

VÝZKUM ZVÝŠENÍ PARTNERSKÉ OCHRANY TRAMVAJOVÝCH VOZIDEL PŘI NEHODĚ S OSOBNÍMI AUTOMOBILY

RESEARCH TO INCREASE PARTNER PROTECTION OF TRAM VEHICLES IN THE EVENT OF AN ACCIDENT WITH CARS

Jakub SEIDL¹

Abstrakt

Ze společenského hlediska rostou požadavky na zvýšení bezpečnosti provozu a snížení následků nehod tramvají s osobními automobily. Výzkum zvýšení bezpečnosti tramvají, který je realizovaný na Fakultě strojní ČVUT v Praze, má za cíl zvýšit aktivní a pasivní bezpečnost tramvají. Prvky a systémy aktivní bezpečnosti mají za úkol snižovat riziko vzniku nehody a systémy pasivní bezpečnosti mají za úkol minimalizovat následky nehod. Jeden z prvků pasivní bezpečnosti je tzv. partnerská ochrana (kompatibilita vozidel při nehodě), která značí přístup, kdy je snaha ochránit jak cestující uvnitř vozidla, tak i vně.

Článek popisuje závěry z provedených dílčích prací výzkumu na zvýšení partnerské ochrany tramvají při nehodě s osobními automobily.

Klíčová slova

tramvaj, osobní automobil, nehoda, pasivní ochrana, FEM modely

Abstract

From a social point of view, there is a growing demand to increase traffic safety and reduce the consequences of tram and cars accidents. The research to increase the safety of trams, which is carried out at the Czech Technical University in Prague, aims to increase the active and passive safety of trams. Components and systems of active safety are design to reduce the risk of an accident. Components and systems of passive safety are design to minimize the consequences of accidents. One of the elements of passive safety is the partner protection (vehicle compatibility in the accident), which means an approach where the effort is to protect passengers inside and outside the vehicle.

The article describes the conclusions from the partial research work on increasing the partner protection of trams in the event of an accident with cars.

Keywords

tram, car, accident, passive safety, FEM models

1 ÚVOD

Moderní tramvajová doprava, zajišťována částečně nebo plně nízkopodlažními vozidly, patří k jednomu ze základních pilířů městské hromadné dopravy každého moderního města s vyšším počtem obyvatel. Tramvajová doprava je nejčastěji využívána k přepravě velkého počtu cestujících z odlehlých částí do centra města. Z důvodu historické zástavby většiny evropských měst není možné vést tramvajovou dopravu po samostatném tělese odděleném od ostatních účastníků

¹ Ing. Jakub Seidl, ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 160 00 Praha 6. Tel.: +420 728 874 324, e-mail: jakub.seidl@fs.cvut.cz

silničního provozu a tím zcela eliminovat riziko vzniku nehody. Z důvodu potřeby změny směru jízdy dochází ke křížení tramvajových kolejí s jízdními pruhy ostatních účastníků silničního provozu. Každé toto křížení zvyšuje riziko vzniku dopravní nehody tramvaj s osobními motorovými vozidly (dále jen OA). [1]

Ze společenského hlediska rostou požadavky na zvýšení bezpečnosti silničního provozu, snížení rizika vzniku dopravní nehody a snížení závažnosti následků dopravních nehod. Bezpečnost vozidel lze rozdělit do dvou skupin: aktivní a pasivní bezpečnost. Prvky a systémy aktivní bezpečnosti mají za úkol zabránit vzniku nehod a prvky a systémy pasivní bezpečnosti mají za úkol minimalizovat následky nehod na cestujících a vozidlech. [2, 3]

Požadavky na pasivní bezpečnost nově konstruovaných tramvaj jsou popsány v normě ČSN EN 15227. Tato norma vznikla z důvodu zvýšení bezpečnosti cestujících a posádek v kolejových vozidlech, tedy tzv. vlastní ochrana. [4] V posledních letech je snaha u vozidel zvyšovat i tzv. partnerskou ochranu, kdy vozidlo má chránit i cestující vně vozidla. Tento příspěvek se zabývá popisem dílčích prací na výzkumu zvýšení kompatibility tramvaj s OA s cílem snížení rizika vzniku poranění posádek v OA.

