VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ODBOR ZNALECTVÍ VE STROJÍRENSTVÍ, ANALÝZA DOPRAVNÍCH NEHOD A OCEŇOVÁNÍ MOTOROVÝCH VOZIDEL

DEPARTMENT OF EXPERTISE IN MECHANICAL ENGINEERING, ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENTS AND VEHICLE ASSESSMENT

NÁVRH METODY PRO POSUZOVÁNÍ DEFORMAČNÍ ENERGIE Z VÝSLEDKŮ NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK

DESIGN OF A METHOD FOR ASSESSING DEFORMATION ENERGY FROM CRASH TEST RESULTS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

ABBREVATED DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Pavlína Moravcová

AUTHOR

ŠKOLITEL — Ing. Albert Bradáč, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024

OBSAH

OBSAH 4
1 ÚVOD 6
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ 6
2.1 DEFORMAČNÍ ENERGIE 7
2.2 PROFIL DEFORMACE 8
2.3 METODY DOKUMENTACE POŠKOZENÍ 9
2.3.1 2D metody dokumentace 9
2.3.2 3D metody dokumentace 10
2.4 METODY STANOVENÍ HODNOTY EES 12
2.4.1 Odhad EES znalcem/odborníkem 12
2.4.2 Komparační metoda 12
2.4.3 Korelační diagram 12
2.4.4 Energetický rastr 12
2.4.5 CRASH3 13
2.4.6 Trojúhelníková metoda 14
2.4.7 Voxelový 3D model 14
3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 15
4 FORMULACE PROBLÉMŮ 16
5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU KVANTIFIKACE POŠKOZENÍ VOZIDLA NA STANOVENÍ PARAMETRU EES 17
5.1 ANALÝZA LIMITŮ A PŘÍNOSŮ RŮZNÝCH METOD DOKUMENTACE POŠKOZENÍ VOZIDLA 17
5.2 ANALÝZA VLIVU VYBRANÝCH PARAMETRŮ NA VÝSLEDNOU HODNOTU EES VOZIDLA PRO ČELNÍ NÁRAZ 18
5.3 ANALÝZA VLIVU ZAMĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE NA VÝSLEDNOU HODNOTU *EES* PRO BOČNÍ NÁRAZY 21
5.4 ANALÝZA VLIVU ZAMĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE NA VÝSLEDNOU HODNOTU *EES* 22
5.5 NÁVRH METODY PRO MĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE VOZIDLA A OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI NAVRŽENÉ METODY 24
5.6 3D ANALÝZA POŠKOZENÍ VOZIDEL 25
6 DISKUSE 27
7 LIMITACE DIZERTAČNÍ PRÁCE 28
8 ZÁVĚR A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE 29
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 31

1 ÚVOD

Dizertační práce vznikla v souvislosti s potřebami znalecké činnosti a rozvoje znaleckého oboru doprava (odvětví doprava silniční), zejména v oblasti dokumentace poškození vozidel na místě dopravní nehody, stanovení profilu deformace a kvantifikace deformační energie. Výzkumná činnost je řešena v rámci soudního inženýrství, které je nadstavbou vybraných technických a technicko – ekonomických oborů znalectví.

V posledních letech došlo ve forenzní praxi k výraznému rozvoji metod dokumentace místa dopravní nehody, vč. samotného poškození vozidel. Nové technologie mění způsob ohledání místa dopravních nehod a následnou analýzu a rekonstrukci nehodového děje. Největší technologický pokrok je patrný v rámci 3D dokumentace, s čímž souvisí i možnosti využívání mobilních zařízení při ohledání místa dopravní nehody, vč. poškozených vozidel. Dochází tak k častější implementaci 3D modelů do rekonstrukce nehodového děje, vč. trojrozměrné analýzy stop vzniklých na místě dopravních nehod nebo samotného poškození vozidel. S vývojem technologií souvisí řada výhod i limitací. Kvalita získaných podkladů však nezávisí pouze na vybrané metodě dokumentace, ale i na vnějších podmínkách či na samotném zpracovateli.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V rámci analýzy nehodového děje a následné rekonstrukce je zapotřebí zajistit kvalitní ohledání místa dopravní nehody, s čímž souvisí i důkladná dokumentace poškození zkoumaného vozidla [81]. V případě vyžádání znaleckého posudku je soudní znalec zpravidla odkázán na kvalitu policejních záznamů, fotodokumentace, výpovědí svědků a případných nákresů [53]. Kvalitní dokumentace vozidla je od samého prvopočátku závislá na přesnosti a preciznosti zpracovatele. Dokumentaci však obecně může ovlivnit řada dalších faktorů, od použité metody dokumentace, až po špatné podmínky na místě dopravní nehody (déšť, sníh, špatné povětrnostní podmínky, velký pohyb osob či vozidel apod.). Jak uvádí řada autorů [5], [20], při ohledání je nutné zvážit, k jakému účelu bude následné ohledání sloužit, zda bude dokumentace využita jen jako podklad pro náhradu škody, anebo bude využita pro rekonstrukci nehodového děje.

Analýza dopravních nehod je ve většině případů řešena zpětným odvíjením nehodového děje. Vyšetřovatel/soudní znalec tedy začíná od samotného poškození vozidel. Na základě poškození vozidel, resp. pomocí zaměřeného profilu deformace lze stanovit deformační energii. Nejdříve je nutné identifikovat samotné poškození jak kontaktní, tak indukované poškození [32], [106], [117], které je důležitou součástí analýzy nehodového děje. Dále je nutné znát rozsah

deformace a hlavní směr působící síly [5], [20], [106], resp. PDOF (Principal Direction of Force). Hloubka deformace by měla být měřena ve stejném směru, jako je určen PDOF [5], [117], [128]. Jak uvádí Vangi [117], v praxi je to velmi obtížné a je vhodnější hloubku deformace zaměřit v podélném nebo kolmém směru k ose (x) vozidla (dle typu střetu) a následně deformační energii vynásobit korekčním faktorem, který zohledňuje PDOF [117], [128].

Určení PDOF na místě dopravní nehody nebo pouze z pořízené fotodokumentace může být velmi Podkladem pro správně určení PDOF je určení maximální deformace či konkrétní části na vozidle (nárazník, světlomet apod.), kde došlo k maximálnímu přenosu sil během střetu, a následně je zaměřeno podélné a příčné posunutí zkoumané části vozidla [5].

Důležitým podkladem pro analýzu nehodového děje i samotný typ střetu, kdy je možné rozlišovat ráz na centrický a excentrický, s plným či částečným překrytím, se skluzem, bez skluzu či s částečným skluzem, čelní, boční, zadní nebo šikmý.

2.1 DEFORMAČNÍ ENERGIE

Při analýze dopravních nehod je nutné co nejpřesněji stanovit deformační energii [7], [8], [9]. Pro deformační energii a následné určení střetových rychlostí vozidel (rychlosti před střetem) se využívají různé postupy a matematické modely [109]. Deformační energie vznikající během střetu je vyjádřená v Joulech nebo pomocí parametru Ekvivalentní energetické rychlosti (*EES*), či Ekvivalentní bariérové rychlosti (*EBS*).

Parametr *EES* byl zaveden Burgem a Zeidlerem v roce 1980. Jedná se o odhad deformační energie vozidla z celkové kinetické energie, který zohledňuje pouze plastickou deformaci [131], [23]. Deformační energie je rozdílem mezi kinetickou energií vozidla před střetem a kinetickou energií vozidla po střetu [13], [21], [23], [22]. Ekvivalentní bariérová rychlost (*EBS* – equivalent barrier speed) někdy také označovaná jako (*BEV* – barrier equivalent velocity), je hodnota, která vyjadřuje množství rozptýlené energie během střetu do tuhé nedeformovatelné bariéry [33], [104].

EBS ale i *EES* bývají často zaměňovány s nárazovou rychlostí. Pokud po střetu dochází k pohybu vozidla je *EBS* či *EES* odlišné od nárazové rychlosti. V případě nárazu do tuhé nedeformovatelné překážky by mohlo dojít čistě k plastické deformaci, ale jak je uvedeno v [20], v reálných podmínkách tento případ nenastává. Na základě výše uvedených definic *EES* a *EBS* je možné odvodit uvedený vztah mezi *EES* a *EBS*, kdy koeficient restituce *e* nabývá hodnot od 0 do 1, z čehož plyne, že *EES* < *EBS*.

2.2 PROFIL DEFORMACE

Jedním z důležitých předpokladů pro správnou analýzu nehodového děje je kvalitní dokumentace jak samotného místa dopravní nehody, tak i poškozených vozidel. Je důležité si uvědomit, že přesnost vstupních dat může výrazně ovlivnit přesnost výstupu, tedy výslednou analýzu nehodového děje [117]. Určení deformační energie, resp. *EES,* je založeno na měření hloubky deformace [117]. Správné zaměření deformace vyžaduje mj. i stanovení výšky zaměření. Profil deformace by měl být měřen v místě, kde dochází k přenosu maximální síly [20]. Jedná se především o oblast tuhé výztuhy pro čelní nárazy a oblast maximální deformace (resp. výška tuhé výztuhy oponenta) pro boční nárazy. Tento postup je široce využívaný ve znalecké praxi [106]. Jak uvádí Brach a Brach [15], při analýze nehodového děje se pro zjednodušení výpočtů předpokládá lineární tuhost celého vozidla. Někteří autoři, např. [14], [15] uvádějí, že pokud je velký rozdíl mezi deformací na úrovni tuhé výztuhy a nad tuhou výztuhou, jsou vhodné tyto hodnoty zprůměrovat, aby byla dosažena lepší korelace s nárazovými testy.

Rozsah měření profilu deformace by měl zahrnovat přímé a indukované poškození [32]. Postupy pro stanovení šířky deformace se však v literatuře liší – viz např. [32], [71], [82], [117], [126]. Pokud dojde k poškození celé přední části vozidla, je deformace měřena podél celé šířky anebo je šířka deformace měřena pouze v oblasti tuhé výztuhy, resp. mezi rohy nárazníku vozidla. V případě, že rozsah deformace není přes celou šířku vozidla, je šířka deformace měřená od kraje deformace po roh nárazníku nebo po okraj vozidla. Měření šířky deformace pro boční nárazy zahrnuje opět přímé i indukované poškození, šířka deformace je měřena od okraje k okraji deformace.

Počet měřicích bodů pro zaměření profilu deformace je závislý na využívané metodě pro kvantifikaci parametru EES. Řada matematických modelů se opírá o Tumbasův a Smithův protokol (Measuring Protocol for Quantifying Vehicle Damage from an Energy Point of View, formerly the National Accident Sampling System – NASS) [115], kdy by počet měřicích bodů měl respektovat typ a rozsah poškození. Pro zaměření profilu deformace je dle této metodologie využíváno 2, 4 nebo 6 měřicích bodů, které jsou rovnoměrně rozmístěny podél celé šířky deformace vozidla. Struble [106] či Vomhof [126] diskutují nezbytnost rovnoměrného rozmístění měřicích bodů podél šířky deformace. Autoři zmiňují, že se jedná pouze o zbytečné omezení, které pouze zjednodušuje výpočet deformační energie, resp. hodnoty EES. Cookson [28] uvádí, že měření profilu deformace je potřeba provést minimálně ve 3 měřicích bodech, které jsou opět rovnoměrně rozmístěné podél celé šířky vozidla. Zjednodušenou metodu zaměření deformace představil Vangi v několika navazujících studiích (viz např. [117], [118], [120], [122]). Jedná se o tzv. Trojúhelníkovou metodu.

Tato metoda využívá aproximaci poškozené oblasti pomocí jednoduché geometrie poškození (trojúhelník, obdélník, lichoběžník), při využití maximálně 2 měřicích bodů.

V případě bočního střetu probíhá měření hloubky deformace odlišně. Zejména v případě bočních střetů může docházet k prohnutí karoserie. Někteří autoři (viz [32], [106], [115]) zmiňují, že pokud dojde k prohnutí karoserie během střetu o více než 10 cm, musí být prohnutí karoserie zahrnuto do měření hloubky deformace. Následně je zaměřeno boční vychýlení vozidla x_1 a x_2 (ke každému zaměření C_i je připočtena konstanta prohnutí vozidla

2.3 METODY DOKUMENTACE POŠKOZENÍ

Všechny využívané metody kvantifikace deformační energie vyžadují stanovení rozsahu poškození [20], [27], [45], [104]. Dokumentaci provádí policie na místě dopravní nehody a v určitých případech i znalec. Vždy záleží na tom, k jakému účelu mají být fotografie nebo dokumentace poškození určeny. Pokud není znalci umožněna prohlídka poškozeného vozidla, musí se spolehnout na osobu, která dokumentaci zajišťovala na místě dopravní nehody. Přesnost měření a dokumentace je vždy závislá na přesnosti a preciznosti zpracovatele. Pro dokumentaci i následné měření rozsahu poškození vozidla lze využít řadu metod.

2.3.1 2D metody dokumentace

Mezi 2D metody dokumentace se řadí fotografická dokumentace poškození s využitím měřítka, nivelačních latí, olovnice nebo měřicích tyčinek.

Metoda dokumentace poškození pomocí měřítka nebo nivelačních latí, je často využívanou metodou ve znalecké praxi. Jedná se o jednoduchou, rychlou a finančně nenáročnou metodu [20], [72], [74]. Limitací této metody může být zejména obtížné zaměření v případě markantní deformace, při které může být nemožné stanovit referenční bod, od kterého je deformace měřena, [5], [20]. V případě, že je deformace tak rozsáhlá, že není možně stanovit referenční bod, je vhodné kolem poškozeného vozidla sestavit obdélník (např. z PVC trubek či měřítka/nivelačních latí apod.) od kterého zaměřeno celé poškozené vozidlo (pomocí měřítka). Pro přesnou dokumentaci a následné měření je nutné dodržovat pravidla pro kvalitní fotodokumentaci [43], [92], [20].

Metoda dokumentace poškození za pomocí měřicích tyčinek je nejvíce rozšířená v USA. Zařízení má velmi omezenou dostupnost a ve většině případů je vyráběno na zakázku [39]. Výhodou měřicích tyčinek je nesporně jejich jednoduchá konstrukce, vč. snadné manipulace [20], [39]. Měření deformace probíhá od referenční linie, která je stanovena od referenčního bodu). Využitelnost metody může být ovlivněná typem střetu, charakterem poškození nebo místem

dopravní nehody. V některých případech nemusí být možné změřit kompletní geometrii vozidla, měřicí přípravek je vyroben pouze za účelem výběrové dokumentace poškození (čelní, boční, zadní). Při destrukci celého vozidla je velmi obtížné stanovit referenční body (zejména u markantní boční deformace, kdy dochází k ohybu karoserie). Tato problematika je řešena obdobně jako u metody dokumentace pomocí měřítka/nivelačních latí [20], [39].

