

PRINCÍP URČENIA ENERGETICKY EKVIVALENTNEJ RÝCHLOSTI S VYUŽITÍM PROGRAMU PC-CRASH

PRINCIPLE OF DETERMINING ENERGY EQUIVALENT SPEED BY USING PC-CRASH SOFTWARE

JUDr. Ing. Marek Čopiak

Žilinská univerzita v Žiline, Ústav znaleckého výskumu a vzdelávania

Ul. 1.mája 32, 010 26 Žilina

Kontakt: marekcopiak@gmail.com

Ing. Tomáš Korbel'

Žilinská univerzita v Žiline, Ústav znaleckého výskumu a vzdelávania

Ul. 1.mája 32, 010 26 Žilina

Kontakt: tomas.korbel@slovdekra.sk

Ing. Ladislav Imrich

Žilinská univerzita v Žiline, Ústav znaleckého výskumu a vzdelávania

Ul. 1.mája 32, 010 26 Žilina

Kontakt: ladislavimrich@gmail.com

ABSTRAKT

Príspevok je zameraný na princíp určenia energeticky ekvivalentnej rýchlosti prostredníctvom programu PC-Crash, pričom obsahuje definíciu energeticky ekvivalentnej rýchlosti a teoretický základ metódy jej výpočtu v programe PC-Crash. Stanovenie hodnoty energeticky ekvivalentnej rýchlosti je charakterizované určitými obmedzeniami v podobe presnosti a použiteľnosti. Simulačné modely nachádzajúce sa v programe PC-Crash možno sčasti porovnávať s inými vozidlami s obdobnými parametrami, avšak pri porovnávaní môže dôjsť k určitým odchýlkam, a preto je potrebné výsledky verifikovať.

Kľúčové slová: energeticky ekvivalentná rýchlosť, metóda konečných prvkov, PC-Crash

ABSTRACT

The contribution is focused on the principle of determination of energy equivalent speed by means of PC-Crash software, including definition of energy equivalent speed and theoretical basis of its calculation in PC-Crash. The determination of the energy equivalent speed is characterized by certain limitations in terms of accuracy and usability. Simulation models contained in PC-Crash software can be compared to other vehicles with similar parameters, but some variations may occur when comparing them, so the results need to be verified.

Keywords: energy equivalent speed, finite element method, PC-Crash

1 ÚVOD

Výpočet zmeny pohybového stavu vozidla počas rázu je podmienený vysporiadaním sa s množstvom deformačnej práce vozidla. Veľkosť a smer rázovej sily je ovplyvnená viacerými faktormi, ktoré nemožno prístupmi použiteľnými v znaleckej praxi analyticky popísať s dostatočnou presnosťou. Aj z tohto dôvodu je v praxi často využívaný prístup odborného odhadu energeticky ekvivalentnej rýchlosti (EES, z angl. Equivalent Energy.Speed). [6]

Medzi základné metódy používané pri rekonštrukcii zrážky vozidiel na odhadovanie rýchlosti týchto vozidiel je skupina tzv. energetických metód. Predmetné metódy opisujú vzťah medzi energeticky ekvivalentnou rýchlosťou a veľkosťou permanentnej deformácie vozidla.

Energetické metódy sú založené na predpoklade, že všetka kinetická energia stratená vozidlom počas zrážky je „spotrebovaná“ na deformáciu vozidla. [10]

2 ENERGETICKY EKVIVALENTNÁ RÝCHLOSŤ

Burg, Martin a Zeidler definovali pojem ekvivalentnej energetickej rýchlosti ako mieru rýchlosti, ktorá sa v priebehu kolízie vozidla premení na deformačnú energiu. Podľa Medzinárodnej organizácie pre normalizáciu (ISO) je EES definovaná ako ekvivalentná rýchlosť, ktorou by vozidlo muselo prísť do kontaktu s pevným a zároveň tuhým predmetom, aby došlo k rozptýleniu deformačnej energie zodpovedajúcej deformácii vozidla. [1]

Existuje viacero matematických modelov umožňujúcich určenie deformačnej práce. Problémom pri výpočte hodnoty EES je však neurčitost' určovania tohto parametra vyplývajúca z neistoty vstupných údajov. [10]