2 STATISTIKA NEHODOVOSTI TRAMVAJÍ S OSOBNÍMI AUTOMOBILY

Při tvorbě statistiky nehodovosti tramvaj jsem navázal spolupráci s dopravními podniky provozující tramvaje na území ČR (kromě dopravního podniku Ostrava) a s dopravní Policií ČR. Obě dvě tyto instituce zaznamenávají k nehodám jiné informace. Pro vytvoření komplexní statistiky nehodovosti bylo nutné jednotlivé databáze propojit.

Dopravní podniky mi poskytly informace k nehodám jimi provozovaných tramvaj za roky 2016 až 2018. K jednotlivým nehodám mi poskytly informace o: datu nehody, místu nehody a krátký popis nehody. Dopravní Policie ČR mi k jednotlivým nehodám poskytla informace o následcích nehod, zda došlo pouze k materiální škodě nebo např. lehkému/těžkému zranění účastníků nehody. [5]

Mezi roky 2016 a 2018 bylo celkově zaznamenáno 4 641 nehod tramvaj s OA. V tab. 1 jsou uvedeny počty nehod podle roků pro jednotlivé dopravní podniky. [5]

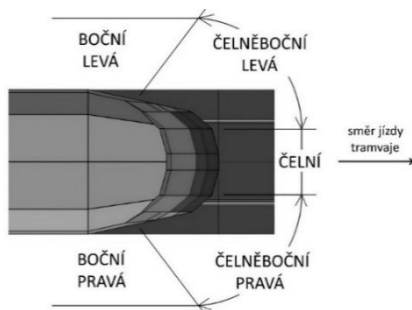
Tab. 1 Počet nehod zaznamenaných v jednotlivých dopravních podnicích

Rok	DPMB	DPMLJ	DPMO	DPMOST	DPP	PMDP	Celkem
2016	310	31	32	9	954	72	1 408
2017	351	37	26	6	1 143	72	1 635
2018	324	29	31	9	1 119	86	1 598

Pro vyhodnocení statistiky nehodovosti byla stanovena dvě vyhodnocovací kritéria, podle kterých byly jednotlivé nehody rozděleny do skupin: následky nehody na zdraví cestujících v OA a kolizní směr nehody. [2]

Kritérium následky nehody na zdraví cestujících v OA bylo zvoleno pro možnost stanovení závažnosti následků jednotlivých typů nehod. Následky nehod byly rozděleny do těchto skupin: bez zranění, lehké zranění a těžké zranění. U jednotlivých nehod byl vyhodnocován celkový počet zraněných cestujících uvnitř OA. Za vyšetřované období nedošlo k úmrtí cestujících v OA při nehodě s tramvaj. [2]

Kritérium kolizní směr nehod bylo zvoleno pro možnost stanovení nejčastějšího kolizního směru. Kolizní směr má velký vliv na následky nehod. Kolizní směr nehod byl vyhodnocován vůči směru jízdy tramvaje (viz obr. 1). Kolizní směr nehod byl rozdělen do těchto kategorií: čelní, zezadu, čelněboční pravá/levá a boční pravá/levá. Výsledky statistiky nehodovosti tramvaj s OA podle zvolených kritérií jsou uvedeny v tab. 2. [2]



Obr. 1 Kategorie kolizních směrů nehod [5]

Tab. 2 Výsledky statistiky nehodovosti tramvají s OA za roky 2016 až 2018

Kolizní směr		celkový počet nehod (-)	počet lehkých zranění (-)	počet lehkých zranění (%)	počet těžkých zranění (-)	počet těžkých zranění (%)
Čelní	-	782	102	13.0	6	0.8
Čelněboční	pravá	1 668	99	5.9	2	0.1
	levá	334	18	5.4	0	0.0
Boční	pravá	1 603	8	0.5	1	0.1
	levá	228	1	0.4	0	0.0
Zezadu	-	26	1	3.8	0	0.0
Celkem		4 641	229	4.9	9	0.2

Z výsledků uvedených v tab. 2 vyplývá, že nejčastější kolizní směry jsou čelněboční a boční pravý. Vyšší četnost nehod z pravého směru oproti levému je způsobena rozložením komunikací ve městech České republiky, kdy je tramvajová trať vedena středem ulice a silniční komunikace je vede po stranách, viz obr. 2. [2]



Obr. 2 Rozložení komunikací pro tramvaje a silniční vozidla na území ČR; zdroj: silnice-zeleznice.cz

Při bočních nehodách došlo ke zranění posádek OA v méně než 1 % ze všech nehod. To je způsobeno tím, že tyto nehody jsou nejčastěji zapříčiněny neodhadnutím průjezdného profilu jedním z řidičů a kontaktu boků vozidel. Při těchto nehodách nejčastěji dochází pouze k materiálním škodám na vozidlech.

