

# Airsoft lövedék viszkózus-rugalmas-képlékeny ütközésének szimulációja és alkalmazása

## Analysis and application of viscous-elastic-plastic impact of airsoft pellet

*BEREZVAI Szabolcs, PhD hallgató, Dr. KOSSA Attila, egyetemi docens,  
Dr. STÉPÁN Gábor, egyetemi tanár*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék,  
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3; Tel.: +36-1463-1235; fax: +36-1463-3471  
berezvai@mm.bme.hu, kossa@mm.bme.hu, stepan@mm.bme.hu

### **Absztrakt**

*Az airsoft golyók becsapódása nagy alakváltozásokkal jár, amely rugalmas, képlékeny és viszkózus deformációkat is mutat. A becsapódás végeeselemes szimulációjához rugalmas-képlékeny helyettesítő konstitutív egyenleteket vezetünk be a mérési eredményekre illesztett viszkózus-rugalmas-képlékeny anyagmodell alapján. A szimulációk lehetővé teszik az ütközés paramétereinek és a releváns frekvenciatartománynak becslését, ahol az airsoft golyó gerjesztésként használható ütési kísérletekben.*

### **Abstract**

*During impact, airsoft pellets undergo large deformations, which shows elastic, yielding and viscous properties as well. Finite element simulations of the impact were performed using equivalent elastic-plastic models obtained from the fitted viscous-elastic-plastic constitutive model based on mechanical measurements. Based on the simulation results, the impact parameters were estimated and the relevant frequency domain was obtained, where pellet impacts can be applied as impulse excitation.*

**Kulcsszavak:** Airsoft golyó, viszkózus-rugalmas-képlékeny deformáció, paraméterillesztés, ütközés, modális analízis

## **1. BEVEZETÉS**

Az ütésálló polisztirol (HIPS) alapanyagból készült airsoft lövedékek egy lehetséges mérnöki alkalmazási területe a modális analízis, amelynek során a lövedék becsapódásával gyors lefutású impulzusgerjesztést valósíthatunk meg. Ezt a módszert akkor alkalmazhatjuk, amikor a hagyományos modális kalapácsütés nem biztonságos illetve nem gerjeszti megfelelően a magas frekvenciákat (pl. nagy sebességgel forgó szerszámok esetén). Az airsoft golyós gerjesztés hátránya, hogy a gerjesztő erő nem mérhető. Emiatt a lövedék ütközésének lefolyását és a modális analízis szempontjából releváns gerjesztési frekvenciatartomány becslését végeeselemes szimulációk segítségével szükséges megvalósítani [1].

Az airsoft lövedéken elvégzett előzetes mechanikai tesztek kimutatták, hogy viselkedése nagy alakváltozással jár, amely rugalmas, képlékeny és viszkózus deformációkkal is rendelkezik. Ezen komplex mechanikai viselkedés leírására az ABAQUS [2] kereskedelmi végeeselemes szoftverben az ún. „two-layer viscoplastic” modell hatékonyan alkalmazható. Az anyagmodell azonban sem explicit, sem implicit dinamikai szimulációk esetén nem alkalmazható. Ezért rugalmas-képlékeny helyettesítő modelleket vezetünk be, amelyekkel a dinamikai szimulációk már elvégezhetők [1,3,4,5].

Dolgozatunkban bemutatjuk az airsoft lövedék leírására használt összetett konstitutív modellt, az alkalmazott paraméterillesztési eljárást és az egyenértékű rugalmas-képlékeny modellek paramétereinek számítási módját. Vizsgálataink célja, hogy a helyettesítő rugalmas-képlékeny modelleken elvégzett dinamikai szimulációk segítségével becslést adjunk az ütközési időre, a kinetikus energia változására, a maximális ütközési erőre valamint az ún. releváns frekvenciatartományra, amelyen az airsoft golyó becsapódása impulzusgerjesztésként alkalmazható.

## 2. MECHANIKAI ANYAGMODELL

Az ABAQUS kereskedelmi végeleemes szoftverben elérhető „two-layer-viscoplastic” (2LVP) modell egy rugalmas-képlékeny (P) és egy viszkoelasztikus (V) ág párhuzamos kapcsolásából épül fel (lásd 1. ábra1. ábra). Emiatt, a teljes feszültség kifejezhető a két ágban ébredő feszültségek összegeként, azaz  $\sigma = \sigma_V + \sigma_P$  [3,4].

