

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

VLIV POLOHY TĚŽIŠTĚ VOZIDLA NA JEHO POSTŘETOVÝ POHYB

IMPACT OF CG ON POST CRASH VEHICLE MOVEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN KUNOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Bc. MAREK SEMELA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Ing. Martin Kunovský

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Expertní inženýrství v dopravě (3917T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb

v anglickém jazyce:

Impact of CG on Post Crash Vehicle Movement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměří na charakteristiku pohybu vozidla po střetu s jiným vozidlem a dalšími specifickými situacemi v závislosti na poloze těžiště.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rozbor možných metod zjištění polohy těžiště vozidla
- 2) Vytyčení problematických manévru a situací při silničním provozu
- 3) Vytvoření simulací problematických manévru v prostředí programů PC Crash a Virtual Crash se změnou polohy těžiště vozidla
- 4) Zhodnocení výsledků simulačních programů

Seznam odborné literatury:

- [1] BRADÁČ, Albert a kol. Soudní inženýrství. Brno, CERM Akademické nakladatelství, s.r.o.. 1999. 725 s. ISBN 80-7204-133-9 (dotisk)
- [2] VLK, František. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. 1. vyd. Brno : Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2001. 576 s. ISBN 80-238-6573-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 1.11.2011



JUDr. Miroslav Kledus
ředitel vysokoškolského ústavu

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou vlivu změny polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb. V rešeršní části jsou popsány základní metody běžně používané k nalezení příčné, podélné a výškové polohy těžiště, nebo vliv polohy těžiště vozidla na jeho stabilitu a jízdní vlastnosti. Dále se práce zabývá základním rozdělením silničních nehod a stručně popisuje metody používané k jejich analýze. V práci jsou vytyčeny problematické manévry a situace vyskytující se v každodenní silniční dopravě. Vybrané situace byly nasimulovány v programech Virtual CRASH a PC Crash. V těchto programech byl sledován vliv podélné a výškové polohy těžiště na postřetové chování vozidla. Získané výsledky byly v poslední kapitole vyhodnoceny.

Klíčová slova

Těžiště vozidla, PC Crash, Virtual CRASH, Postřetový pohyb.

Abstract

This diploma thesis analyses the influence of the change to the vehicle's center of gravity on its after-impact movement. The theoretical part of the thesis describes the basic methods which are used in investigation of the transverse, lengthwise and height position of center of gravity or the influence of center of gravity's vehicle position to its stability and handling. Next part of the thesis deals with basic division of the road accidents and briefly describes the methods used in its analysis. Problematic maneuvers and everyday road traffic situations are stated in this thesis. Chosen situations were simulated in Virtual CRASH and PC crash programmes. Influence of the transverse, lengthwise and height position of center of gravity was investigated in these programmes with regards to the after-impact behaviour of vehicle. The obtained results were evaluated in the final chapter.

Key words

Vehicle center of Gravity, PC Crash, Virtual CRASH, After-impact movement.

Bibliografická citace

KUNOVSKÝ, M. *Vliv polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a na základě uvedené literatury a zdrojů.

V Brně dne 5.10.2012

.....

Ing. Martin Kunovský

Poděkování

Děkuji Ing. Bc. Marku Semelovi, Ph.D. za konzultace a odborné rady při tvorbě této diplomové práce. Taktéž děkuji rodičům za hmotnou a morální podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	10
2	Těžiště	11
2.1	Měření podélné a příčné polohy těžiště	12
2.1.1	Podélná poloha těžiště vozidla	13
2.1.2	Příčná poloha těžiště vozidla	14
2.2	Měření výškové polohy těžiště	15
2.2.1	Metoda vážení vozidla při naklánění na nápravu	16
2.2.2	Metoda vážení vozidla při naklápění na bok	20
2.2.3	Metoda zjištění úhlu překlopení	21
2.2.4	Metoda zavěšení celého vozidla	24
3	Stabilita vozidla v závislosti na poloze těžiště a prováděném manévru vozidla	25
3.1	Jízda v zatáčce	26
3.1.1	Elektronický stabilizační program (např. ESP)	30
3.2	Přímé brzdění	31
4	Rozdělení silničních dopravních nehod	33
	Rozdělení podle typu nehodového děje	33
5	Střety	36
5.1	Metody výpočtu a řešení střetů	36
5.1.1	Zpětné metody	36
5.1.2	Dopředné metody	38
5.2	Pohyb vozidla po střetu	39
6	Vytyčení problematických manévru a situací v silničním provozu	41
6.1	Vliv příčné polohy těžiště	41
6.2	Vliv výškové polohy těžiště	42
6.3	Vliv podélné polohy těžiště	44
7	Vytvoření simulací problematických manévru v prostředí programů PC Crash a Virtual CRASH se změnou polohy těžiště vozidla	47
7.1	Vliv příčné polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb	47
7.2	Vliv výškové polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb	52
7.2.1	Vliv výškové polohy těžiště vozidla na jeho převrácení	53
7.2.2	Vliv výškové polohy těžiště při střetu s pevnou překážkou	55

7.3	Vliv podélné polohy těžiště na postřetový pohyb vozidla.....	61
7.3.1	<i>Situace čelního střetu s 50 % překrytím.</i>	<i>61</i>
7.3.2	<i>Šikmý střet vozidla Nissan Pathfinder a Toyota Corolla.....</i>	<i>67</i>
7.3.3	<i>Modifikovaný šikmý střet vozidla Nissan Pathfinder a Toyota Corolla</i>	<i>73</i>
8	Experimentální měření polohy těžiště	79
9	Zhodnocení výsledků simulačních programů	85
10	Závěr	89
	Použité zdroje	92
	Seznam symbolů	94
	Seznam obrázků	95
	Seznam tabulek	97
	Seznam příloh	98

1 Úvod

Silniční vozidla jsou považována za každodenní samozřejmost, jen málo kdo si dokáže představit přesun např. do zaměstnání bez využití silničního vozidla. Přitom pouze v roce 2011 Policie ČR šetřila 75 135 dopravních nehod, při kterých bylo 707 lidí usmrceno a 3 092 jich bylo těžce zraněno [18].

Jedna z nejvýznamnějších oblastí znalecké činnosti je analýza silničních nehod. Většina moderních znalců při řešení dopravní nehody využívá k objasnění vzniklé situace výpočetní techniku společně s použitím sofistikovaných programů určených k analýze silničních nehod. Mezi tyto programy, běžně používané v České Republice patří především program PC Crash a Virtual CRASH.

Tyto programy jsou schopny nasimulovat každý, i nereálný, průběh dopravní nehody. Při samotné simulaci záleží především na zkušenostech programátora, který musí objektivně posoudit, zda průběh vzniklé simulace odpovídá platným fyzikálním zákonům a chování vozidel realitě.

Teoretická část diplomové práce se zabývá převážně metodikou vedoucí k nalezení podélné, příčné a výškové polohy těžiště. Metody vedoucí k nalezení polohy těžiště jsou jednotlivě rozepsány a okomentovány. V této práci jsou také řešeny vlivy polohy těžiště vozidla na jeho jízdní stabilitu, například při brzdění nebo průjezdu vozidla zatáčkou. Dále je stručně popsáno rozdělení silničních nehod a metod používaných k jejich analýze. V závěru teoretické části jsou vytyčeny problematické manévry a situace vyskytující se v běžném silničním provozu.

V praktické části diplomové práce byla řešena problematika vlivu polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb. K tomuto účelu byly vybrány problematické situace namodelovány v prostředí programu Virtual CRASH a PC Crash se změnou polohy těžiště. Výsledky z těchto simulací byly následně analyzovány.

Nad rámec zadání této diplomové práce bylo provedeno experimentální měření polohy těžiště vozidla Toyota Corolla metodou naklánění vozidla na přední nápravu.

2 Těžiště

První člověk, který zavedl pojem těžiště, byl Archimédes (cca 287 př. n. l. až 212 př. n. l.), který se mimo jiné věnoval i inženýrské činnosti, při níž určil metodiku k nalezení polohy těžiště pro rovinné útvary a prostorová tělesa [14].

Těžiště je bod každého hmotného tělesa umístěného v gravitačním poli Země, kterým prochází osa soustavy elementárních tíhových sil jednotlivých částí tělesa při jeho libovolném natočení. Těžiště je také působištem výslednice tíhové síly F_G elementárních tíhových sil působících na jednotlivé části tělesa. Poloha těžiště tělesa je pak dána tíhovým zrychlením g a rozložením látky určité hustoty ρ v objemu tělesa. Těžiště tělesa může být umístěno vně tělesa, na jeho povrchu, v dutině tohoto tělesa nebo zcela mimo něj [1].

Pomocí těžiště lze také popsat trajektorii pohybujícího se tělesa v prostoru. Této vlastnosti těles využívají mnohé sofistikované programy k analýze deformací, či pohybu těles nejen v automobilovém průmyslu.

Mezi hlavní parametry vozidel, pomocí nichž se analyzuje jejich dynamické chování a velkou mírou se podílí na jízdních vlastnostech, je právě i poloha těžiště vozidla.

Poloha těžiště u motorových vozidel:

- Poloha těžiště v podélném a příčném směru vozidla má vliv především na nesouměrné rozložení hmotnosti na jednotlivá kola, či nápravy vozidla. Nesouměrné zatížení těchto prvků má za následek zvýšenou přetáčivost, či naopak nedotáčivost vozidla při jízdě zatáčkou, nebo při provozním brzdění vozidla [3].
- Výšková poloha těžiště má vliv především na stabilitu vozidla vzhledem k překlopení při průjezdu zatáčkou, či převrácení u speciálních vozidel při jízdě do svahu nebo ze svahu dolů [4].

Vysoká poloha těžiště v kombinaci s nevhodnou podélnou polohou těžiště má také za intenzivního brzdění vliv na rozdělení brzdných sil na jednotlivé nápravy. Nevhodné rozdělení těchto brzdných sil může mít za následek, při přímé jízdě, přebrzdění zadní nápravy. Blokující kola zadní nápravy mohou uvést vozidlo do neřízeného rotačního pohybu kolem své svislé osy [2].

Znalost polohy těžiště je tedy nezbytná pro výpočty týkající se dynamiky vozidla, především v případech boční stability při průjezdu zatáčkou, a podélné stability při akceleraci a deceleraci vozidla [2].

2.1 Měření podélné a příčné polohy těžiště

Pro zjištění podélné a příčné polohy těžiště je zapotřebí znát hmotnosti připadající na jednotlivá kola vozidla a základní rozměry jako jsou rozchod kol a rozvor náprav vozidla. Hmotnostní parametry vozidla lze získat např. umístěním vozidla na přenosné váhy tak, aby vozidlo bylo vždy při odčítání hmotností ve vodorovné poloze. Tedy součet jednotlivých hmotností pod všemi koly musí být roven celkové hmotnosti vozidla, viz vzorec (1) [4].

$$m_C = m_{PP} + m_{LP} + m_{PZ} + m_{LZ} \quad (1)$$

Kde:

m_C je celková hmotnost vozidla

m_{PP} je hmotnost připadající na pravé přední kolo

m_{LP} je hmotnost připadající na levé přední kolo

m_{PZ} je hmotnost připadající na pravé zadní kolo

m_{LZ} je hmotnost připadající na levé zadní kolo

2.1.1 Podélná poloha těžiště vozidla

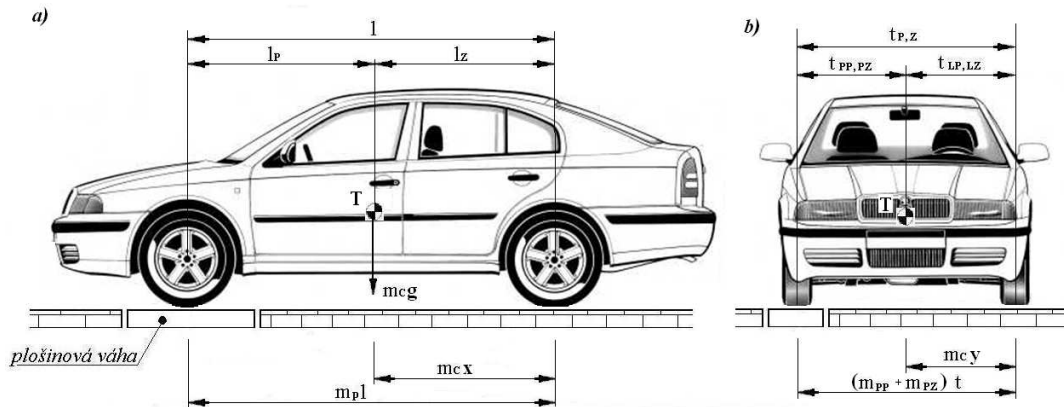
Pro snadnější představu způsobu výpočtu podélné polohy těžiště lze využít schéma znázorněné na obr. č. 1a. Z tohoto schématu lze stanovit podélnou polohu těžiště z momentu vztaženému k ose zadní nápravy, za předpokladu známého rozvoru náprav l a hmotností připadajících na přední nápravu vozidla m_P . [4]

$$m_P = m_{PP} + m_{LP} \quad (2)$$

Z obr. č. 1a je patrné, že vzdálenost podélné polohy těžiště l_Z od osy zadní nápravy získáme pomocí rovnováhy statických momentů působících na zadní nápravu. Po dosazení lze podélnou polohu těžiště vypočítat z následujícího vztahu.

$$x = l_Z = \frac{m_P}{m_C} l \quad (3)$$

Pokud hodnota x vyjde kladná, je těžiště posunuto o hodnotu $|x|$ od osy zadní nápravy k přední.



Obr. č. 1: Schéma vozidla pro výpočet: a) podélné polohy těžiště vozidla [28], b) příčné polohy těžiště vozidla [28].

2.1.2 Příčná poloha těžiště vozidla

Za předpokladu, že vozidlo má stejný rozchod kol na přední i zadní nápravě, který je znám, a zároveň je známo zatížení připadající na pravou stranu vozidla, tj. hmotnost změřenou pod pravou přední a pravou zadní pneumatikou, lze obdobným způsobem, jako tomu bylo u podélné polohy těžiště vypočítat i příčnou polohu těžiště vozidla. Příčnou polohu těžiště vztáhneme k ose rovnoběžné s podélnou osou vozidla procházející ohniskem středů pneumatik na levé straně vozidla. Potom příčná vzdálenost těžiště od této osy je dána [3]:

$$y' = \frac{m_{PP} + m_{PZ}}{m_C} t_{P,Z} \quad (4)$$

Kde: y' je příčná vzdálenost těžiště vozidla od ohniskového středu pneumatik levé strany vozidla za předpokladu stejného rozchodu kol na přední i zadní nápravě,

$t_{P,Z}$ je rozchod přední, resp. zadní nápravy vozidla,

Takto vypočítaná vzdálenost y' je příčná vzdálenost těžiště od osy procházející ohniskovým středem pneumatik levé strany vozidla. Příčná poloha těžiště se obvykle udává ve vzdálenosti od podélné osy vozidla. Tuto vzdálenost získáme přepočtem dle vzorce (5) [4].

$$y = y' - \frac{t_{P,Z}}{2} \quad (5)$$

Pokud hodnota y vyjde kladná, těžiště vozidla je posunuto o hodnotu $|y|$ doprava od podélné osy vozidla [4].

2.2 Měření výškové polohy těžiště

Nalezení výškové polohy těžiště je poněkud obtížnější, než je tomu u podélné, či příčné polohy těžiště vozidla. Stěžejní metod vedoucích k nalezení přesné výškové polohy těžiště je hned několik. Protože nejčastější metody jsou spojeny s různým nakláněním, či naklápěním vozidla, musí se vzít v potaz především přesun pohonných hmot a provozních kapalin vozidla, nelineární působení pružin a tlumičů podvozku vozidla, nesouměrná deformace pneumatik nebo např. presence volně pohybujících se předmětů nejen v kabině vozidla. Všechny tyto aspekty mohou zkreslit výsledek měření polohy těžiště. Proto je před započítáním měření nutno tyto potenciální vlivy měření co možná nejvíce potlačit, nebo jinak zamezit jejich projevu. Před měřením se pružiny vozidla stahují a tlumiče nahrazují např. pevnou tyčí, nebo se vozidla vybavují přípravky, které zamezí vzájemný posuv karoserie vozidla vůči podvozku při následném nadzvedávání některé z částí vozidla [3].