Při čelních nehodách tramvají s OA došlo ve 13 % všech nehod ke zranění cestujících v OA. Při pravých a levých čelněbočních nehodách došlo ke zranění posádek OA ve více než 5 % ze všech nehod. Tyto typy nehod jsou nejčastěji způsobeny řidiči OA, kteří při přejíždění přes tramvajový pás

nedají přednost v jízdě souběžně nebo proti jedoucí tramvaji a následně dojde k nárazu tužšího čela tramvaje do měkčího boku OA. Při nehodě tak dojde k větší destrukci boku OA, což má za následek větší riziko vzniku zranění posádky OA. U tramvají s pevným spřáhlem, například tramvaj typu T3 nebo T6A5, hrozí při nárazu čela tramvaje do boku OA průnik spřáhla do prostoru pro cestující, kde může poranit posádku OA. Následky čelní nehody tramvaje typu T3 s bokem OA jsou znázorněny na obr. 3 a obr. 4. [2]



Obr. 3 Nehoda tramvaje typu T3 s OA;
zdroj: Hasiči Praha

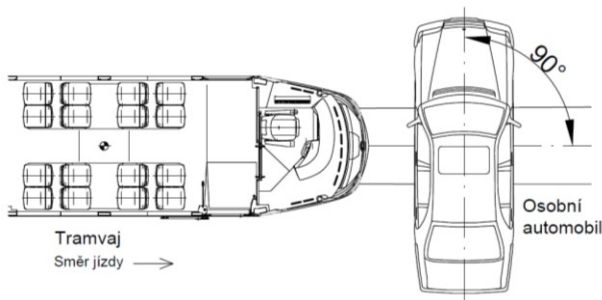


Obr. 4 Místo průniku spřáhla do prostoru pro cestující; zdroj: dopravacek.eu

3 NAVRŽENÝ VÝPOČTOVÝ SCÉNÁŘ NEHODY TRAMVAJE S OA

Podle výsledků provedené statistiky nehodovosti, viz tab. 2, dochází nejčastěji ke zranění cestujících v OA při čelní nehodě tramvaje do boku OA, tedy při situaci, kdy řidič OA nedá přednost v jízdě tramvaji a vjede na tramvajový pás před příjezdějí tramvaj.

Navržený výpočtový scénář, který budu používat pro další výzkum zvýšení kompatibility tramvají, reprezentuje náraz tramvaje do boku OA v místech prostředku dveří řidiče OA. OA je při nárazu postaveno kolmo na osu tramvajových kolejí. Schéma navrženého výpočtového scénáře pro výzkum zvýšení kompatibility tramvají při nehodě s OA je znázorněno na obr. 5.



Obr. 5 Schéma výpočtového scénáře

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících následky nehod je rychlost tramvaje před nehodou. Při tvorbě statistiky nehodovosti tramvají na území ČR mi nebyly dopravními podniky poskytnuty informace k rychlosti tramvají před nehodou, a proto jsem nebyl schopen stanovit průměrnou rychlost tramvají při nehodách s OA. Z tohoto důvodu jsem počáteční rychlost tramvaje převzal ze třetího scénáře srážky vozidla konstrukční kategorie odolnosti proti nárazu C-III z normy ČSN EN 15227, který reprezentuje náraz čela tramvaje do pevné překážky o hmotnosti 3 tuny. Pro výpočtový scénář jsem stanovil počáteční rychlost tramvaje 25 km/h. [4]

Dalším z důležitých faktorů ovlivňující následky na zranění cestujících v OA je pohyb OA po nehodě. Jedním z dat získaných od dopravních podniků k jednotlivým nehodám byl slovní popis průběhu nehody. Z popisů nehod vyplynulo, že při nehodách docházelo jak k posuvům OA ve směru jízdy tramvaje, tak i k posuvům ve směru jízdy OA a rotacím OA kolem svislé osy. Aby výpočtový scénář co nejpřesněji reprezentoval skutečnou nehodu tramvaje s OA, tak jsem stanovil u modelu OA tři stupně volnosti: posuv v osách X a Y a rotace kolem osy Z.

