ZKOUŠKA STŘETU VLAKU S AUTOBUSEM

CRASH TEST – A RAIL VEHICLE WITH A BUS

Jakub Zębala[26], Piotr Ciępka[27]

ABSTRAKT:

V pojednání jsou prezentovány výsledky zkoušky střetu železniční soupravy tvořené motorovou lokomotivou SM 42-611 se sněhovým pluhem typu 411S s autobusem Jelcz M11. Prezentované výsledky zahrnují: střetovou rychlost železniční soupravy, parametr EES autobusu a dále simulaci děje provedenou v programu PC Crash.

ABSTRACT

The paper presents the results of a crash test in which a rail unit consisting of an SM 42-611 diesel locomotive and a 411 S snow plough collided with a Jelcz M11 bus. The presented results encompass: the collision velocity of the vehicles, and EES parameter of the bus, as well as simulation of the collision and the post-collision movement of the vehicles, carried out using the PC-Crash program.

KEYWORDS:

Lokomotiva, autobus, střetová rychlost, EES, simulace, PC Crash

KEYWORDS

Locomotive, bus, collision velocity, EES, simulation, PC-Crash.

1 ÚVOD

V Polsku je skoro 13 tisíc železničních přejezdů, z toho je pouze asi 26% zajištěno závorami. Tato situace spolu s neopatrností řidičů způsobuje, že každoročně na železničních přejezdech dochází k více než 200 kolizím a nehodám, při kterých jsou usmrceny a zraněny desítky osob.

V rámci kampaně „Bezpečný přejezd", která si klade za cíl objasnění nebezpečí, která hrozí při nedodržení mimořádné opatrnosti na železničních přejezdech, byla provedena zkouška, při které železniční souprava tvořená sněhovým pluhem a lokomotivou, která jej tlačila, najela na přejezdu do autobusu. Zkouška byla provedena dne 24. května 2012. Místo provedení zkoušky: Polsko, Sosnowiec, ul. Naftowa, železniční přejezd. Při této zkoušce působili autoři tohoto pojednání jako pozorovatelé s oprávněním provést měření a vyhotovit dokumentaci děje a poškození vozidel.

V době zkoušky panovalo pěkné počasí, bylo slunečno, bezvětří a teplota vzduchu byla kolem + 25°C.

2 VOZIDLA POUŽITÁ PŘI ZKOUŠCE

Zkušební střet byl proveden za použití následujících vozidel:

Motorová lokomotiva SM 42-611

[26] Zębala, Jakub, dr inż. – Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie, +48 126185723, jzebala@ies.krakow.pl

[27] Ciępka, Piotr, mgr inż. – Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie, +48 126185723, pciepka@ies.krakow.pl

Sněhový pluh 411 S,

Autobus Jelcz M11

Technická data vozidel jsou uvedena v prvním obrázku.

Lokomotiva SM 42

Rozchod kolejí	1,435 m
Délka včetně nárazníků	14,24 m
Největší šířka	3,170 m
Největší výška	4,285 m
Rozvor náprav	10,10 m
Vzdálenost otočných čepů	7,50 m
Průměr kol (na ojížděné ploše)	1,10 m
Hmotnost včetně náplní	74 t

Sněhový pluh 411S

Typ: bez pohonu	
Hmotnost včetně závaží	64 t
Délka včetně nárazníků	15,76 m
Délka nástavby	12,8 m
Šířka pluhu	3,12 m
Šířka nástavby	2,8 m
Výška pluhu	4,085 m
Vzdálenost otočných čepů	8,5 m
Průměr kol	0,920 m

Autobus Jelcz M11

Délka	11,00 m
Šířka	2,50 m
Výška	3,08 m
Rozvor náprav	5,40 m
Přední převis	2,48 m
Zadní převis	3,12 m
Pohotovostní hmotnost	9200 kg
Celková hmotnost	16000 kg
Výška podlahy	920 mm
Šířka dveří	1220 mm
Rozměr pneumatik	11 R20

Obr. 1: Vozidla použitá při zkoušce

3 MECHANISMUS STŘETU

Před střetem byl autobus postaven do kolejiště přibližně kolmo ke kolejím. Přesně postavení autobusu na kolejích ukazuje 6. obrázek. Železniční souprava narazila do levého boku autobusu. Střed sněhového pluhu udeřil do místa vzdáleného přibližně 5,5 m před zadním obrysem autobusu. Levý bok autobusu před provedením zkoušky je na 2. obrázku.