Energeticky ekvivalentná rýchlosť napomáha k odhadu deformačnej energie, ktorá je premenená z celkovej kinetickej energie vozidla na deformáciu tohto vozidla pri náraze do prekážky. EES vyjadruje rýchlosť odpovedajúcu celkovej kinetickej energii vozidla, ktorá sa rovná deformačnej práci potrebnej pre dosiahnutie príslušného stupňa deformácie vozidla. [5]

Medzi prácou a EES platí vzťah: $A_{DEF} = \frac{1}{2} * m * EES^2$ [J]

pričom:	m	[kg]	hmotnosť vozidla
	EES	[m/s]	energeticky ekvivalentná rýchlosť vozidla

Pre výpočet rázu dvoch vozidiel je potrebné určiť spotrebovanú energiu pri ráze na deformácie, ak je známy len stupeň dosiahnutej deformácie. Na základe známej deformácie je náročné vypočítať deformačnú prácu. Existujú relatívne presné metódy pre tento výpočet, avšak ich použitie pre každodennú znaleckú činnosť nie je vhodné. [5]

Vzhľadom k tomu, že v znaleckej praxi je problém určiť deformačnú energiu v podobe energeticky ekvivalentnej rýchlosti, preto bolo pre tieto účely vypracovaných niekoľko metód, medzi ktoré patria napr.:

- odhad EES expertmi,
- komparačná metóda,
- metóda korelačného diagramu,
- metóda energetického rastra,
- výpočet EES z nárazových skúšok.
- výpočet EES pomocou programu PC-Crash.

3 PRINCÍP VÝPOČTU EES POMOCOU PROGRAMU PC-CRASH

Jedným zo spôsobov ako vypočítať deformačnú energiu v podobe EES je využitie programu PC-Crash. Softvér PC-Crash využíva pre výpočet EES program CRASH 3, ktorý predstavuje zjednodušenú matematickú analýzu dopravných nehôd. Podobne ako iné programy, aj tento funguje na určitých zjednodušujúcich predpokladoch. [8]

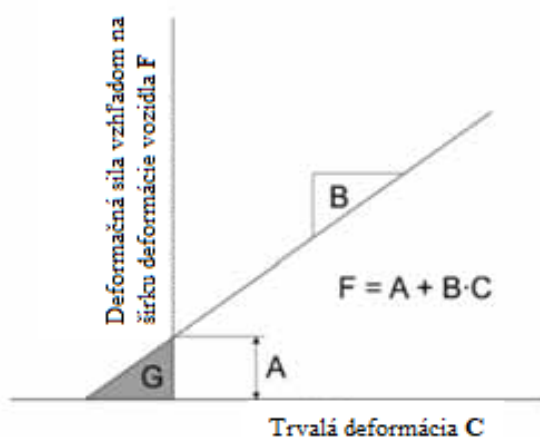
Metóda výpočtu energeticky ekvivalentnej rýchlosti pomocou programu PC-Crash je založená na lineárnej závislosti medzi pôsobiacou silou a plastickou deformáciou. Výpočet je obmedzený jednou centrálnou tuhostnou charakteristikou, ktorá popisuje deformačné správanie prednej časti vozidla ako celku. Takýto prístup môže znamenať limitujúci predpoklad v prípade, že vozidlo by bolo poškodené len čiastočne. Lineárna tuhostná charakteristika je odvodená z nárazovej rýchlosti a vzniknutej deformácie, čo znamená, že presnosť výpočtu EES je obmedzená. Skutočný priebeh závislosti sily na deformácii je v skutočnosti oveľa zložitejší. [2]

Základom algoritmu programu CRASH, resp. jeho dnes platnej verzie CRASH 3 sa stal výskum a teória Raymonda McHenryho, ktorá vychádza z nasledujúcich vzťahov: [2]

$$F = A + B * C \quad [\text{N/m}]$$

pričom:

F	$[\text{N/m}]$	parameter deformačnej sily vzhľadom na šírku deformácie vozidla
A	$[\text{N/m}]$	parameter medznej sily vzhľadom na šírku deformácie vozidla, pri ktorej začína dochádzať k trvalým deformáciám
B	$[\text{N/m}^2]$	parameter tuhosti karosérie vzhľadom na šírku deformácie vozidla
C	$[\text{m}]$	hlĺbka deformácie



Obrázok 1 Lineárna závislosť tuhosti vozidla podľa R. McHenryho [2]