Výpočtový scénář s těmito okrajovými podmínkami odpovídá průběhu čelních nehod tramvají s boky OA podle dat k nehodám od jednotlivých dopravních podniků. Takto navržený výpočtový scénář použiji pro další výzkum zvýšení kompatibility tramvají při nehodách s OA.

4 POPIS ČÁSTÍ FEM MODELU

FEM model byl vytvořen tak, aby co nejpřesněji reprezentoval navržený výpočtový scénář nehody tramvaje s OA. Jednotlivé části FEM modelu byly vytvořeny v prostředí softwarů Ansys a LS-PrePost. Tyto softwary jsou volně dostupné studentům FS ČVUT.

FEM model se skládá ze submodelů: tramvaje, deformačního prvku, osobního automobilu, řidiče a spolucestujícího na straně řidiče.

4.1 FEM model tramvaje

FEM model tramvaje reprezentuje tramvaj ŠKODA 39T Ostrava (obr. 6), která byla konstruovaná podle požadavků normy ČSN EN 15227 na bezpečnost vozidel při nehodě.

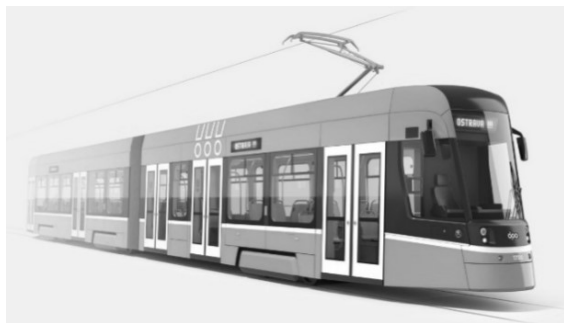
Tab. 3 Základní parametry tramvaje typu ŠKODA 39T Ostrava; zdroj: mhd-ostrava.cz

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
hmotnost prázdné tramvaje	m	36 835	kg
počet míst k sezení	p_{sed}	60	-
hmotnost cestujícího	m_{cest}	70	kg
kolizní hmotnost tramvaje	m_{kol}	38 935	kg

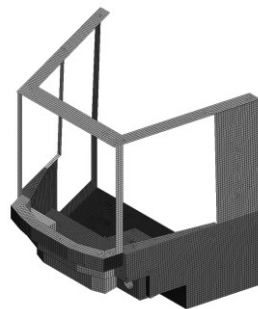
Crashové výpočty tramvají se počítají na modelech hrubých staveb daných tramvají, které byly dimenzovány podle legislativních požadavků na životnost a pevnost při běžném provozu a nárazu do jiné tramvaje. Crashový výpočet na takovém modelu dokáže s vysokou přesností predikovat průběh srážek a případné deformace hrubých staveb článků. Vytvoření takového modelu hrubé stavby článků tramvaje je však nad rámec tohoto výzkumu. [3]

Z důvodu vysoké pevnosti hrubých staveb článků lze předpokládat, že při nehodě s OA nedojde k deformaci hrubé stavby tramvají. Podle uvedeného předpokladu lze při výpočtu uvažovat model tramvaje jako dokonale tuhý. Tento předpoklad bude mít za následek menší chybu, než kdyby byl model tramvaje uvažovaný jako poddajný a při nehodě došlo k nereálné deformaci tramvaje.

Z tohoto důvodu je FEM model tramvaje (obr. 7) reprezentován pouze kabinou, která je uvažovaná jako dokonale tuhá. Zbýlé části tramvaje nebyly uvažovány, jelikož by složitější model vedl k delším výpočtovým časům simulací bez přínosu k přesnosti výsledků. Kabině tramvaje je přiřazena hmotnost celé tramvaje.