Obr. 2: Levý bok autobusu před zkouškou

4 MĚŘÍCÍ APARATURA

Při zkoušce bylo pro měření zpomalení železniční soupravy použito zařízení XL-Meter Pro Beta, vyrobeným firmou Inventure Automotive Electronics Inc. Zařízení bylo upevněno v kabině lokomotivy na čelní sklo (3. obrázek).

Obr. 3: Pohled na zařízení XL-Meter upevněné v kabině lokomotivy

Přístroj XL-Meter dovoluje zápis výsledků a jejich předání do počítače pomocí interface RS 232. Výsledkem měření je nejen střední hodnota zpomalení (MFDD), ale i rychlost na začátku zpomalování, délka dráhy zpomalování a doba zpomalování. Parametry měřiče zpomalení XL-Meter jsou tyto:

- Nejdelší doba měření – 3 x 40 s,
- Frekvence měření – 220 Hz
- Rozsah měřeného zpomalení ± 12,7 m/s^2

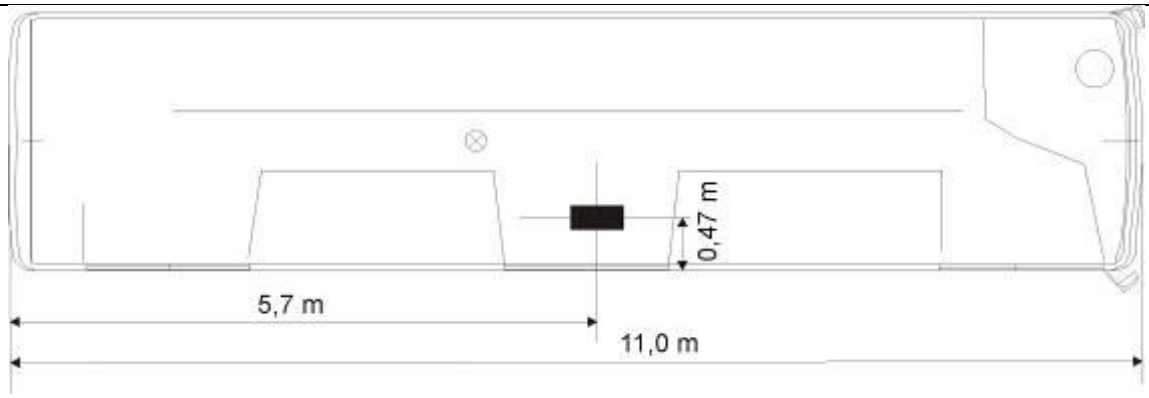
Pro měření zrychlení autobusu v době střetu byla použita měřící plošina Pocket DAQ firmy DSD. Tato plošina umožňuje měření hodnot postupných a rotačních zrychlení ke všem třem osám v závislosti na době. Získaná data jsou analyzována programem Pocket DAQ Analyzer a výstupem jsou následující veličiny:

- Zrychlení libovolné části vozidla, především po transformaci vztažené k těžišti vozidla s přihlédnutím k různým úrovním filtrace,
- Rychlosti (včetně jejich změn Δv),
- Změny polohy vozidla

Zařízení Pocket DAQ dovoluje měřit změny zrychlení v rozsahu ± 50 m/s^2 a ± 500 m/s^2. Při zkoušce bylo zjišťováno zpomalení po dobu 120 s při frekvenci zápisu 5 Hz.

Plošina Pocket DAQ byla upevněna ve středu druhého schodu středních nástupních dveří autobusu (4. obrázek); přesněji je umístění plošiny vidět na 5. obrázku.