2.3.2 3D metody dokumentace

Moderní metody dokumentace umožňuje přesně a rychle zachytit celé místo dopravní nehody vč. vzniklých stop a poškozených vozidel [5], [46]. Trojrozměrná analýza deformace vozidla je sofistikovanější a umožňuje zjistit reálnou geometrii poškozeného vozidla pro získání důležitých informací pro následnou analýzu nehodového děje [54], [87], [104], [19]. Mezi 3D metody dokumentace se řadí totální stanice, fotogrammetrie, 3D skenery nebo mobilní telefony.

Totální stanice patří mezi velmi přesné přístroje, které mají široké využití ve znalecké praxi. Metoda dokumentace poškození je ale oproti 2D metodám dokumentace finančně náročnější [20], [63]. Poškození vozidla lze měřit buď pomocí odrazného hranolu, který odráží vysílaný paprsek totální stanicí zpět do přístroje, anebo pouze pomocí paprsku, který se odráží od měřeného místa (odrazné plochy) [5], [6], [20], [27], [39], [63]. Hustota zaměřených bodů, vždy závisí na samotném zpracovateli, charakteru poškození vozidla, podmínkách na místě dopravní nehody a časových možnostech zpracovatele [20], [39]. Pokud dojde k chybnému zaměření nemusí být chyba ihned detekována. Oprava naměřených dat je velmi obtížná obzvláště v situacích, kdy není možné poškození opětovně zaměřit [93].

Fotogrammetrie se ve znalecké praxi využívá zejména pro měření a lokalizaci stop na místě dopravní nehody nebo pro kvantifikaci deformační energie vozidla [64], [88], [85], [89], [103], [105]. Již ve svých začátcích byla dle autorů [24], [26], [39], [40], [41], [105], [107] považována za velmi účinnou metodu dokumentace (jednosnímková fotogrammetrie nebo stereofotogrammetrii). Fotogrammetrie je schůdnou alternativou dokumentace poškození pomocí totální stanice či 3D skeneru, avšak v reálných podmínkách má metoda určité limitace [56], [93]. V případě dodržení určitých pravidel se jedná o velmi přesnou metodou dokumentace poškození vozidel, např. oproti konvenčním metodám (měření pomocí měřítka/nivelačních latí, měřicích tyčinek) [34], [36], [93], [96]. Na základě vhodného programu je možné z dostatečného počtu fotografií získat mračno bodů a sestavit tak 3D model poškozeného vozidla. Jedná se o tzv. vícesnímkovou fotogrammetrii [20], [61]. neboli 3D skenování založené na fotografiích. Tato metoda má dle Ericsona [39] řadu nesporných výhod (snadná přenositelnost, nízké náklady jak na vybavení, tak i na samotný čas potřebný ke zpracování, detailní snímání stop na místě dopravní nehody apod.). Pokud použijeme

k fotogrammetrii fotografie rozdílné kvality, může být ovlivněna přesnost získaného modelu [45], [93]. Kvalita dat a hustota mračna bodů je opět závislá na samotném zpracovateli [39], [112]. Mezi limitace patří např. citlivost na světelné podmínky, vlastnosti dokumentovaného objektu, špatné překrytí snímků nebo špatné podmínky na místě dopravní nehody (sníh, déšť, vítr, hustý provoz, značný pohyb osob apod. [70], [84], [93], [105].

Dokumentace pomocí 3D skeneru nepatří v České republice mezí rozšířené metody, zejména pro vysoké finanční náklady jak na 3D skener, tak i software a hardware pro následné zpracování. 3D skenování patří v současnosti mezi nejpřesnější metody dokumentace, které umožňuje masivní sběr 3D dat [1], [37], [45], [52], [70], [74], [111]. Přesnost je podmíněná volbou vhodného typu 3D skeneru (ruční, statický apod). Statický 3D skener má oproti ručnímu skeneru obecně vyšší přesnost a umožňuje detailnější sběr 3D informací. Dokáže snímat až 2 mil. bodů za sekundu, vč. vytváření panoramatických fotografií (sférické snímkování), opět záleží na volbě skeneru [42]. Při dokumentaci lze sbírat data pouze v přímé viditelnosti zájmového objektu, z tohoto důvodu je zapotřebí jeho přemístění vč. změny výšky. Jedná se o nevýběrový způsob dokumentace. 3D skener nezaznamenává pouze zájmové objekty, některé typy skenerů umožňují zaznamenávat veškerá 3D data během otočení o 360˚, díky čemuž může uživatel využít zpětného přezkoumání jak místa dopravní nehody, tak i samotného poškození vozidel[20], [26], [110]. Výhodou není jen přesný sběr dat, ale i použitelnost ve špatných/zhoršených světelných podmínkách. Limitací 3D skenování, které ovlivňují sběr dat, jsou zejména špatně odrazivé plochy objektu, hustý déšť či sníh [70] .

3D data je možné, díky značnému vývoji v této oblasti, získat pomocí mobilních telefonů. Dokumentace probíhá za pomoci fotogrammetrie nebo různých senzorů, jako je např. senzor ToF (Time-of-light) [61] nebo LIDAR [1], [3]. Jedná se o užitečný nástroj pro forenzní praxi. Oproti statickým 3D skenerům je sběr 3D informací pomocí mobilních zařízení finančně dostupnější [20], [60]. Jak uvádí Bucsuházy a kol. [20], v zásadě každé mobilní zařízení je schopno vytvořit 3D model vozidla (pokud je vybaven fotoaparátem) za pomocí fotogrammetrie. Ke sběru 3D dat pomocí mobilního zařízení není nutné školení, využívané aplikace jsou velmi intuitivní [97], [130]. Proces sběru 3D dat se odvíjí od využívané aplikace, vč. samotného postupu dokumentace poškození vozidla. Získaná data je možné ukládat do cloudových uložišť [35], [62], [68]. Řada limitací vyplývá již z použití 3D skeneru, ale mezi další je možné zařadit chybné získávání 3D dat a vytváření neadekvátního povrchu (štěpení povrchu, ztráta rovinnosti apod.). Přesnost dokumentace je dále limitována aplikací, která je pro sběr dat využívána [20], [68], [69].

2.4 METODY STANOVENÍ HODNOTY EES

Pro stanovení hodnoty *EES* existuje řada metod založených na matematických modelech či na odhadu znalce/oborníka. Mezi využívané metody pro kvantifikaci parametru *EES* patří zejména odhad *EES* znalcem/oborníkem, komparační metoda, korelační diagram, energetický rastr, CRASH3, Trojúhelníková metoda apod.

2.4.1 Odhad *EES* znalcem/odborníkem

Na základě odhadu *EES* znalcem/odborníkem nemusí být vždy hodnota *EES* odhadnuta v technicky přijatelném rozmezí. Odhad *EES* se může pohybovat ve velmi širokém rozmezí. Nesprávné posouzení může vést k mylnému závěru ve znaleckém posudku, což je zejména pro účastníky sporu nežádoucí [7], [8], [9].

2.4.2 Komparační metoda

Komparační metoda vychází z vizuálního porovnání poškozeného vozidla (zkoumané vozidlo) s poškozeným vozidlem, u kterého je hodnota *EES* známá (nejčastěji vozidla z nárazových testů). Vizuální porovnání patří mezi základní, ale zároveň často využívané metody stanovení hodnoty *EES* [7], [8], [9], [76]. K porovnání lze využívat i *EES* katalogy, které ale často neobsahují moderní vozidla, často také není známa metoda, jak bylo *EES* stanoveno [76], [122]. Vangi [122] mj. uvádí, pokud není nalezeno stejné či porovnatelná vozidla není tato metoda použitelná.

2.4.3 Korelační diagram

Jedná se opět o metodu subjektivního hodnocení vzniklého poškození. Poškození je bodováno dle klasifikace rozsahu poškození. Korelační diagram patří mezi starší metody, kdy na základě odborného odhadu dochází k bodové klasifikaci poškození vozidla. Aktuální korelační diagram není využitelný pro znaleckou praxi. Aby byla zaručena použitelnost korelačního diagramu, muselo by dojít k jeho aktualizaci s využitím moderních vozidel.

2.4.4 Energetický rastr

Výpočet hodnoty *EES* pomocí energetického rastru je založen na Campbellově metodě síťového rozložení, kdy jednotlivé zóny jsou symetricky rozděleny vůči podélné ose vozidla. Každé části přísluší určitý procentuální poměr deformační energie. Rozložení zón vč. procentuálního poměru se dle řady autorů různí, kdy Campbell rozdělil přední část vozidla na 4 zóny, které měly shodné procentuální podíly rozdělení deformační energie [20], [25] . Na Campbella dále navázal Röhrich (1977), který na základě nových nárazových testů (s jedním typem vozidla) rozdělil odlišně

procentuální podíly energie pro přední část vozidla [20], [95]. Shaper (1981) rozšířil Röhrichovu metodu tak, že přední část vozidla rozdělil na 8 zón a na základě dalších sérií nárazových testů stanovil procentuální podíly v jednotlivých zónách přední části vozidla [20], [99]. Autoři Burg a Rau publikovali odlišné rozdělení procentuálního podílu energie přední části vozidla [20], [22]. Vždy závisí na konkrétním vozidle a nutnosti zohlednění tuhostní charakteristiky vozidla. Appel a kol. vytvořili energetický rastr, který respektoval uspořádání motoru vč. hmotnosti vozidla [2].

Metoda předpokládá lineární závislost mezi nárazovou rychlostí a hloubkou deformace. Výsledek výpočtu může být zpřesněn jemnější sítí vytvořeného rastru, vč. využití většího množství porovnatelných vozidel a získané hodnoty následně zprůměrovat. Aktuální energetické rastry jsou využitelné pro starší vozidla, jelikož pro moderní vozidla nejsou energetické rastry stanoveny nebo nejsou volně přístupné. Rastrové rozložení bylo sestaveno pro vozidla obdélníkového tvaru, výpočet nezohledňuje zakřivenou část vozidla a je zapotřebí tento fakt zohlednit ve výpočtu[32].

2.4.5 CRASH3

Mezi nejvyužívanější metody pro stanovení hodnoty *EES* lze zařadit mj. výpočetní algoritmus CRASH3, který je součástí mnoha výpočetních programů [78]. Přesnost metody se odvíjí mj. od přesnosti vstupních parametrů. Mezi parametry, které mohou významně ovlivnit výsledek *EES*, patří koeficienty tuhosti *A, B* a *G*. Do výpočtu vstupující koeficienty tuhosti jsou zpravidla zjišťovány na základě nárazových testů. Pokud nejsou známy hodnoty stejného vozidla nebo jeho nárazový test není dostupný, je nutné vybrat vozidlo porovnatelné (se známou tuhostí). Jak uvádí např. [33], [121], [123], [129], koeficienty tuhosti lze získat na základě již publikovaných výzkumů, ale je opět nutné uvážit, zda jsou tyto hodnoty pro zkoumané vozidlo použitelné [129]. Chybný výběr porovnatelného vozidla (tuhostních parametrů) může výrazně ovlivnit výsledek výpočtu hodnoty *EES*.

EES může být metodou CRASH3 stanoveno např. pomocí programu PC-Crash. Program disponuje tuhostní databankou z nárazových testů amerického národního úřadu pro bezpečnost silničního provozu (NHTSA). Právní i bezpečnostní předpisy v USA se oproti EU liší, díky tomu je i konstrukce vozidel na americkém trhu odlišná. Každé vozidlo má jiné strukturální chování s ohledem na trh a je nutné k získaným datům přistupovat s opatrností. Další limitací dat NHTSA je odlišné měření šířky deformace. Pokud není změněna šířka deformace dle skutečnosti, zpracovatel si do výpočtu opět zanáší chybu (resp. dochází k nadhodnocení tuhosti vozidla), která povede k nadhodnocení konečného výsledku hodnoty *EES*. Pokud odborník/znalec využívá databázi nárazových testů v programu PC-Crash, je nutné zkontrolovat vstupní hodnoty (data jsou buď neúplná nebo chybně přepsaná z reportů nárazových testů)[20].

Dalším důležitým parametrem pro stanovení *EES* pomocí CRASH3 je hloubka deformace. Starší metodiky doporučují měřit hloubku deformace v rovnoměrně rozmístěných bodech podél celé šířky deformace [115], což je možné zejména v laboratorních podmínkách (nárazové testy) nebo při následném zpracování dat získaných z místa dopravní nehody, za předpokladu kvalitní dokumentace poškození vozidel.

2.4.6 Trojúhelníková metoda

Jako další výpočetní metodu lze využít tzv. Trojúhelníkovou metodu, která byla vyvinuta Vangim [117], [119], [122]. Tato metoda je pro samotného uživatele velmi nenáročná a využívá se v případech, kdy má poškození vozidla jednoduchou geometrii (trojúhelník, obdélník, lichoběžník).

Výpočet opět využívá parametrů porovnatelného vozidla, kdy poškození porovnatelného vozidla by mělo mít obdobný tvar poškození z hlediska pohlcené deformační energie. Z tohoto důvodu není potřebné znát koeficienty tuhosti [117], [119], [122], [123], [124]. V případě, že je znám skutečný tvar nepoškozeného vozidla, je tato metoda dobře využitelná s přijatelnou odchylkou výpočtu. Přesnost výpočtu může být limitována zaměřenou hloubkou a šířkou deformace na místě dopravní nehody.

2.4.7 Voxelový 3D model

Erbsmehl [38] vyvinul 3D model, který na základě hloubky deformace počítal hodnotu *EES*. Na jeho studii navázal řadou projektů Fraunhofer-Institut für Verkehrs-und Infrastruktursysteme IVI [16], [17], [18]). Autoři [16], [17], [18] se zaměřují na vývoj modelů pro stanovení hodnoty *EES* založené na reálných dopravních nehodách z databáze GIDAS (Hloubková analýzy dopravních nehod v Německu) a NASS CDC. Zjištěná hloubka deformace byla odhadnuta pomocí fotodokumentace a případně doplněna o 3D model, sestavený pomocí fotogrammetrie. Na základě hloubek deformací byla následně odhadnuta hodnota *EES* a korelována s voxelovým modelem. Získané modely byly následně seskupeny dle hlavního směru působící síly (*PDOF*) a rozděleny dle kategorií, kdy pro každou kategorii byl vytvořen univerzální voxelový model. Každý voxel obsahuje informaci o tuhosti, resp. kopíruje tuhostní charakteristiku vozidla [16], [17], [18].