Obr. 6 Tramvaj ŠKODA 39T Ostrava; zdroj: mhd-ostrava.cz

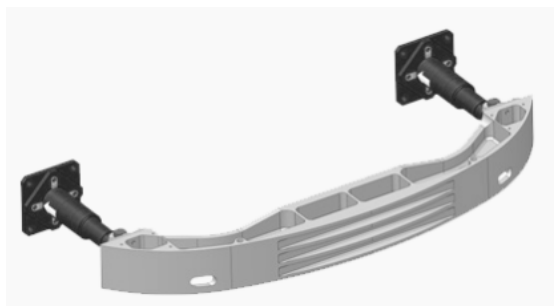


Obr. 7 FEM model kabiny tramvaje

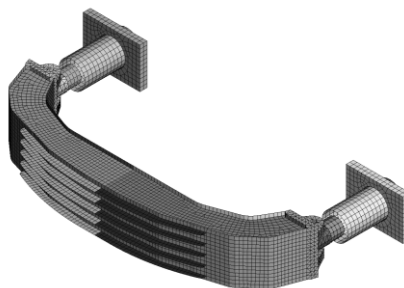
4.2 FEM model deformačního prvku

Deformační prvky tramvajových vozidel se u nově konstruovaných tramvají skládají ze dvou absorpčních členů propojených nárazníkem, viz obr. 8. Absorpční členy jsou schopny absorbovat energii nárazu. Velikost absorbované energie je definována legislativními požadavky v normě ČSN EN 15227. Deformační prvky tramvaje ŠKODA 39T, při úvaze parametrů v tab. 3 a součinitele rotačních hmot 0,15, musí být schopny absorbovat energii 97 kJ. [1]

FEM model deformačního prvku byl vytvořen tak, aby co nejvěrněji reprezentoval reálné deformační prvky. Skládá se ze dvou absorpčních prvků, ke kterým je přes rotační vazbu uchycen nárazník, viz obr. 9. Pro každý absorpční člen je definována zatěžující charakteristika pro absorpci energie 49,8 kJ. Charakteristika byla stanovena podle podkladů od firmy Axtone a konzultována s pracovníky ŠKODA Transportation, zabývajícími se pasivní bezpečností tramvají.

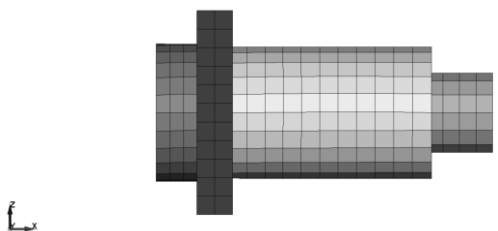


Obr. 8 Deformační prvek; zdroj: axtoneglobal.com

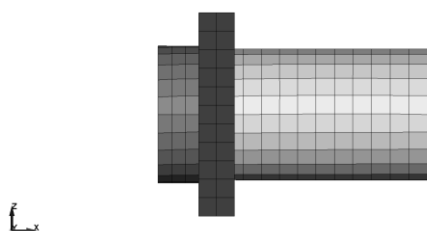


Obr. 9 FEM model deformačního prvku

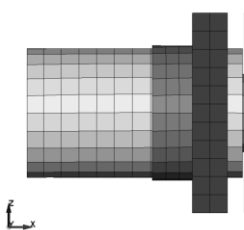
Funkčnost absorpčních členů byla ověřena pomocí kalibrační zkoušky. Při zkoušce byl absorpční člen stlačován zkušebním přípravkem až do oblasti přetížení. Ze zkoušky byla vyhodnocována závislost síly na stlačení absorpčního členu. Výsledek kalibrační zkoušky byl porovnán s navrženou charakteristikou, viz obr. 10 až 14. Porovnání dosahovalo dobré shody a model byl vyhodnocen jako validovaný.



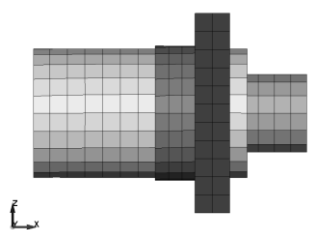
Obr. 10 Průběh kalibrační zkoušky 1



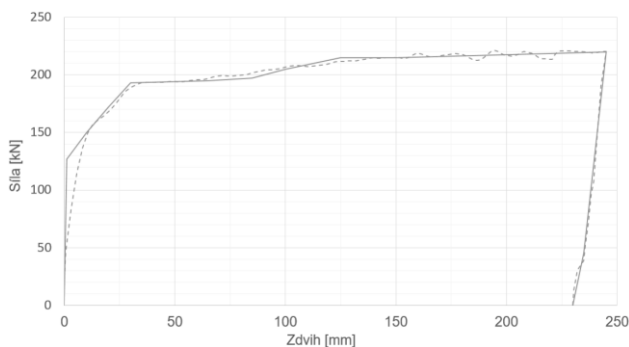
Obr. 11 Průběh kalibrační zkoušky 2



Obr. 12 Průběh kalibrační zkoušky 3



Obr. 13 Průběh kalibrační zkoušky 4



Obr. 14 Charakteristika absorpčního členu (návrh – plná čára, model – prerusovaná čára)