Obr. 4: Umístění měřící plošiny v autobusu

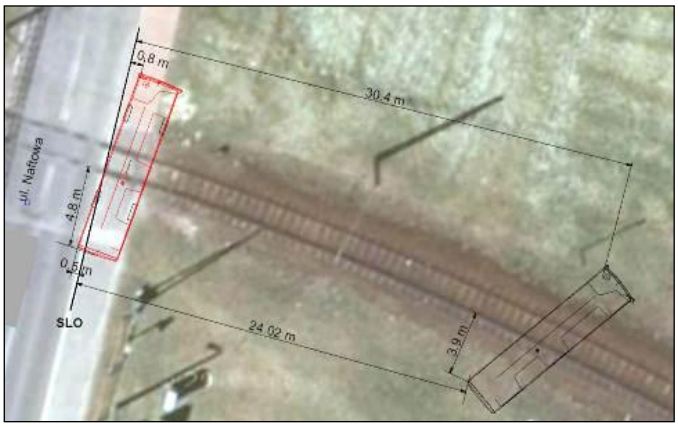


Obr. 5: Umístění měřící plošiny v autobusu

5 MĚŘENÍ PROVEDENÁ PŘI ZKOUŠCE

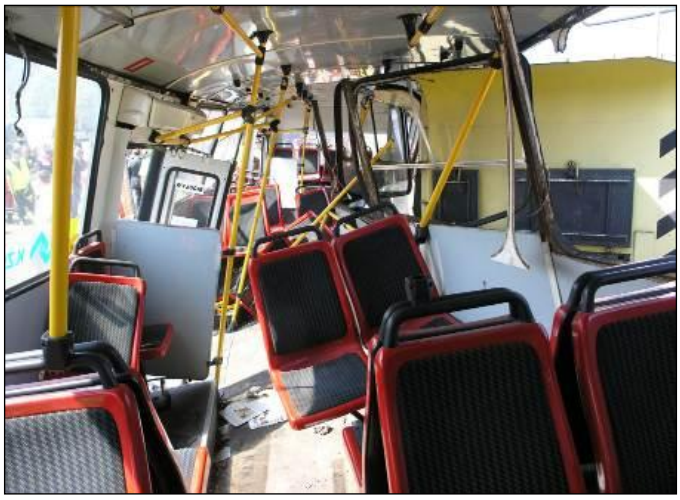
5.1 Poloha autobusu

Při testu byla provedena měření, která dovolují popsat polohu autobusu před střetem a po něm. Měření bylo vykonáno ve vztahu ke kolejím a k základní měřící přímce – SLO. Jako přímka SLO byl zvolen pravý okraj vozovky Naftové ulice (6. obrázek). Základem situačního nákresu byl satelitní snímek získaný ze serveru *Google*. Postřetovou polohu autobusu a železničního sněhového pluhu ukazují 7. a 8. obrázek.