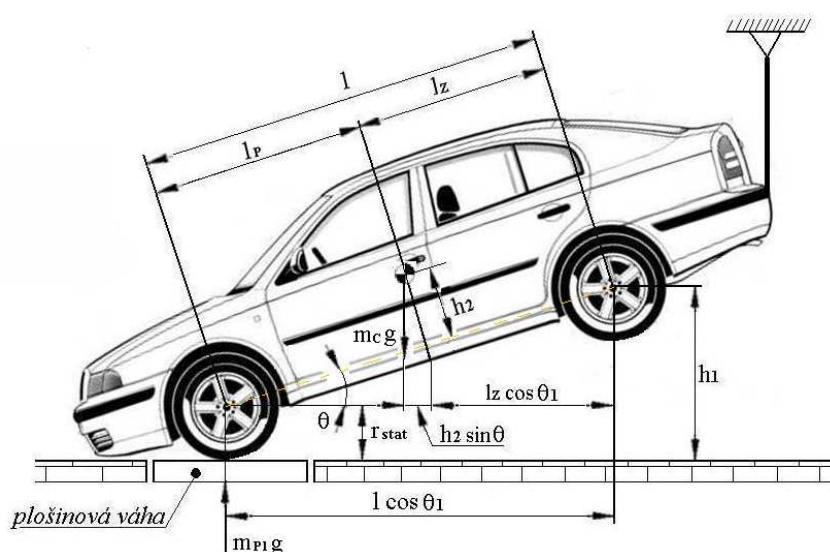
K určení výškové polohy těžiště je možno použít také kalkulátorů, kterých je na internetu k nalezení hned několik. Za nevýhodu těchto kalkulátorů se dá považovat, že to jsou tzv. black boxy, tedy po zadání požadovaných dat o vozidle kalkulátor určí výškovou polohu těžiště. Ovšem na základě jakých postupů kalkulátor výsledek určil nelze přesně specifikovat.

Standardně se k zjištění výškové polohy těžiště využívá následujících několik sofistikovaných metod:

- Metoda vážení vozidla při naklánění na nápravu.
- Metoda vážení vozidla při naklápění na bok.
- Metoda zjištění úhlu překlopení.
- Metoda zavěšení vozidla.

2.2.1 Metoda vážení vozidla při naklánění na nápravu

Metoda naklánění vozidla na jednu, váženou, nápravu je jedním z nejčastěji používaných metod vedoucích k nalezení výškové polohy těžiště. Tato metoda je založena na principu počítání statické rovnováhy momentů vztažených k ose nadzvednuté nápravy nakloněného vozidla, při čemž kola jiné nápravy vozidla spočívají na vahách. Za předpokladu, že známe hmotnosti vozidla, horizontální polohu těžiště, rozvor náprav vozidla a úhel náklonu zobrazený na obr. č. 2 lze sestavit následující rovnice [4].



Obr. č. 2: Měření výškové polohy těžiště metodou naklánění na nápravu [28].

Rovnice statické rovnováhy momentů k ose zadní nápravy.

$$M: m_{P1} g l \cos \theta_1 - m_C g (h_2 \sin \theta_1 + l_Z \cos \theta_1) = 0 \quad (6)$$

kde:

- m_{P1} Je hmotnost připadající na přední nápravu v 1. poloze nadzvednutého vozidla,
- m_C je celková hmotnost vozidla,
- θ_1 je úhel měřený mezi vodorovnou a nakloněnou rovinou spojnice středů pneumatik přední a zadní nápravy vozidla,
- l je rozvor náprav,
- l_Z je kolmá vzdálenost těžiště od osy zadní nápravy vozidla,
- h_2 je kolmá vzdálenost od roviny středů pneumatik přední a zadní nápravy vozidla k výškové poloze těžiště,
- g je tíhové zrychlení.

Z rovnice (6) lze pak vyjádřit hmotnost připadající na přední nápravu vozidla m_{P1} nakloněného do polohy 1, ve tvaru:

$$m_{P1} = m_c \frac{h_2}{l} \operatorname{tg}(\theta_1) + m_c \frac{l_z}{l} = m_c \frac{h_2}{l} \operatorname{tg}(\theta_1) + m_P \quad (7)$$

Při naklonění vozidla o úhel θ_1 dojde k přitížení přední nápravy vozidla o Δm_{P1} , oproti hmotnosti připadající na přední nápravu m_P vozidla umístěného na vodorovné podložce, viz rovnice (8).

$$m_{P1} = m_P + \Delta m_{P1} \quad (8)$$

Po dosazení do rovnice (7) lze psát:

$$\Delta m_{P1} = m_{P1} - m_P = m_c \frac{h_2}{l} \operatorname{tg}(\theta_1) \quad (9)$$

Kolmá výšková vzdálenost těžiště od roviny procházející středem předních a zadních pneumatik h_2 lze pak snadno dopočítat dle následujícího vzorce.

$$h_2 = \frac{\Delta m_{P1}}{m_c} \frac{l}{\operatorname{tg}(\theta_1)} \quad (10)$$

Celková výška těžiště je pak dána součtem kolmých vzdáleností h_2 od těžiště vozidla po rovinu procházející středem pneumatik a r_{stat} vzdálenosti středu pneumatik od opěrné roviny za předpokladu stejných vzdáleností r_{stat} pro přední i zadní pneumatiky [5].

Protože odměřování úhlu naklonění θ nemusí být v praxi vždy zcela přesné, lze výšku těžiště spočítat i z výšky h_1 viz obr. č. 2 a to následujícím způsobem:

Protože platí že:

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (11)$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta)} \quad (12)$$

Tak lze psát, že:

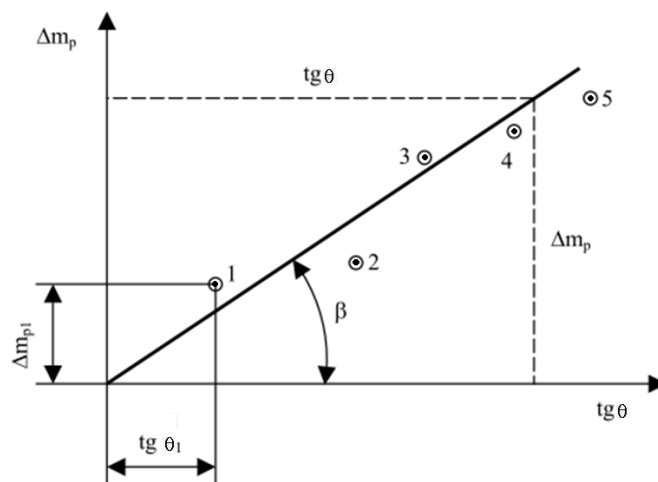
$$\sin(\theta) = \frac{h_1}{l} \quad (13)$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta)}} = \frac{h_1}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{h_1^2}{l^2}}} = \frac{h_1}{\sqrt{l^2 - h_1^2}} \quad (14)$$

Po dosazení do rovnice č. (10) lze výsledný vztah pro výpočet vzdálenosti h_2 závisějícího na výšce h_1 formulovat ve tvaru:

$$h_2 = \frac{\Delta m_{P1}}{m_c} \frac{l}{h_1} \sqrt{l^2 - h_1^2} \quad (15)$$

Při zjišťování výškové polohy těžiště může snadno dojít k chybám způsobujícím zkreslení výsledků např. nepřesným odměřováním jednotlivých vzdáleností nebo úhlu θ . Proto se doporučuje provést více měření a výsledné Δm_{P1} a $\operatorname{tg}(\theta)$, resp. Δm_{P1} a $h_1/\sqrt{l^2 - h_1^2}$ vynést do grafu viz obr. č. 3 pro měření 1 až 5 [5].



Obr. č. 3: Graf určený k minimalizaci chyby měřením výškové polohy těžiště [5].

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{\Delta m_p}{\operatorname{tg}(\theta)} \quad (16)$$

Takto znázorněnými body ve výše uvedeném grafu lze proložit přímkou. Směrnice přímky je daná úhlem β . Tato přímka určuje kolmou vzdálenost těžiště vozidla od roviny spojující středy přední a zadní pneumatiky. Výsledná vzdálenost h_2 je dána [4]:

$$h_2 = \frac{\Delta m_{p1}}{m_c} \frac{l}{\operatorname{tg}(\theta_1)} = \frac{l}{m_c} \operatorname{tg}(\beta) \quad (17)$$

Pro určení celkové výšky těžiště je opět zapotřebí k vzdálenosti h_2 připočíst i vzdálenost středu pneumatik od opěrné roviny r_{stat} .

Tato metoda je používána v případech, kdy je zapotřebí jednoduše a rychle zjistit výškovou polohu těžiště. Nehodí se ovšem k nalezení polohy těžiště u sportovních vozidel, které mají těžiště z důvodů potřebných jízdních vlastností posunuto co nejnižší k vozovce. Při naklání vozidla s nízko posunutým těžištěm v malém rozmezí úhlů náklonu nastává jen nepatrný přírůstek hmotnosti Δm na vážené nápravě a tím se do celého měření dostává poměrně velká chyba [3].

Je nutno zdůraznit, že před použitím této metody je nutno nejprve zamezit vnesení chyb do měření např. relativním posuvem odpružené a neodpružené části vozidla. Tyto nepřesnosti jsou blíže popsány v úvodu kapitoly 2.2.

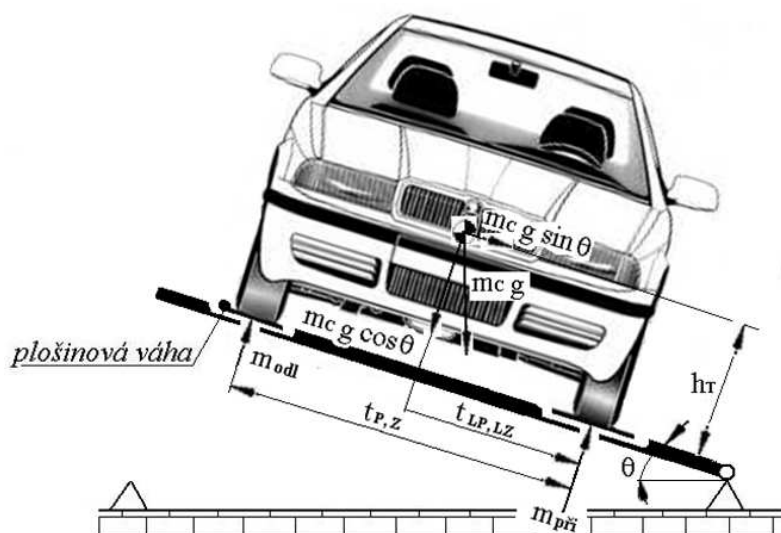
2.2.2 Metoda vážení vozidla při naklápění na bok

Tato metoda je obdobného charakteru, jako metoda vážení vozidla při naklápění na nápravu. Její hlavní rozdíl spočívá v tom, že je vozidlo umístěno na sklopnou plošinu tak, aby podélná osa vozidla byla rovnoběžná s osou klopení plošiny, kolem nichž se následně celé vozidlo naklápí [3].

Na této plošině musí být vozidlo řádně upevněno tak, aby nedošlo k jeho svévolnému posunu a následnému poškození. K tomuto účelu jsou většinou používány různé druhy rozpěrek a upínacích pásů [3].

Dále musí být vozidlo upraveno tak, aby nedocházelo k vnesení zbytečné chyby při měření vlivem přesunu paliva a provozních kapalin, či vzájemnému posunu karosérie vůči podvozku stlačením tlumičů a pružin zatěžované části vozidla při naklápění vozidla na plošinu [3].

Postupné naklápění plošiny s vozidlem je většinou zajištěno přímočarým hydromotorem, nebo prostřednictvím výsuvného šnekového převodu. Po naklopení plošiny a ustálení vozidla se měří náklonný úhel a hmotnost připadající na jednotlivé pneumatiky. Průběh měření je znázorněn na obr. č. 4 [3].



Obr. č. 4: Metoda vážení vozidla při naklápění na bok [28].

Výškovou polohu těžiště pak lze snadno dopočítat podle následujícího vzorce [6]:

$$h_T = \frac{t_{P,Z} (m_{odl-0} \cos(\theta) - m_{odl})}{m_C \sin(\theta)} \quad (18)$$

Kde:

h_T je výška těžiště,

m_{odl-0} je součet hmotností připadající na pravou přední a pravou zadní pneumatiku vozidla umístěného ve vodorovné poloze, před započítáním naklápění,

m_{odl} je součet hmotností připadající na pravou přední a pravou zadní pneumatiku vozidla nakloněného o úhel θ , tedy součet hmotností na odlehčené straně vozidla nakloněného o úhel θ ,

$t_{p,z}$ je rozchod kol přední, resp. zadní nápravy vozidla, za předpokladu, že je shodný,

m_C je celková hmotnost vozidla.

Pro zpřesnění výsledků je opět vhodné provést více měření při různém úhlu naklonění vozidla a z dosažených výsledků vytvořit aritmetický průměr.

Tato metoda má hlavní výhodu v tom, že k dosažení přesného výsledku výškové polohy těžiště postačuje dosažení i menších úhlů naklonění sklopné plošiny, než je tomu u metody využívající naklápění na nápravu. Dále je nespornou výhodou, že pomocí této metody lze poměrně přesně určit výškovou polohu těžiště i u sportovních vozidel, které mají těžiště záměrně položeno co nejblíže k vozovce [3].

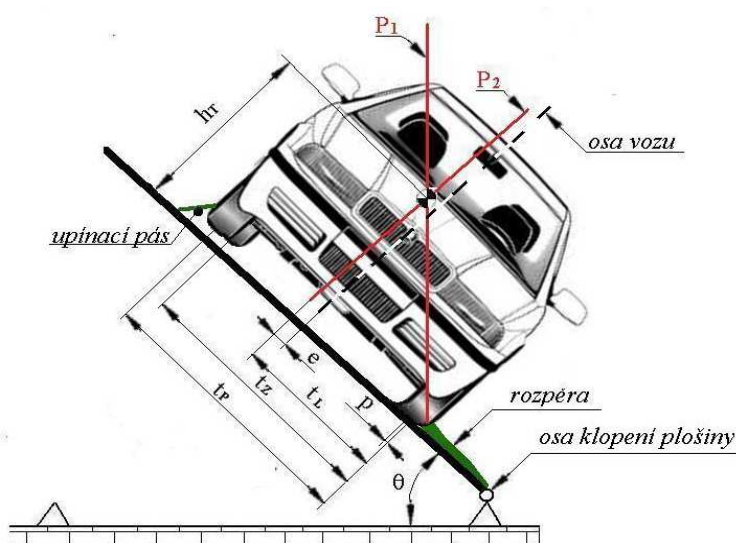
2.2.3 Metoda zjištění úhlu překlopení

Pomocí této metody lze jednoduše a rychle stanovit výškovou polohu těžiště vozidla. Před započítáním měření je ovšem nutno znát příčnou a podélnou polohu těžiště měřeného vozidla a zamezit vnesení chyb do měření např. přesunem pohonných hmot, relativním pohybem odpružené a neodpružené části vozidla, atd. Vznik těchto chyb je blíže popsán v úvodu kapitoly 2.2.