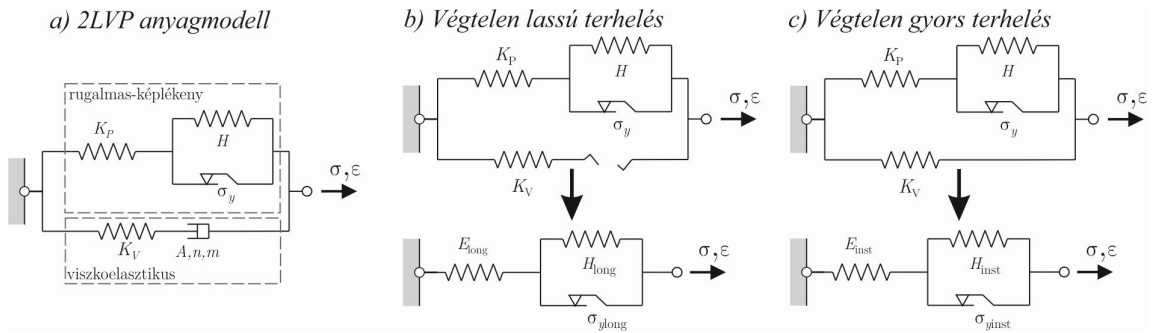
A modell rugalmas viselkedését a két ágban szereplő  $K_P$  és  $K_V$  rugalmassági modulusokkal valamint  $\nu_P$  és  $\nu_V$  Poisson-tényezőkkel jellemezhetjük, melyekre  $\nu = \nu_V = \nu_P$  teljesül. A modell eredő rugalmassági modulusa ekkor  $E = K_V + K_P$ , míg az  $f = K_V / E$  paraméter kifejezi a modulusok arányát az egyes ágakban. A viszkoelasztikus ágban szereplő „csillapító elem” az egyenértékű kúszási alakváltozás  $\bar{\varepsilon}^{cr}$  és az egy egyenértékű egytengelyű deviátoros feszültség  $q$  között a

$$\frac{d}{dt} \bar{\varepsilon}^{cr} = \left( Aq^n \left[ (m+1) \bar{\varepsilon}^{cr} \right]^m \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (1)$$

differenciálegyenlet teremt kapcsolatot, amelyben az ismeretlen paraméterek  $A$ ,  $n$  és  $m$ . A képlékeny viselkedést a von Mises-féle képlékenységi feltételre épülő lineárisan izotrop keményedő modell segítségével írjuk le, melyet a kezdeti folyáshatár  $\sigma_y$  és a képlékeny keményedési modulus  $H$  jellemez.

Az anyagmodellben szereplő paraméterek illesztésére egytengelyű mechanikai tesztek végeztünk egy kereskedelmi forgalomban kapható HIPS airsoft golyón. Annak érdekében, hogy valamennyi anyagparamétert egy lépésben tudjuk illeszteni, a mechanikai teszt három terhelési szakaszból állt: felterhelés állandó deformációsebességgel, relaxáció és tehermentesítés. A fenti anyagmodell esetén azonban a zárt-alakú feszültség válasz nem érhető el, még egyszerű terhelési esetekre sem. Emiatt a paraméterillesztést egy végeleemes szimuláción alapuló iterációs eljárás segítségével valósítottuk meg az ISIGHT [2] külső optimalizáló segítségével. Az eljárás lényege, hogy az iteráció minden lépésében a mérés teljes végeleemes szimulációját elvégezzük, majd azt összevetjük a mért adatokkal. Az illesztett anyagparamétereket az 1. táblázatban összegeztük.

Az illesztett modell alapján lehetőség nyílik a golyó ütközésének dinamikai szimulációjára, azonban a 2LVP modell sem explicit, sem implicit dinamikai szimulációk esetén nem alkalmazható, emiatt az anyagi viselkedés közelítésére egyenértékű rugalmas-képlékeny modelleket vezetünk be.



1. ábra:

a) A TLVP modell 1D reprezentációja valamint a helyettesítő rugalmas-képlékeny modellek b) végtelen lassú és c) pillanatnyi terhelés esetén

Az illesztett anyagparaméterek

1. táblázat

2LVP anyagmodell			Egyenértékű rugalmas-képlékeny modellek	
Rugalmas	Viszkózus	Képlékeny	Végtelen gyors	Végtelen lassú
$E = 2309 \text{ MPa}$	$A = 0,0024$	$\sigma_y = 14,2 \text{ MPa}$	$E_{inst} = 2309 \text{ MPa}$	$E_{long} = 1387 \text{ MPa}$
$\nu = 0,25$	$n = 0,4826$	$H = 45,7 \text{ MPa}$	$\sigma_{yinst} = 23,7 \text{ MPa}$	$\sigma_{ylong} = 14,24 \text{ MPa}$
$f = 0,399$	$m = -0,55$		$H_{inst} = 1659 \text{ MPa}$	$H_{long} = 45,7 \text{ MPa}$

