egy esetben nőtt jelentősen a penetrációs mélység, ennek oka, hogy a védett oldali kráter (14. ábra) és a bemeneti oldali kráter lényegében már összeért, a megmaradt kis betonzóna kihullását, a perforációt már csak a betonacélok akadályozták meg.



12. ábra. Penetrációs mélység a becsapódási sebesség függvényében, az egyes betonösszetételek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti). A bekarikázott részen perforáció figyelhető meg (A szerzők szerkesztése)

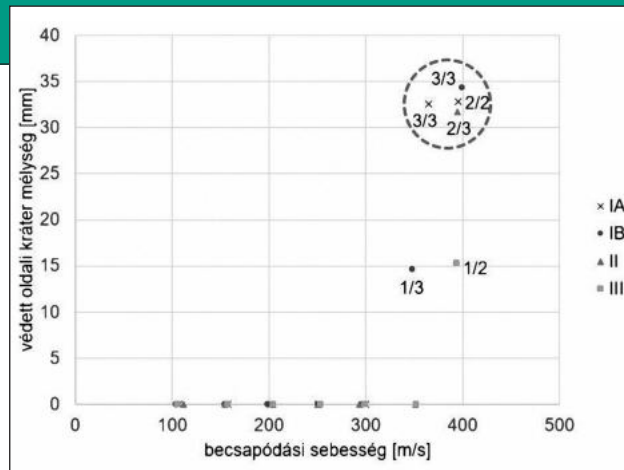


13. ábra. Becsapódási oldali kráter átlagos átmérője a becsapódási sebesség függvényében, az egyes betonösszetételek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti) (A szerzők szerkesztése)

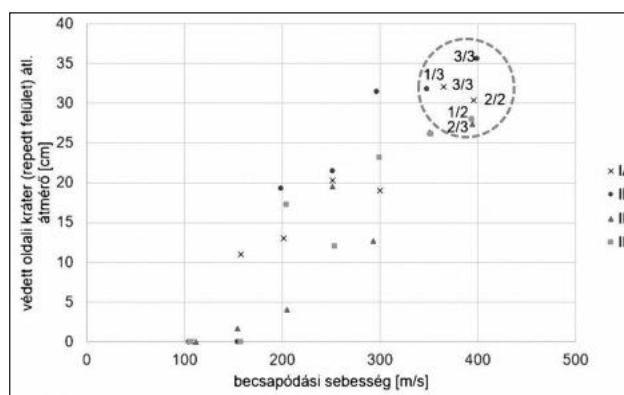
Ha a penetrációs mélység elérte a 40 mm-t, akkor már nagyon közel járunk a perforációhoz, a penetrációs mélységre visszahat a védett oldal. Ez jó egyezést mutat a szakirodalommal, amely szerint, ha a vastagság harmadát felét meghaladja a penetrációs mélység, akkor perforációhoz közeli állapot áll fenn.

A 13. ábra a becsapódási oldali kráter kiterjedését mutatja a becsapódási sebesség függvényében. Látható, hogy a sérült tartomány kiterjedése, mindegyik céltárgy esetén, nagyjából a sebességgel arányosan növekszik. A 14. ábra a védett oldali kráter mélységét mutatja a becsapódási sebesség függvényében. Az ábrán az átlukadással járó esetek jól elkülönülnek, ezek az IA(350), az IA(400), az IB(400), az II(400) esetek. Az IB(350) és a III(400) esetekben csak 1-1 lövéskor keletkezett kisebb mélységű védett oldali kráter, így ezekben az esetekben perforáció nem feltételezhető. A 14. ábrán látható, hogy 12 esetben vált le a varasodott zóna a védett oldalon.

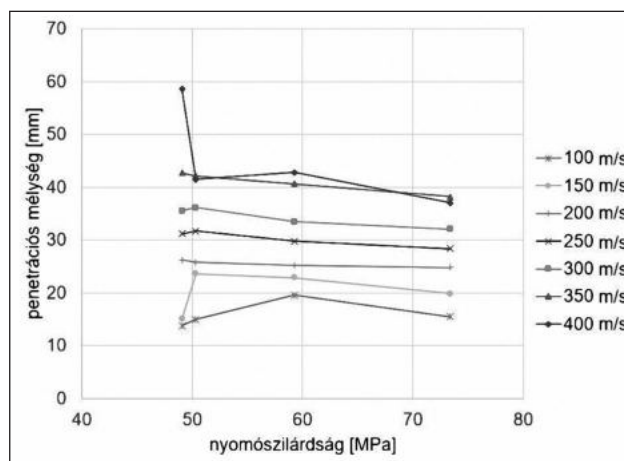
A 15. ábrán a védett oldali kráter kiterjedését láthatjuk a becsapódási sebesség függvényében. Jól látható az eredmények szórása a betonminőség függvényében. A 14. ábra a gyakorlatilag perforálódott eseteket dokumentálja, míg a 15. ábrán azokat az eseteket jelöltük bekarakással, amelyekben tényleges védett oldali kráter keletkezett.