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V rámci komplexní analýzy nehodového děje, řešení vlastního střetu a předstřetového pohybu je nutné správně posoudit kinetickou energii, která se mění na deformační práci. Jedním z důležitých parametrů při řešení střetu je deformační energie pohlcená deformačními zónami vozidla. K určení deformační energie se využívá tzv. ekvivalentní energetická rychlosti (*EES*), a to na základě vzniklých trvalých deformací vozidla (viz **kap. 2.1**). Technologický pokrok přináší rozvoj bezpečnostních systémů, díky kterým nemusí být stopy na místě dopravní nehody viditelné. Čím méně je pak zdokumentovaných stop, tím více se musí znalec opírat o samotné poškození vozidla. Görtz [44] mj. uvádí, že v případě nedostatku stop na místě dopravní nehody je možné hodnotu *EES* pojmout jako kontrolní veličinu, která zaručuje vysokou úroveň validity analýzy nehodového děje.

Mezi nejběžněji využívané metody dokumentace a měření hloubky deformace patří tzv. 2D metody – měřítko, nivelační lať, měřicí tyčinky. Moderní metody dokumentace poškození, jako jsou 3D metody dokumentace (fotogrammetrie, 3D skenery), nejsou při ohledání nehod zpravidla běžně využívané, ale finanční náročnost nemusí být už tak velkou překážkou, jak tomu bylo donedávna (viz **kap. 2.3**). Pro různé typy střetů a různé podmínky na místě dopravních nehod jsou vhodné i různé metody dokumentace poškození. I přesto, že na místě dopravní nehody nejsou zajištěny ideální podmínky, je nezbytné zajistit co nejpřesnější sběr dat pro objektivní analýzu nehodového děje. Samotná dokumentace a její přesnost se však odvíjí od preciznosti zpracovatele. Při výběru metody pro dokumentaci i při samotné dokumentaci je nutné reflektovat výhody i limitace jednotlivých metod.

Postup pro zaměření profilu deformace se pro jednotlivé matematické modely liší. Většina z nich se opírá o Tumbasův a Smithův [115] měřicí protokol. Autoři uvádějí, že pro výpočet je dostačující zaměřit deformaci ve 2, 4 nebo 6 rovnoměrně rozmístěných měřicích bodech (viz **kap.2.2)**. Jedná se o zažitý postup, který pouze zjednodušuje samotný výpočet, ale nemusí vždy reflektovat skutečný tvar poškození [73].

Analýza současného stavu dokládá, že existuje řada metod pro kvantifikaci deformační energie (viz **kap. 2.4**). Použitelnost dané metody vždy závisí na řadě faktorů, např. na charakteru poškození a typu střetu. Každá metoda stanovení *EES* nemusí být využitelná pro všechny případy. Dle literární rešerše je zřejmé, že dostupné výpočetní metody nemusí být vždy využitelné pro všechny typy vozidel, zejména s ohledem na analyzované vozidlo a jeho charakteristické vlastnosti [20].

Na základě zhodnocení analýzy současného stavu je patrná potřeba dalšího řešení problematiky v oblasti dokumentace a návazné analýzy poškození vozidla pro potřeby znalecké činnosti. Provedená analýza současného stavu ilustruje, že není dostupný ucelený soubor limitů a přínosů dokumentace poškození vozidel, které by byly validovány v reálných podmínkách, a návazně analyzován vliv přesnosti či obecně limitů těchto metod na výslednou kvantifikaci deformační energie.

- I když se řada studií zaobírá vlivem tuhostních parametrů na výpočet deformační energie, nebyla nalezena komplexní studie analyzující vliv ostatních vstupních parametrů, jako je šířka deformace, či počet měřicích bodů, přičemž tyto parametry jsou často v praxi využívány a měřeny odlišným způsobem.
- Přestože existuje metodika měření hloubky deformace z roku 1988, je nutné striktně tento postup dodržovat? Absentuje analýza, která by zkoumala rozdíl mezi rovnoměrným a nerovnoměrným rozmístěním měřicích bodů při měření hloubky deformace vozidla, jak tyto body rozložit a jaký počet případně použít pro správné určení profilu deformace.
- S rozvojem metod pro sběr dat z místa dopravní nehody došlo i k rozvoji 3D analýzy deformační energie (resp. *EES*) pomocí dostupných dat z nárazových testů a využití snímačů síly z nedeformovatelné tuhé bariéry. Otázkou je, do jaké míry je 3D analýza aplikovatelná na reálné dopravní nehody a jaké výhody či limitace přináší pro samotného znalce.

4 FORMULACE PROBLÉMŮ

Rozsáhlá analýza současného stavu dokládá potřebnost řešení dané problematiky. Z analýzy současného stavu vyplynuly konkrétní problémy:

1. Vymezit limity a výhody dokumentace poškození vozidla na základě experimentálního ověření v reálných podmínkách.
2. Experimentálně ověřit vliv vybraných vstupních parametrů výpočtu na výslednou hodnotu *EES* pro čelní nárazy.
3. Experimentálně ověřit vliv vybraných vstupních parametrů výpočtu na výslednou hodnotu *EES* pro boční nárazy.
4. Experimentálně ověřit vliv zaměření profilu deformace na výslednou hodnotu *EES*.
5. Na základě získaných výsledků navrhnout metodu měření profilu deformace tak, aby byla využitelná v reálných podmínkách.
6. Ověřit využitelnost 3D analýzy poškození vozidla pro potřeby znalecké činnosti.

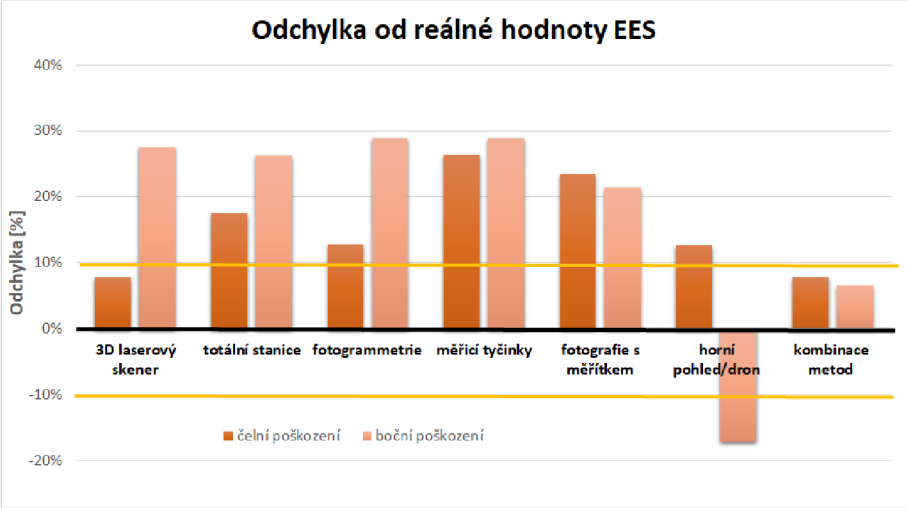
5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU KVANTIFIKACE POŠKOZENÍ VOZIDLA NA STANOVENÍ PARAMETRU EES

5.1 ANALÝZA LIMITŮ A PŘÍNOSŮ RŮZNÝCH METOD DOKUMENTACE POŠKOZENÍ VOZIDLA

Řešení střetu vozidel, jehož součástí je určení deformační energie, je jednou z hlavních částí komplexní analýzy dopravních nehod. Přesné určení střetových rychlostí vozidel závisí na přesnosti určení několika parametrů – zejména tuhosti vozidla, hloubky deformace a deformační energii.

Dílčím cílem bylo analyzovat možnosti zaměření hloubky deformace s využitím různých metod, a to při zohlednění různého rozsahu a charakteru deformace a různých vnějších podmínek. Tento výzkum byl mj. součástí řešení projektu CK02000084, Moderní metody dokumentace a analýzy poškození vozidel, jehož byla autorka dizertační práce spoluřešitelkou.

Na základě stanoveného profilu deformace byly pomocí zvolené metody dokumentace zjištěny odchylky měření vůči nejpřesnější metodě dokumentace – 3D skener. Největší odchylky jak pro čelní, tak boční nárazy byly zjištěny u metody dokumentace poškození pomocí horního pohledu/dronu (jednosnímkové fotogrammetrii). Ze získaných hloubek deformací byla následně vypočítána hodnota *EES*, která se v určitých případech výrazně lišila od reálné hodnoty *EES (viz obr. 1*), což následně potvrdilo i ověření pomocí energetická bilance střetu



Obr. 1: Odchylka výpočtu EES od reálné hodnoty [133]

Aby byla zajištěna co nejpřesnější dokumentace pro stanovení profilu deformace a následné odměření, bylo zapotřebí využít kombinaci metod dokumentace vzniklého poškození. Pokud nelze využít např. 3D skener, totální stanici nebo fotogrammetrii pro určité omezení při dokumentaci poškození, je vhodné tyto metody kombinovat s ručním zaměřením (pomocí měřítka

či měřicích tyčinek). Značná chybovost byla zjištěna u porovnání referenčních (nepoškozený model) a naměřených dat (poškozený model) 3D modelů vozidel, zejména tak u bočního poškození, kdy došlo k prohnutí karoserie, které znemožnilo provést porovnání získaných 3D dat. Mnohem přesnější se jeví vytvořit pouze 3D model poškozeného vozidla, stanovit začátek a konec profilu deformace a následně tyto body propojit přímkou. Pokud je karoserie prohnutá o více než 10 cm, je nutné ke každému měření připočíst konstantu prohnutí pro adekvátní měření profilu deformace.

Zvolená metoda dokumentace poškození vozidla ale vždy závisí především na časových možnostech a preciznosti zpracovatele. Značné nadhodnocení hodnoty *EES* poukazuje na možnost chybné metody měření profilu deformace a nutnosti se touto problematikou dále zaobírat.

5.2 ANALÝZA VLIVU VYBRANÝCH PARAMETRŮ NA VÝSLEDNOU HODNOTU EES VOZIDLA PRO ČELNÍ NÁRAZ

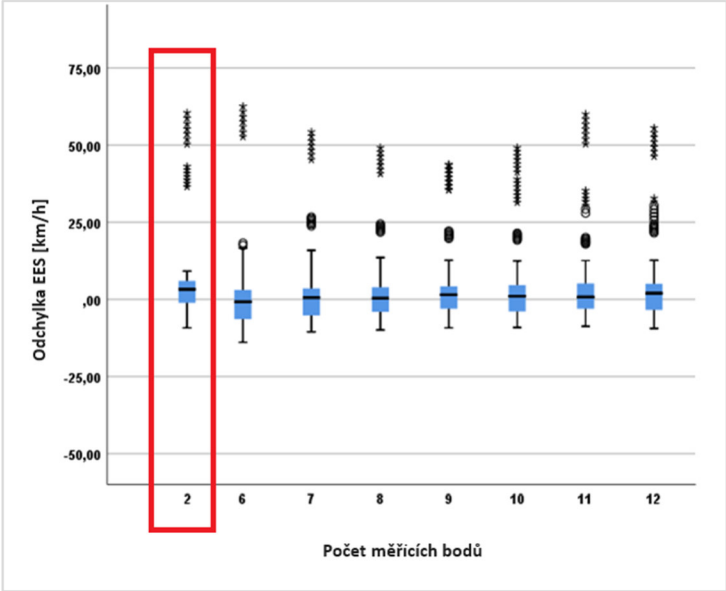
Cílem této kapitoly bylo zjistit, do jaké míry mohou ovlivnit zjištěné informace (b_0 – rychlost, při které nevznikají trvalé deformace; L_d – šířka deformace nebo C_n – počet měřicích bodů) o poškozeném vozidle výpočet deformační energie, která je vyjádřená parametrem *EES*. Z analyzovaných dat z míst dopravních nehod a z nárazových testů bylo zjištěno, že u parametru b_0 byly pozorovány statisticky významné rozdíly u kategorie vozidla SUV. Vozidla vykazují vyšší tuhost a použití nižších hodnot b_0 by nemělo být doporučováno.

Šířka deformace L_d měla statisticky významný vliv na výslednou hodnotu *EES* pouze v případě částečného překrytí. Šířka deformace by měla být měřena jako celá šířka vozidla (pro poškození celé přední části vozidla) nebo od kraje deformace po kraj karoserie (pro částečné poškození vozidla).

Mezi parametry, které vstupují do výpočtu hodnoty *EES,* patří zejména počet měřicích bodů, který je stanoven dle zažité metody z roku 1988 [115]. Pokud vezmeme v úvahu charakter a rozsah poškození či kategorii vozidel, počet měřicích bodů významně ovlivňuje hodnotu *EES*, obzvláště v případech, kdy jsou pro stanovení profilu deformace využity pouze dva měřicí body. Dva měřicí body byly vhodné spíše pro nárazové zkoušky, které probíhají v laboratorních podmínkách (náraz do tuhé nedeformovatelné bariéry), ale ve znalecké praxi by se neměly doporučovat. Jako vhodné se jeví využívat nejméně 7 měřicích bodů (rovnoměrně rozmístěných podél celé šířky deformace L_d pro výpočetní metodu CRASH3), jelikož lépe odrážejí skutečný tvar poškození.

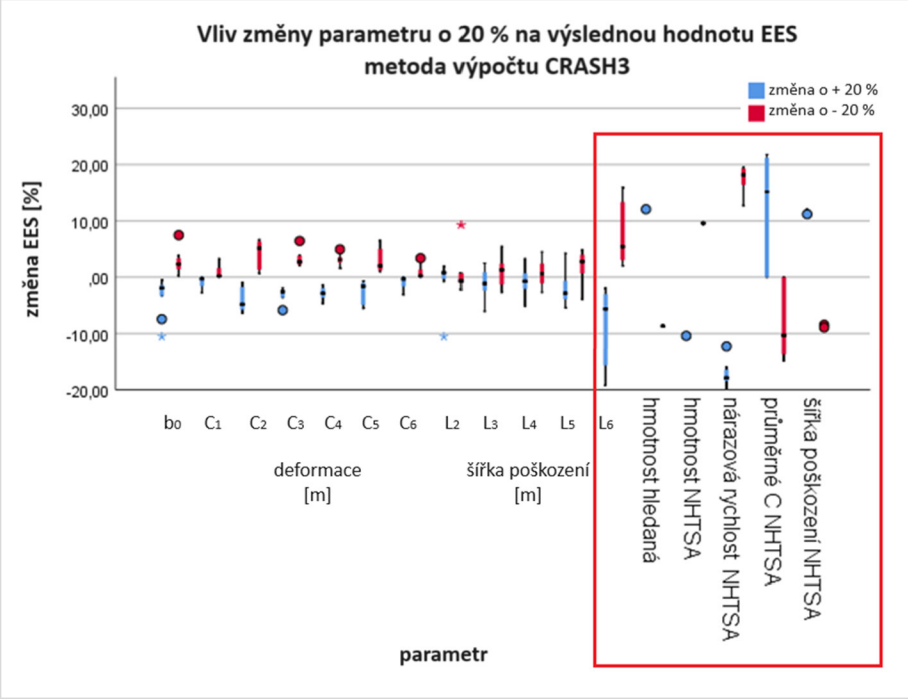
V případech, kdy použijeme 2 měřicí body a metodu výpočtu dle Vangiho [117], [119], [120] (viz *obr. 2*, červený rámeček), která využívá aproximaci poškozené oblasti pomocí jednoduché geometrie (trojúhelník, obdélník a lichoběžník), byl výpočet *EES* bližší hodnotám reálné hodnoty

EES, ale i zde byly zaznamenány výrazné odchylky pro střety s částečným překrytím (do 30 %). Trojúhelníková metoda se nebyla nevhodná pro tento typ střetů.