## 2.1. Egyenértékű rugalmas-képlékeny anyagmodellek

Az egyenértékű rugalmas-képlékeny modellek bevezetésének alap gondolata, hogy a viszkózus viselkedést két szélsőértékével, azaz a végtelen lassú és a pillanatnyi (végtelen gyors) terheléssel, helyettesítsük. Végtelen lassú terhelés esetén (lásd *1/b. ábra*) a viszkózus elem feszültségmentesen deformálódik, amely a viszkoelasztikus ágban szakadásként közelíthető. Következésképpen, az így kapott egyenértékű modell megegyezik a 2LVP modell rugalmas-képlékeny ágával, vagyis

$$E_{long} = (1-f)E, \quad \sigma_{ylong} = \sigma_y, \quad H_{long} = H. \quad (2)$$

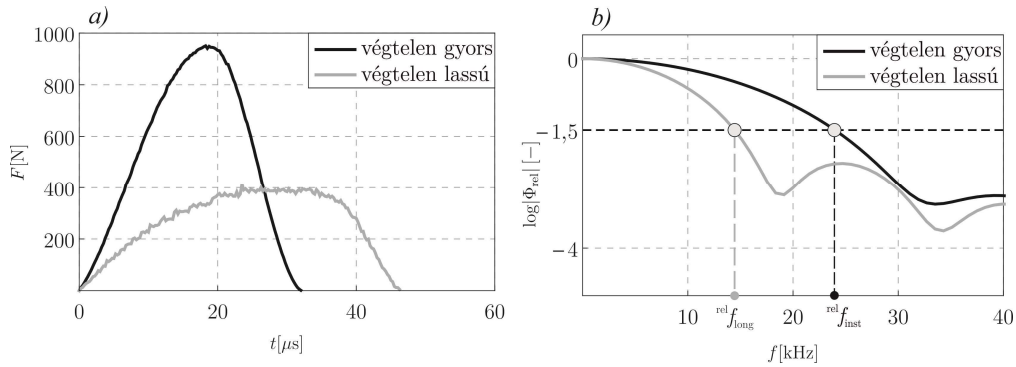
Ezzel szemben a pillanatnyi (végtelen gyors) terhelés esetén a viszkózus elem végtelen merev lesz (lásd *1/c. ábra*), így a viszkoelasztikus ágat a  $K_V$  rugóval helyettesíthetjük. Ebben az esetben a rugalmas-képlékeny helyettesítő modell paramétereire az alábbi összefüggés áll fenn:

$$E_{inst} = E, \quad \sigma_{yinst} = \frac{\sigma_y}{1-f}, \quad H_{inst} = \frac{f(1-f)E + H}{(1-f)^2}. \quad (3)$$

Az egyenértékű rugalmas-képlékeny modellek paramétereit az *1. táblázatban* összegeztük.

## 3. DINAMIKAI SZIMULÁCIÓ

Az egyenértékű rugalmas-képlékeny modelleken már elvégezhető a becsapódás dinamikai szimulációja, amelynek során a HIPS golyót ( $\rho_g = 3900 \text{ kg/m}^3$ ) alumínium (AL2024-T351) falnak lőttünk. A szimuláció során a fal mechanikai viselkedését rugalmas-ideálisan képlékenynek feltételeztük ( $\rho_{Al} = 2780 \text{ kg/m}^3$ ,  $E_{Al} = 73,1 \text{ GPa}$ ,  $\nu_{Al} = 0,33$ ,  $\sigma_{yAl} = 324 \text{ MPa}$ ). A golyó ütközés előtti sebessége a valós mérési adatoknak megfelelően falra merőleges irányban  $v = 28,22 \text{ m/s}$  volt. A szimuláció eredményeként kapott ütközési erőkarakteristikákat a *2/a. ábra* szemlélteti. Az erőjel gyors Fourier-transzformáltjából ( $\Phi(j\omega)$ ) bevezethetjük az ún. releváns frekvenciaspektrumot (lásd *2/b. ábra*), mint  $\Phi_{rel} = |\Phi(j\omega)| / |\Phi(j\omega)|_{max}$ . A releváns frekvenciaspektrumra bevezetett  $\log(\Phi_{rel}) > -1,5$  feltétel alapján megállapíthatjuk azt a maximális  $f^{rel}$  frekvenciát, amelyre az airsoft golyós gerjesztési módszer alkalmazható. A fentiek alapján a vizsgált esetben  $f_{inst}^{rel} = 24,71 \text{ Hz}$  illetve  $f_{long}^{rel} = 15,15 \text{ Hz}$ .