14. ábra. Védett oldali kráter mélysége a becsapódási sebesség függvényében, az egyes betonösszetételek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti). A bekarikázott részen perforáció figyelhető meg. A pontok mellett található számok azt jelzik, hogy hány mérés esetében keletkezett tényleges kráter, illetve mennyi volt az adott pont esetében az összes mérés (A szerzők szerkesztése)

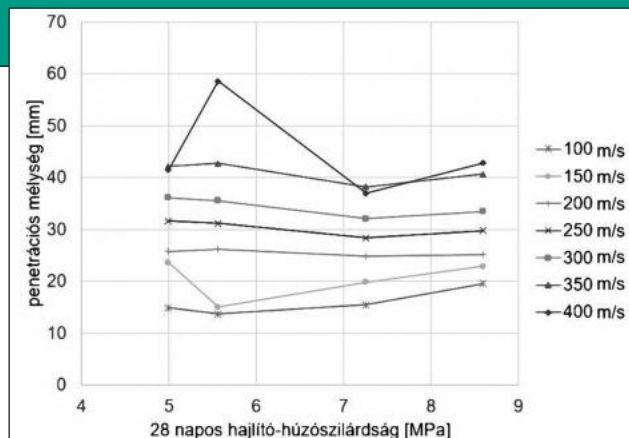


15. ábra. Védett oldali kráter (vagy repedt felület) átlagos átmérője a becsapódási sebesség függvényében, az egyes betonösszetételek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti). A bekarikázott részen keletkezett védett oldali kráter. A pontok mellett található számok azt jelzik, hogy hány mérés esetében keletkezett tényleges kráter, illetve mennyi volt az adott pont esetében az összes mérés (A szerzők szerkesztése)

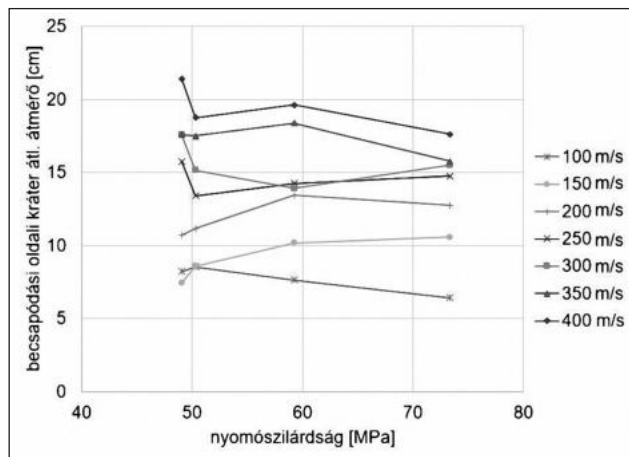


16. ábra. Penetrációs mélység a lőtéri tesztekkor mért beton nyomószilárdságának függvényében, a különböző becsapódási sebességek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti) (A szerzők szerkesztése)

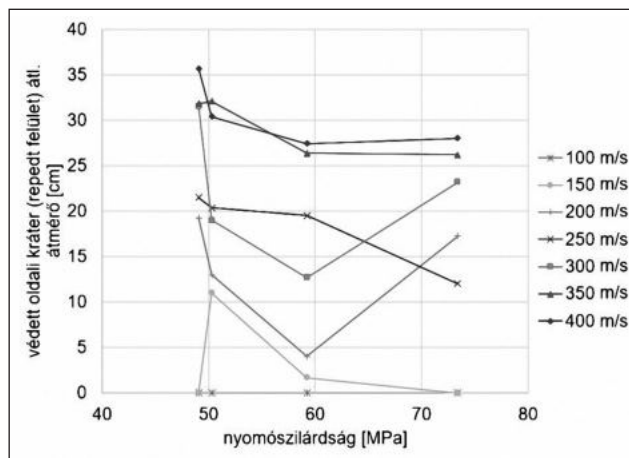
A 16-17. ábrák a penetrációs mélységet ábrázolják, a beton lőtéri tesztekkel egyidőben mért nyomószilárdsága, illetve a 28 napos húzószilárdság függvényében, az egyes



17. ábra. Penetrációs mélység a 28 napos állapotban mért beton hajlító-húzószilárdság függvényében, a különböző becsapódási sebességek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti) (A szerzők szerkesztése)