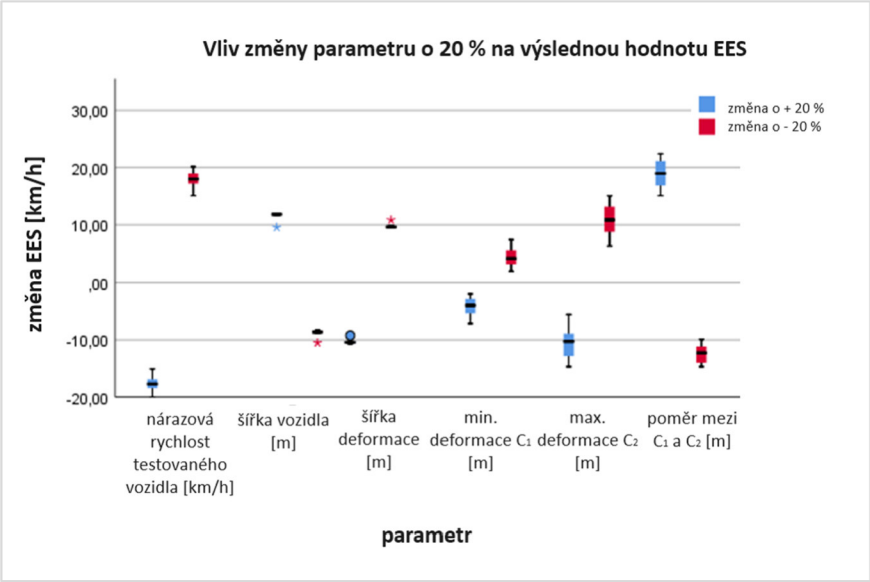
Obr. 2: Odchylky od reálné hodnoty EES pro počet měřicích bodů (2 měřicí body pro trojúhelníkovou metodu; 6 až 12 bodů pro CRASH3) [133]

Vliv vstupních parametrů na výslednou hodnotu *EES* byla následně ověřena pomocí citlivostní analýzy, jak pro metodu CRASH3, tak pro Trojúhelníkovou metodu. V citlivostní analýze byl variován vždy jen jeden vstupní parametr výpočtu o 20 % a následně byl zkoumán vliv na výsledný výpočet hodnoty *EES*. Z citlivostní analýzy výpočetního algoritmu CRASH3 (*obr. 3*) bylo zřejmé, že každý parametr byl různě citlivý při 20% variování. Výrazná změna nastala převážně u převzatých parametrů z vybraného substitutu (dostupné z databáze NHTSA), jako byla hmotnost vozidla, nárazová rychlost šířka poškození a zejména průměrná hloubka deformace. Z těchto parametrů se následně vypočítaly koeficienty tuhosti, které byly důležitou součástí výpočetního algoritmu. Celková šířka deformace zkoumaného vozidla, která na *obr. 3* představovala parametr L_6, vykazovala opět výraznou změnu, a to přibližně o kolo 20 %. Při variování parametrů b_0 a C_1 až C_6 došlo k minimálním změnám, cca do 5 %.



Obr. 3: Citlivostní analýza výpočtu EES – CRASH3 [133]

Citlivostní analýza Trojúhelníkové metody je zobrazená na *obr. 4*. Autor metody [117], [119], [120] podrobně nepopisuje metodu zaměření poškození, výpočet byl velmi citlivý na zadané vstupní parametry a pokud bylo analyzované poškození chybně zaměřeno docházelo k nadhodnocení výsledné hodnoty *EES*. Tento fakt potvrdila citlivostní analýza výpočtu *EES* pro trapézové poškození, viz *obr. 4*, kdy byl zkoumán vliv změny jednotlivých parametrů (vstupujících do výpočtu) o 20 % na výslednou hodnotu *EES*. Z výsledů bylo patrné, že stanovená hloubka deformace, resp. poměr mezi hodnotami C_1 a C_2 došlo ke změně *EES* až o cca 23 %.



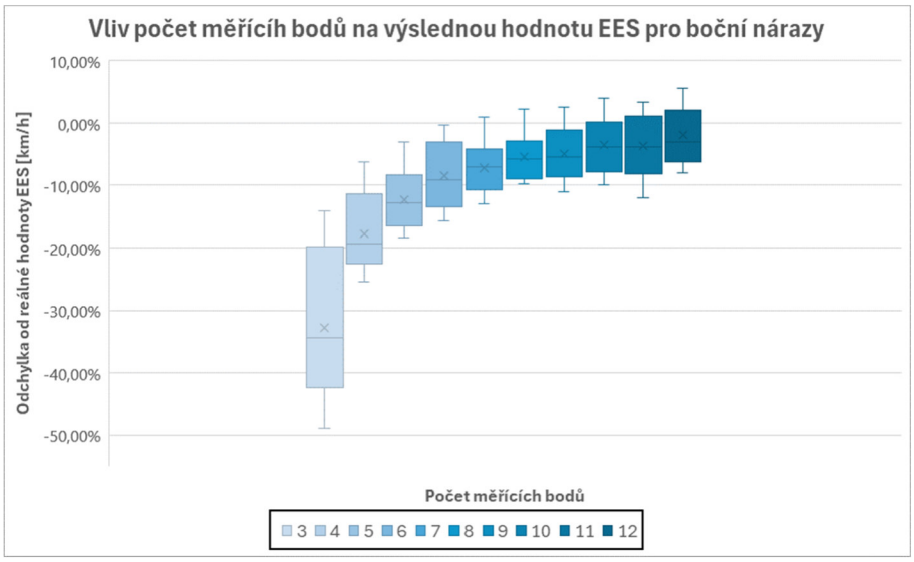
Obr. 4: Citlivostní analýza výpočtu EES – Trojúhelníková metoda [133]

5.3 ANALÝZA VLIVU ZAMĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE NA VÝSLEDNOU HODNOTU *EES* PRO BOČNÍ NÁRAZY

Hodnotu *EES* pro boční nárazy lze stanovit například pomocí třetího Newtonova zákona. Výpočet byl využíván zejména u střetů na stykové křižovatce, kdy byla známá hodnoto *EES* alespoň jednoho vozidla. Za předpokladu známé hodnoty *EES* a známé průměrné hloubky plastické deformace C_p oponenta (druhého vozidla), lze vypočítat maximální sílu F_{max}, která je pro obě vozidla během střetu stejná. Cílem této analýzy bylo zejména ověřit vliv stanovení a zaměření profilu deformace (resp. stanovení výšky, ve které má být profil deformace měřen, a počtu měřicích bodů) na výslednou hodnotu *EES*.

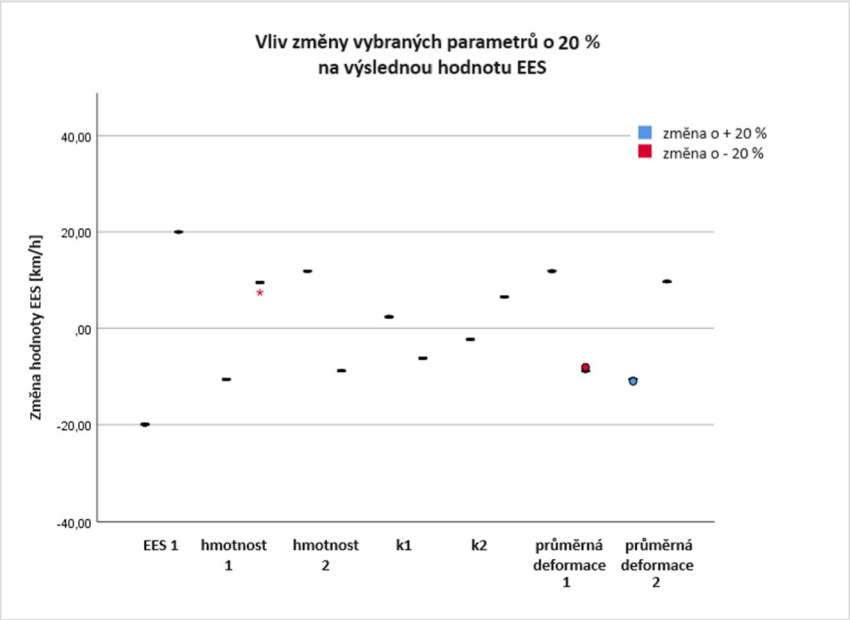
Charakter poškození při bočních nárazech byl oproti čelním střetům odlišný. I zde se ohledně stanovení počtu měřicích bodů nebo výšky, ve které docházelo k měření profilu deformace, názory různí. Např. Tumbas a Smith [115] uvádějí, že profil deformace se stanoví v oblasti maximální deformace, ale v případě, kdy mezi měřenými hodnotami na úrovni maximální a minimální deformace dochází k odchylce více než 5 palců (12,7 cm) (kdy minimum je na úrovni prahu vozidla), je zapotřebí naměřené hodnoty zprůměrovat. Z výsledků analýzy bylo ale patrné, že průměrováním hodnot maxima a minima, docházelo k výraznému podhodnocení hodnoty *EES*.

Pro boční poškození bylo možné stanovit obdobný závěr jako v předchozí kapitole. S rostoucím počtem měřicích bodů docházelo ke zpřesnění hodnoty *EES*. Od 8 měřicích bodů, které byly rovnoměrně rozmístěny podél celé šířky deformace, již nedocházelo k výrazným odchylkám. S narůstajícím počtem měřicích bodů byla výsledná hodnota *EES* téměř konstantní.



Obr. 5: Analýza rozptylu měřicích bodů [133]

Citlivostní analýza vybraného výpočtu (stanovení *EES* pro boční nárazy) potvrdila předpoklad autorky, že s čím přesnějšími daty znalec pracuje, tím se k přesnější výsledné hodnotě *EES* dostane (odchylky jsou minimální).



Obr. 6: Citlivostní analýza – změna vybraných parametrů o 20 % [133]

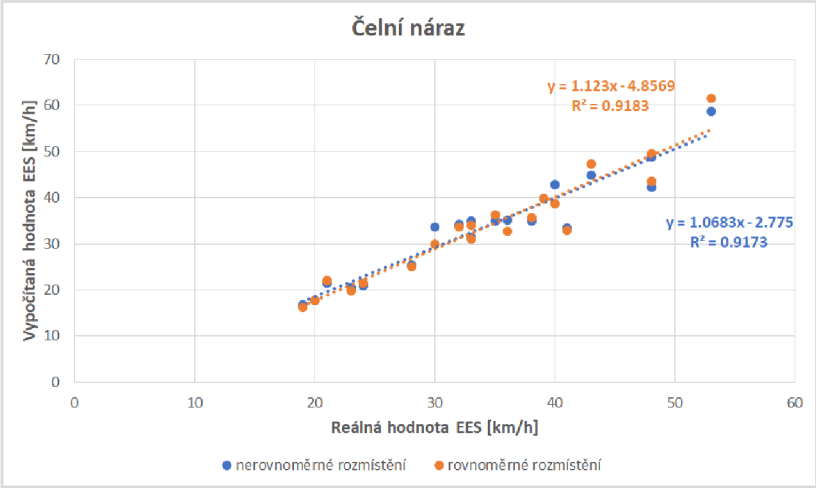
5.4 ANALÝZA VLIVU ZAMĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE NA VÝSLEDNOU HODNOTU *EES*

Pro zaměření profilu deformace vozidla neexistuje jednotný postup, jak daný profil deformace zaměřit. Dostupné matematické modely využívají pro výpočet deformační energie, resp. hodnoty *EES*, rovnoměrné rozložení měřicích bodů podél celé šířky deformace, ve kterých je následně měřena hloubka deformace. Rovnoměrně rozmístěné měřicí body se široce využívají v laboratorních podmínkách (nárazové zkoušky) nebo při následném zpracování dat z místa dopravní nehody. V praxi, zejména na místě dopravní nehody, může být rovnoměrné měření profilu deformace obtížné nebo nepřesné, což ve svých studiích popsal Struble nebo Vomhof [106], [126]. Cílem této kapitoly bylo zjisti možné rozdíly v metodice měření pomocí rovnoměrného a nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů.

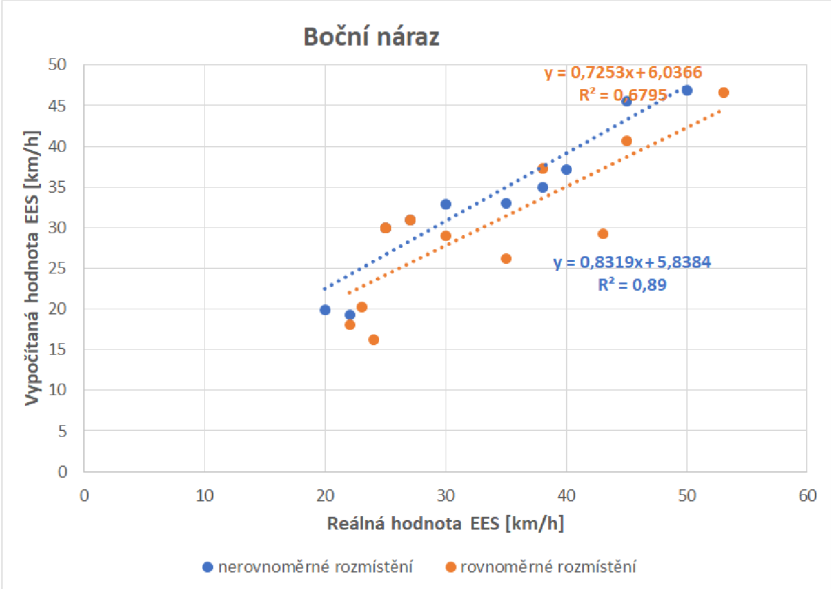
Z výsledků bylo patrné, že nerovnoměrné rozmístění měřicích bodů mohlo vést ke zpřesnění výsledné hodnoty *EES*, což potvrzují i závěry popsané Vomhofem [126]. Při využití nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů musí být dodržena určitá pravidla, zejména pro čelní nárazy. V případě, že byl profil deformace nelineární, bylo důležité měřit hloubku deformace tam, kde docházelo k výrazné změně, v tzv. zlomových bodech. Pokud byl profil deformace měřen

pomocí rovnoměrné rozmístěných bodů, mohly být tyto body vynechány (např. maximální hloubka deformace), což mohlo vést k podhodnocení výsledné hodnoty *EES*.