Vzťah pre výpočet deformačnej energie po dvojitej integrácii vyššie uvedeného vzťahu: [5]

$$E_D = \int_0^L (A * C + \frac{B * C^2}{2} + G) dL \quad [\text{J}]$$

pričom:

G	$[\text{N}]$	integračná konštanta, ktorá vyjadruje elastickú energiu odpovedajúcu práci vykonanej silou A v elastickej oblasti deformácie
-----	--------------	--

Vzťah pre výpočet integračnej konštanty: $G = \frac{A^2}{2 * B} \quad [\text{N}]$

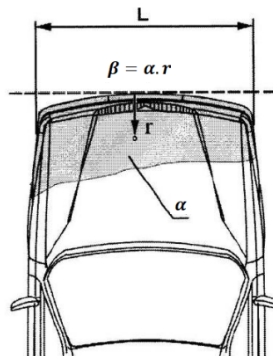
Vzťah pre výpočet deformačnej energie po dosadení integračnej konštanty:

$$E_D = A * \int_0^L C * dL + B * \int_0^L \frac{C^2}{2} * dL + \frac{A^2}{2 * B} * L \quad [\text{J}]$$

pričom: $\int_0^L C * dL$ [m²] plocha oblasti poškodenia
 $\int_0^L \frac{C^2}{2} * dL$ [m³] moment zotrvačnosti 1. rádu plochy ku krivke popisujúcej pôvodný nedeformovaný tvar
 L [m] šírka deformovanej plochy

substitúcia: $\alpha = \int_0^L C * dL$ [m²]
 $\beta = \int_0^L \frac{C^2}{2} * dL$ [m³]

Vzťah pre výpočet deformačnej energie po substitúcii: $E_D = A * \alpha + B * \beta + G * L$ [J]



Obrázok 2 Vyjadrenie parametrov α a β zo vzťahu pre výpočet deformačnej energie [7]

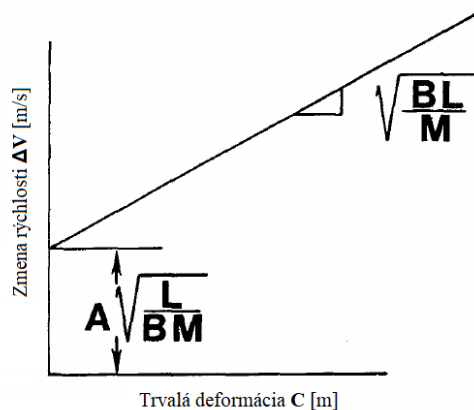
Vzťah pre výpočet deformačnej energie za predpokladu, že absorbovaná energia je rovná zodpovedajúcej kinetickej energii vozidla: [8]

$$E_D = \frac{1}{2} * m * \Delta V^2 \quad [J]$$

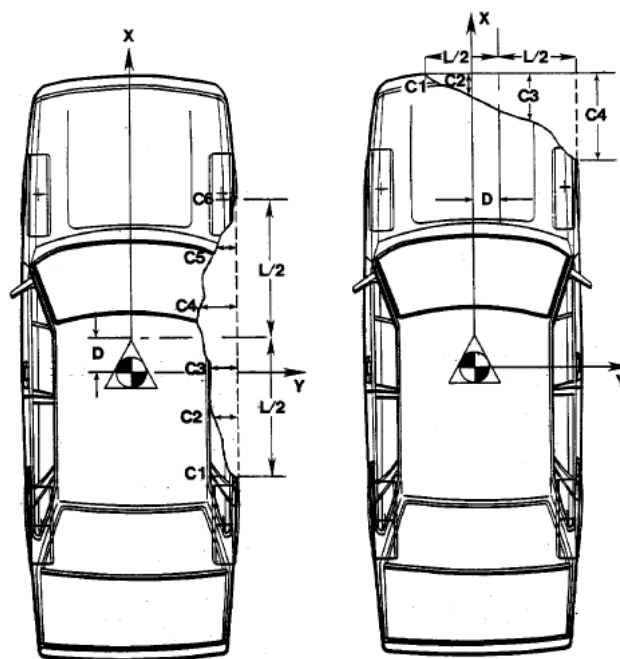
pričom: ΔV [m/s] zmena rýchlosti pred fázou reštitúcie
 m [kg] hmotnosť vozidla