Obr. 6: Prostor zkoušky

Obr. 7: Postřetová poloha vozidel

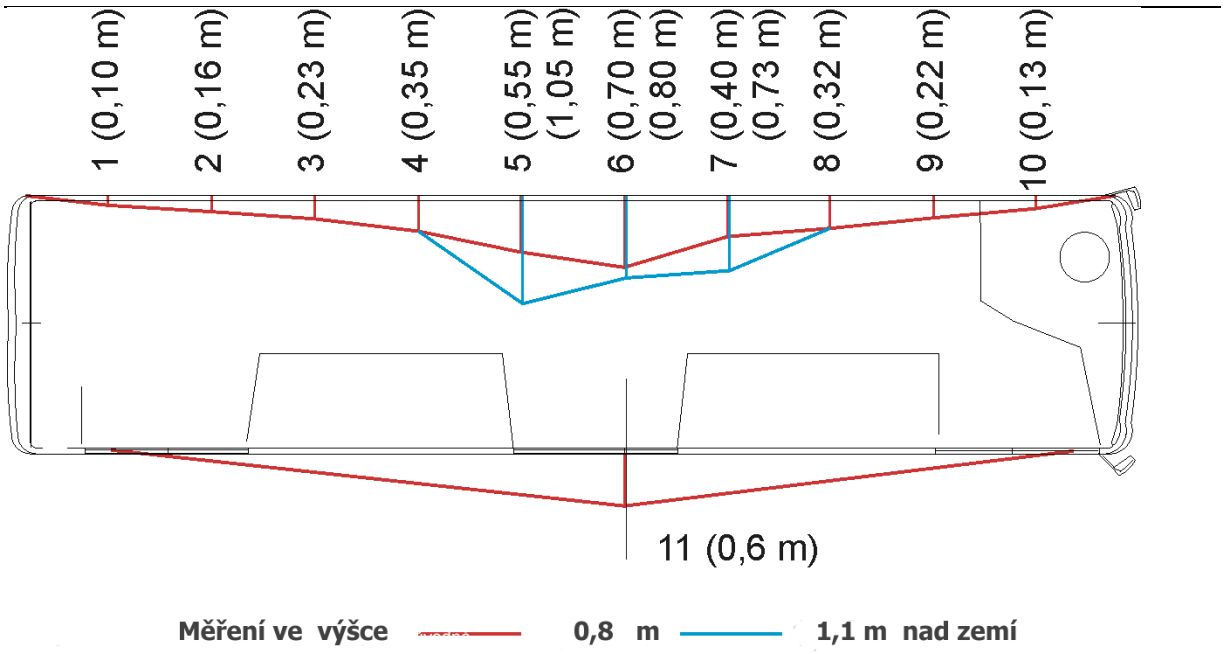


Obr. 8: Postřetová poloha vozidel a pohled na poškození interiéru autobusu

5.2 Poškození autobusu

Hloubky deformací levého boku autobusu byly měřeny v jedenácti místech vzájemně vzdálených po jednom metru. Měření bylo provedeno ve dvou výškách nad zemí – 0,8 a 1,1 m. Deformace ve výšce 0,8 m byly spojeny s deformacemi nosného roštu karosérie. Měření ve výšce 1,1 m nad zemí zjistilo největší deformace prostoru cestujících (obrázky 9 až 11).

Deformace pravého boku autobusu byla měřena pouze v jednom místě a to 0,6 m nad zemí a 6 m od zádě autobusu. V tomto místě byla maximální deformace.



Obr. 9: Profil poškození boků autobusu

Obr. 10: Poloha poškození levého boku autobusu ve vztahu k povrchu

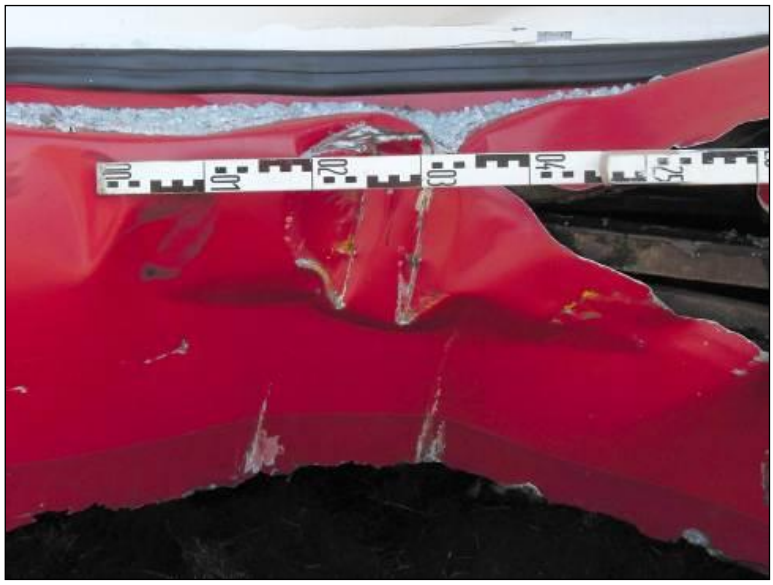
Obr. 11: Měření podélné polohy deformací levého boku autobusu

5.3 Poškození sněhového pluhu

Radlice sněhového pluhu má jinou konstrukci než přední část lokomotivy (12. a 13. obrázek). Díly radlice, které jsou nejdále vpředu, což jsou nárazníky, jsou také na předních částech lokomotiv, tedy deformace autobusu pocházející z nárazu nárazníky by byly shodné jako při střetu se samotnou lokomotivou. Lokomotivy nemají hrany, které vytvářejí dvoudílnou radlici, která je pouze neznatelně couvnuta oproti nárazníkům (13. obrázek). V době střetu tato hrana vytvořila největší deformace spodní části autobusu (14. obrázek). Prohlídka sněhového pluhu po provedené zkoušce neprokázala žádné trvalé deformace radlice. Byly nalezeny otěry červené barvy z autobusu na sněhovém pluhu.