Dále byla analyzována korelace mezi reálnou hodnotou *EES* a vypočítanou hodnotou *EES* při použití rovnoměrného a nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů. Míra korelace byla vyjádřená korelačním koeficientem, který byl vypočítám jako odmocnina z koeficientu spolehlivosti R^2. V případě čelního nárazu (viz *obr. 7*) byly korelační koeficienty téměř shodné pro obě metody měření a dosahují hodnot 0,958. V případě bočního nárazu (viz *obr. 8*) byly koeficienty odlišné, kdy pro nerovnoměrné rozmístění korelační koeficient dosahoval hodnoty 0,943 a rovnoměrné rozmístění 0,824. Rozdíly byly zde značné a hodnoty byly ovlivněny nelineárním profilem deformace. Vyšší počet měřicích bodů by mohl výrazně zpřesnit výsledek.



Obr. 7: Korelace mezi reálnou hodnotou EES a vypočítanou hodnotou EES – čelní náraz [133]



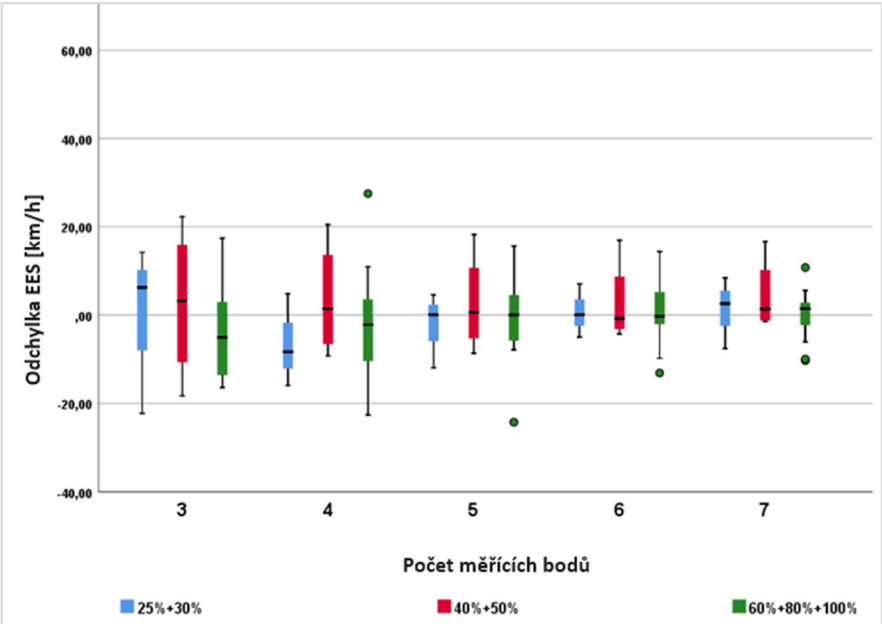
Obr. 8: Korelace mezi reálnou hodnotou EES a vypočítanou hodnotou EES – boční náraz [133]

V případě bočního nárazu bylo důležité stanovit co nejpřesnější průměrnou hloubku deformace (vážený průměr nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů) a měřicí body soustředit do tzv. zlomových bodů, které lépe odrážely reálný profil deformace. Následně se jevilo jako vhodnější využívat pouze 3D model poškozeného vozidla pro analýzu bočních nárazů, kterým byl následně proveden 2D řez. Porovnáním nepoškozeného a poškozeného 3D modelu docházelo ke špatnému stanovení profilu deformace, který mohl výrazně ovlivnit konečný výsledek hodnoty *EES*.

5.5 NÁVRH METODY PRO MĚŘENÍ PROFILU DEFORMACE VOZIDLA A OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI NAVRŽENÉ METODY

Na základě výše uvedených analýz bylo zjištěno, že výpočet *EES* ovlivňuje řada faktorů při dokumentaci poškození vč. samotného zaměření. Pokud není možná dokumentace poškození na místě dopravní nehody jednou z výše uvedených metod, je vhodné využít jejich kombinaci. V případě stanovení profilu deformace je zapotřebí využívat více metod měření, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího výsledku. Na místě dopravní nehody může být tato metoda nevhodná nebo obtížně využitelná. Znalec/odborník potřebuje co nejrychleji a nejpřesněji zaměřit profil deformace a v případě využití vyššího počtu měřicích bodů dochází k nárustu času, který je potřebný pro dokumentaci/zaměření. Z tohoto důvodu je nutné zvolit odlišnou metodu měření profilu deformace, tak aby byla využitelná a efektivní i na místě dopravních nehod.

Navržená metoda zaměření profilu deformace s nerovnoměrným rozmístěním měřicích bodů podél celé šířky deformace se jevila jako metoda velmi přesná. Metoda zaměření byla vhodná i pro střety s částečným překrytím nebo pro střety s pevnou/úzkou překážkou (strom, sloup apod.) s využitím výpočetního algoritmu CRASH3. V případě, že profil deformace byl stanoven pomocí měřicích bodů na konci a na začátku deformace s následným rozmístěním měřicích bodů podél tuhé výztuhy dle tzv. zlomových bodů, došlo při využití 7 měřicích bodů k odchylkám od reálné hodnoty *EES* do 5 % (viz *obr.9*). Tato odchylka neměla takřka žádný vliv na analýzu nehodového děje.

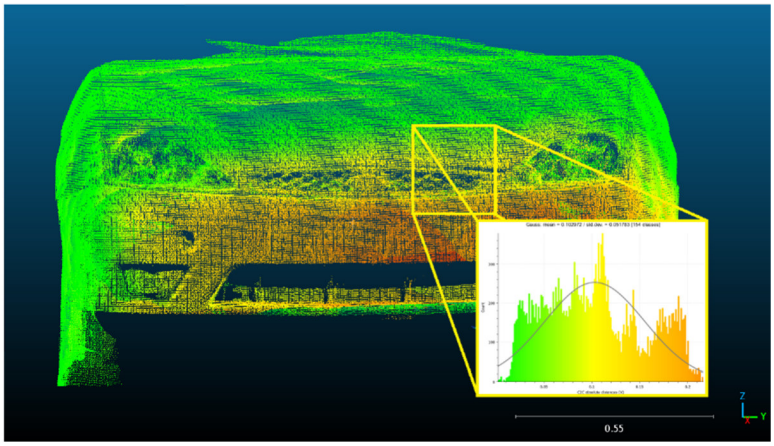


Obr. 9: Vliv počtu nerovnoměrně rozmístěných měřicích bodů na hodnotu EES – překrytí při střetu [133]

5.6 3D ANALÝZA POŠKOZENÍ VOZIDEL

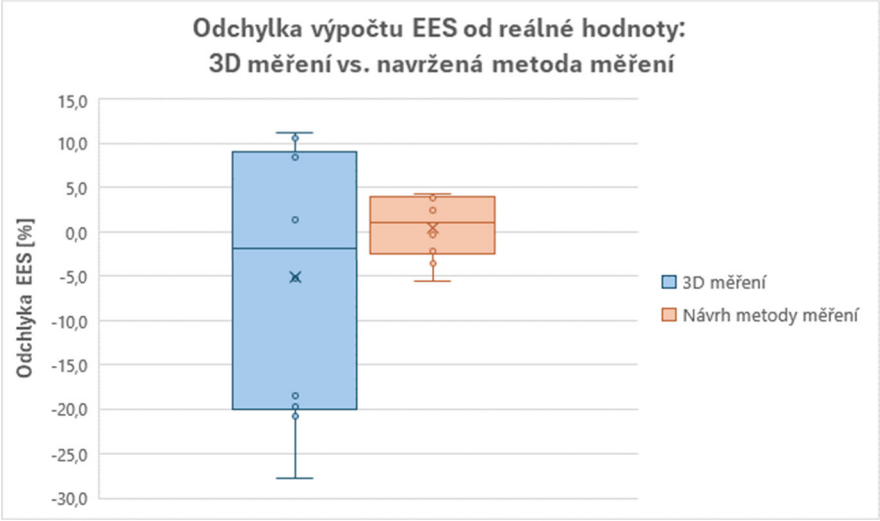
Na základě literární rešerše je zřejmé, že dochází k značnému vývoji v oblasti využívání metod dokumentace. Cílem této kapitoly bylo zjistit možné rozdíly při použití matematických modelů pro 2D a 3D analýzu poškození vozidla a stanovení hodnoty *EES*. Dále se jeví jako důležité, položit otázku, jak jsou tyto metody využitelné pro soudně inženýrkou praxi a existují výhody či limitace v případě použití pro analýzu nehodového děje?

V každém segmentu došlo k porovnání naměřených dat s referenčními daty. Na základě zjištěných odchylek bylo možné sestavit pro každý segment histogram vč. průměrné odchylky mezi naměřenými a referenčními daty (viz *obr. 10*), který program ve stanovené oblasti vypočítá.



Obr. 10: Histogram odchylek měření pro vybraný segment [133]

Výsledky 3D analýzy byly statisticky porovnány s reálnými hodnotami *EES*, které byly získány z dat nárazových testů. Z výsledků bylo patrné, že v případě korektní 3D dokumentace byla odchylka *EES* minimální. Pokud ale docházelo vlivem střetu k překrytí deformace kapotou či poškozeným nárazníkem, jednalo se o tzv. skrytou deformaci, která zapříčiní podhodnocení hodnoty *EES*. I když byla 3D dokumentace jedna z nejpřesnějších metod dokumentace, skrytá deformace byla jednou z významných limitací, která nelze při porovnání referenčních a naměřených dat eliminovat. Tato problematika výrazně ovlivňovala i níže uvedený graf na *obr. 11.* K podhodnocení došlo u 4 případů z 10. A i když medián a průměr odchylek *EES* byl v přijatelném rozmezí, tak 75. percentil a rozptyl odchylek *EES* zobrazoval výrazné podhodnocení hodnoty *EES* (téměř až o 30 %).



Obr. 11: Výsledky 3D a 2D analýzy poškození vozidel [133]

3D dokumentace místa dopravní nehody a analýza poškození vozidel začíná být ve forenzní praxi stále častějším tématem. 3D analýza poškození má i přes velký potenciál značné limitace. Pokud není zajištěna přímá viditelnost na zájmovou oblast poškození vozidla, nemusí být zajištěna dostatečná kvalita získaných dat, resp. mračna bodů. Kvalita získaných dat může ovlivnit analýzu poškození vozidla. Zejména v případě skryté deformace by bylo vhodné tuto metodu kombinovat s metodami, které umožňují doměření skryté deformace. V určitých případech by bylo dobré zvážit i odstranění výrazně poškozených částí karoserie pro získání reálného profilu deformace.

6 DISKUSE

Komplexní analýza nehodového děje je závislá zejména na kvalitní dokumentaci místa dopravní nehody vč. samotných vozidel. Chybná analýza rozsahu poškození a stanovení profilu deformace, který je důležitou součástí výpočtu deformační energie, může ovlivnit průběh analýzy nehodového děje a závěry znaleckých posudků.

V této práci byly zkoumány limitace a výhody jednotlivých metod dokumentace poškození v reálných podmínkám na místě dopravní nehody. Autorka dizertační práce spatřuje přínos práce již v uceleném souboru limitací a výhod metod dokumentace a validaci využitelnosti těchto metod v reálných podmínkách. Na základě provedených analýz lze doporučit v některých případech pro dokumentaci poškození vozidla kombinaci metod 2D a 3D zobrazení, a to zejména v případech, kdy není možná přímá viditelnost na zkoumané poškození. Bylo prokázáno, že v těchto případech může i využití nejmodernějších 3D metod dokumentace vést k nepřesnému stanovení profilu deformace a chybnému stanovení hodnoty *EES*.

Dále byl formou citlivostní analýzy detailně zkoumán vliv vybraných faktorů na výslednou hodnotu *EES* při použití výpočetního algoritmu CRASH3, při použití rovnoměrného rozložení měřicích bodů, a to jak pro čelní, tak i boční nárazy. Zažitá metoda měření profilu deformace, tak jak je uvedena v [115], nemusí být vždy ideální v reálných podmínkách na místě dopravní nehody. Měřené body, pro získání profilu deformace bývají rozloženy rovnoměrně podél stanovené šířky deformace, což může být v reálných podmínkách velmi omezující, a může dojít k vynechání důležitých bodů pro stanovení co nejpřesnějšího profilu deformace. Z tohoto důvodu byl analyzován vliv rovnoměrného a nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů na výslednou hodnotu *EES*. Na základě všech zjištěných poznatků byla navržena metoda zaměření profilu deformace tak, aby co nejlépe kopírovala profil deformace s co nejpřesnějším výsledkem hodnoty *EES*. Navržená metoda pro stanovení profilu deformace je jednoduchá, rychlá a využitelná na místě dopravní nehody. Metoda měření zpřesnila výsledný výpočet hodnoty *EES* a jevila se jako využitelná pro zkoumané typy střetů. Právě návrh jednoduché, a přesto přesné a efektivní metody dokumentace lze hodnotit jako hlavní přínos této dizertační práce. Metoda reflektuje stávající stav poznání v soudně-inženýrské praxi. Finanční náročnost, vyšší nároky na uchování a zpracování těchto dat, jsou častou překážkou pro běžné využívání moderních metod dokumentace ve stávající policejní i znalecké činnosti.

Navržená metoda byla dále porovnána 3D analýzou poškození vč. stanovení hodnoty *EES*. I když se 3D analýza poškození jeví jako nejpřesnější, má řadu limitací, které musí uživatel brát v potaz. Provedená analýza doložila, že 3D analýza poškození je velmi složitý a výpočetně náročný

proces. Referenční 3D data, resp. nepoškozený 3D model vozidla musí mít znalec k dispozici, což může být pro znalce značná limitace jak z hlediska náročnosti zpracování 3D modelu, tak z pohledu potřebnosti velkého uložiště pro využívané 3D modely vozidel. 3D analýza může tedy zvyšovat nároky na samotného znalce i náročnost znaleckých posudků, často však bez podstatného přínosu. Vzniklé systematické chyby 3D analýzy, zejména nemožnost dokumentace skryté deformace nebo nedostatečné bodové mračno, mohou být korigovány kombinací využívaných metod dokumentace poškození. Kombinace metod dokumentace a následné stanovení profilu deformace opět vedlo k využívání 2D analýzy poškození v součinnosti s navrženou metodou měření jak pro svou jednoduchost, tak i využitelnost v reálných podmínkách.

Získané výsledky mohou dále sloužit k dalším výzkumům v oblasti získání hodnot *EES* pomocí umělé inteligence, jelikož nové metody a technické pokroky neopomíjejí ani forenzní praxi.