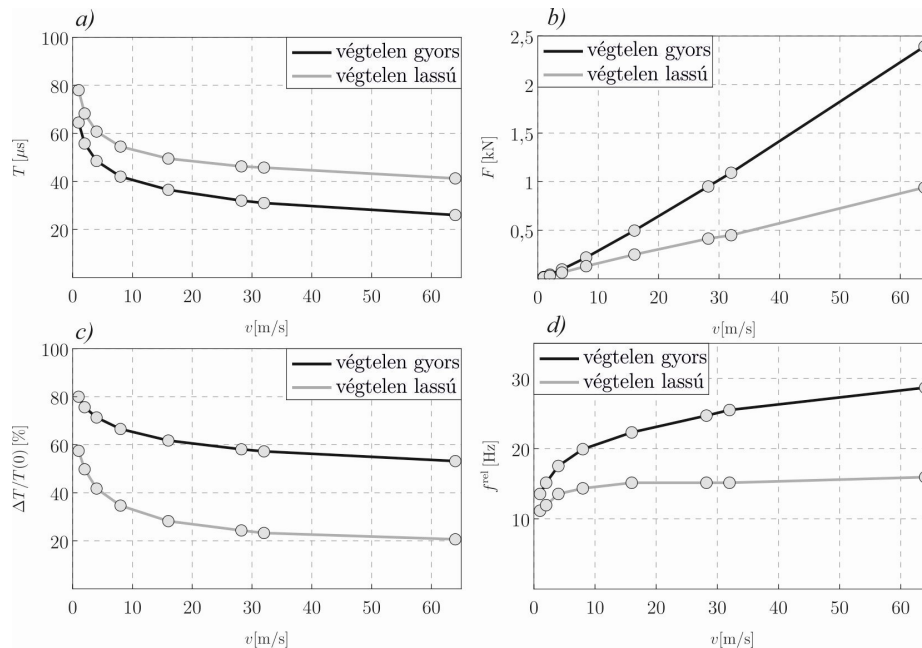
2. ábra:

Az airsoft golyó ütközésének a) erőkarakterisztikája valamint b) relatív frekvenciaspektruma

### 3.1. Ütközési paraméterek becslése

Az airsoft golyós gerjesztés megfelelő alkalmazásához fontos ismerni az ütközési sebesség hatását az ütközés paramétereire. Ennek érdekében különböző sebességek esetén vizsgáltuk az ütközési idő  $T$ , a maximális erő  $F$ , a kinetikus energiavesztés  $\Delta T / T(0)$  és a releváns maximális frekvencia  $f^{rel}$  változását. Az eredmények alapján (lásd *3. ábra*) látható, hogy a becsapódási sebesség

növelésével a maximális erő és az kinetikus energiaveszteség jelentősen nő, azonban a gerjesztés szempontjából jelentős maximális frekvenciaérték sokkal kisebb mértékben növekszik.



3. ábra:

*A becsapódási sebesség hatása a) az ütközési időre, b) maximális erőre, c) kinetikus energia vesztésre és d) a releváns maximális frekvenciára airsoft golyó és alumínium fal ütközésekor*

## 4. KÖVETKEZTETÉS

Eredményeinket összegezve elmondhatjuk, hogy mérési eredményekkel igazoltuk az airsoft golyó viszkózus-rugalmas-képlékeny anyagi viselkedését valamint egy végeselemes szimuláción alapuló paraméterillesztő eljárás segítségével illesztettük a szükséges anyagparamétereket. A dinamikai szimulációk elvégzésének érdekében bevezettük az egyenértékű rugalmas-képlékeny modelleket, amelyekkel alulról és felülről tudjuk becsülni az airsoft golyó valós viselkedését. Végül kimutattuk a modális analízis szempontjából legfontosabb ütközési paraméterek és az airsoft golyó ütközés előtti sebességének kapcsolatát, amely segítséget nyújt az impulzus gerjesztés tervezése során.

### Köszönetnyilvánítás:

*Az eredményekhez vezető kutatás az Európai Kutatási Tanács (ERC) részéről, az Európai Közösség hetedik keretprogramjából (2007-2013), az EKT 340889 sz. haladó kutatási támogatási megállapodása (Advanced Grant Agreement) alapján finanszírozásban részesült valamint az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3-I. Kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.*

### Irodalom:

- [1] Berezvai, Sz., Kossa A., Bachrathy D., Stepan G., Numerical and experimental investigation of the applicability of pellet impacts for impulse excitation, International Journal of Impact Engineering, 115:19-31, 2018
- [2] ABAQUS 2017 Documentation. Dassault Systems, Simulia Corporation, Providence, Rhode Island, USA.
- [3] Kichenin J., Comportement Thermomécanique du Polyéthylène - application aux structures gazieres. PhD Thesis. Ecole Polytechnique, Paris, France, 1992.
- [4] Kichenin J., Boytard K., Finite-element simulation of a new two-dissipative mechanisms model for bulk medium-density polyethylene. Journal of Material Science. 31:1653-1661, 1996
- [5] Berezvai, Sz., Kossa A., Characterization of a thermoplastic foam material with the two-layer viscoplastic model. Mat. Today: Proceedings 4(5):5749-5754, 2017