Obr. 12: Radlice sněhového pluhu – pohled zepředu

Obr. 13: Radlice v pohledu z boku



Obr. 14: Poškození dolní části boku autobusu způsobené čelní hranou sněhového pluhu

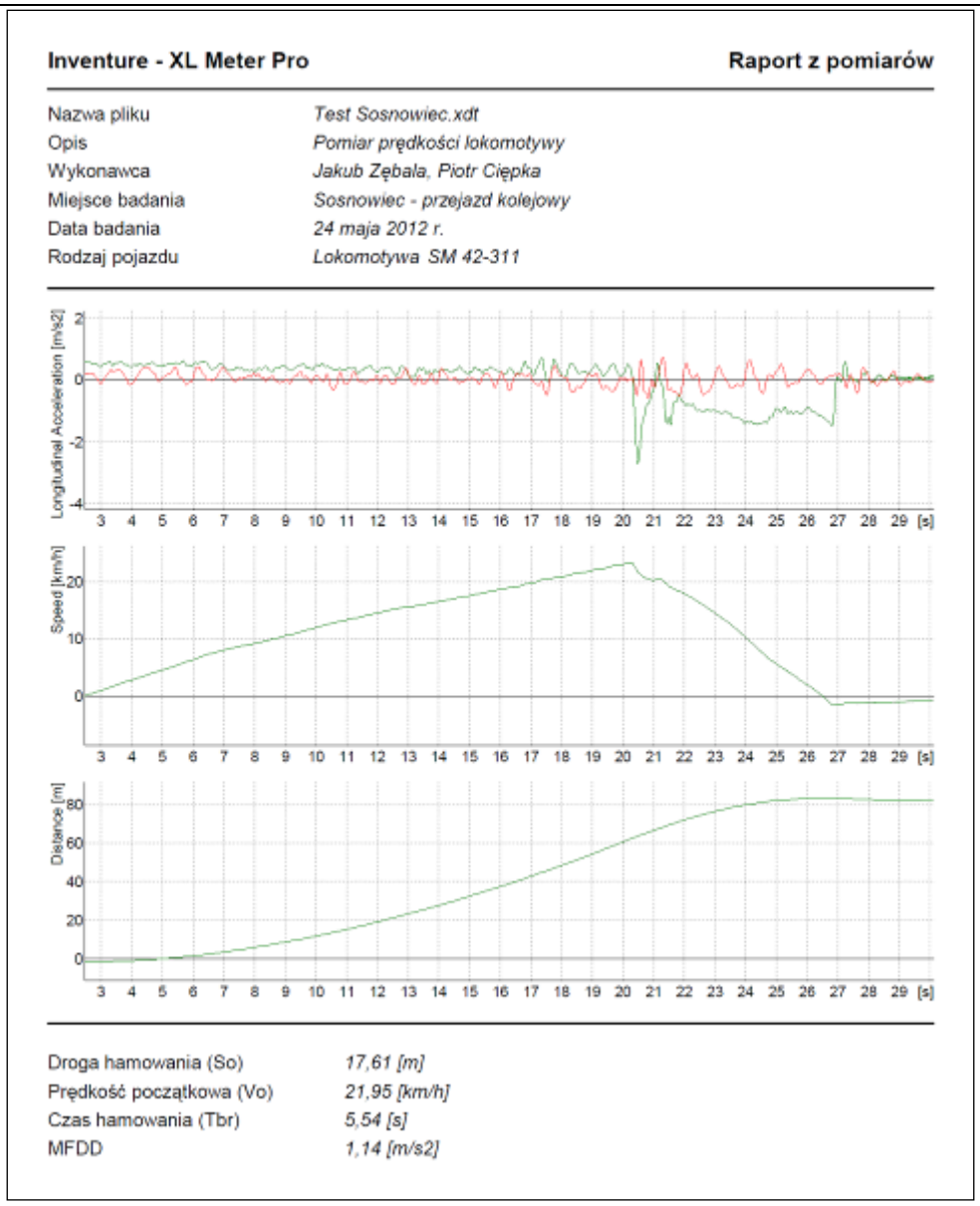
Obr. 15: Otěry červené barvy nalezené na radlici sněhového pluhu

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PROVEDENÝCH PŘI ZKOUŠCE

Výsledky měření provedeného zařízením XL-Meter jsou prezentovány protokolem, který má formu diagramů, v 16. obrázku. Z diagramů plyne:

- dráha zpomalování drážní soupravy S_o = 17,6 m,
- rychlost na začátku brzdění V_o = 22 km/h,
- doba brzdění T_{br} = 5,54 s,
- střední zpomalení železniční soupravy MFDD = 1,14 m/s^2.