7 LIMITACE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce narážela na řadu limitací, mezi které patří:

- Práce s omezeným datovým souborem. Jeho navýšení by mohlo zpřesnit získané výsledky statistické analýzy. Datový soubor obsahoval pouze výběr určitých kategorií vozidel, směrů působící síly a překrytí při střetu. Do budoucna by bylo vhodné datovou základnu rozšířit i o střety s malým překrytím vč. zahrnutí všech kategorií vozidel.
- Pro výpočet hodnoty *EES* byl použit zejména nejvyužívanější výpočetní algoritmus CRASH3, což může být částečnou limitací zjištěných hodnot *EES*. Využití více matematických modelů by mohlo lépe odrážet potřeby pro stanovení profilu deformace pro různé matematické modely.
- Další limitace byla spatřována ve výběru porovnatelného vozidla, díky kterému byly vypočteny koeficienty tuhosti a dále aplikovány do výpočetního algoritmu CRASH3. Pro výpočet hodnoty *EES* bylo vždy využito jen jedno porovnatelné vozidlo. Pokud by stanovení hodnoty *EES* nevycházelo pouze z výběru jednoho porovnatelného vozidla, došlo by k získání přesnějších výsledků hodnoty *EES*.
- 3D analýza poškození a následná aplikace na výpočetní model, který využíval data z nárazových testů a tuhé nedeformovatelné bariéry (ze snímačů síly), byla limitována využitím programu Cloud Compare, který je sice poskytován na porovnání 3D dat zdarma, ale jeho přesnost porovnání mohla být ovlivněná zjednodušeným výpočtem odchylek. Další omezení bylo spatřováno v nejistotě

směru počítání odchylek mezi 3D modely. Program si sám vybere, v jakém směru bude odchylky počítat a pokud bylo získané mračno bodů 3D modelů nedostatečné nebo ředěné, mohl být výsledný výpočet *EES* ovlivněn touto skutečností. Pro zpřesnění 3D analýzy by bylo vhodné porovnat mezi sebou využívané programy na 3D porovnání a zjistit, s jakou odchylkou pracují a jak tato odchylka může ovlivnit výsledný výpočet *EES*.

- Přesnost 3D analýzy byla dále limitována v případě tzv. skryté deformace vozidla. Pokud by tento problém byl vyřešen již při samotném získávání 3D dat zkoumaného vozidla, nedošlo by k tak výraznému podhodnocení výsledné hodnoty *EES*.
- Výsledky nebyly porovnány s daty EDR, která by následně mohla zpřesnit závěry analýzy.

8 ZÁVĚR A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Komplexní analýza nehodového děje je závislá zejména na kvalitní dokumentaci místa dopravní nehody vč. samotných vozidel. Chybná analýza rozsahu poškození a stanovení profilu deformace, který je důležitou součástí výpočtu deformační energie, může ovlivnit průběh analýzy nehodového děje a závěry znaleckých posudků.

V této práci byly zkoumány limitace a výhody jednotlivých metod dokumentace poškození v reálných podmínkám na místě dopravní nehody. Autorka dizertační práce spatřuje přínos práce již v uceleném souboru limitací a výhod metod dokumentace a validaci využitelnosti těchto metod v reálných podmínkách. Na základě provedených analýz lze doporučit v některých případech pro dokumentaci poškození vozidla kombinaci metod 2D a 3D zobrazení, a to zejména v případech, kdy není možná přímá viditelnost na zkoumané poškození. Bylo prokázáno, že v těchto případech může i využití nejmodernějších 3D metod dokumentace vést k nepřesnému stanovení profilu deformace a chybnému stanovení hodnoty *EES*.

Dále byl formou citlivostní analýzy detailně zkoumán vliv vybraných faktorů na výslednou hodnotu *EES* při použití výpočetního algoritmu CRASH3, při použití rovnoměrného rozložení měřicích bodů, a to jak pro čelní, tak i boční nárazy. Zažitá metoda měření profilu deformace, tak jak je uvedena v [115], nemusí být vždy ideální v reálných podmínkách na místě dopravní nehody. Měřené body, pro získání profilu deformace bývají rozloženy rovnoměrně podél stanovené šířky deformace, což může být v reálných podmínkách velmi omezující, a může dojít k vynechání důležitých bodů pro stanovení co nejpřesnějšího profilu deformace. Z tohoto důvodu byl analyzován vliv rovnoměrného a nerovnoměrného rozmístění měřicích bodů na výslednou

hodnotu *EES*. Na základě všech zjištěných poznatků byla navržena metoda zaměření profilu deformace tak, aby co nejlépe kopírovala profil deformace s co nejpřesnějším výsledkem hodnoty *EES*. Navržená metoda pro stanovení profilu deformace je jednoduchá, rychlá a využitelná na místě dopravní nehody. Metoda měření zpřesňuje výsledný výpočet hodnoty *EES* a jeví se jako využitelná pro řadu zkoumaných střetů. Právě návrh jednoduché, a přesto přesné a efektivní metody dokumentace lze hodnotit jako hlavní přínos této dizertační práce. Metoda reflektuje stávající stav poznání v soudně-inženýrské praxi. Finanční náročnost, vyšší nároky na uchování a zpracování těchto dat, jsou častou překážkou pro běžné využívání moderních metod dokumentace ve stávající policejní i znalecké činnosti.

Navržená metoda byla dále porovnána 3D analýzou poškození vč. stanovení hodnoty *EES*. I když se 3D analýza poškození jeví jako nejpřesnější, má řadu limitací, které musí uživatel brát v potaz. Provedená analýza také dokládá, že 3D analýza poškození je velmi složitý a výpočetně náročný proces. Referenční 3D data, resp. nepoškozený 3D model vozidla musí mít znalec k dispozici, což může být pro znalce značná limitace jak z hlediska náročnosti zpracování 3D modelu, tak z pohledu potřebnosti velkého uložiště pro využívané 3D modely vozidel. 3D analýza může tedy zvyšovat nároky na samotného znalce i náročnost znaleckých posudků, často však bez podstatného přínosu. Vzniklé systematické chyby 3D analýzy, zejména nemožnost dokumentace skryté deformace nebo nedostatečné bodové mračno, mohou být korigovány kombinací využívaných metod dokumentace poškození. Kombinace metod dokumentace a následné stanovení profilu deformace opět vede k využívání 2D analýzy poškození v součinnosti s navrženou metodou měření jak pro svou jednoduchost, tak i využitelnost v reálných podmínkách.

Získané výsledky mohou dále sloužit k dalším výzkumům v oblasti získání hodnot *EES* pomocí umělé inteligence, , jelikož nové metody a technické pokroky neopomíjejí ani forenzní praxi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ALEXANTONAKIS, Pavlos a TSAKIRI, Maria. *The Use of Terrestrial Laser Scanning for Post-Accident Deformation Evaluation of a Train Wagon. Environmental Science*. 2015.

[2] APPEL, Hermann; KRABBEL, Gerald a VETTER, Dirk. *Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*. Online. 2nd Edition. Springer Book Archive, 2002. ISBN 978-3-322-83030-2.

[3] Apple Inc., 2020. May 2, *Apple unveils new iPad pro with LIDAR Scanner and trackpad support in ipados*. Apple Newsroom (Canada). Retrieved May 2, 2022. Dostupné z: http://www.apple.com/ca/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/. [cit. 2023-10-12].

[4] ARTESE, Serena a PERRELLI, Michele. *Monitoring a Landslide with High Accuracy by Total Station: A DTM-Based Model to Correct for the Atmospheric Effects*. Geosciences, 2018, roč. 8, č. 2. ISSN 2076-3263. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/geosciences8020046. [cit. 2023-10-12].

[5] BAKER, Stannard J a Lynn B FRICKE. *Traffic crash investigation. Evanston: Northwestern University Center for public safety*. 2017, viii, 589 stran. ISBN 978-1-63315-175-8.

[6] BARTLETT, Wade; WRIGHT, William; MASORY, Oren; BRACH, Raymond; BAXTER, Al a kol. *Evaluating the Uncertainty in Various Measurement Tasks Common to Accident Reconstruction. SAE Transactions*, Vol. 111, Section 6: JOURNAL OF PASSENGER CAR: MECHANICAL SYSTEMS JOURNAL. 2002, s. 657-668. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2002-01-0546. [cit. 2023-03-12].

[7] BECKE, Manfred a SCHLOTTBOM, Severin. *Ermittlung der Gesamtdeformationsenergieaufnahme von zwei Unfallfahrzeugen auf Basis von vereinfachten Kraft-Weg-Kennungen aus Crashtestdaten*. Online. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. Juni 2015. Dostupné z: https://www.ureko.de/wp/wp-content/uploads/2019/12/2015.06-Ermittlung-der-Gesamtdeformationsenergieaufnahme-von-zwei-Unfallfahrzeugen-auf-Basis-von-vereinfachten-Kraft-Weg-Kennungen-aus-Crashdaten-Becke-Schlottbom.pdf. [cit. 2024-03-12].

[8] BECKE, Manfred. *Probleme, Fehler und Besonderheiten bei der EES-Einstufung*. Online. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 09/2006. Dostupné z: https://www.ureko.de/wp/wp-content/uploads/2019/12/2006.09-Heft-9-Probleme-Fehler-und-Besonderheiten-bei-der-EES-Einstufung.pdf. [cit. 2024-03-12].

[9] BECKE, Manfred. *Unzutreffende EES-Schätzungen und ihre Auswirkungen auf das Rekonstruktionsergebnis – Die Bedeutung von EES-Versuchen*. Online. In: Verkehrsunfall und

Fahrzeugtechnik, Heft 05/2008. Dostupné z: https://www.ureko.de/wp/wp-content/uploads/2019/12/VRR-2008.05-BECKE-Unzutreffende-EES-Sch%C3%A4tzungen-und-ihre-Auswirkungen-auf-das-Rekonstruktionsergebnis-Die-Bedeutung-von-EES-Versuchen.pdf. [cit. 2024-03-12].

[10] BODDORFF, Thomas C. a JONES, Ian S. *Simple Overhead Photography Techniques for Vehicle Accident Reconstruction* (No. 900370), SAE Technical Paper, 1990. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/900370. [cit. 2023-01-24].

[11] BÖHM, Klaus; KUBJATKO Tibor; PAULA Daniel a SCHWEIGE Hans-Georg. *New developments on EDR (Event Data Recorder) for automated vehicles*. 2020, 140–146. DOI: https://doi.org/10.1515/eng-2020-0007.

[12] BORTLES, William; BIEVER, Wayne; CARTER Neal a SMITH Connor. *A Compendium of Passenger Vehicle Event Data Recorder Literature and Analysis of Validation Studies*. (No. 2016-01-1497), SAE Technical Paper. 2016.DOI: https://doi.org/10.4271/2016-01-1497.

[13] BRADÁČ, A. a kol. *Soudní inženýrství.* 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999. 725 s. ISBN 80-7204-133-9.

[14] BRACH, Matthew R. a BRACH, Raymond M. *Crush Energy and Planar Impact Mechanics for Accident Reconstruction*. (No. 980025), SAE Technical Paper, 1998. DOI:10.4271/980025.

[15] BRACH, Matthew; BRACH, Raymond M. a LOUDERBACK, Andrew. *Uncertainty of CRASH3 ΔV and Energy Loss for Frontal Collisions* (No. 2012-01-0608). SAE Technical Paper, 2012. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2012-01-0608. [cit. 2024-01-03].

[16] BREITLAUCH Pascal; JUNGE, Mirko; ERBSMEHL, Christian; SANDNER, Volker a VAN RATINGEN, Michiel. Converting post-crash deformation into energy equivalent speed (EES): Toward an objective measure of crash severity. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2022. Dostupné z: https://doi.org/10.1177/09544070231186842. [cit. 2023-12-10].

[17] BREITLAUCH, Pascal. *Eine neuartige Stoßberechnungsmethode für Pkw-Kollisionen basierend auf Energy Equivalent Speed (EES)-Modellen*. Online. Dostupné z: https://www.ivi.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/fahrzeug-und-antriebstechnik/fahrzeug-und-verkehrssicherheit/unfallsimulation/calculateees---eine-objektive-schaetzung.html. [cit. 2024-03-02].

[18] BREITLAUCH, Pascal; ERBSMEHL, Christian; RATINGEN, Michiel; MALLADA, Jorge L.; SANDNER, Volker; FERSON, Niels a URBAN, Martin. *A Novel Method for the Automated Simulation of Various Vehicle Collisions to Estimate Crash Severity*. Traffic Injury Prevention 24, no. sup1 (2023): S116–23. DOI:10.1080/15389588.2022.2159761.

[19] BUCK, Ursula; NAETHER, Silvio; BRAUN, Marcel; BOLLIGER, Stephan; FRIEDERICH, Hans; JACKOWSKI, Christian; AGHAYEV, Emin; CHRISTE, Andreas; VOCK, Peter; DIRNHOFER, Richard a THALI, Michael J. *Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: With high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation*. 2007, 170(1), 20–28. DOI: 10.1016/j.forsciint.2006.08.024.

[20] BUCSUHÁZY, Kateřina; MORAVCOVÁ, Pavlína; SEMELA, Marek; BILÍK, Martin; MIKULEC, Roman; KŘIŽÁK, Michal; BELÁK, Michal; BRADÁČ, Albert; DLUGOŠ, J. a ZŮVALA, Robert. Analýza poškození vozidel: Průvodce metodami dokumentace a kvantifikace deformační energie. 1. 1. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2023. 271 s. ISBN: 978-80-88655-00-8.

[21] BURG, Heinz a MOSER, Andreas. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation.* 2017. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-658-16143-9. [cit. 2023-12-15].

[22] BURG, Heinz a RAU, Hartmut. *Handbuch der verkehrsunfall-Rekonstruktion. 1. vyd. Kippenheim: Verl*. Information Ambs, 1981. ISBN 38-855-0020-5.

[23] BURG, Heinz a ZEIDLER, F. 1980. *EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung.* Der Verkehrsunfall, S. 75-78.

[24] CALLAHAN, Michael Andrew; LEBLANC, Beau; VREELAND, Regan a BRETTING, Gerard. *Close-Range Photogrammetry with Laser Scan Point Clouds*. (No. 2012-01-0607). SAE Technical Paper, 2012. DOI:10.4271/2012-01-0607.

[25] CAMPBELL, Kenneth L. *Energy Basis for Collision Severity*. Online. Warrendale: SAE International, 1974. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/740565. [cit. 2023-02-16].

[26] COLEMAN, Clay; TANDY, Donald; COLBORN, Jason a AULT, Nicholas. *Applying Camera Matching Methods to Laser Scanned Three Dimensional Scene Data with Comparisons to Other Methods* (No. 2015-01-1416). SAE Technical Paper, 2015. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2015-01-1416. [cit. 2023-11-10].

[27] COMEAU, Jean-Louis; DALMOTAS, Dainius J.; GERMAN, Alan; MONK, Brian a TRÉPANIER, Daniel. *Crush Measurement for Side Impacts Using a Total Station*. (No. 960100). SAE Technical Paper Series, 1966. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/960100. [cit. 2023-11-25].