Průběh měření je velice podobný metodě vážení vozidla při naklápění na bok. Hlavní požadavek pro zjištění úhlu překlopení vozidla spočívá v tom, že vozidlo musí být na sklopnou plošinu umístěno tak, aby spojnice vnějších okrajů ráfku kol na straně bližší k ose klopení plošiny byla s osou klopení plošiny rovnoběžná. Většinou se toho

docílí vložení stejně dlouhé rozpěry mezi přední i zadní pneumatiku vozidla na straně bližší k ose klopení plošiny a rám sklopné plošiny, jak lze pozorovat na obr. č. 5. Po naklopení plošiny se vozidlo o tyto rozpěry svévolně zapře a tím dojde k jeho vystředění v případě, že vozidlo nenajelo na sklopnou plošinu výše popsaným způsobem. Zároveň tyto rozpěry zabrání dalšímu bočnímu úsmyku vozidla. Vozidlo, na straně odvrácené k ose klopení plošiny, je nutno upevnit, aby nedošlo k jeho úplnému překlopení. K tomuto účelu je používáno různých druhů upínacích pásů [3].

Plošina s vozidlem je pomalu naklápěna tak dlouho, dokud nedojde ke ztrátě styku všech pneumatik odlehčené strany vozidla s naklopnou plošinou. V tomto okamžiku se výšková poloha těžiště nachází v průsečíku přímky P_1 , procházející vertikálně osou vnějších okrajů pneumatik, v místě styku pneumatiky s plošinou, na straně bližší k ose klopení plošiny a přímkou P_2 vedoucí průsečíkem podélné a příčné polohy těžiště, kolmou k horizontální poloze vozidla v nenaklopném stavu, viz přímka P_1 a P_2 znázorněná v obr. č. 5 [3].



Obr. č. 5: Metoda zjištění úhlu překlopení [28].

Kde:

- e je vzdálenost příčné polohy těžiště vozidla od podélné osy vozidla,
- p je velikost příčné deformace pneumatiky vlivem naklopení vozidla,
- t_L je příčná vzdálenost těžiště vozidla od ohnisek středů pneumatik levé části vozidla,
- t_p je rozchod kol přední nápravy,
- t_z je rozchod kol zadní nápravy.

Pokud má vozidlo stejný rozchod kol přední i zadní nápravy, vzorec na výpočet výškové polohy těžiště je následující:

$$h_T = t_L \operatorname{tg} (90 - \theta) \quad (19)$$

S hodnotou t_L je počítáno v případě, že levá strana vozidla je blíže k ose klopení plošiny než pravá strana vozidla. V opačném případě by byla použita hodnota t_{PR} .

Výškovou polohu těžiště u vozidla s rozdílným rozchodem kol přední a zadní nápravy lze pomocí této metody stanovit z následujících vzorců [6]:

$$\operatorname{tg} (\gamma) = \frac{t_P - t_Z}{2 l} \quad (20)$$

Kde :

l je rozvor náprav vozidla

Z rovnice (19) lze vypočítat úhel γ . Výšková poloha těžiště h_T pak je:

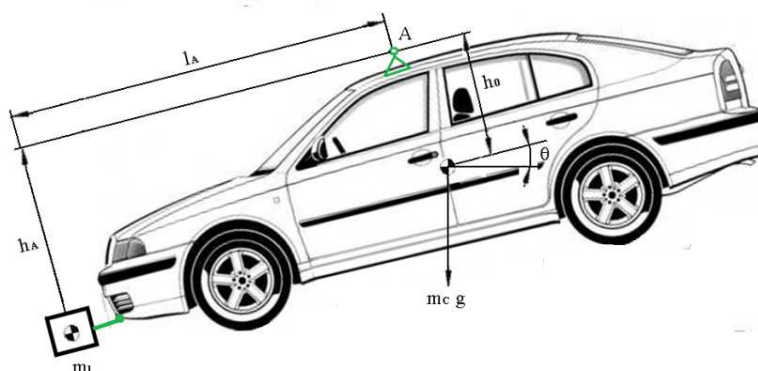
$$h_T = \frac{\left(\frac{t_Z}{2} + \frac{t_P - t_Z}{2 e} l + e \right)}{\operatorname{tg} (\theta)} \cos (\gamma) - p \quad (21)$$

Výhodou této metody je poměrně snadná realizace a malá časová náročnost. U lehčích typů vozidel lze sklopnou plošinu zcela vypustit a vozidlo naklánět např. pomocí vhodného hydraulického jeřábu apod. V těchto případech je velice důležité zajistit vozidlo proti překlopení. Nevýhodou této metody je přesnost určení úhlu překlopení a s tím spojené výškové polohy těžiště [3]. Dále hrozí velké nebezpečí úrazu, či poškození vozidla, pokud je takto manipulováno s vozidlem v neprofesionálních podmínkách.

2.2.4 Metoda zavěšení celého vozidla

Tato metoda není v praxi příliš používána pro její nežádoucí a často deformační charakter měření, přesto ji lze využít k nalezení výškové polohy těžiště odpružené části vozidel. Popis metody je následující [5]:

Na karoserii, korbu či kabinu vozidla je upevněn speciální přípravek, za jehož pomoci bude celé vozidlo nadzvednuto nad podložku. Vozidlo se kolem tohoto přípravku bude moci volně naklánět. Po jeho ustálení je změřen úhel náklonu vozidla. Následně je na přední část vozidla umístěno přídavné závaží o známé hmotnosti m_1 . Přídavné závaží vychýlí vozidlo o určitý úhel, s jehož pomocí lze stanovit výslednou výškovou polohu těžiště. Použití této metody je znázorněno na obr. č. 6 [5].



Obr. č. 6: Metoda zvedání celého vozidla [28].

Při výpočtech výškové polohy těžiště se vychází z rovnováhy statických momentů vzhledem k bodu závěsu - bodu A [3].

$$\sum M_A: m_1 [l_A \cos(\theta) - h_A \sin(\theta)] - m_c h_0 \sin(\theta) = 0 \quad (22)$$

$$h_0 = \frac{m_1}{m_c} [l_1 \cot g(\theta) - h_A] \quad (23)$$

Kde: θ je rozdíl úhlů mezi nezatíženým nadzdviženým vozem a zatíženým nadzdviženým vozem závažím o hmotnosti m_1 .

Za hlavní nevýhodu použitelnosti této metody lze považovat samotná instalace přípravku, či nešetrný průběh měření vzhledem k měřenému vozidlu. Tato metoda je zcela nevhodná např. pro měření těžiště nových osobních automobilů. Opakem je tomu při měření havarovaných, či jinak zdeformovaných vozidel, nebo nákladních automobilů [3].

3 Stabilita vozidla v závislosti na poloze těžiště a prováděném manévru vozidla

Za jeden z hlavních parametrů vztahujících se k aktivní bezpečnosti vozidla, který má předejít, nebo zabránit dopravní nehodě lze považovat právě polohu těžiště vozidla. Dynamické děje vozidla s nevhodně navrženým nebo následně posunutým těžištěm mají neblahý vliv na stabilitu a jízdní vlastnosti vozidla [7].

Stabilita tělesa je obecně schopnost tělesa udržet rovnovážnou stálou polohu, nebo se do ní vrátit po ukončení působení vnějších sil [1]. Stabilitu vozidla ovlivňuje mnoho faktorů. Tyto faktory mohou být rozděleny dle místa iniciace, či působení, do následujících skupin:

- Konstrukce vozidla
- Druh a charakter nákladu
- Poloha těžiště vozidla
- Řidič a jeho chování
- Vliv okolního prostředí (povětrnostní podmínky, charakter vozovky atd.)

Dynamiku vozidla lze rozdělit do následujících skupin podle smyslu ovlivnění vozidla působícími silami, na:

- Podélnou:
 - Přímá jízda,
 - akcelerace,
 - decelerace.
- Příčnou:
 - Výchyly ze směru jízdy vyvolané příčnou odstředivou silou,
 - výchyly ze směru jízdy silou bočního větru,
 - přebřzděním jednoho kola, apod.
- Výškovou:
 - Svislé pohyby, způsobené pružením a pérováním automobilu z příčin zejména nerovností vozovky.

Mezi základní situace a manévry vyskytující se běžně v silničním provozu ovlivňující stabilitu vozidla při nevhodném rozložení hmotnosti, tedy nevhodně umístěném těžišti ve vozidle patří zejména [10, 13, 15]:

- Jízda v zatáčce.
- Přímé brzdění.
- Jízda ze svahu, do svahu.
- Jízda s vozidlem mající mobilní polohu těžiště např. při převozu sypkého, nebo kapalného nákladu.
- Příčné přemístění vozidla při předjíždění.

3.1 Jízda v zatáčce

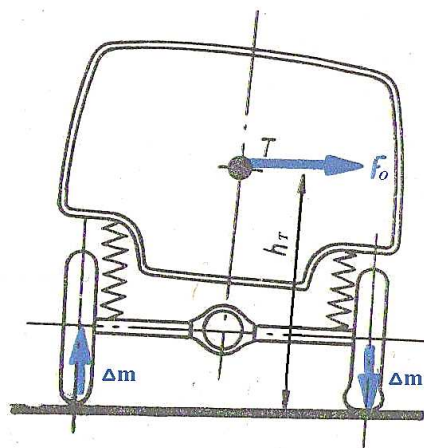
Při projíždění vozidla obloukem reprezentující zatáčku, na něj působí odstředivá síla F_O [N], jejíž velikost závisí na hmotnosti vozidla m_C [kg], druhé mocnině rychlosti v [m s^{-1}] a poloměru zatáčky r [m]. Odstředivá síla je odvozená jednotka SI popsána následujícím vztahem [7]:

$$F_O = m_C \frac{v^2}{r} \quad (24)$$

Tedy odstředivá síla se zvyšuje úměrně s druhou mocninou rychlosti vozidla jedoucího obloukem a působí v těžišti vozidla T . Je to síla působící na vozidlo směrem od středu křivosti trajektorie, resp. od středu kružnice reprezentující projížděnou zatáčku. Tato síla společně s výškou těžiště h_T vytváří moment M_O kolem podélné osy vozidla, který naklápí vozidlo ven ze zatáčky [7].

$$M_O = m_C \frac{v^2}{r} h_T \quad (25)$$

Moment popsaný rovnicí (25) naklápí vozidlo a tím vyvolává změnu svislých zatížení kol (tj. radiální reakci kol). Tímto naklopením se zatíží více pneumatiky na vnějších kolech o hodnotu Δm a na kolech vnitřních nastane jejich odlehčení o tutéž hodnotu Δm , viz obr. č. 7. Čím bude mít vozidlo větší rozchod kol, tím bude jeho naklánění v zatáčce menší [7].

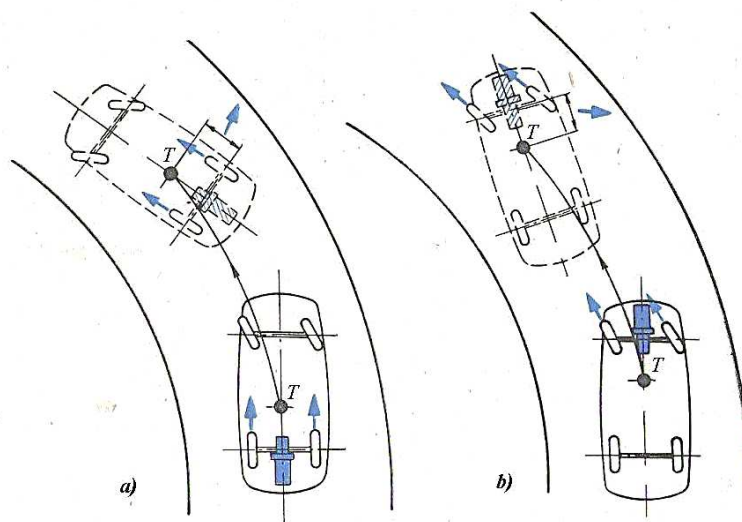


Obr. č. 7: Působení odstředivé síly na vozidlo projíždějící zatáčkou [7].

Vozidlo s více zatíženou zadní nápravou má těžiště posunuto blíže této nápravě. Čím blíže bude těžiště posunuto k zadní nápravě, tím větší bude hmotnostní rozdíl přenášený přední a zadní nápravou na vozovku. Zatížené zadní pneumatiky se budou v zatáčce více stranově deformovat směrem ven z oblouku [7].

Plocha, ve které se pneumatika dotýká vozovky, se nazývá stopa. Působí - li v ose otáčení kola boční síla, v tomto případě odstředivá síla v zatáčce, pak ve stopě vznikne vodorovná boční reakce S_K . Tato reakce se nazývá boční vodící síla kola. Působením této síly dojde k pružné deformaci pneumatiky v bočním směru a osa stopy se vzhledem k podélné rovině kola vychýlí o uhel, který je přímo závislý na velikosti boční síly a boční tuhosti pneumatik [2]. To znamená, že zadní část vozidla se bude v zatáčce vychylovat směrem ven z oblouku a bude se stáčet napříč, viz obr. č. 8 - a. Vozidlo se snaží svévolně zatáčku přetočit, proto se nazývá přetáčivé. S přetáčivým vozidlem se musí v zatáčce, obzvláště na mokré, či zledovatělé vozovce, jezdit velmi opatrně. Vozidla se zadním náhonem jsou vždy více, či méně vždy přetáčivá [7].

Má li vozidlo s předním náhonem více zatíženou přední nápravu nastává při jízdě zatáčkou zcela opačný úkaz vyobrazený na obr. č. 8 - b. Vozidlo se svévolně snaží přední část vytlačit ven z oblouku a osa vozidla při průjezdu zatáčkou opisuje oblouk s větším poloměrem, než má zatáčka. Vozidlo tedy nedostatečně zatáčí, a proto je vozidlo nedotáčivé. Nedotáčivé vozidlo je v zatáčce mnohem bezpečnější než přetáčivé.



Obr. č. 8: Vozidlo při jízdě v zatáčce: a) přetáčivé [7], b) nedotáčivé [7].

Při dosažení kritických hodnot odstředivé síly dojde ke ztrátě příčné stability vozidla. V závislosti na konstrukci vozidla a parametrech zatáčky může dojít k příčnému smyku, nebo až k převrácení vozidla. Aby byla zachována příčná stabilita vozidla z hlediska vzniku smyku, musí být splněna tato podmínka [10]:

$$\sum F_y \leq F_{ADy} \quad (26)$$

Tedy součet všech příčných sil působících na vozidlo musí být menší, než adhezní síla v příčném směru. Při překročení této adhezní síly dojde ke vzniku příčného smyku vozidla [10].