Vzťah pre výpočet ΔV : $(\Delta V)^2 = \left(\frac{2 * A * L}{m}\right) * C + \left(\frac{B * L}{m}\right) * C^2 + \frac{A^2 * L}{m * B}$ [m/s]²

po úprave: $\Delta V = \sqrt{\frac{B * L}{m}} * \left(C + \frac{A}{B}\right)$ [m/s]



Obrázok 3 Lineárna funkcia trvalej deformácie pri čelnom náraze [5]



Obrázok 4 Rozmery poškodenia vozidla [6]

Výpočet modelu pomocou metódy konečných prvkov bol zavedený v programe PC-Crash 10.0 v roku 2013. V súčasnosti je k dispozícii niekoľko modelov vozidiel Národného centra pre analýzu nehôd (NCAC - National Crash Analysis Center), ktoré boli prevedené do formátu podporovaného programom PC-Crash, a zároveň boli vylepšené možnosti ich výpočtu. Tieto modely ponúkajú širokú škálu aplikácií pre rekonštrukciu dopravnej nehody. Zložité modely je však potrebné overiť, a preto by mal používateľ programu vedieť kedy možno dané modely použiť pre konkrétnu situáciu, a taktiež akú presnosť výpočtu možno očakávať. [9]

Modely vozidiel NCAC boli podrobené reverznému inžinierstvu, spočívajúcemu v zdemontovaní vozidla po jednotlivých častiach. Každá časť vozidla bola katalogizovaná, skenovaná pre učenie geometrie, bola odmeraná jej hrúbka a klasifikovaná podľa materiálu. Komponenty boli následne zoradené pre definovanie prvkov. Po zistení charakteristík materiálov a ich spojenie s inými časťami boli tieto prvky definované pre vytvorenie modelu konečných prvkov vozidla, ktorý odráža všetky štrukturálne a mechanické vlastnosti tohto vozidla. Modely vozidiel boli následne overené čelnou zrážkou proti nedeformovateľnej bariére. Výsledky skutočných crash testov sa následne porovnali s výsledkami simulácie metódy konečných prvkov. [9]

Postup pri výpočte EES prostredníctvom programu PC-Crash je založený na tom, že užívateľ programu vyberie vozidlo z databanky NHTSA pre *Výpočet EES Crash 3*, ktorého parametre sa najviac podobajú vozidlu, ktorého EES je potrebné určiť. Pri zvolenom vozidle sa zobrazia údaje o nárazovej skúške, vrátane parametrov A, B, G. V časti *Deformácie* je potrebné zadať hĺbky trvalých deformácií L, ako aj ich polohu v priečnom smere C. Po definovaní deformácie, zadání koeficientu reštitúcie, a taktiež smeru pôsobiacej sily je následne v časti *EBS* vypočítaná hodnota EES a EBS. [2]

Výpočet EES Crash 3

Databanka NHTSA Deformácie EBS

PEUGEOT Partnera ukázať

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Le...	Wi...	CO...	S...	PD...	C1
14072	1407	PEU...	405	1989	FOUR DOOR SEDAN	1400.0	2.670	4.478	1.717	1.069	0.0	180.0	0.422
3691	0369	PEU...	504	1970	FOUR DOOR SEDAN	1299.0	2.741	4.491	1.689	1.300	0.0	250.0	0.114
3681	0368	PEU...	504	1972	FOUR DOOR SEDAN	1300.0	2.741	4.491	1.689	1.341	0.0	250.0	0.061
3682	0368	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1384.0	2.741	4.491	1.689	1.364	74.8	0.0	0.229
3692	0369	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1381.0	2.741	4.491	1.689	1.313	76.0	0.0	0.218
4061	0406	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1304.0	2.741	4.491	1.689	1.313	0.0	250.0	0.041
4062	0406	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1378.0	2.741	4.491	1.689	1.321	71.9	0.0	0.132
4091	0409	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1300.0	2.741	4.491	1.689	1.341	0.0	250.0	0.066
4092	0409	PEU...	504	1973	FOUR DOOR SEDAN	1378.0	2.741	4.491	1.689	1.321	74.8	0.0	0.300
4391	0439	PEU...	504	1977	FOUR DOOR SEDAN	1304.0	2.741	4.491	1.689	1.313	0.0	250.0	0.008
4392	0439	PEU...	504	1977	FOUR DOOR SEDAN	1378.0	2.741	4.491	1.689	1.321	75.2	0.0	0.269
4401	0440	PEU...	504	1977	FOUR DOOR SEDAN	1304.0	2.741	4.491	1.689	1.313	0.0	250.0	0.089
4402	0440	PEU...	504	1977	FOUR DOOR SEDAN	1378.0	2.741	4.491	1.689	1.321	75.3	0.0	0.300