[28] COOKSON, R.; RICHARDS, D. C. a CUERDEN, R. W. *The accuracy of vehicle damage based protocols to quantify impact severity*. Online. International Symposium on ESAR "Expert Symposium on Accident Research", 3rd, 2008. Hannover (Germany). 2009, s. 204–212. Dostupné z: https://trid.trb.org/view/1152109. [cit. 2023-01-06].

[29] COSTANTINO, Domenica; VOZZA, Gabriele; PEPE, Massimiliano a ALFIO, Vincenzo Saverio. *Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges*. Online. Applied System Innovation. 2022, roč. 5, č. 4, s. 63. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/asi5040063. [cit. 2023-07-20].

[30] COUFAL, Tomáš. Analýza tuhosti přední části vozidel. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2014.

[31] COYNE, M; SPEK, A.; REYNOLDS, J.; ESSEN, J. a BOT, H. *Vehicle Fault Memory Data Extraction and Interpretation*. 19. EVU Conference, 2010. Prague.

[32] DAILY, Jeremy; SHIGEMURA Nathan. Damage Profile Measuring Procedures, presentace. Online. 2005. Dostupné z: http://www.jhscientific.com/downloads/DamageProfileMeasuringProcedures.pdf. [cit. 2023-04-01].

[33] DAILY, Jeremy; STRICKLAND Russell a DAILY, John. *Crush Analysis with Under-rides and the Coefficient of Restitution:* Institute of Police Technology and Management's, 24th Annual Special Problems in Traffic Crash Reconstruction. 2006, s. 1-77.

[34] DAMYANOV, Iliyan S. *Use of modern software solutions and systems for analysis and reconstruction of road accidents*. Online. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, roč. 878, č. 1, s. 012043. IOP Publishing. ISSN: 1757-8981. Dostupné z: https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012043. [cit. 2023-02-04].

[35] DESAI, Jairaj; LIU, Jidong; HAINJE, Robert; OLEKSY, Robert; HABIB, Ayman a BULLOCK, D. *Assessing vehicle profiling accuracy of handheld LiDAR compared to terrestrial laser scanning for crash scene reconstruction*. Online. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 23. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/s21238076. [cit. 2023-02-04].

[36] DU, Xinguang; JIN, Xianlong; ZHANG, Xiaoyun; SHEN, Jie a HOU, Xinyi. *Geometry features measurement of traffic accident for reconstruction based on close-range photogrammetry*. Online. Advances in Engineering Software. 2009, roč. 40, č. 7, s. 497-505. Dostupné z: https://.org/ 10.1016/j.advengsoft.2008.09.002. [cit. 2023-02-07].

[37] DUSTIN, David a LISCIO, Eugene. *Accuracy and Repeatability of the Laser Scanner and Total Station for Crime and Accident Scene Documentation*. J AssocCrime Scene Reconstr. 2016; 20:57-67.

[38] ERBSMEHL, C.: *Ein neues 3-dimensionales Energy Equivalent Speed (EES)-Modell für Fahrzeuge basierend auf Unfalldaten*. Dissertation an der Der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden 2013.

[39] Erickson, Mark S.; BAUER, Jeremy J. a HAYES, Wilson C. *The Accuracy of Photo-Based Three-Dimensional Scanning for Collision Reconstruction Using 123D Catch* (No. 2013-01-0784), SAE Technical Paper, 2013. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2013-01-0784. [cit. 2023-12-20].

[40] FENTON, S., JOHNSON, W., LAROCQUE, J., ROSE, N. ET AL. *Using Digital Photogrammetry to Determine Vehicle Crush and Equivalent Barrier Speed (EBS).* (No. 1999-01-0439). SAE Technical Paper, 1999. DOI: https://doi.org/10.4271/1999-01-0439.

[41] FENTON, Stephen a KERR, Richard, *Accident Scene Diagramming Using New Photogrammetric Technique.* (No. 970944). SAE Technical Paper. 1997. DOI: https://doi.org/10.4271/970944.

[42] GEFOS A.S. Leica RTC360. Online. Dostupné z: https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/3d-laserove-skenovani/3d-laserove-skenery/rtc360. [cit. 2024-04-05].

[43] GODDARD, Chris a HANSEN, Per Bo. Finding Order In chaos: The Manual Of Collision Scene Evidence. Great Britain: Collision Science, 2017. ISBN 978-87-995320-2-5.

[44] GÖRTZ, Marco. Model určovania deformačných energií na vozidlách po dopravných nehodách. Dizertačná práca. Žilina: UZVV UNIZA, 2018.

[45] HAN, I.; KANG, Heejoon. Three-dimensional crush scanning methods for reconstruction of vehicle collision accidents. International journal of automotive technology, 2016, 17.1: 91-98.

[46] Harrington, Shawn a Lebak, Gabriel. *The Placement of Digitized Objects in a Point Cloud as a Photogrammetric Technique.* SAE International Journal of Transportation Safety. 2018, 6(2). DOI:10.4271/09-06-02-0007.

[47] Hoxha, Gezim; SHALA, Ahmet a LIKAJ, Rame. Vehicle Speed Determination in Case of Road Crash by Software Method and Comparing of Results with the Mathematical Model. Online. *Journal of Mechanical Engineering.* 2017, roč. 67, č. 2, s. 51–60. ISSN 2450-5471. Dostupné z: https//doi.org/10.1515/scjme-2017-0017. [cit. 2023-12-01].

[48] CHASE, Cassandra E. a LISCIO Eugene. *Technical Note: Validation of Recon-3D, iPhone LiDAR for bullet trajectory documentation*, Forensic Science International, Volume 350, 2023. ISSN 0379-0738. DOI: https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111787.

[49] Infineon. *Time-of-Flight Technology for Smartphones*. Online. ECN, 2019. Rockaway: Advantage Business Media. ISSN 1523-3081. [cit. 2023-08-15].

[50] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: Brána do řešení problémů*. Online. 2022. ISBN 978-80-7623-103-0. [cit. 2024-03-02].

[51] JOHANNSEN, Heiko. *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion Grundlagen der Unfallaufklärung, 3. Auflage Unfallforschung, Gliederungspunkt 3.5.1 Unfallschwere, Unfallkenngröße*. 2013, s. 47–52. Springer Vieweg-Verlag, Wiesbaden.

[52] KAMNIK, Rok; NEKREP PERC, Matjaž a TOPOLŠEK, Darja. *Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis*. Online. *Accident Analysis & Prevention*. 2020, roč. 135. ISSN 00014575. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105391. [cit. 2023-04-03].

[53] KAMNIK, Rok; TOPOLŠEK, Darja a LAKOVIĆ, Stanko. *Modern technologies and methods of data collection in the function of making better traffic analysis of forensic traffic experts*. Environmental engineering. 2022, roč. 9., 1-10. DOI: 10.37023/ee.9.1-2.1.

[54] KANG, Heejin a HAN Inhwan. 3-Dimensional Scanning/Modeling for Analysis of Vehicle Collision Accidents. Transactions of KSAE. 2017, 25(5), 541–547. DOI: https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.5.541. ISSN 2234-0149.

[55] KOHÚT, Pavol a KOLLA, E. *Berechnung des Delta-V verursacht durch die Kollisi-on von zwei Fahrzeugen für die Aus-wertung des Schleudertraumas*, 20. EVU-Jahrestagung, Graz, 2011.

[56] KOTTNER, Sören; THALI, Michael J. a GASCHO, Dominic. *Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes*. Online. Forensic Imaging. 2023, roč 32. ISSN 26662256. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535. [cit. 2023-10-16].

[57] KUBJATKO, Tibor.; GÖRTZ, M.; MACUROVA, L. a BALLAY, Michal. *Synergy of forensic and security engineering in relation to the model of deformation energies on vehicles after traffic accidents*. In Transport Means Procedings of the International Conference. 2018, s. 1342-1348.

[58] KUÇAK, Ramazan Alper; EROL, Serdar a ALKAN, Reha. *iPad Pro LiDAR sensörünün profesyonel bir yersel lazer tarayıcı ile karşılaştırmalı performans analizi (Comparative performance analysis of the iPad Pro LiDAR sensor with a professional terrestrial laser scanner).* Geomatik. 2023, 8. 35-41.Online. Dostupné z: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2380469.

[59] LIENHART, Werner. *Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions*. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2017, 7(3), 315–324. DOI:10.1007/s13349-017-0228-5.

[60] LUETZENBURG, Gregor; KROON, Aart a BJØRK, Anders Anker. *Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for anApplication in Geosciences*. Scientific Reports. 2021, roč. 11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-01763-9.

[61] LUHMANN, Thomas, ROBSON, Stuart, KYLE, Stephen and BOEHM, Jan. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging,* Berlin, Boston: De Gruyter, 2020. DOI: https://doi.org/10.1515/9783110607253.

[62] LUHMANN, Thomas; ROBSON, Stuart; KYLE, Stephen a BOEHM, Jan. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (English ed. 3*). 2019. DOI:10.1515/9783110607253-201. ISBN: 978-3-11-060724-6.

[63] MASSA, David J. a BARRETTE, Roger W. *Using Three-Dimensional Digitization to Model a Vehicle*. Online. SAE Transactions. 1998, s. 107, Section 6: Journal of passenger Cars, s. 929-940. Dostupné z: https//doi.org/10.4271/980377. [cit. 2023-11-15].

[64] MATYS, Marián; KRAJČOVIČ, Martin a GABAJOVÁ Gabriela. *Creating 3D models of transportation vehicles using photogrammetry*, Transportation Research Procedia. Volume 55, 2021, Pages 584-591, ISSN 2352-1465. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.025.

[65] MCHENRY, Brian G. *The algorithms of CRASH*. In: Southeast Coast Collision Conference. 2001. p. 1-34. Online. Dostupné z: https://mchenrysoftware.com/SECCC%20Presentation.pdf.

[66] MCHENRY, Raymond. R. a MCHENRY, Brian. G. (1986). *A Revised Damage Analysis Procedure for the CRASH Computer Program*. 1986 (No. 861894). SAE Technical Paper. DOI:10.4271/861894.

[67] MIKULEC, Roman; SVATÝ, Zdeněk a MOTL, Jakub. *Problematika 3D skenování při dokumentaci dopravních nehod*. ExFoS – Expert Forensic Science: XXX. Mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně – Ústav soudního inženýrství, 2022. Mikulov. ISBN 978-80-214-6033-1.

[68] MILLER, Seth Higgins; HASHEMIAN, Alireza; GILLIHAN, Robert a BENES, Saylor. *Accuracy and Repeatability of Mobile Phone LiDAR Capture.* (No. 2023-01-0614). SAE Technical Paper, 2023. Online. DOI: https://doi.org/10.4271/2023-01-0614.

[69] MILLER, Seth Higgins; HASHEMIAN, Alireza; GILLIHAN, Robert a HELMS, Ethan. *A Comparison of Mobile Phone LiDAR Capture and Established Ground Based 3D Scanning Methodologies.* (No. 2022-01-0832), SAE Technical Paper, 2022. Online. Dostupné z: https://doi.org.10.4271/2022-01-0832. [cit. 2023-07-03].

[70] MORALES, Alejandro; GONZALEZ-AGUILERA, Diego; GUTIÉRREZ, Miguel a LÓPEZ, Alfonso. *Energy analysis of road accidents based on close-range photogrammetry*. Online. Remote Sensing. 2015, roč. 7, č. 11, s. 15161-15178. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/rs71115161. [cit. 2023-04-03].

[71] MORALES, Alejandro; SÁNCHEZ-APARICIO, Luis; GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, Pablo; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, David et al. *A new approach to energy calculation of road accidents against fixed small section elements based on close-range photogrammetry*. Online. Remote sensing. 2017, roč. 9, č. 12, s. 1219. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/rs9121219. [cit. 2023-01-24].

[72] MORAVCOVÁ, P., MIKULEC, R., BUCSUHÁZY, K., BILÍK, M., KOSTÍKOVÁ, M. *Z badań nad zależnością między energią zderzenia a deformacją pojazdu*. Paragraf na drodze, 2019, roč. 1, č. 2, s. 45–61. ISSN: 1505-3520.

[73] MORAVCOVÁ, Pavlína.; ZŮVALA, Robert. and BUCSUHÁZY, K*ateřina. How Should I Measure Vehicle Deformation Depth?* In Proceedings of the 10th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. 2024. ISBN 978-989-758-703-0, ISSN 2184-495X, pages 123-131.

[74] MORAVCOVÁ, Pavlína; BUCSUHÁZY, Kateřina a BRADÁČ, Albert. *Porovnání vybraných metod měření pro stanovení hloubky deformace vozidla*. Online. Soudní inženýrství, 2020, roč. 31, č. 3, s. 32-39. ISSN: 1211 443X. Dostupné z: https://doi.org/10.13164/SI.2020.1.2. [cit. 2023-04-11].

[75] MORAVCOVÁ, Pavlína; BUCSUHÁZY, Kateřina, ZŮVALA, Robert; SEMELA, Marek a BRADÁČ, Albert. *What should I use to calculate vehicle EES?* PLoS ONE, 2024, 19(2): e0297940. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297940.

[76] MORAVCOVÁ, Pavlína; BUCSUHÁZY, Kateřina; BILÍK, Martin; BELÁK, Michal a BRADÁČ, Albert. *Let It Crash! Energy Equivalent Speed Determination*. Online. In: Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. SCITEPRESS – Science and Technology Publications. 2021, s. 521-528. ISBN 978-989-758-513-5. DOI: 10.5220/0010449005210528.

[77] MOTL, Jakub; RÜCKER, Jan a KAFOŇKOVÁ, Jitka. *Metody dokumentace místa dopravní nehody*. Soudní inženýrství. 2018, roč. 29, č. 4, s. 25-36. ISSN 1211-443X.

[78] MROWICKI, Adam; KRUKOWSKI, Mateusz; TUROBOŚ, Filip a KUBIAK, *Przemysław. Determining vehicle pre-crash speed in frontal barrier crashes using artificial neural network for intermediate car class*. Online. Forensic science international. 2020, roč. 308. ISSN 03790738. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110179. [cit. 2023-10-20].

[79] MURARIU, Gabriel; HAHUIE, Valentin; GEORGESCU, Lucian; ARSENI, Maxim; ITICESCU, Catalina; MURARIU, A., G.; BUHOCIU, F. a NISTOR, N. *Study on the influence of atmospheric parameters on the accuracy of the geodetic measurements*. 6th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy – Heidelberg (Germany), 2016. 1792(), 040009. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.1063/1.4972387. [cit. 2023-10-14].

[80] NEALE, William. T. C.; FENTON, Steve; MCFADDEN, Scott a ROSE, Nathan. A. *A Video Tracking Photogrammetry Technique to Survey Roadways for Accident Reconstruction*. (No. 2004-01-1221). 2004. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2004-01-1221

[81] NOON, Randall. *Introduction to Forensic Engineering*. Online. CRC Press, 2020. Dostupné z: https://doi.org/10.4324/9781003068877. [cit. 2023-11-04].