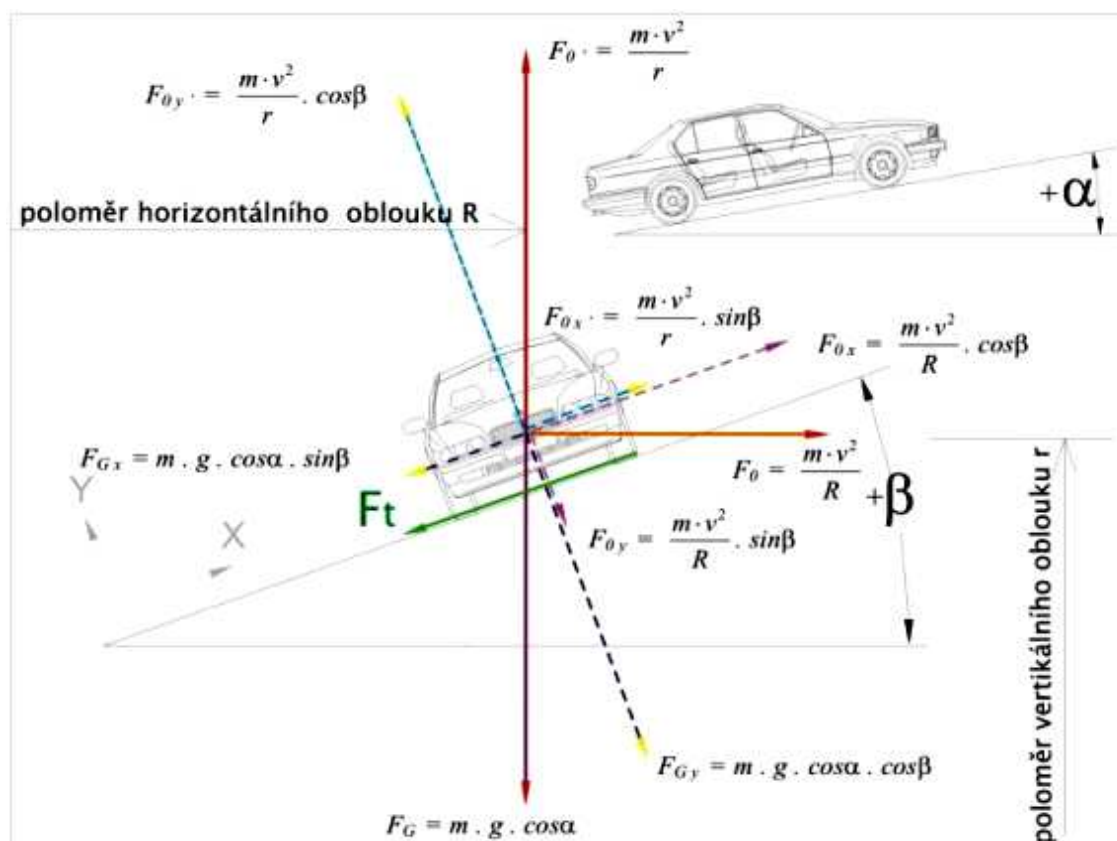
Ve zjednodušeném případě, kdy se vozidlo pohybuje stálou rychlostí v oblouku, který není příčně ani horizontálně nakloněn, kdy z příčných sil působí na vozidlo pouze odstředivá síla s odpovídajícími reakcemi, je mezní rychlost průjezdu oblouku možno stanovit jako odmocninu ze součinu poloměru oblouku, tíhového zrychlení a součinitele adheze v příčném směru. V případě nutnosti stanovit mezní rychlost vozidla v oblouku, ve kterém se vyskytují příčné a vertikální úhly sklonu vozovky lze použít následujícího komplexní vztah pro obecný typ oblouku [21].

$$v_{MEZ} = \sqrt{\frac{g r R (\mu_y + tg(\beta)) \cos(\alpha)}{r (1 - \mu_y tg(\beta)) - R (\mu_y + tg(\beta))}} \quad (27)$$

Kde:

- v_{MEZ} je maximální, mezní rychlost vozidla při průjezdu obloukem, před vznikem příčného smyku,
- g je tíhové zrychlení,
- r je vertikální poloměr oblouku,
- R je horizontální poloměr oblouku,
- μ_y je dosažitelná adheze v příčném směru,
- α je úhel podélného sklonu vozovky,
- β je úhel příčného sklonu vozovky.

Například v oblouku bez příčného ani podélného sklonu o poloměru 30 m s použitou adhezí v příčném směru 0,5 je mezní rychlost vozidla cca 73 km h⁻¹ [21].



Obr. č. 9: Síly působící na vozidlo při jízdě v oblouku [21].

Převrácení vozidla v zatáčce se z hlediska bezpečnosti považuje za mnohem nebezpečnější situace než vznik příčného smyku. Proto se vozidla konstruuji tak, aby při jízdě zatáčkou došlo dříve ke smyku, než k samotnému převrácení vozu. Dle následujících tří podmínek se při průjezdu vozidla o daných parametrech zatáčkou rozhodne, zda dojde k převrácení vozidla, nebo ke vzniku smyku [10].

$$f < \frac{t}{h_T} \dots \text{dojde ke smyku} \quad (28)$$

$$f = \frac{t}{h_T} \dots \text{dojde ke smyku + k převrácení vozidla} \quad (29)$$

$$f > \frac{t}{h_T} \dots \text{dojde k převrácení vozidla} \quad (30)$$

3.1.1 Elektronický stabilizační program (např. ESP)

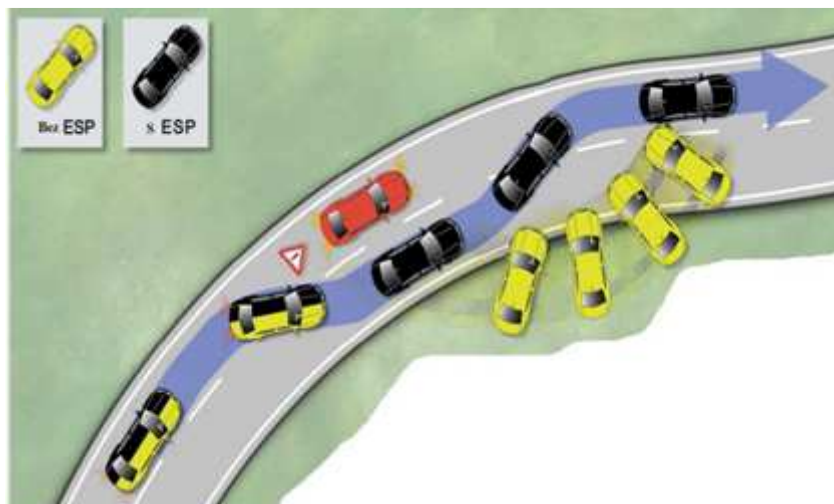
Přetáčivost či nedotáčivost vozidla je důležitá vlastnost z hlediska bezpečnosti jízdy. V dnešní době musí mít každé nově homologované vozidlo v EU instalovaný elektronický stabilizační program ESP. K roku 2014 musí všechny prodávané vozy v EU být povinně vybaveny ESP [9].

Systém ESP slouží ke stabilizaci jízdy vozidla a k odvrácení kritických mezních situací např. při průjezdu vozidla zatáčkou s následným vznikem příčného smyku. Tento systém dokáže předejít smyku až v 80 procentech případů [9].

ESP je rozšířením systému ABS a ASR. ESP provádí regulaci dynamiky vozidla na základě informací o natočení předních kol, rychlosti všech kol, otáčkách a krouticím momentu motoru, příčného zrychlení vozidla a rychlosti stáčení vozidla kolem svislé osy otáčení [8].

Na základě těchto hodnot dokáže řídicí jednotka korigovat přetáčivé, či nedotáčivé chování vozidla. Při přetáčení vozidla jsou automaticky přibrzdovány kola na vnější straně zatáčky, přičemž největší brzdná síla působí na přední vnější kolo. Naopak při nedotáčivém pohybu vozidla jsou přibrzdována kola na vnitřní straně zatáčky, přičemž největší brzdná síla působí na zadní vnitřní kole. Systém je navíc schopen sledovat reakci řidiče na tuto kritickou situaci a zároveň vyhodnotit a následně upravit točivý moment motoru. V dnešní době existuje i systém ESP 2. generace (ESP II), který aktivně zasahuje i do řízení vozidla [8].

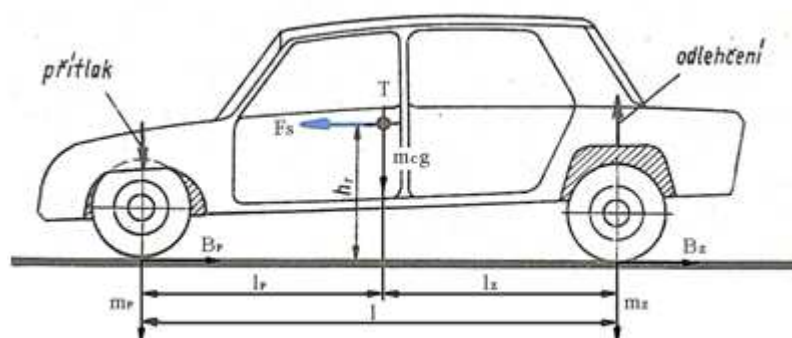
Stabilizace přetáčivého vozidla v kritické situaci s a bez využití systému ESP je znázorněn na obrázku č. 10.



Obr. č. 10: Zásah EPS při přetáčivém chování vozidla [24].

3.2 Přímé brzdění

Brzdíme-li vozidlo, působí na něj setrvačná síla F_S v těžišti T vzdáleném o míru h_T od země. Na nápravy vozidla působí brzdné síly B_P a B_Z , viz obr. č. 11.



Obr. č. 11: Síly působící na vozidle při brzdění [7].

Působením setrvačné síly vzniká moment, kterým se odlehčuje zadní náprava. Čím je zadní náprava více odlehčená, tím více se zatěžuje náprava přední (přítlak), což se projeví předkláněním přední části automobilu. Zatížení jednotlivých náprav (radiální reakce) se získají z momentových podmínek rovnováhy. Aby nebylo nutné užívat záporné znaménko zrychlení v následujících rovnicích, byl zaveden pojem poměrné zpomalení. Poměrné zpomalení z je poměr záporného zrychlení $-a$ k tíhovému zrychlení g [2].

Tedy: (31)

$$m_P = m_C \left(\frac{l_Z}{l} + z \frac{h_T}{l} \right) = m_{P_{stat}} + m_C z \frac{h_T}{l}$$

$$m_Z = m_C \left(\frac{l_P}{l} + z \frac{h_T}{l} \right) = m_{Z_{stat}} - m_C z \frac{h_T}{l} \quad (32)$$

Kde:

- m_P je zatížení na přední nápravu,
- m_Z je zatížení na zadní nápravu,
- $m_{P_{stat}}$ je zatížení přední nápravy vozidla v klidu,
- $m_{Z_{stat}}$ je zatížení zadní nápravy vozidla v klidu,
- l je rozvor náprav,
- h_T je výška těžiště,
- z je poměrné zpomalení.

Tedy velikost zatížení jednotlivých náprav při prudkém brzdění se dá do určité míry ovlivnit konstrukčním uspořádáním přední a zadní nápravy, nebo výškovou polohou těžiště dle rovnice (31) a (32).

Odlehčením zadní nápravy při prudkém zabrzdění může nastat blokace zadních kol, neboť se zmenšilo jejich zatížení, ale brzdící účinek obložení čelisti a bubnů, či brzdných kotoučů a písků se nezměnil. Blokování kol, ať zadních, či předních může být příčinou smyku vozidla, a vést k havárii. Proto jsou brzdné systémy osobních automobilů většinou konstruovány tak, aby přední kola vlivem technických inovací brzdila v poměru k zedním kolům 60 : 40 [7]. V dnešní době již není výjimkou, že brzdné tlaky jednotlivých kol řídí elektronika např. pomocí systému EBD, nebo EBV – Elektronické rozdělení brzdného účinku, což je systém zohledňující aktuální zatížení vozidla, a podle něj provádí samočinnou úpravu brzdných tlaků mezi přední a zadní nápravou vozidla tak, aby bylo docíleno maximálního možného účinku brzd na zadní nápravě a přitom nedošlo k jejich přebrzdění [2].

4 Rozdělení silničních dopravních nehod

Dopravní nehody § 2 odst. 1 zákona č. 56/2001 Sb., lze typově rozdělit do mnoha skupin dle kritérií, které při nehodě, či následném řešení nehodového děje, hrály významnou roli. Tyto dopravní nehody lze dělit např. dle:

- typu nehodového děje,
- místa vzniku,
- příčin,
- následků atd.

Rozdělení podle typu nehodového děje

Rozdělení je stanoveno podle toho s jakou překážkou se vozidlo střetne, popřípadě jaký děj nastane během střetu. Mezi typy nehodového děje patří havárie, srážka a ostatní nehody.

Havárie

Havárie je klasifikována jako dopravní nehoda s účastí pouze jediného silničního vozidla. Většinou se jedná o převrácení vozidla nebo sjetí do potoka následkem např. namrzlé vozovky [12].

Srážka

V souvislosti se srážkou lze hovořit o střetu vozidla, resp. vozidel, z nichž alespoň jedno bylo silničním vozidlem.

Srážky lze dělit např. podle:

- Srážky se statickou, či dynamickou překážkou [12].
- Základních poloh vozidel při střetu [11]:
 - o zepředu,
 - o zezadu,
 - o z boku.
- Dále lze střet rozdělit na [11]:
 - o centrický,
 - o excentrický,
 - o přímý,
 - o nepřímý.

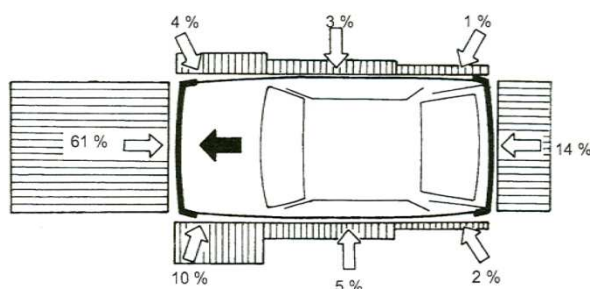
Přičemž *podélné srážky* jsou děleny dle míry překrytí vozidla na srážky v podélné ose vozidla a mimo osu. *Kolmé srážky* jsou děleny podle přesazení vozidel při střetu vztaženého k těžišti naraženého vozidla. Základní rozdělení jednotlivých střetů vozidel je znázorněno graficky na obr. č. 13, přičemž mohou nastat další varianty střetu např. nacouváním do statické překážky apod. [11].

Srážka se statickou překážkou

Střet se statickou překážkou lze dále rozdělit za předpokladu, zda po střetu došlo k významnému pohybu statické překážky (např. svislého dopravního značení), či nikoliv, jak by tomu bylo např. u vzrostlého stromu či železo-betonové zdi [12].

Srážka s dynamickou překážkou

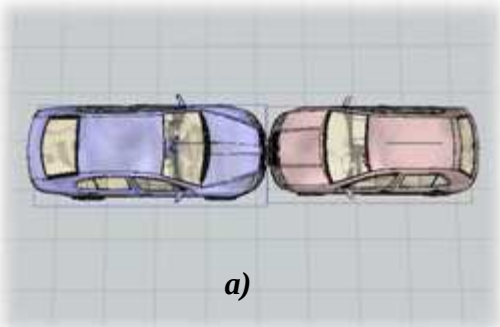
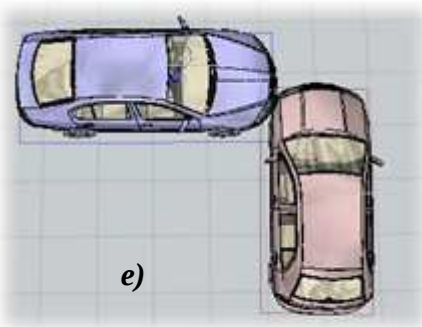
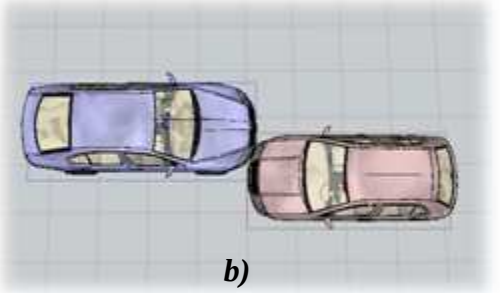
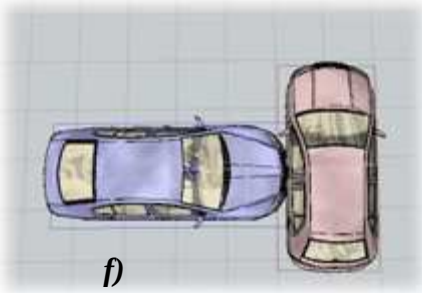
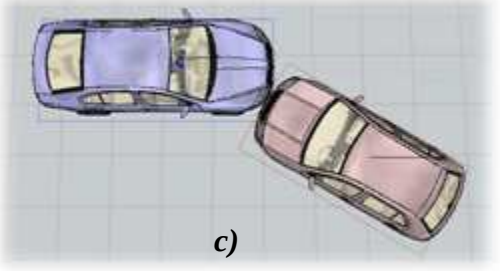
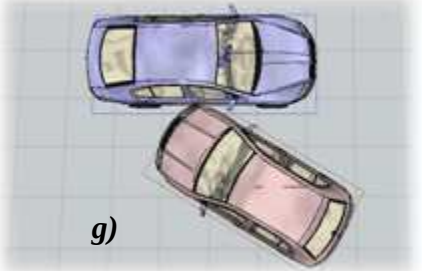
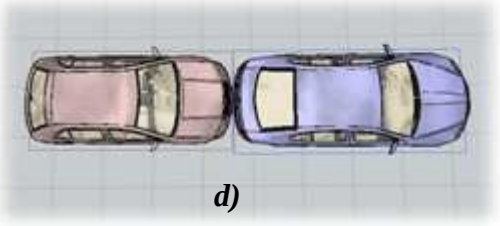
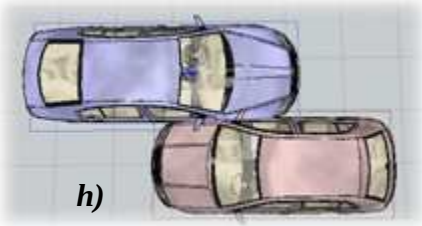
Do této skupiny střetů připadá největší podíl nehodových dějů vůbec. Mezi tyto nejčastější nehody patří střet dvou či více vozidel, dále střet se zvířetem nebo chodcem. Statistická četnost místa střetu vozidla podle různých směrů rázu v % je znázorněna na obr. č. 12 [12].