Rýchlosť pri teste vt: 34.2 km/h
Šírka deformácie Lt: 1.461 m
Hmotnosť mt: 1400 kg

Hĺbka deformácie
Počet miest merania:
☐ n = 2 ☐ n = 4 ☒ n = 6

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.422	0.445	0.467	0.483	0.49	0.503

Priemerná deformácia:

$$C_{Ave\ t} = \frac{\frac{C_1}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + \frac{C_n}{2}}{n-1} : 0.47 \text{ m}$$

<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov>
<http://www.ncac.gwu.edu>
Bez deformácie do
b0 : 12 km/h
Konštanta tuhosti

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{Ave\ t}} : 0.47 \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : 42 \text{ kN/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : 165.5 \text{ kN/m}^2$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : 5.3 \text{ kN}$$

OK Zrušiť Apply Help

Obrázok 3 Výpočet EES v programe PC-Crash – Databanka NHTSA

Výpočet EES Crash 3

Databanka NHTSA Deformácie EBS

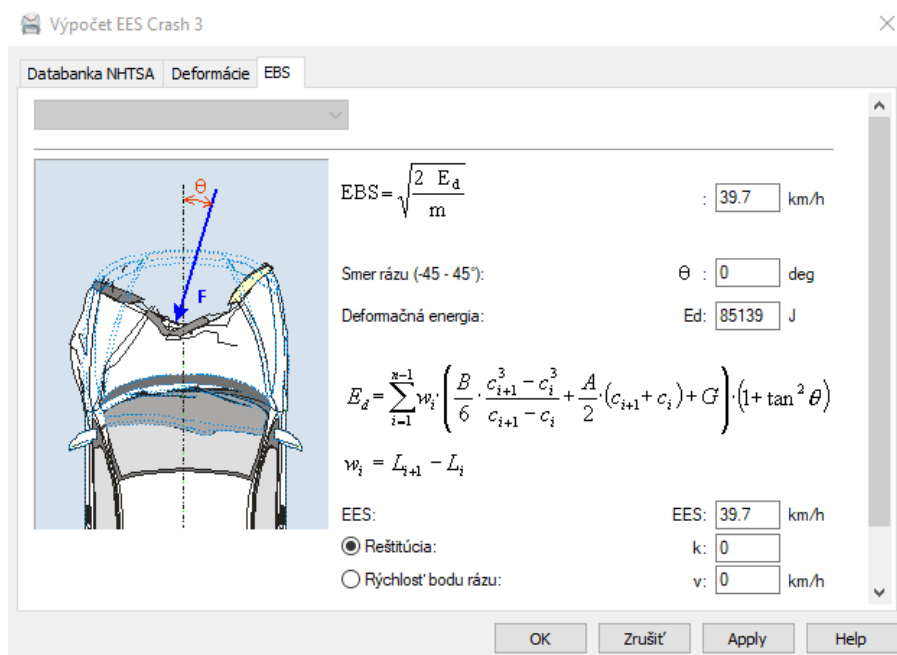
Hĺbka deformácie

Počet miest merania: 9

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	0.6
L1	L2	L3	L4	L5	L6
0	0.25	0.5	0.75	1	1.25
C7	C8	C9	C10	C11	C12
0.4	0.3	0.1	0	0	0
L7	L8	L9	L10	L11	L12
1.5	1.75	2	1.928	0	0