Analýza průběhu změn rychlosti železničních vozidel prokázala, že souprava byla rozjeta na rychlost kolem 23 km/h (16. obrázek), rychlost vypočtená pro zahájení brzdění programem XL-Vision byla 22 km/h. Tento nevelký rozdíl je důsledkem zahájení brzdění až po začátku střetu. Při další analýze střetu bylo vycházeno z hodnoty 23 km/h.



Obr. 16: Protokol měření provedeného přístrojem XL-Meter

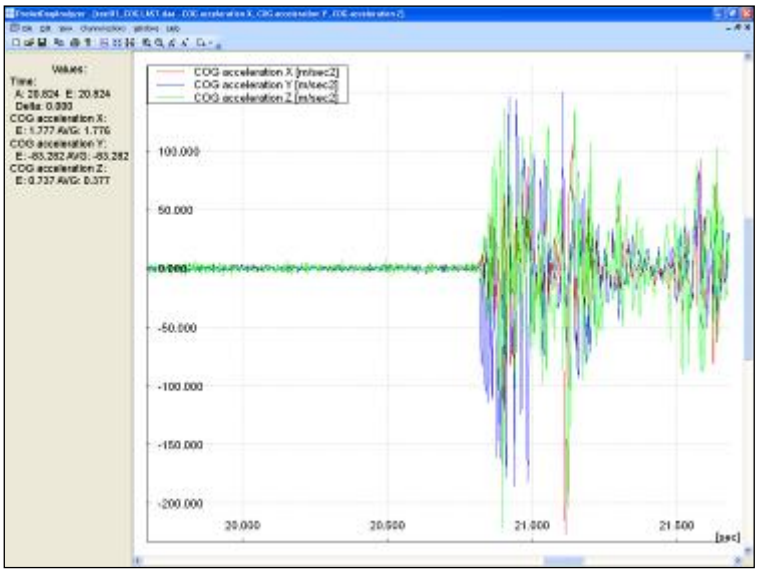
Průběhy rychlostí a zrychlení zjištěné zařízením Pocket DAQ ve vztahu k těžišti autobusu jsou prezentovány v 17. a 18. obrázku.

Obr. 17: Změny rychlosti těžiště autobusu v době střetu registrovaná zařízením Pocket DAQ. Svislá přímka určuje okamžik, kdy došlo k poškození schodu autobusu, na kterém bylo zařízení umístěno

První mohutné zrychlení bylo ve třech sledovaných směrech rovno:

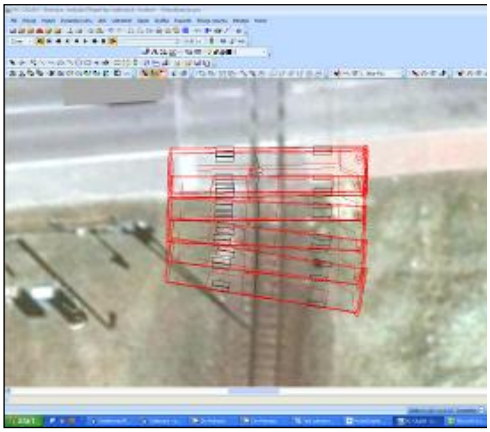
$$a_x = 1{,}8 \text{ m/s}^2;\ a_y = 83{,}3 \text{ m/s}^2;\ a_z = 0{,}4 \text{ m/s}^2$$

Zařízení bylo montováno v autobusu takovým způsobem, že směr měřící osy *y* byl shodný se směrem působení impulsu střetových sil. Proto je hodnota zrychlení ve směru *y* mnohonásobně větší než hodnoty zapsané pro další směry. Výsledné zrychlení vypočtené vztahem $a = \sqrt{a_x^{\,2} + a_y^{\,2} + a_z^{\,2}}$ bylo 83,3 m/s^2.