Obr. č. 12: Relativní četnost nehody podle různých směrů rázu [26].

Ostatní nehody

Mezi ostatní nehody se řadí dopravní nehody, které ze své podstaty nelze zařadit mezi havárie, nebo střety. Může se jednat o dopravní nehodu v souvislosti s dopravním prostředkem, ve které nedojde ke kolizi. Může se jednat o vypadnutí pasažéra z dopravního prostředku apod. [12].

 <i>a)</i>	 <i>e)</i>
 <i>b)</i>	 <i>f)</i>
 <i>c)</i>	 <i>g)</i>
 <i>d)</i>	 <i>h)</i>
a - čelní centrický střet, 100% překrytí b - čelní excentrický střet, 50% překrytí c - čelní šikmý střet d - centrický střet zezadu, 100% překrytí	e - boční kolmý střet velká excentricita f - boční kolmý střet malá excentricita g - boční šikmý střet h - tečný střet (tangenciální)

Obr. č. 13: Základní rozdělení jednotlivých střetů vozidel [28].

5 Střety

5.1 Metody výpočtu a řešení střetů

Z hlediska analýzy a následného řešení střetu vozidla lze metody řešení rozdělit na dvě základní skupiny, dopředné a zpětné. Takto rozdělené metody se liší zejména použitou metodikou a přístupem k nehodovému ději [11].

Zpětné metody- tyto metody jsou z historického hlediska starší a podstatou těchto metod je, že řešitel řeší střet proti běhu času. Od následků k příčinám. Postup těchto metod je snadno popsateľný, neboť řešitel postupuje metodicky od známého k neznámému [11].

Dopředné metody – tyto metody vedou řešitele tak, aby postupoval ve smyslu toku času. To je od příčin k následkům. K řešení střetu pomocí těchto metod jsou použity vstupní předstřetové parametry k nalezení výstupních postřetových parametrů.

Vzhledem k tomu, že předstřetové parametry nelze z pravidla přesně metodicky odvodit, bývají dopředné metody používány výhradně v kombinaci s výpočetní technikou, která dovoluje variovat vstupní parametry a pro ně hledat optimální řešení [11].

5.1.1 Zpětné metody

Za zpětné metody výpočtu lze považovat např.:

- Metodu DRHI – diagram rovnováhy hybností a impulsů.
- Metoda rhomboidního řezu (MDRHI, DRRHI, energetický prstenec).
- Metoda průniku pásem
- Metoda Delta V
- Metoda ZZH + ZZE někdy nazývaná také (DRHI + EES)

Podrobný postup pro sestavení grafu, či nalezení vhodného řešení těchto i dalších metod je popsán v [15].

DRHI - diagram rovnováhy hybností a impulsů

Tato metoda je grafickou metodou, spočívající v řešení diagramu rovnováhy hybností a impulsů. Při konstrukci tohoto diagramu se vychází ze zákonů akce – reakce a zákonu zachování hybnosti. Za předpokladu, že známe postřetové pohybové parametry vozidel, směr a rychlost lze řešením DRHI obdržet vektor impulsu rázových sil a vektorovým součtem s předstřetovou hybností i rychlost vozidel před střetem [11].

Tato metoda je rychlá, ovšem není zcela přesná. Její přesnost závisí především na správném určení vstupních parametrů, navíc nezohledňuje všechna hlediska střetu vozidel. Proto ji lze využít především ke kontrole a orientačním výpočtům [11].

Metoda Rhomboidního řezu

Tato grafická metoda vede k vytvoření diagramu prostřednictvím tří odlišných kroků konstrukce diagramu. Každý krok posuzuje střet vozidel z jiného hlediska [11].

- MDRHI - Modifikovaného diagramu rovnováhy hybností a impulsů.
- DRRHI - Diagram rovnováhy rotačních hybností a impulsů.
- Energetického prstence.

Výsledkem každé z těchto metod je nalezení oblasti znázorňující množinu koncových bodů vektoru impulsu splňující danou podmínku. Cílem řešitele je nalezení střetové konfigurace, ve které mají všechny tři sestrojené oblasti stejný průnik [11].

MDRHI vychází ze změny hybnosti vozidel během střetu způsobené impulsem rázové síly. Modifikace potom spočívá ve variaci postřetových hybností, co do velikosti i do směru. Výsledkem je množina impulsů splňujících podmínku postřetového translačního pohybu. Obdržené řešení vyhovuje z hlediska translace [11].

DRRHI představuje koncepci vycházející z rotačních pohybů. Pomocí tohoto diagramu se vymezí oblast, ve které leží koncové body všech impulsů, jejichž následkem je zadaná postřetová rotace. Obdržené řešení vyhovuje z hlediska rotace [11].

Průnik těchto oblastí vytvoří rovinný útvar zvaný rhomboid, ze kterého lze dopočítat parametry předstřetových pohybů vozidel [11].

Pro zpřesnění předstřetových pohybů lze průniky výše uvedených diagramů upřesnit srovnáním s metodou energetického prstence. Velikost impulsu rázové síly je stanovena ze změny energie vozidel, nikoliv pomocí změny hybností, resp. Rotací jako DRRHI nebo MDRHI [11].

5.1.2 Dopředné metody

Dopředné metody řešení střetu jsou mnohem mladší, než je tomu u zpětných metod. Velkého uplatnění se jim dostalo až s rozvojem výpočetní techniky, pomocí které lze efektivně řešit různé typy střetů vozidel na základě předstřetových veličin. Pro nalezení vhodného řešení mohou být použity veškeré fyzikální podmínky, při vzájemné interakci všech zadaných parametrů. Od řešitele jsou mnohdy vyžadovány zkušenosti a intuice oproti zpětným metodám, které lze řešit metodicky pomocí definovaných kroků [11].

V dnešní době při řešení střetu a pohybu vozidel, střetu vozidel s motocyklem či chodcem, jednoznačně dominují dopředné metody nad zpětnými. K analýze těchto střetů se v Evropě používají nejčastěji tyto programy Virtual CRASH, PC Crash, Carat, SMAC, Analyzer Pro, apod. Zpětné metody jsou využívány především pro orientaci, či kontrolu výsledků [16].

Mezi dopředné metody řešení střetu patří především:

- Impulsně rázový model
- Silový model

Oba tyto dopředné modely analýzy dopravních nehod pracují především s těmito *parametry rázu*. Parametry rázu jsou tři významné veličiny charakterizující fyzikální vlastnosti střetu: [11]

Koeficient restituce k [-]

Tato skalární veličina popisuje elasticnost rázu, tedy jak pružně se tělesa při srážce chovají. Koeficient restituce obvykle nabývá hodnot <0 až 1 , kde 0 znamená dokonale plastický ráz, a 1 je dokonale pružný ráz. Koeficient restituce může ve výjimečných případech, ve kterých dojde k průniku materiálem, nabývat i záporných hodnot [11].

Koeficient restituce lze definovat jako poměr restituční složky impulsu ke kompresní složce nebo také jako poměr elastické deformace vůči celkové deformaci při střetu [11].

Normála roviny rázu n

Normála roviny rázu určuje směr při střetu, ve kterém došlo k vyrovnání rychlostí těles a ve kterém se realizuje restituace. Kolmo na tuto rovinu může nastat případný skluz vozidel [11].

Tření v rovině rázu

Tření v rovině přímo ovlivňuje délku výběhu vozidel, tedy i velikost postřetových rychlostí. Přesné stanovení roviny rázu a tření je značně problematické i s využitím počítačové techniky [11].

5.2 Pohyb vozidla po střetu

Samotný střet dvou vozidel je velice komplikovaný proces, při němž velké množství činitelů může ovlivnit síly mezi koly a vozovkou, což má nezanedbatelný vliv na průběh postřetového děje a výslednou polohu vozidel. Mezi parametry ovlivňující tento děj patří zejména následující [15]:

- Velikost rychlosti,
- úhel stočení směru rychlosti k ose,
- úhel stočení podélné osy vozidla k ose,
- úhlovou rychlost rotace,
- hmotnost,
- moment setrvačnosti k těžištní ose,
- průměrnou vzdálenost těžiště od kol.

Při intenzivním rázu dojde k deformaci vozidla, což má za následek jiné, nové rozložení hmoty a následné vychýlení těžiště a změnu momentu setrvačnosti. Velmi významnou roli při modelování střetu hraje právě poloha těžiště vozidla k místu rázu. Příliš velká excentricita střetu, viz výše, obr. 13 - e, má za následek menší změnu translační rychlosti a větší změnu rotace [16].

Mezi další faktory, které mají významný vliv na výslednou polohu vozidla, patří samotný charakter postřetového pohybu. Zda se jedná o intenzivní brzdění, smýkání na konkrétním povrchu, dření, rytí či dokonce převrácení vozidla nebo sekundární náraz do okolního objektu [16].

Schopnost vozidla zastavit záleží především na charakteru a stavu povrchu, na kterém se vozidlo nachází, tedy na součiniteli adheze pneumatik na vozovce, nebo na součiniteli tření např. při dření kovu o asfalt [16]. Dosažené zpomalení vozidel pro různé povrchy jsou zaznamenány v tab. č. 1, ve které jsou publikovány sebrané výsledky různých měření [17].

Tab. č. 1: Dosažené zpomalení vozidel na různých površích [16, str. 41].

Střední plné zpomalení vozidel na rozdílných površích [m.s ⁻²]									
Povrch		Burg/Rau 1980	Danner/Halm 1980	Rathgeb Handbuch 1980	Dekra 1988	Fucik- Hartl- Schlosser 1998	Ilfa Jakubasch 1998	Tabulky EVU	Vlastní měření 2004
Asfalt	suchý	5,3-8,6	7,5±7%	6-9	6-9	5,5-8,0	6-10	6-11	6-8,5
	mokrý	5,5-7,4	5,5±10%	4-8	5-7	4-7	5-7	4-7,5	5-6,8
Beton	suchý		8,5±10%	6-9	6-9	6-8	6-10	6-11	6,5-9
	mokrý		5,5±10%	4-8	5-8	5,5-7	4-8	4-7,5	4,5-8
Kostky velké („Kočí hlavy“)	suché		8,2-9,2	6-8		5-7,5	4,5-9,2	4,5-7	5-9
	mokrý		6,3	3,5-6		3,5-6	2-5	2-5	4-7,5
Betonová dlažba	suchá		7±5%						5-8,5
	mokrá								4-7,5
Kypřý sníh				1-2	1-3		1-4	1-4	2-3,5
Uježdění sněhová pokryvka			3,5±10%			0,2-1,5	1-3		1-3,5
Led			1,75±10%	0,5-3	0,5-3	0,2-1,5	0,5-3	0,5-3	0,5-3
Tvrdý písek	suchý		5,5	5-6	5-6		4-6	4-6	4-7
	mokrý			4-5			2,5-5	2,5-5	3,5-6
Štěrka	suchý	3,7-4,8	4,8			3-4,5			4-7,5
Tvrdá půda	mokrá		2,2	2-3	2-3		2-3		
Travnatá louka	suchá			4,5-6		3-6	4,5-6		2,5-5,5
	mokrá			3-4		1-4,5	3-4		2,5-4,5

6 Vytyčení problematických manévrů a situací v silničním provozu

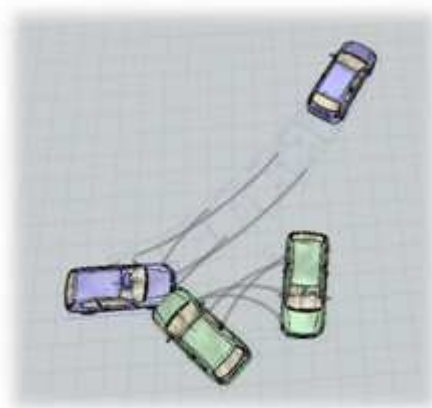
V běžném silničním provozu dochází každý den k určité dopravní nehodě. Mezi nejběžnější příčiny vzniku dopravní nehody patří nedání přednosti v jízdě, nejčastěji v prostoru křižovatky, dále špatné předjíždění či objíždění překážky [18].

Pro analýzu postřetového děje vozidla byly vytyčeny problematické manévry a situace vyskytující se v běžném silničním provozu. Tyto situace byly chronologicky seřazeny dle směru pohybu těžiště vozidla na posun těžiště v příčném, výškovém a podélném směru vozidla. Vybrané typy z těchto simulací následně budou řešeny a namodelovány v prostředí programu Virtual CRASH 2.2 a PC Crash 8.0

6.1 Vliv příčné polohy těžiště

Běžná osobní vozidla se konstruuje tak, aby se příčná poloha těžiště nacházela v podélné ose vozidla, nebo co nejbližší k ní. Příčný posun těžiště nastane nerovnoměrným rozložením hmotnosti nákladu pouze na jednu podélnou stranu vozidla. Takovýto posun těžiště se pak může projevit zhoršenými jízdními vlastnostmi vozidla např. při průjezdu zatáčkou, brzdění nebo samotném střetu s jiným vozidlem.

Situace šikmého střetu dvou vozidel je jeden z nejčastějších typů střetu, který může nastat právě v křižovatce při nedání přednosti v jízdě. Tento střet je znázorněn na obr. č. 14.



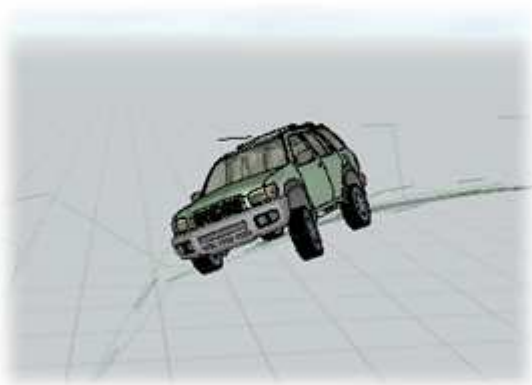
Obr. č. 14: Střet dvou vozidel [28].

6.2 Vliv výškové polohy těžiště

Výšková poloha těžiště má vliv především na převrácení vozidla. Proto byly následující situace zaměřeny především na docílení převrácení vozidla. Protože z bezpečnostního hlediska je převrácení vozidla klasifikováno jako velice nebezpečné pro újmu na zdraví, jsou vozidla konstruována tak, aby za běžných podmínek došlo dříve ke smyku, než k převrácení vozidla.

Průjezd zatáčkou

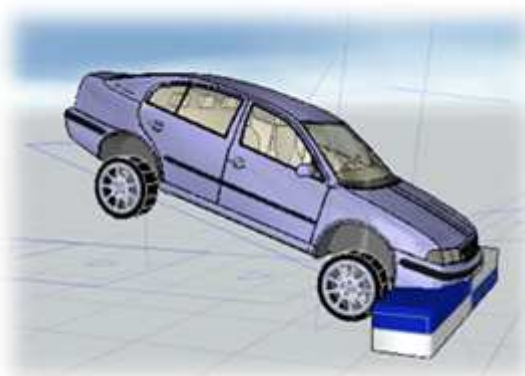
Při průjezdu vozidla zatáčkou, vlivem odstředivé síly působící v těžišti vozidla, může dojít k jeho převrácení. Proto byla situace průjezdu vozidla zatáčkou vybrána jako vhodná k následné analýze. Situace průjezdu vozidla zatáčkou je znázorněna v následujícím obrázku č. 15.