18. ábra. Becsapódási oldali kráter átlagos átmérője a lőtéri tesztekkor mért beton nyomószilárdságának függvényében, a különböző becsapódási sebességek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti) (A szerzők szerkesztése)



19. ábra. Védett oldali kráter (vagy repedt felület) átlagos átmérője a lőtéri tesztekkor mért beton nyomószilárdságának függvényében, a különböző becsapódási sebességek esetén (egy-egy pont 3-3 mérés átlagát jelenti) (A szerzők szerkesztése)

becsapódási sebességek esetén. A diagramok alapján a penetrációs mélység nyomószilárdságtól való függése egyértelműen látható, az elvártaknak megfelelően nagyobb nyomószilárdság kisebb penetrációs mélységet eredményez. A húzószilárdság hatása vélhetően a védett oldali károsodások esetén lesz domináns, az itt keletkező károsodá-

sok részletesebb vizsgálatához a táblákról a közeljövőben metszeteket készítünk. A 18–19. ábrák a becsapódás felőli, illetve a védett oldali kráterátmérőket ábrázolják a lőtéri tesztekkel egyidőben mért nyomószilárdság függvényében. Általában elmondható, hogy nagyobb nyomószilárdság kisebb károsodást, így kisebb átmérőket eredményez.

ÖSSZEGZÉS – TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A BME Építőmérnöki Kar és Természettudományi Kar Nukleáris Technikai Intézet, valamint a Magyar Honvédség Modernizációs Intézet közös vizsgálatában különböző összetételű (szilárdságú) betontáblák károsodását vizsgáltuk 30 mm átmérőjű, 169,2 g tömegű acéllövedék 100–400 m/s sebességgel történő becsapódása esetén. Négyféle betonkeverékből összesen $7 \times 4 = 28$ betontábla készült, amelyekre 3-3 azonos sebességű lövést adtak le. Az alkalmazott vizsgálófegyver a Magyar Honvédség Modernizációs Intézet saját fejlesztése, a betonanyagok tervezése és a próbatestek legyártása a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában történt. A vizsgálati eredmények jól követték az előzetes számításokat, a próbatestek esetén a lehetséges károsodások mindegyike megfigyelhető volt: a becsapódás felőli oldalon penetráció, a védett oldalon elhanyagolható károsodásoktól a repedéseken és varasodáson át a perforációig terjedő károsodás következett be. A vizsgálófegyver – még a kisebb sebességek esetén is – alkalmas volt az előirányzott lövedékek sebességeinek pontos megvalósítására. A vizsgálatok eredményei az előzetesen számított értékeknek megfelelően alakultak, így jól használhatók numerikus szimulációk kalibrálásához, illetve a szerzők által korábban kidolgozott számítási formula igazolásához. Az eredmények részletesebb elemzése és a károsodásokra vonatkozó többletinformációk érdekében a táblákról történő metszetkészítés, 3D-s szkenneléstől történő felmérés, illetve a további szilárdsági jellemzők laboratóriumi vizsgálata még javában tart. Ezek a további vizsgálatok lehetőséget teremtenek a teljes becsapódási és védett oldali károsodott zóna térfogatának számítására. Vizsgálható lesz, hogy a teljes károsodott zónatér fogat hogyan függ a céltárgy szilárdságától. A szerzők nyomó- és hajlító-húzószilárdság mellett a betonkeverékek hasító-húzószilárdságát és nyírt próbatesteken mért szilárdságát is mérték, az eredmények részletes elemzése és a következtetések levonása még folyamatban van.

A vizsgálófegyver a továbbiakban széleskörűen alkalmazható különféle vizsgálatokban, pl. adott morfológiájú repeszek kilövése, különböző konstrukciójű szárnystabilizált nyíllövedékek külső és célballisztikai vizsgálata esetén.

A vizsgálatok eredményei, és az azok során szerzett tapasztalatok megfelelő alapot nyújthatnak nagyobb méretű lövedékek becsapódásának vizsgálatához is, amellyel – végső célként – akár repülőgép-hajtómű becsapódásának valós és számítógépes elemzésére is sor kerülhet.

A szerzők köszönetüket fejezik ki az NKFIH K-128584 és az ITM NKFIÁ által nyújtott TKP2020 BME-IKA-VIZ projektek anyagi támogatásáért. Köszönjük Bíró Andrásnak, Burai Balázsnak és a Magyar Honvédség Modernizációs Intézet Lőkísérleti Vizsgáló Osztály munkatársainak a céltárgyak elkészítéséhez, és a lőtéri tesztek során nyújtott szakmai segítséget. Köszönjük Halmos Krisztiánnak és az MTA-BME Morfodinamikai Kutatócsoportnak a 3D-s szkennelésben nyújtott segítséget.