4.3 FEM model osobního automobilu, řidiče a spolujezdce

Kvalita a přesnost FEM modelů OA, řidiče a spolujezdce jsou pro výzkum zvýšení kompatibility tramvaje při nehodě s OA zásadní. Nepřesné modely by vedly k nepřesným výsledkům výpočtů a závěrům výzkumu. Proto bylo nutné pro výzkum použít FEM modely validované podle reálných měření a zkoušek.

Americká univerzita George Masona poskytuje na webových stránkách validované FEM modely různých silničních vozidel. Pro výzkum byl zvolen model auta Toyota Yaris z roku 2010 (viz obr. 15). FEM model OA byl validován pro čelní i boční nárazy. [6]

Americká firma Livermore Software Technology, výrobce softwaru Ansys, poskytuje na webových stránkách validované FEM modely mechanických figurín, které se používají při návrhu bezpečnosti motorových vozidel. Navržený výpočtový scénář, popsáný v předchozí kapitole, reprezentuje boční náraz do OA. Z figurín pro boční náraz byla zvolena figurína SID-50th, viz obr. 16, která reprezentuje průměrného dospělého člověka o hmotnosti 74 kg. FEM model byl validován podle pádového testu hlavy a zkoušek krku, ramen, hrudi, břicha a pánve. [7]

Výsledky výpočtů provedené na těchto modelech budou poskytovat věrohodné výsledky.



Obr. 15 FEM model Toyota Yaris 2010 [6]

Obr. 16 FEM model SID 50th

5 ZÁVĚR

Tento příspěvek popisuje provedené dílčí práce na výzkumu zvýšení kompatibility tramvají při srážce s OA. Podle znalostí získaných z dosud provedeného výzkumu byl vytvořen výpočtový model nehody tramvaje s bokem OA. Při tomto typu nehody dochází nejčastěji ke zranění cestujících v OA. Na vytvořeném výpočtovém modelu budou v rámci dalšího výzkumu prováděny výpočtové simulace s cílem snížit riziko zranění cestujících v OA při nehodě s tramvají.

Výzkum byl realizován s podporou studentské grantové soutěže projektu SGS19/161/OHK2/3T/12.



Literatura

- [1] ZELENÝ, V., SEIDL, J. *Vliv statistiky nehodovosti na konstrukční prvky čel tramvajových a železničních vozidel*. Žilina, VTS při Žilinskej univerzite, 2019. ISBN: 978-80-89276-59-2.
- [2] KOLÁŘ, J., SEIDL, J., ZELENÝ, V., VINCÍK, O. *Statistika nehodovosti tramvají a vozidel regionální železnice*. Z 20-03 U12120. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2020.
- [3] KOLÁŘ, J., SEIDL, J., ZELENÝ, V. *Zpráva o možnosti zvyšování pasivní bezpečnosti železničních vozidel*. Z 20-05 U12120. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2020.
- [4] ČSN EN 15227. *Železniční aplikace – Požadavky na odolnost skříní železničních vozidel proti nárazu*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [5] SEIDL, J., ZELENÝ, V. *Statistika nehodovosti tramvajových vozidel*. Praha: ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06622-5.
- [6] MARZOUGUI, D., SAMAHA, R., CUI, CH., KAN, C. *Extended validation of the finite element model for the 2010 Toyota Yaris passenger sedan* [online]. Virginia, USA: Center for Collision Safety and Analysis, 2012 [cit. 02. 08. 2021]. Dostupné z: <http://ccsa.gmu.edu>
- [7] TAHAN, F., MAHADEVIAIAH, U., MARZOUGUI, D., KAN, C. *LSTC WorldSID 50th Male Finite Element Model* [online]. Virginia, USA: Center for Collision Safety and Analysis, 2018 [cit. 02. 08. 2021]. Dostupné z: <http://lstc.com>