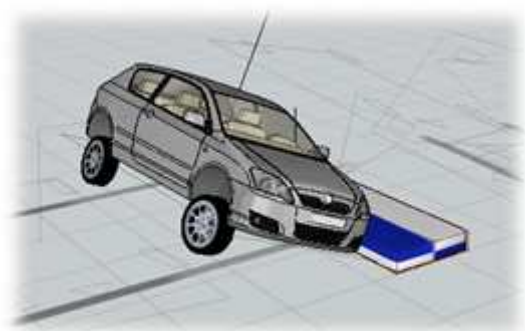
Obr. č. 15: Průjezd vozidla zatáčkou [28].

Střet s nízko situovanou pevnou překážkou

Jako další nebezpečná situace, vyskytující se v silničním provozu je střet s nízko situovanou překážkou, např. betonová obruba. Vlivem kombinace nízko umístěného bodu rázu, vysokou polohou těžiště a setrvačností vozidla může snadno dojít k příčnému, či podélnému převrácení vozidla. Situace střetu vozidla s nízko umístěnou překážkou jsou znázorněny v obrázcích č. 16 a 17.



Obr. č. 16: Podélný náraz s nízko umístěnou pevnou překážkou [28].

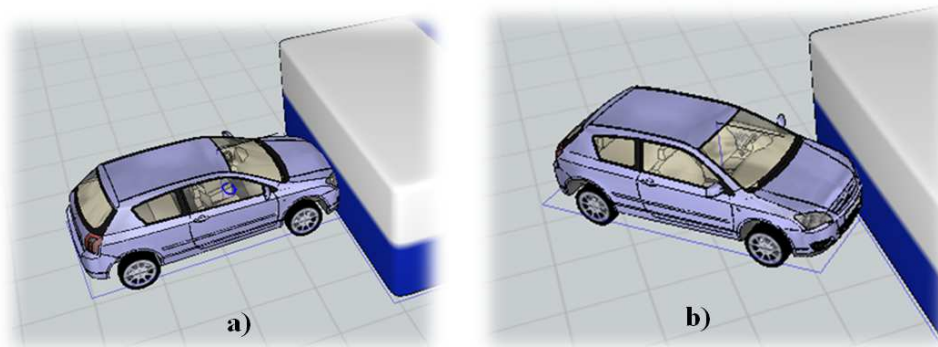


Obr. č. 17: Příčný náraz s nízko umístěnou pevnou překážkou [28].

Vzhledem k tomu, že použité simulační programy (PC Crash a Virtual CRASH) přistupují rozdílně ke střetu pneumatiky s překážkou, je srovnání výstupů u těchto simulací velice obtížně proveditelné. Ráz mezi pneumatikou a nízkou překážkou není modifikovatelný, ke kontaktu a následnému vygenerování EES dochází, až jakmile dojde k průniku karoserie vozidla a překážky. Proto bylo od simulací střetu vozidla s nízkou překážkou opuštno.

Střet s pevnou překážkou

Tento typ střetu s pevnou překážkou může nastat např. pokud řidič v kritické situaci nezvládne řízení vozidla a čelně, či pod úhlem se střetne s domovní zdí. Situace střetu s pevnou překážkou je znázorněna na obr. č. 18.



Obr. č. 18: a) Kolmý střet s pevnou překážkou [28].
b) Šikmý střet s pevnou překážkou [28].

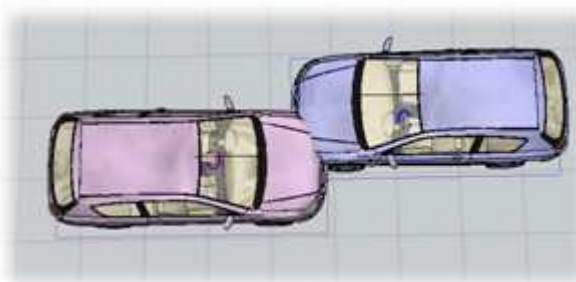
6.3 Vliv podélné polohy těžiště

Simulační programy pro analýzu silničních nehod, běžně používány v ČR, počítají především se změnou podélné polohy těžiště. Tato změna bývá brána většinou od osy přední nápravy. Pokud je do kufru vozidla vloženo závaží, posune se poloha těžiště směrem k zadní části vozidla. Takto posunuté těžiště může vyvolat po střetu s jiným vozidlem větší rotaci a rázně tak změnit postřetové chování vozidla oproti vozidlu s nezměněnou polohou těžiště.

Jako problematické situace byly vytyčeny následující, z nichž budou vybrány situace pro analýzu vlivu podélné polohy těžiště na postřetový pohyb vozidla a ty budou nasimulovány v programech PC Crash a Virtual CRASH.

Situace čelního střetu dvou protijedoucích vozidel s překrytím 50 %.

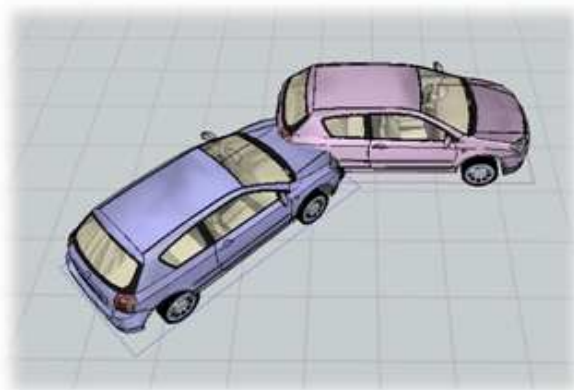
Čelní střet simuluje situaci, kdy předjíždějící vozidlo se nestihne zcela zařadit do svého jízdního pruhu a čelně se střetne s protijedoucím vozidlem. Tato situace je znázorněna na obr. č. 19.



Obr. č. 19: Čelní střet dvou vozidel s překrytím 50 % [28].

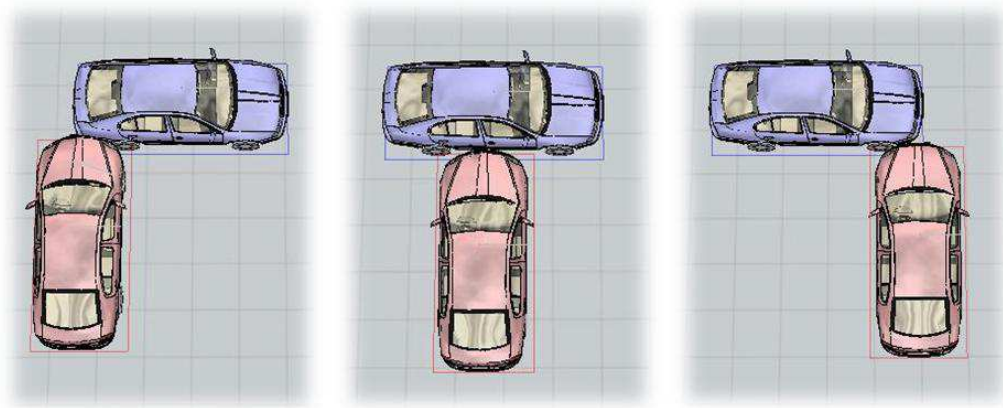
Šikmý střet do zadní části vozidla.

Tento střet vystihuje situaci při rozjíždění pomalu jedoucího vozidla v křižovatce, které nedalo přednost rychle jedoucímu vozidlu po hlavní silnici. Situace je znázorněna na obr. č. 20.



Obr. č. 20: Šikmý střet dvou vozidel [28].

Další typy střetů, vyskytující se nejčastěji v křižovatce můžou být např. kolmé střety dvou vozidel, jež jsou znázorněny na obr. č. 21.



Obr. č. 21: Situace kolmého střetu dvou vozidel [28].

Lze vytvořit daleko více zajímavých situací, např. různé šikmé střety či střety více vozidel, které by mohly být následně modelovány a řešeny v programech běžně používaných soudními znalci na území České republiky pro analýzu nehodového děje či znaleckou činnost. Z kapacitních důvodů této práce byl proveden výběr i z výše znázorněných situací, které byly nasimulovány v programech Virtual CRASH a PC Crash.

Virtual CRASH

Tento program je v současné době jeden z nejmodernějších nástrojů pro analýzu průběhu silničních nehod. Virtual CRASH vyniká uživatelsky příjemným prostředím. Výsledky simulací dokáže zobrazit v pláncích v měřítku, ve dvou i trojrozměrných pohledech, diagramech a tabulkách. Výsledky simulace taky dokáže exportovat do videosouborů. Tento program pracuje s real-time výpočty [22].

PC Crash

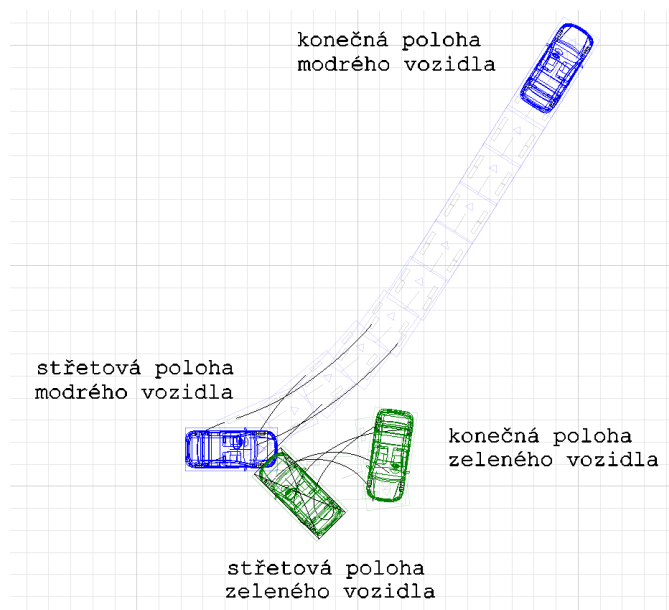
Je to světově rozšířený a vysoce efektivní program k analýze průběhu silničních nehod. Tento program dokáže pracovat až s 32 vozidly a je vhodný k analýze nehodových dějů motorových vozidel, či střetu s chodci. Kromě samotného výpočtu dokáže vykreslovat průběh nehodového děje v diagramu dráha/čas a vyhodnotit možnosti odvrácení střetu. Pro znázornění dokáže analyzovanou situaci zobrazit v trojrozměrných pohledech [23].

7 Vytvoření simulací problematických manévrů v prostředí programů PC Crash a Virtual CRASH se změnou polohy těžiště vozidla

Pro analýzu vlivu polohy těžiště na jeho postřetový pohyb byly vybrány určité situace vyskytující se v běžném provozu na pozemních komunikacích. Dále byly vybrány situace, u kterých bylo předpokládáno výrazných změn v chování vozidla během postřetového pohybu za předpokladu změny polohy těžiště. Taktéž byl výběr vhodných situací zaměřen na situace, při nichž se nevyskytovaly žádné sekundární střety vozidel, které by rázným způsobem ovlivnily postřetové chování vozidel při určité změně jejich polohy těžiště. Prioritním vozidlem zvoleným k simulaci bylo vozidlo Toyota Corolla, které bylo použito k experimentálnímu měření polohy těžiště, viz kapitola č. 8.

7.1 Vliv příčné polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb

Protože ani jeden ze simulačních programů, používaných běžně v ČR, Virtual CRASH a PC Crash, nedokáže přímo měnit příčnou polohu těžiště vozidla. Byla pro srovnání postřetového pohybu se změnou příčné polohy těžiště vytvořena simulace střetu dvou vozidel se základní polohou těžiště v programu Virtual CRASH, viz obr. č. 22. Na základě postřetových hodnot získaných z této simulace byl vytvořen DRHI_1 popsáný a dopočítaný v tabulce č. 3, zobrazený na obr. č. 23. Dále byl vytvořen DRHI_2 a DRHI_3 na základě totožných dat jako DRHI_1, ovšem se změněnými úhly postřetových rychlostí. Tyto úhly byly získány posunem příčné polohy těžiště modrého vozidla ve střetové a v konečné poloze.



Obr. č. 22: Sřet dvou vozidel pro analýzu vlivu příčné polohy těžiště [28].

Parametry použité pro vytvoření simulace a následného diagramu DRHI k analýze příčné polohy těžiště:

Tab. č. 2: Použité parametry k simulaci a diagramu DRHI [28].

	jednotky	modré vozidlo	zelené vozidlo
Předstřetová rychlost	[km h ⁻¹]	90	50
Postřetová rychlost	[km h ⁻¹]	45	20
Předstřetový směr rychlosti	[°]	0	135
Postřetový směr rychlosti	[°]	50	22
Hmotnost vozidel	[kg]	1250	1250

Příčná poloha těžiště vozidel je umístěna v podélné ose vozidla.

Takto vytvořený diagram DRHI_1 byl následně porovnán s DRHI_2 a DRH_3. Tyto diagramy byly vytvořeny se změněnou příčnou polohou těžiště modrého vozidla, posunutou o 0,11 m vlevo, resp. vpravo od původní příčné polohy těžiště následkem osazení simulovaného vozidla dvěma osobami v levé, resp. pravé části vozidla, které přitížili LP a LZ, resp. PP a PZ kolo, každé o 100 kg. Hodnoty příčného posunu těžiště o 0,11 m na každou stranu od příčné polohy těžiště nezatíženého vozidla byly maximální analyzované extrémy.

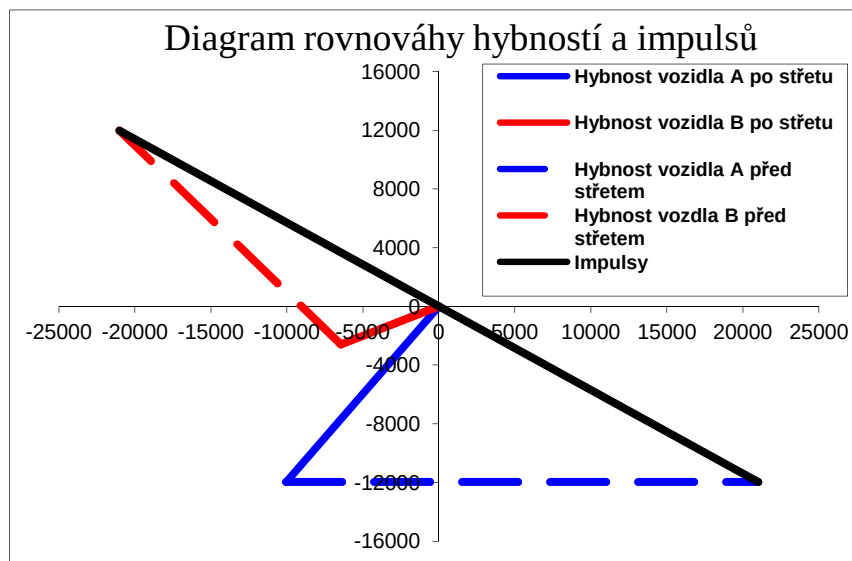
Hodnota (0,11 m) posunu příčné polohy těžiště vlevo, resp. vpravo od původní příčné polohy těžiště vozidla byla získána na základě výpočtu hmotností s použitím hodnot zatížení vozidla získaných při experimentálním měření polohy těžiště vozidla Toyota Corolla, blíže popsáném v kapitole č. 8.