Obr. 18: Změna zrychlení těžiště autobusu registrovaná zařízením Pocket DAQ. V okně vlevo jsou hodnoty zrychlení, které posloužily k výpočtu nehodového zrychlení

V 19. obrázku jsou výsledky řešení střetu programem PC Crash ve verzi 9.2. Vyobrazení znázorňuje průběh děje od okamžiku, kdy začal střet do okamžiku, kdy byl deformován schod, na kterém byla měřící plošina



Obr. 19: Vizualizace dílčích poloh autobusu v programu PC Crash s časovým krokem 0,2 s

7 VÝPOČET RYCHLOSTI EES PRO AUTOBU

Hodnota parametru EES pro autobus Jelcz byla vypočtena za využití zákona zachování energie a zákona zachování hybnosti, jedná se o energetickou bilanci střetu. Obecné vyjádření této bilance je následující:

$$\frac{m_Z v_Z^2}{2} + \frac{m_A v_A^2}{2} = \frac{m_Z v'^2_Z}{2} + \frac{I_Z \omega'^2_Z}{2} + \frac{m_A v'^2_A}{2} + \frac{I_A \omega'^2_A}{2} + \frac{m_Z EES_Z^2}{2} + \frac{m_A EES_A^2}{2}, \quad (1)$$

Kde:	v_Z	[km/h]	rychlost drážní soupravy před střetem
	v_A	[km/h]	rychlost autobusu před střetem
	$v_Á$	[km/h]	rychlost autobusu po střetu
	$v_Ź$	[km/h]	rychlost drážní soupravy po střetu
	m_Z	[kg]	hmotnost drážní soupravy
	m_A	[kg]	hmotnost autobusu
	EES_A	[km/h]	rychlost odpovídající deformacím autobusu
	EES_Z	[km/h]	rychlost odpovídající deformacích drážní soupravy

Před střetem byla rychlost autobusu nulová ($v_A = 0$). Analýza pohybu vozidel po střetu dovoluje zanedbat rotaci drážní soupravy a autobusu ($\omega´_Z$ a $\omega´_A$) a předpoklad hodnoty $EES_Z = 0$, protože na sněhovém pluhu nebyla zjištěna deformace. Dále bylo konstatováno, že po střetu zůstala vozidla zaklíněná do sebe, tedy jejich postřetové rychlosti byly shodné. Na základě těchto rozvah pak je obecný tvar vztahu pro energetickou bilanci redukován do tvaru:

$$\frac{m_Z v_Z^2}{2} = \frac{(m_Z + m_A)v'^2}{2} + \frac{m_A EES_A^2}{2}, \quad (2)$$

Kde: V´ [km/h] je společná rychlost železničních vozidel a autobusu po střetu.

Zákon o zachování hybnosti má v tomto případě tvar:

$$m_Z v_Z + m_A v_A = (m_Z + m_A)v', \quad (3)$$

Po úpravě vztahů (2) a (3) je možno získat vztah pro výpočet rychlosti ekvivalentní poškození autobusu:

$$EES_A = v_Z \sqrt{\frac{m_Z}{m_A}\left(1 - \frac{m_Z}{m_Z + m_A}\right)}, \quad (4)$$

Dosazením do vztahu (4): V_Z = 23 km/h; m_Z = 13.800 kg, m_A = 9.000 kg, lze vypočíst, že rychlost ekvivalentní poškození autobusu EES_A činila cca 22 km/h. (Při výpočtech parametru EES byla volena hodnota hmotnosti autobusu nižší než katalogová 9.200 kg, protože před zkouškou byla z vozidla demontována nádrž, část palivové soustavy a výstroje motoru.)

8 SIMULACE STŘETU VOZIDEL

Simulace střetu vozidel a jejich postřetového pohybu byla provedena výpočtovým programem PC CRASH verze 9.2-Základem simulace byly:

- technické údaje vozidel,
- předstřetová a postřetová poloha autobusu, jak byly zjištěny na místě pokusu,
- rychlost lokomotivy 23 km/h, jak byla určena měřením zařízení XL-Meter,
- velikost parametru EES, vypočtená pro autobus hodnotou 22 km/h,
- hodnota zpomalování lokomotivy při postřetovém pohybu změřená zařízením XL-Meter, která byla rovna 1,14 m/s^2,
- 3D modely vozidel ,
- automatické řešení střetu,
- model hlinitého povrchu, který dovolil uvažovat nezpevněný povrch s proměnným součinitelem přilnavosti,
- výřez satelitního snímku umístěného na serveru Google, který posloužil jako podklad pro simulaci pohybu vozidel.