OK Zrušiť Apply Help

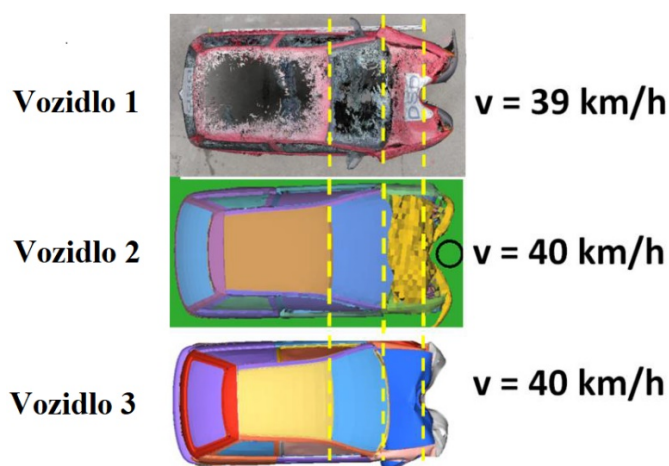
Obrázok 4 Výpočet EES v programe PC-Crash – zadanie deformácií



Obrázok 5 Výpočet EES v programe PC-Crash

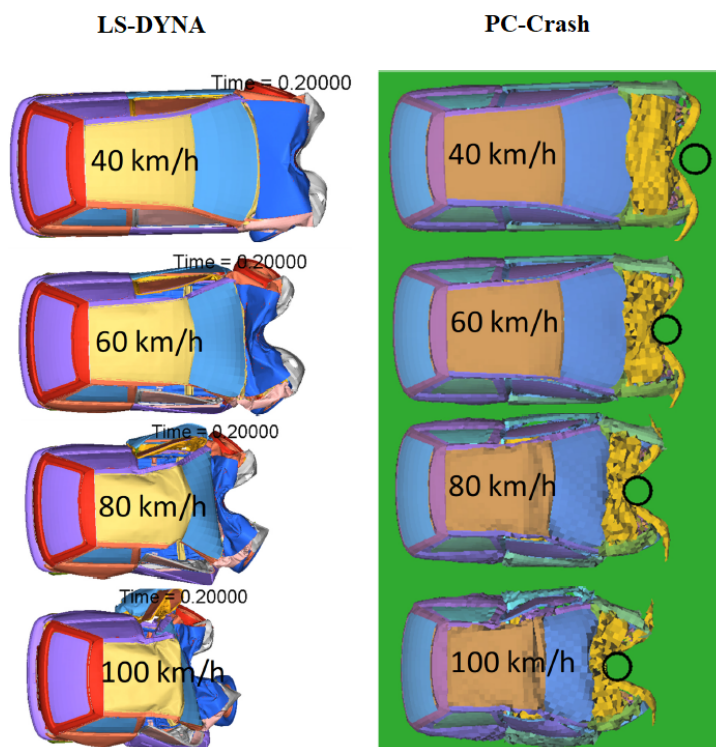
4 VERIFIKÁCIA VÝPOČTOVÝCH MODELOV

Využitie metódy konečných prvkov na účely analýzy dopravných nehôd predpokladá dostatočné znalosti špecifických hraníc predmetnej metódy. Pre posúdenie presnosti simulačných modelov dostupných v programe PC-Crash je potrebné porovnať modely programu PC-Crash s typovo identickými simulačnými modelmi iných obdobných softvérov (napr. LS-DYNA), prípadne s reálnymi výsledkami nárazových skúšok. [3]



Obrázok 6 Vizualne porovnanie nárazu do stĺpa s výsledkami simulácií [3]

Vyššie uvedený obrázok 8 znázorňuje použiteľnosť výsledkov modelu programu PC-Crash pri vizuálnom porovnaní 3D-Scanu vozidla Geo metro z nárazových skúšok (Vozidlo 1), simulácie v programe PC-Crash (Vozidlo 2) a simulácie v programe LS-Dyna (Vozidlo 3). Pre daný typ nárazu vozidla do stĺpa pri rýchlosti 40 km/h sú výsledky všetkých troch vozidiel porovnateľné.