Tab. č. 3: Výsledné hodnoty DRHI1, DRHI2 a DRHI3 [28].

	jednotky	Posun o 0,11 m vlevo, DRHI_2		Originální poloha těž. DRHI_1		Posun o 0,11 m vpravo, DRHI_3	
		modré voz.	zelené voz.	modré voz.	zelené voz.	modré voz.	zelené voz.
Rychlost po střetu	[km h ⁻¹]	45	20	45	20	45	20
Rychlost po střetu	[m s ⁻¹]	12,50	5,56	12,50	5,56	12,50	5,56
Směr rychlosti po střetu (od vodorovné osy)	[°]	49	22	50	22	51	22
Směr rychlosti po střetu (od vodorovné osy)	[rad]	0,86	0,38	0,87	0,38	0,89	0,38
Rychlost před střetem	[km h ⁻¹]	89,52	58,62	89,43	59,35	89,33	60,05
Rychlost před střetem	[m s ⁻¹]	24,87	16,28	24,84	16,49	24,81	16,68
Směr rychlosti před střetem	[°]	0	135	0	135	0	135
Směr rychlosti před střetem	[rad]	0,00	2,36	0,00	2,36	0,00	2,36
Hmotnost	[kg]	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Hybnost před střetem	[kg m s ⁻¹]	36056	23612	36021	23903	35978	24187
Hybnost po střetu	[kg m s ⁻¹]	18125	8055	18125	8055	18125	8055

Příčná změna polohy těžiště modrého vozidla v extrémních situacích o hodnotu 0,11 m vpravo, resp. vlevo od podélné osy vozidla má pouze nepatrný vliv na postřetový pohyb vozidla výše uvedené simulace. Vliv posunu těžiště o hodnotu 0,11 m vlevo, resp. vpravo lze kompenzovat změnou předstřetové rychlosti modrého vozidla o -0,09 km h⁻¹, resp. o 0,1 km h⁻¹

Při řešení střetu s použitím zpětných metod např. DRHI, MDRHI, je velice důležité přesně určit předstřetové a postřetové směry rychlostí, které mají mnohem vyšší vliv na celkový výpočet nehodového děje než je příčná změna polohy těžiště vozidla.

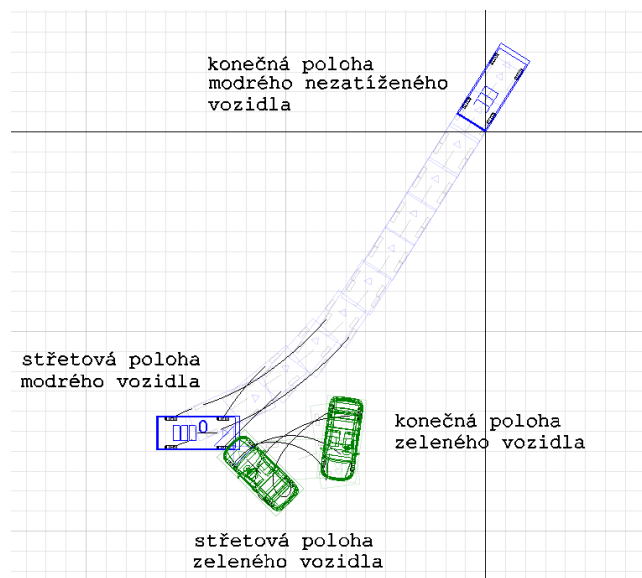


Obr. č. 23: Diagram rovnováhy hybností a impulsů [27].

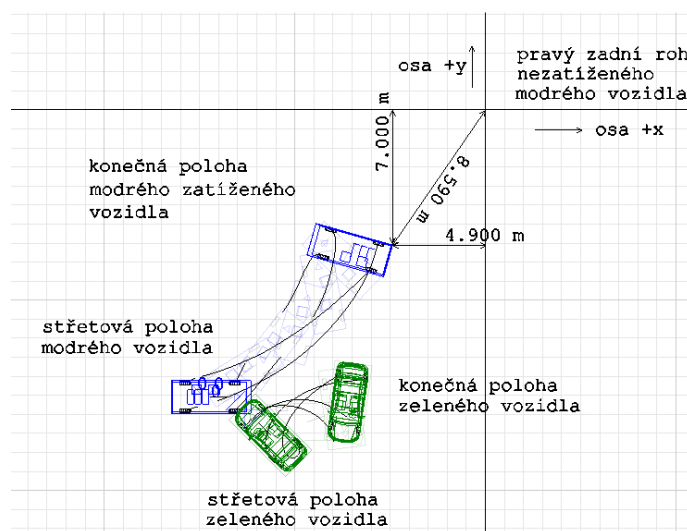
Výše uvedené programy, běžně používané pro řešení dopravních nehod v ČR, nedokážou přímo měnit příčnou polohu těžiště v simulacích, ale program Virtual CRASH nabízí možnost změny tvaru karoserie vozidla při zachování jeho hlavních jízdních vlastností. Simulace střetu s takto pozměněnou karosérií je vyobrazena na obr. č. 24 a obr. č. 25. Místo karosérie typické pro vozidlo Toyota Corolla byl použit tvar trailer. V místech řidiče a spolujezdce jedoucího za ním byly vloženy na modré vozidlo dvě závaží každé o hmotnosti 100 kg. Tyto závaží nahradily posádku vozidla a posunuly tak příčnou polohu těžiště vozidla vlevo od podélné osy vozidla. Tyto závaží byly připoutány k vozidlu formou bezpečnostního pásu, tedy po střetu s protijedoucím zeleným vozidlem neopustily vozidlo, ale pokračovaly s ním dále celou postřetovou dráhu.

Tab. č. 4: Parametry střetu vozidel Toyota Corolla [28].

veličiny	jednotky	Toyota Corolla	
hmotnost vozidel	[kg]	1250	
hmotnost závaží	[kg]	2x100	
barva vozidla	[-]	modré	zelené
úhel rychlosti před střetem	[°]	0	135
rychlost před střetem	[km h ⁻¹]	90	50
k- faktor	[-]	0,1	
tření	[-]	0,5	
adheze	[-]	0,78	
phi roviny rázu	[°]	45	
psi roviny rázu	[°]	0	



Obr. č. 24: Střet vozidel bez použití závaží [28].



Obr. č. 25: Střet vozidel s použitím závaží na modrém vozidle [28].

Obrázky č. 24 a 25 znázorňují střet dvou vozidel bez a s příčně a výškově posunutým těžištěm vozidla. Postřetová dráha nezatíženého modrého vozidla je 23 m. Po zatížení modrého vozidla na levé straně o 200 kg se jeho postřetová dráha zkrátí na hodnotu 11,2 m. Při srovnání konečných poloh vozidla vzhledem odlišným průběhům postřetové dráhy se konečná poloha (braná od pravého zadního kola) zatíženého vozidla posunula o -4,9 m v ose x a -7,0 m v ose y od konečné polohy nezatíženého vozidla. Tyto simulace jsou obsaženy v příloze č. 4. pod čísly 1_2_1 a 1_2_2.

Nutno podotknout, že procesem vložení určitého závaží na vozidlo se pozměnila nejen příčná poloha těžiště, ale i podélná a výšková poloha těžiště. Takto získané výsledky nejsou zcela korektní a zasloužené pouze změnou příčné polohy těžiště. Proto jsou hodnoty postřetových drah bány pouze jako orientační.

7.2 Vliv výškové polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb

Vozidla jsou bezpečnostně konstruována tak, aby při vzniku kritické situace, např. při průjezdu zatáčkou ve vysoké rychlosti, běžně došlo ke smyku dříve než k převrácení vozidla. Na převrácení vozidla má mimo jiné vliv právě výšková poloha těžiště a rozchod kol vozidla. Výšková poloha těžiště je vzhledem k bezpečnosti provozu a ochrany zdraví nejen cestujících navrhována při konstrukci vozidla s ohledem na tzv. *faktor statické stability SSF* [19]. Faktor statické stability je dán polovinou rozchodu kol vozidla dělenou výškou jeho těžiště, tedy $SSF = T/2H$, kde T je rozchod kol a H je výška těžiště vozidla. Faktor statické stability běžných vozidel se pohybuje v okolí hodnot 1,1 a 1,5. Výškové polohy těžiště různých vozidel, společně se střední hodnotou rozchodu kol a faktorem stat. stability jsou znázorněny v tabulce č. 5. Hodnoty obsažené v této tabulce jsou hodnoty vybrané z publikovaných měření v [20, 21].

Tab. č. 5: Výšky těžiště, střední hodnoty rozchodů kol a SSF vybraných typů vozidel. [20, 21]

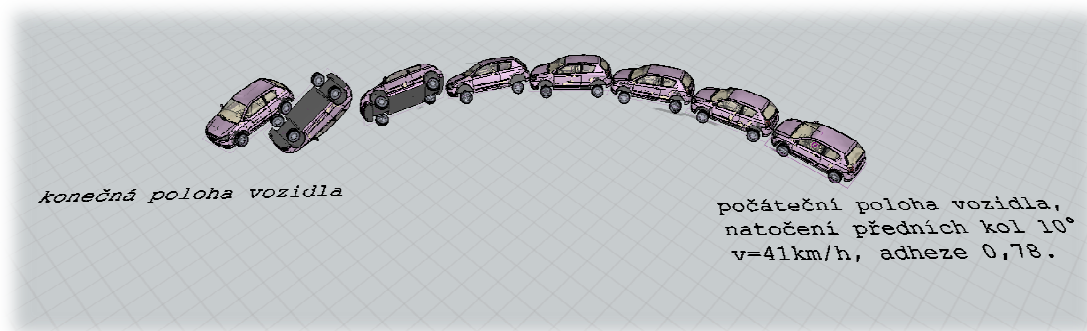
značka a typ vozidla	výška těž. [m]	rozchod kol [m]	SSF[-]
Datsun 280X	0,49	1,393	1,42
Audi Quattro	0,51	1,546	1,52
Ford Escort	0,51	1,415	1,39
Volvo 740	0,53	1,495	1,41
Mazda 323	0,53	1,460	1,38
Toyota Camry	0,55	1,540	1,40
Ford Ranger	0,65	1,553	1,19
Jeep Cherokee	0,67	1,473	1,10
Hyundai Terracan	0,68	1,530	1,13
Nissan Pathfinder	0,69	1,570	1,14
Nissan Patrol	0,72	1,615	1,12
Toyota Landcruiser	0,84	1,618	0,96

7.2.1 Vliv výškové polohy těžiště vozidla na jeho převrácení

Pro analýzu vlivu výškové polohy těžiště na stabilitu vozidla byly vytvořeny simulace průjezdu neklopenou zatáčkou o poloměru 15 m vozidlem Toyota Corolla se změněnou polohou těžiště o +0,245 m v důsledku naložení nákladu o hmotnosti 300 kg na střechu vozidla. Tyto simulace jsou obsaženy v příloze 4 pod čísly 2_1_2 a 2_1_3.

Hodnota navýšení výškové polohy těžiště o 0,245 m byla získána porovnáním chování vozidel se zatíženou střechou nákladem o hmotnosti 300 kg a vozidlem s posunutou polohou výšky těžiště v programu Virtual CRASH, viz příloha č. 4 - 2_1_1.

Cílem této simulace bylo docílit převrácení vozidla vlivem jeho extrémní výšky těžiště a následně vůči sobě porovnat hodnoty postřetového děje získanými mezi programy Virtual CRASH a PC Crash. Při takto vytvořené simulaci, dojde k převrácení vozidla v programu PC Crash již při rychlosti 39 km h⁻¹, v programu Virtual CRASH nastane převrácení vozidla až v rychlosti 41 km h⁻¹. Průběhy simulací vytvořených v těchto programech po sekvencích 4,2 m jsou znázorněny na obr. č. 26 a obr. č. 27. Počáteční hodnoty nutné k nastavení těchto simulací, společně s konečnými hodnotami úhlu natočení a celkovou dráhou vozidla jsou znázorněny v tabulce č. 6.



Obr. č. 26: Simulace průjezdu zatáčkou v programu Virtual CRASH [28].



Obr. č. 27: Simulace průjezdu zatáčkou v programu PC Crash [28].

Tab. č. 6: Počáteční a konečné hodnoty simulací [28].

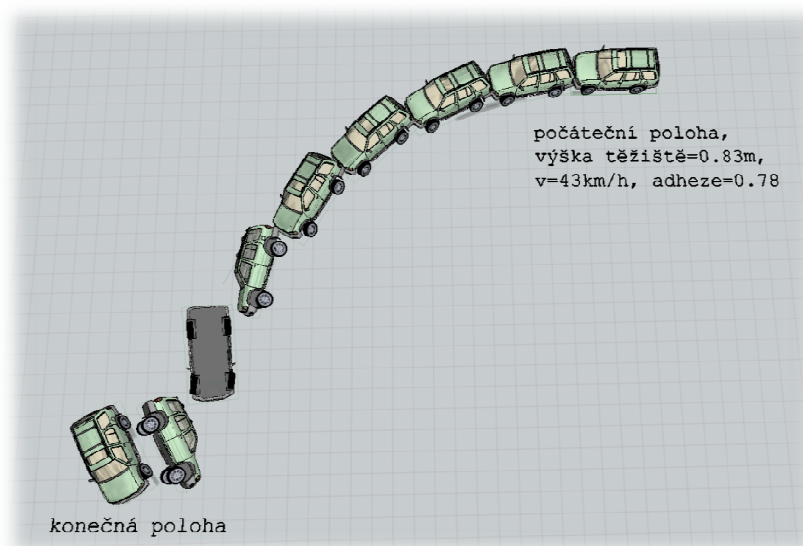
počáteční hodnoty	jednotky	Virtual CRASH	PC Crash
použitý typ vozidla		Toyota Corolla 1.4	
délka simulace	[s]	6	6
původní výška těžiště	[m]	0,54	0,54
extrémní výška těžiště	[m]	0,785	0,785
rychlost	[km h ⁻¹]	41	41
natočení kol	[°]	10	10
čas natočení kol	[s]	0	0
koeficient restituce	[-]	0,05	0,05
koeficient adheze	[-]	0,78	0,78
tření	[-]	0,7	0,7
konečné hodnoty			
celková dráha	[m]	29,87	26,24
konečné natočení vozidla	[°]	101	107

Pokud vozidlo s výše uvedenými počátečními podmínkami, řešené simulací v programu Virtual CRASH, vjede do této zatáčky rychlostí 78 km h⁻¹ a vyšší, nastane smyk a nedojde k jeho převrácení. U simulace řešené v programu PC Crash nastane převrácení vozidla při každé rychlosti vyšší než 39 km h⁻¹. Aby nedocházelo k převrácení, musí být výšková poloha těžiště snížena na hodnotu 0,73 m, tj. navýšení od původní polohy těžiště o 0,19 m. Hodnota kritické výškové polohy těžiště, u simulace řešené v programu Virtual CRASH, při níž nenastane převrácení vozidla v žádné rychlosti je 0,75 m, tedy navýšení od původní výšky těžiště o 0,21 m.

Důvodem, proč se jednotlivé výstupy simulací řešené v programech PC Crash a Virtual CRASH mírně odlišují je např. to, že programy počítají s odlišnými modely pneumatik a s tím pak souvisí především odlišná rychlost potřebná k převrácení vozidla.

Pro porovnání simulace průjezdu zatáčkou s následným převrácením vozidla Toyota Corolla byla namodelována stejná situace v programu Virtual CRASH s použitím vozidla Nissan Patrol, obr. č. 28. Nissan Patrol má od výrobce posunuto těžiště značně vysoko, viz tab. č. 5. K převrácení vozidla dojde již při posunu výškové polohy těžiště o +0,11 m, čemu odpovídá hmotnost umístěná na střechu vozidla v hodnotě 158 kg. Rychlost, při které dojde k převrácení tohoto vozidla je v rozmezí 43 až 62 km h⁻¹.

Vůz Nissan Patrol je obecně považován za terénní vozidlo, tudíž jsou na něj kladeny vyšší nároky na průjezdnost obtížným terénem. To má za následek mimo jiné jinak řešenou soustavu odpružení vozidla vůči sportovním nebo malým osobním automobilům. S tím je spojeno navýšení světlé výšky a celého těžiště vozidla. Simulace vozidla Nissan Partol je k dispozici v příloze 4 pod číslem 2_1_4.