[82] NORDHAGEN, Ronald; WARNER, Mark; PERL, Thomas a KENT, Richard. *Accident Reconstruction for Rear Pole Impacts of Passenger Cars* (No. 2006-01-0899), SAE Technical Paper,2006. DOI:10.4271/2006-01-0899.

[83] Nouzovský, Luboš; Kostěncová, Veronika a Frydrýn, Michal. *Využitelnost dat EDR pro analýzu silničních nehod*. Soudní inženýrství, 2021, 32(4), 9–18. DOI: http://dx.doi.org/10.13164/SI.2021.4.9. ISSN 1211-443X

[84] ORTIZ-SANZ, Juan; GIL-DOCAMPO, Ma; REGO-SANMARTÍN, T.; ARZA-GARCÍA, Marcos a TUCCI, Grazia. *A PBeL for training non-experts in mobile-based photogrammetry and accurate 3-D recording of small-size/non-complex objects*. Online. Measurement, 2021, roč. 178. ISSN 02632251. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109338. [cit. 2023-11-12].

[85] OSMAN, Muhammad. Ridhwan a TAHAR, Khairul. Nizam. *3D accident reconstruction using low-cost imaging technique', Advancesin Engineering Software*. 2016. Elsevier Ltd, 100, pp. 231–237. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.007.

[86] OSTERHOLT, Gary; CUMMINGS, Jeremy; BILLER, Beau a CALHOUN, Van. *Updating Generic Crush Stiffness Coefficients for Accident Reconstruction* (No. 2010-01-1581). SAE Technical Paper Series, 2010. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2010-01-1581. [cit. 2023-10-09].

[87] PAPIC, Zoran; BOGDANOVIĆ, Vuk; ŠTETIN, Goran a SAULIC, Nenad. *ESTIMATION OF EES VALUES BY VEHICLE 3-D MODELLING*. Mobility and Vehicle Mechanics. 2018. 44. 29-41. DOI:10.24874/mvm.2018.44.01.03.

[88] PECK, Luis. R. a CHENG, Marka. H. *The Accuracy of an Optimized, Practical Close-Range Photogrammetry Method for Vehicular Modeling*. SAE International Journal of Transportation Safety, 2016, 4(2). DOI:10.4271/2016-01-1462.

[89] PÉREZ, Juan Antonio; GONÇALVES, Gil Rito; RANGEL, Jose Manuel Galvan a ORTEGA, Pedro Fuentes. *Accuracy and effectiveness of orthophotosobtained from low cost UASs video imagery for traffic accident scenes documentation.* Advances inEngineering Software. Elsevier, 2019, 132(March), pp. 47–54. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2019.03.010.

[90] PROGEO DATA SPOL. S.R.O. O MRAČNECH, VEKTORIZACI, 2D A 3D. Online. Dostupné z: https://progeodata.cz/aktuality/o-mracnech-vektorizaci-2d-a-3d/. [cit. 2024-03-22].

[91] Přehled stavu vozového parku v ČR. Online. Svaz Dovozců Automobilů. 2024. Dostupné z: https://portal.sda-cia.cz/stat.php?v#str=vpp. [cit. 2024-03-25].

[92] RÁBEK, Vlastimil. *Hodnocení kompatibility poškození kolizních objektů metodou překrytí snímků*. ExFoS – Expert Forensic Science: XXVI. Mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Ústav soudního inženýrství, 2017. ISBN 978-80-214-5459-0.

[93] RANDLES, Bryan; JONES, Brian; WELCHER, Judson; SZABO, Thomas; ELLIOTT, David et al. *The Accuracy of Photogrammetry vs. Hands-on Measurement Techniques used in Accident Reconstruction* (No. 2010-01-0065), SAE Technical Paper, 2010. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2010-01-0065. [cit. 2023-11-04].

[94] REMONDINO, Fabio a STOPPA, David. *TOF range-imaging cameras*. 2013.ISBN: 978-3-642-27522-7. DOI: 10.1007/978-3-642-27523-4.

[95] RÖHRICH, W. *Die Verteilung der Energiaufnahmefähigkeit bei PKW: Strukturen und Anwendungsmöglichkeiten bei der Unfallanalyse*. Berlín: TU Berlín, 1977.

[96] RUCOBA, Robert; DURAN, Amanda; CARR, Lee a ERDELJAC, Danny. A three-dimensional crush measurement methodology using two-dimensional photographs (No. 2008-01-0163). SAE Technical Paper, 2008. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2008-01-0163. [cit. 2023-12-11].

[97] SANCHEZ-DIAZ, Baltazar; MATA-ZAYAS, Ena Edith; GAMA-CAMPILLO, Lilia Maria; RINCON-RAMIREZ, Joaquin Alberto; VIDAL-GARCIA, Francisca; RULLAN-SILVA, Cristobal Daniel a SANCHEZ-GUTIERREZ, Facundo. *LiDAR modeling todetermine the height of shade canopy tree in cocoaagrosystems as available habitat for wildlife*. International Journal of Engineering and Geosciences, 2022, 7(3), 283-293. DOI: https://doi.org/10.26833/ijeg.978990.

[98] SEMELA, Marek. *Analýza silničních nehod II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2016.

[99] SCHAPER, D. *Energieraster in der Unfallanalyse Schriftenreihe der Adam Opel AG*, 1. uflage Adam Opel Aktiengesellschaft, Russelsheim, 1983.

[100] SCHAPER, D. *Určení střetové rychlosti podle deformace havarovaného vozidla*. In Automobil. 3. vyd. 1981.

[101] SPEK, Aart. *Collaborative study on the estimation of EES-values*, 26th EVU Annual Congress proceedings. Haarlem, 2017.

[102] STÁŇA, Ivo; RYBKA, Jindřich; NOVÁK, Milan a BUCSUHÁZY, Kateřina. *Využití pokročilých metod dokumentace místa dopravní nehody policií ČR*. Soudní inženýrství [online]. Akademické nakladatelství CERM, 2019, 30(2), 3-7 [cit. 2020-04-16]. DOI: 10.13164/SI.2019.2.3. ISSN 1211-443X. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/180484.

[103] STÁŇA, Ivo; TOKAŘ, Stanislav; BUCSUHÁZY, Kateřina a BILIK, Martin. *Comparison of Utilization of Conventional and AdvancedMethods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic*. Procedia Engineering, 2017, 187, pp.471–476. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.402.

[104] STEFFAN, Hermann. *Accident Investigation – Determination of Cause*. 2013. DOI:10.1016/B978-0-12-382165-2.00141-0.

[105] STEHEL, Stanislav; VERTAĽ, Peter a DEMČÁKOVÁ, Lýdia. *Application of close-range photogrammetry in documenting the location of an accident*. Online. Transportation Research Procedia. 2021, roč. 55, s. 1657-1664. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.156. [cit. 2023-09-09].

[106] STRUBLE, Donald. *Automotive Accident Reconstruction: Practices and Principles*. 2020. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, ISBN 9781003008972.

[107] SVATÝ, Zdeněk; KOCIÁN, Karel a LENKOVÁ, Alžběta. *Fotogrammetrická rekonstrukce místa nehody za pomoci bezpilotního prostředku.* Online. Soudní inženýrství. 2018, roč. 29, č. 1, s. 30-34. ISSN 1211-443X. ISBN 978-80-214-5600-6. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/137344. [cit. 2023-06-20].

[108] SVATÝ, Zdeněk; MIČUNEK, Tomáš a NOVÁČEK, Jakub. *Využití prostorových dat pro účely simulace nehodového děje*. Online. Soudní inženýrství. 2020, roč. 31, č. 1, s. 9-16. ISSN 1211-443X. Dostupné z: https://doi.org/10.13164/SI.2020.1.9. [cit. 2023-06-17].

[109] SZTWIERTNIA Karol a GUZEK Marek. *Uncertainty of determining the energy equivalent speed (EES) of a vehicle collision by the experimental and analytical method*. Online. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017, roč. 76, č. 2, s. 123-136. Dostupné z: https://dx.doi.org/1014669/AM.VOL76.ART7. [cit. 2023-11-19].

[110] TANDY, Donald F.; COLEMAN, Clay; COLBORN, Jason; HOOVER, Todd a BAE, Jung. *Benefits and Methodology for Dimensioning a Vehicle Using a 3D Scanner for Accident Reconstruction Purposes.* SAE Technical Paper Series: SAE 2012 World Congress & Exhibition. 2012, roč. 1. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2012-01-0617. [cit. 2023-05-28].

[111] TERPSTRA, Toby; DICKINSON, Jordan; HASHEMIAN, Alireza a FENTON, Stephen. *Reconstruction of 3D Accident Sites Using USGS LiDAR, Aerial Images, and Photogrammetry*. (No. 2019-01-0423). SAE Technical Paper, 2019. ISSN: 0148-7191. DOI: https://doi.org/10.4271/2019-01-0423.

[112] TERPSTRA, Toby; MILLER, Seth a HASHEMIAN, Alireza. *An Evaluation of Two Methodologies for Lens Distortion Removal when EXIF Data is Unavailable*. (No. 2017-01-1422). SAE Technical Paper, 2017. DOIi:10.4271/2017-01-1422.

[113] TOPOLŠEK, Darja; HERBAJ, Elvis a KAMNIK, Rok. *3D Laser Scanners and Point Clouds for Obtaining Car Accident Sketches.* Online. In: Revija za kriminalistiko in kriminologijo. 4. 2019, s. 335–351. Dostupné z: https://www.policija.si/images/stories/Publications/JCIC/PDF/2019/04/JCIC2019-04_DarjaTopolsek_3DLaserScannersAndPointClouds.pdf. [cit. 2024-11-11].

[114] TOPOLŠEK, Darja; HERBAJ, Elvis A. a STERNAD Marjan. *The Accuracy Analysis of Measurement Tools for Traffic Accident Investigation*. Journal of Transportation Technologies, 2014; 4(01): 84–92. DOI: 10.4236/jtts.2014. 41008.

[115] TUMBAS, Nicholas S. a SMITH, Russell A. *Measuring Protocol for Quantifying Vehicle Damage from an Energy Basis Point of View*. SAE Technical Paper Series, 1988. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/880072. [cit. 2023-11-07].

[116] TUMBAS, Nicholas S.; KINNEY, J. Rolly a SMITH, Gregory, C.*Photogrammetry and Accident Reconstruction: Experimental Results*. (No. 940925). 1994. DOI: https://doi.org/10.4271/940925

[117] VANGI Dario. *Vehicle Collision Dynamics*. Online. Butterworth-Heinemann, 2020. ISBN 9780128127506. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812750-6.00013-5. [cit. 2023-09-10].

[118] VANGI, Dario a BEGANI, Filipo. *Energy loss in vehicle collisions from permanent deformation: an extension of the "Triangle Method."* Vehicle System Dynamics. 2013, 51(6), 857–876. DOI:10.1080/00423114.2013.770538.

[119] VANGI, Dario a BEGANI, Filipo. *The Triangle Method for Evaluation*. *19th EVU Congress.* Brno: Tribun EU, 2010, s. 265-299. ISBN 978-80-7399-128-9.

[120] VANGI, Dario a BEGANI, Filippo. *Energy loss in vehicle collisions from permanent deformation: an extension of the 'Triangle Method'*. Vehicle system dynamics. Online. Taylor & Francis, 2013, 51(6), 857-876. ISSN 0042-3114. DOI: 10.1080/00423114.2013.770538.

[121] VANGI, Dario a CIALDAI, C. *Evaluation of energy loss in motorcycle-to-car collisions.* Online. International Journal of Crashworthiness. 2014, roč. 19, č. 4, s. 361-370. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/13588265.2014.899072. [cit. 2023-009-09].

[122] VANGI, Dario. *Simplified method for evaluating energy loss in vehicle collisions*. Accident Analysis and Prevention [online]. Elsevier, 2009, 41(3), 633-641. DOI: 10.1016/j.aap.2009.02.012. ISSN 0001-4575. [cit. 2023-09-15].

[123] VANGI, Dario; CIALDAI C. and GULINO, M. *Vehicle stiffness assessment for energy loss evaluation in vehicle impacts. Forensic science international*. Elsevier B.V 2019, 300, 136-144. ISSN 0379-0738. DOI: https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.04.031.

[124] VANGI, Dario a CIALDAI C. *Evaluation of energy loss in motorcycle-to-car collisions.* Online. International Journal of Crashworthiness. 2014, roč. 19, č. 4, s. 361-370. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/13588265.2014.899072. [cit. 2023-10-20].

[125] VARKONYI-KOCZY, Annamria R.; ROVID, Andrs a DA GRACA RUANO, Maria. *Soft-computing-based car body deformation and EES determination for car crash analysis systems*. Online. IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2006, roč. 55, č. 6, s. 2304-2312. Dostupné z: https://doi.org/10.1109/TIM.2006.873796. [cit. 2023-10-25].

[126] VOMHOF, D. *Equal Spacing NOT Required for Speed from Crush Calculation. Equally Spaced Crush measurements – take them in the field or in the office - which is the better location?* WORLD RECONSTRUCTION EXPOSITION 2016. Florida (Orlando), 2016.

[127] WESTOBY, Matt. J.; BRASINGTON, James.; GLASSER, Neil. F.; HAMBREY, Michael. J. a REYNOLDS, John. M. *Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Online. Geomorphology. 2012, roč. 179, s. 300–314. ISSN: 0169555X. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021. [cit. 2023-02-09].

[128] WOOLLEY, Ronald. *Non-Linear Damage Analysis in Accident Reconstruction*. (No. 2001-01-0504). SAE Technical Paper, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-0504.

[129] WOOLLEY, Ronald L. Non-Linear Damage Analysis in Accident Reconstruction (No. 2001-01-0504). SAE Technical Paper, 2001. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2001-01-0504. [cit. 2023-02-05].

[130] YAKAR, İrem; ÇELIK, Mehmet Özgür; HAMAL, Seda Nur Gamze a BILGI, Serdar. *Kültürel Mirasın Dokümantasyonu ÇalışmalarındaFarklı Yazılımların Karşılaştırılması: Dikilitaş(Theodosius Obeliski) Örneği*. Geomatik, 2021, 6(3), 217-226. DOI: https://doi.org/10.29128/geomatik.761475.

[131] ZEIDLER, F.; SCHREIER, H. a STADELMANN, R. *ccident Research and Accident Reconstruction by the EES-Accident Reconstruction Method*. (No. 850256). SAE technical paper, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1985. DOI: https://doi.org/10.4271/850256.

[132] Hloubková analýza dopravních nehod, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

[133] Vlastní archiv autorky

[134] Archiv ÚSI VUT v Brně