Obrázok 7 Porovnanie výsledkov modelov v programoch LS-DYNA a v PC-Crash [4]

Vyššie uvedený obrázok 9 znázorňuje porovnanie výsledkov simulácií nárazu vozidla Geo metro do stĺpa v programoch PC-Crash a LS-DYNA pre rôzne nárazové rýchlosti (40, 60, 80 a 100 km/h). Z výsledkov simulácií možno usúdiť, že pre rýchlosti medzi 40 a 60 km/h sú výsledky v programe PC-Crash vizuálne porovnateľné s výsledkami v programe LS-DYNA, pričom hĺbka prieniku stĺpa a deformácia jednotlivých komponentov vozidla je vizuálne identická. Pri rýchlostiach 80 a 100 km/h prenikol stĺp v modeli vozidla LS-DYNA viditeľne hlbšie ako v modeli vozidla programu PC-Crash. Daný výsledok možno zosúladiť s výsledkami štúdií štruktúrálnej tuhosti pre predmetné kolízne usporiadanie, nakoľko konštrukčná tuhosť simulačného modelu v programe LS-DYNA pri rýchlostiach nad 60 km/h klesá pod konštrukčnú krivku tuhosti modelu v programe PC-Crash. [4]

5 ZÁVER

Aktuálne používané metódy pre stanovenie hodnoty EES sú charakterizované určitými obmedzeniami, čo sa týka ich presnosti a použiteľnosti. Doposiaľ nedošlo k štandardizovaniu takej metódy, prostredníctvom ktorej by bolo možné komplexne určiť hodnotu EES pri všetkých možných kombináciách vzniku korešpondujúcich poškodení.

Simulačné modely nachádzajúce sa v súčasnosti vo výpočtovom programe PC-Crash možno sčasti porovnávať s vozidlami rovnakých tried a obdobných parametrov. Výskumy a doterajšia prax s vybranými vozidlami však ukázali, že pri porovnávaní môže dôjsť k určitým odchýlkam. Aj preto je potrebný ďalší výskum v predmetnej oblasti pre získanie poznatkov o tom, ktoré vozidlo, s akými odlišnosťami, ku ktorej nárazovej konfigurácii a nárazovej rýchlosti je porovnateľné so simulačnými modelmi.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. BURDZIK, R., FOLEGA, P., KONIECZNY, Ł., ŁAZARZ, B., STANIK, Z., WARCZEK, J. 2012. Analysis of material deformation work measures in determination of a vehicle's collision speed. In: *Materials Science and Engineering*, ISSN 0927-796X, 2012, Vol. 58, No. 1 s. 13-21.
2. COUFAL, T. 2014. *Analýza tuhosti přední části vozidel*: dizertačná práca. Brno: VUT v Brně, 2014. 119 s.
3. GÖRTZ, M. 2018. *Model určovania deformačných energií na vozidlách po dopravných nehodách*. Autoreferát k dizertačnej práci. Žilina: UZVV Žilinská univerzita v Žiline, 2018, 46 s.
4. GÖRTZ, M. 2018. *Model určovania deformačných energií na vozidlách po dopravných nehodách*: dizertačná práca. Žilina: UZVV Žilinská univerzita v Žiline, 2018, 217 s.
5. KASANICKÝ, G. – KOHÚT, P. – LUKÁŠIK, M. *Teória pohybu a rázu pri analýze a simulácii nehodového deja*, 1. vydanie, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2001. 350 s. ISBN 80-7100-597-5.
6. KOHÚT, P. 2005. Energeticky ekvivalentná rýchlosť a prerozdelenie EES. In *Soudní inženýrství. Časopis pro soudní znalectví v technických a ekonomických oborech*, ISSN 1211-443X, 2005, roč. 16, č. 6, s. 318–330.
7. KUBIAK, P. – WOZNIAK, M. – JABLONSKI, R. – OZUNA, G. – DE LA FUENTE, P. 2014. Determination of Energy Deformation with using NHTSA Stiffness Coefficient. In: *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJETIT)*, ISSN 227-3754, 2014, Vol. 4, No. 4 s. 188-193.
8. McHENRY, B. G. *The Algorithms of CRASH*. [online] Cary: McHenry Software, 2001. 37 s. [cit. 2018.10.13]. Dostupné na internete: <http://mchenrysoftware.com/SECCC%20Presentation.pdf>.
9. MOSER, A. – HERMANN, S. Validation of the Finite Element vehicle models in PC-Crash 11.0. In: *Proceedings – 25th Annual Congress – Bratislava, Slovakia 2016*, Bratislava: EVU, 2016. ISBN 978-80-554-1260-3 s. 167-178.
10. SZTWIERTNIA, K. – GUZEK, M. 2017. Uncertainty of determining the energy equivalent speed (EES) of a vehicle collision by the experimental and analytical method. In: *The archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, ISSN 1234-754X, 2017, Vol. 76, No. 2 s. 123-136.