Jako kritéria správnosti provedené simulace posloužily:

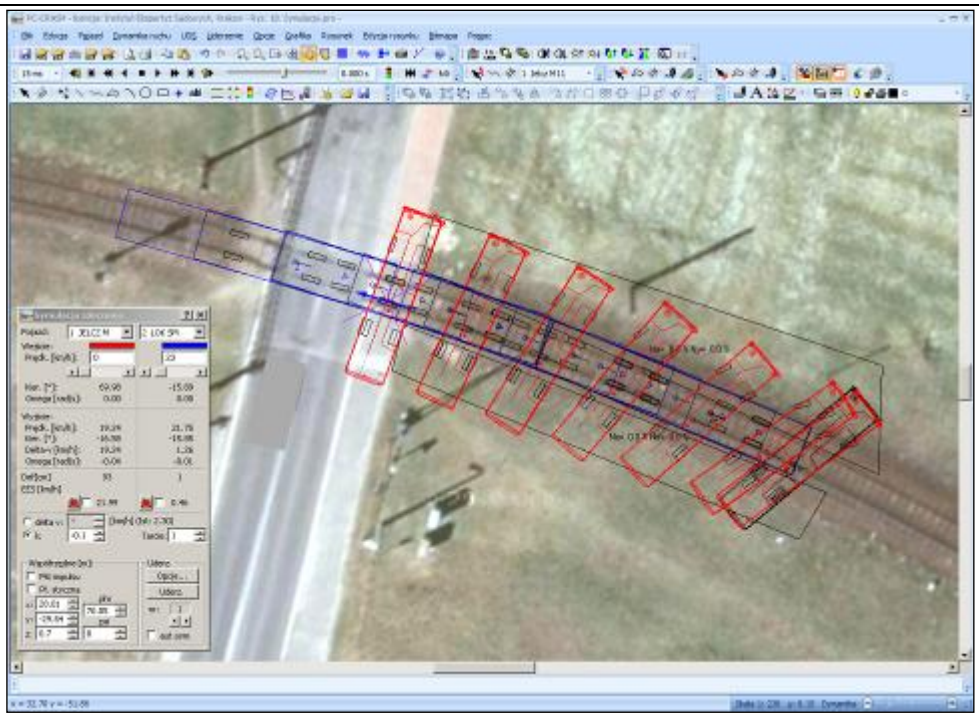
1. Shoda konečných postavení půdorysů autobusu a lokomotivy, získaných simulací se stavem zadokumentovaným po provedení zkoušky.
2. Délka dráhy a doba brzdění lokomotivy. Při testu zjištěné hodnoty byly 17,6 m a 5,54 s, simulace dala hodnoty 17,3 m a 5,2 s. Rozdíly jsou nevelké a přijatelné.

Pro docílení přijatelného výsledku simulace byly změněny:

- poloha působiště střetového impulsu,
- směr styčné plochy,
- součinitel tření ve styčné ploše,
- součinitel restituce.

Příklady výsledků simulace, která odpovídala požadovaným podmínkám, jsou zobrazeny v 21. a 22. obrázku. Po střetu byl autobus drážní soupravou tlačen až do konečné polohy (20. obrázek). V simulaci byl tento pohyb popsán celkem 138 střety drážní soupravy s autobusem.

Obr. 20: Postřetový pohyb vozidel – autobus, který stál napříč kolejí je tlačen drážní soupravou



Obr. 21: Simulace střetu vozidel. Vyznačeny jsou mezipolohy s krokem dráhy 5 m

Obr. 22: Perspektivní vyobrazení střetu a postřetového pohybu

Program PC Crash po dokončení simulace automaticky vypočte tuhost vozidel, která měla podíl na střetu. Z těchto výpočtů plyne, že tuhost levého boku autobusu byla rovna cca 386 kN/m.

9 SHRNUTÍ

Prezentovaný výzkum dovoluje uvést následující poznatky:

- střetová rychlost železničních vozidel byla 23 km/h,
- poškození autobusu odpovídalo parametru EES rovnému 22 km/h,
- z výpočtů provedených v programu PC Crash plyne, že tuhost levého boku autobusu je přibližně 386 kN/m,
- zrychlení těžiště autobusu v době střetu činilo 83 m/s^2.

10 LITERATURA

[1] Praca zbiorowa, *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*, Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków 2011.

[2] Předpis č. 13 EHK OSN, *Jednotné předpisy týkající se homologace vozidel kategorií M, N a O v oblasti brzdění.*

[3] http://www.dsd.at

[4] Wach W., *Symulacja wypadków drogowych w programie PC-Crash*, Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków 2009.