Obr. č. 28: Průjezd zatáčkou vozidlem Nissan Patrol [28].

7.2.2 Vliv výškové polohy těžiště při střetu s pevnou překážkou

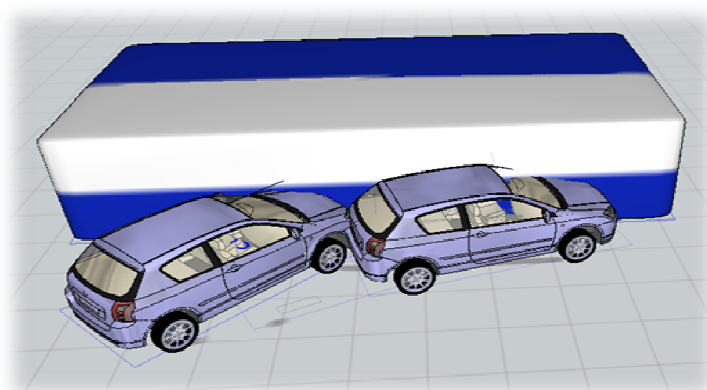
Byla vytvořena situace nárazu vozidla Toyota Corolla pod úhlem 45 ° a rychlostí 50 km h⁻¹ a 90 km h⁻¹ do pevné překážky typu železobetonová stěna. Situace byla namodelována v programu Virtual CRASH a PC Crash. Vozidlo po střetu nebylo brzděno a délka simulace byla zvolena 1,5 s. Postřetové parametry, postřetová dráha a konečného natočení vozidla, stanoveny z obou programů pro rychlost střetu v 50 km h⁻¹ byly uvedeny do tab. č. 8. A pro rychlost 90 km h⁻¹ byly výsledky uvedeny v tab. č. 9.

Grafické vyhodnocení vlivu výškové polohy těžiště na postřetovou dráhu byly zobrazeny pro střetovou rychlost 50 km h^{-1} v obr. č. 31, a pro rychlost 90 km h^{-1} v obrázku č. 32.

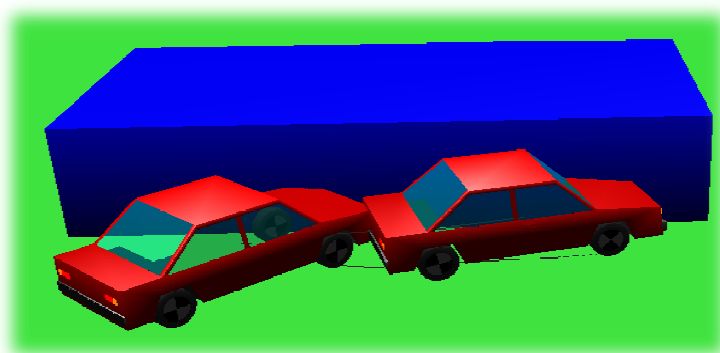
Pro správné nastavení a následné porovnání tohoto střetu v obou simulačních programech je velice důležité zvolit stejný bod rázu vozidla a vhodně stanovit hodnotu tření v bodu rázu tak, aby simulace vypadala věrohodně. Pro simulaci v programu Virtual CRASH je důležité nastavit hloubku překrytí vozidla při střetu na hodnotu 0 m. Parametry střetu potřebné k nastavení simulace jsou znázorněny v tabulce č. 7. Průběh šikmého střetu v rychlosti 50 km h^{-1} v jednotlivých programech je znázorněn na obr. č. 29 a obr. č. 30. Veškeré simulace k tomuto typu střetu jsou přiloženy v příloze 4 - výšková poloha těžiště, číslo 2_2_1 a 2_2_2. Na konci této podkapitoly budou uvedeny dílčí závěry.

Tab. č. 7: Parametry simulace střetu vozidla s pevnou překážkou [28].

veličiny	jednotky	Toyota Corolla
hmotnost	[kg]	1250
původní výška těžiště	[m]	0,54
úhel rychlosti před střetem	[°]	45
rychlost před střetem	[km h^{-1}]	50; 90
k-faktor	[-]	0,1
tření	[-]	0,3
adheze	[-]	0,8
phi roviny rázu	[°]	0
psi roviny rázu	[°]	0
bod rázu		
x	[m]	0,61
y	[m]	1,7
z	[m]	0,35



Obr. č. 29: Šikmý náraz do bariéry v prostředí programu Virtual CRASH [28].



Obr. č. 30: Šikmý náraz do bariéry v prostředí programu PC CRASH [28].

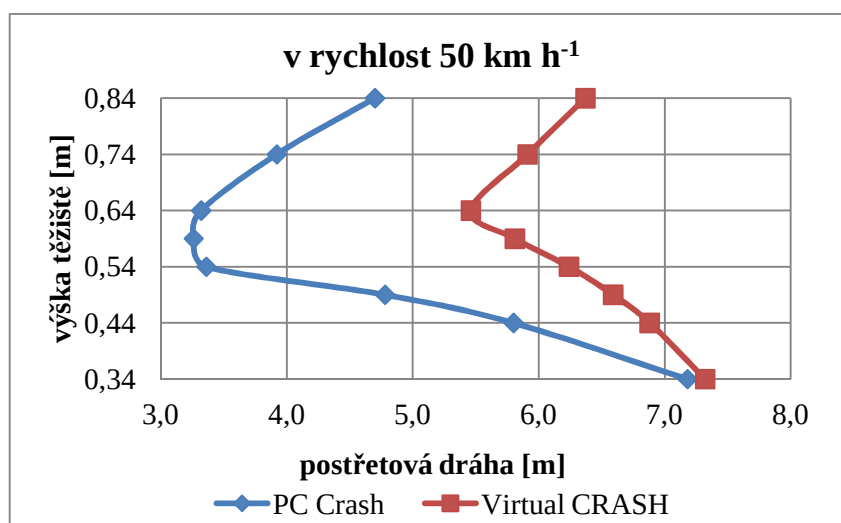
Tab. č. 8: Postřetové parametry střetu s pevnou překážkou v rychlosti 50 km h⁻¹ [28].

výška těžiště	Virtual CRASH		PC Crash		rozdíl	
	postřetová dráha [m]	natočení [°]	postřetová dráha [m]	natočení [°]	postřetová dráha [m]	natočení [°]
0,34	7,32	19,93	7,18	19,54	0,14	0,39
0,44	6,88	24,57	5,80	26,65	1,08	2,08
0,49	6,59	28,47	4,78	34,62	1,81	6,15
0,54	6,24	34,27	3,36	52,14	2,88	17,87
0,59	5,81	42,30	3,26	75,75	2,55	33,45
0,64	5,46	52,62	3,32	97,49	2,14	44,87
0,74	5,91	56,32	3,92	126,65	1,99	70,33
0,84	6,37	46,28	4,70	144,32	1,67	98,04

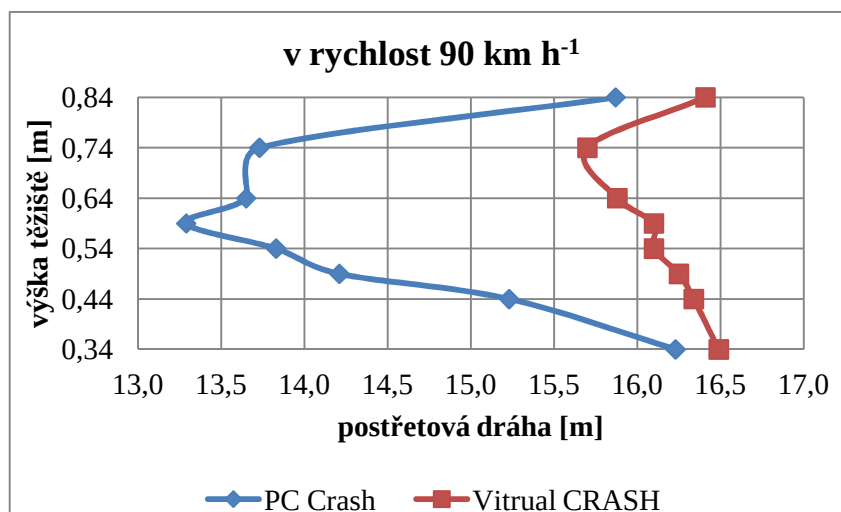
Tab. č. 9: Postřetové parametry střetu s pevnou překážkou v rychlosti 90 km h⁻¹ [28].

výška těžiště	Virtual CRASH		PC Crash		rozdíl	
	postřetová dráha [m]	natočení [°]	postřetová dráha [m]	natočení [°]	postřetová dráha [m]	natočení [°]
0,34	16,49	5,56	16,23	5,54	0,26	0,02
0,44	16,34	14,71	15,23	18,71	1,11	4,00
0,49	16,25	20,40	14,21	24,72	2,04	4,32
0,54	16,10	23,58	13,83	33,89	2,27	10,31
0,59	16,10	14,34	13,29	54,27	2,81	39,93
0,64	15,88	11,13	13,65	42,95	2,23	31,82
0,74	15,70	10,66	13,73	41,70	1,97	31,04
0,84	16,41	205,00	15,87	335,00	0,54	130,00

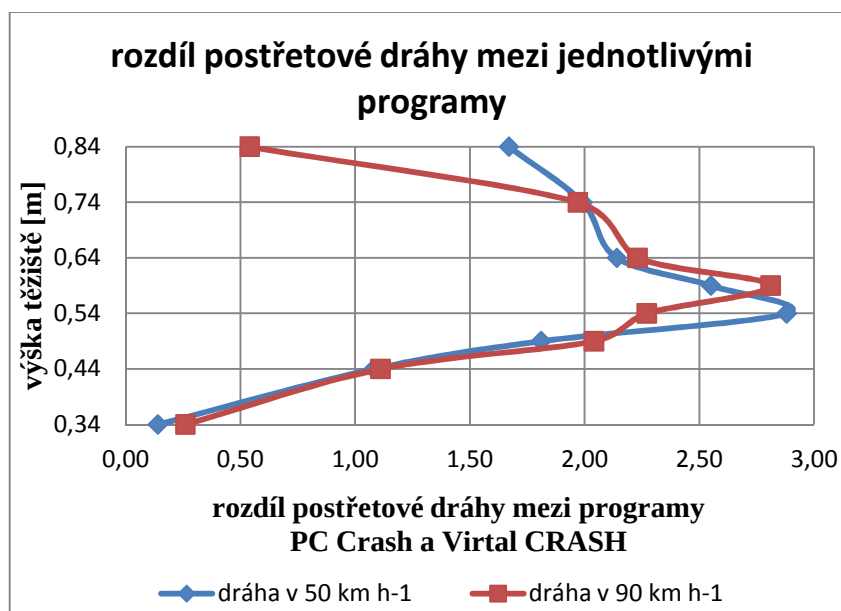
Tabulky č. 8 a č. 9 obsahují postřetové parametry vozidla Toyota Corolla vyhodnoceny programem Virtual CRASH a PC Crash při střetu pod úhlem 45 ° s pevnou překážkou v rychlosti 50 km h⁻¹, resp. 90 km h⁻¹ s výškou těžiště vozidla od 0,34 m do 0,84 m. U tučně znázorněných hodnot došlo k převrácení vozidla. Tabulky dále obsahují rozdíly postřetových hodnot získaných porovnáním hodnot z jednotlivých programů. Hodnoty rozdílů pro rychlosti 50 a 90 km h⁻¹ jsou znázorněny na obr. č. 33.



Obr. č. 31: Vliv výškové polohy těžiště na postřetovou dráhu při rychlosti 50 km h⁻¹ [28].



Obr. č. 32: Vliv výškové polohy těžiště na postřetovou dráhu při rychlosti 90 km h⁻¹ [28].



Obr. č. 33: Rozdíly postřetových drah mezi jednotlivými programy v rychlostech 50 a 90 km h⁻¹ [28].

Při analýze postřetových veličin při různé změně výškové polohy těžiště je patrné, že změna průběhů postřetových drah má mezi jednotlivými programy podobný charakter. Vozidlo má nejkratší postřetovou dráhu v okolí svého originálně umístěného těžiště (0,54 m). S další změnou polohy těžiště o více než $\pm 0,1$ m od standardní polohy dojde k navýšení postřetové dráhy až o 3 m.

Při nízké poloze těžiště dojde po střetu s pevnou překážkou většinou k podélnému skluzu vozidla po této překážce a tím se zmaří méně kinetické energie

vozidla, které následně vykoná delší dráhu.

Při změně polohy těžiště nad určitou hranici dojde vlivem střetu k převrácení vozidla. V rychlosti 50 km h^{-1} dojde k převrácení vozidla při simulaci v programu PC Crash při výškové poloze těžiště $0,84 \text{ m}$. V programu Virtual CRASH dojde k převrácení, při shodných počátečních podmínkách, až ve výšce těžiště $0,96 \text{ m}$.

Při simulované rychlosti střetu 90 km h^{-1} dojde k převrácení vozidla v programu PC Crash při výškové poloze těžiště $0,74 \text{ m}$ a v programu Virtual CRASH $0,84 \text{ m}$.

Různé hodnoty výškové polohy těžiště nutné k převrácení vozidla v těchto programech jsou mimo jiné důsledkem odlišné práce programů s tvarem karosérie vozidel. Program PC Crash pracuje s elipsoidní náhradou karosérie, zatím co Virtual CRASH počítá se skutečným tvarem karosérie vozidel dle použitých modelů. Tyto skutečnosti vedou v simulacích k odlišné přeměně kinetické energie na deformační práci a celkovým odchylkám postřetových hodnot mezi jednotlivými programy. Dále program PC Crash dokáže pracovat s daleko více parametry než Virtual CRASH. Přesné nastavení těchto parametrů nesouvisí s polohou těžiště vozidla, ale může výrazně ovlivnit průběh simulace.

Z obr. č. 33, jenž znázorňuje porovnání rozdílů postřetových drah v jednotlivých polohách výšky těžiště mezi použitými programy a v různých rychlostech, lze pozorovat, že použité simulace pro rychlosti 50 a 90 km h^{-1} se chovají obdobně.

Simulacemi bylo prokázáno, že v běžném provozu za předpokladu standardně používaného a nepřetěžovaného vozidla se vliv výškové polohy vozidla příliš neprojeví. Za předpokladu nevhodně naložené extrémní zátěže na osobní vozidlo musí řidič dbát zvýšené opatrnosti a především přizpůsobit jízdu jízdám vlastnostem takto zatíženého vozidla.

V běžném silničním provozu nedochází příliš často k převrácení vozidla při průjezdu zatáčkou, již z důvodu výbavy vozidla elektronickými prvky aktivní bezpečnosti, jako je ESP. Daleko častěji dojde k převrácení vozidla vlivem střetu s nízko umístěnou překážkou jako je např. betonová obruba, při níž je bod rázu velice nízko nad zemí. Při tomto typu střetu je důležitý výškový rozdíl mezi bodem rázu a výškovou polohou těžiště. Čím je výškový rozdíl těchto hodnot větší, tím je havarované vozidlo náchylnější k převrácení. Tato situace nebyla modelována, z důvodu absence prostředků výše uvedených simulačních programů, pro přesné počítání nárazu do pneumatik vozidla.

7.3 Vliv podélné polohy těžiště na postřetový pohyb vozidla

V této kapitole budou řešeny dva typy střetu. První bude simulace čelního střetu dvou stejných vozidel Toyota Corolla s překrytím 50%, jenž znázorňuje situaci nevhodného předjíždění vozidla, které se nestihlo zařadit do svého jízdního pruhu.

Jako druhý typ střetu byl zvolen šikmý náraz lehkého, rychle jedoucího vozidla Toyota Corolla do zadní části těžkého pomalu jedoucího vozidla Nissan Pathfinder. Tato situace byla dále modifikována na šikmý střet rychle jedoucího těžkého vozidla Nissan s pomalu jedoucím lehkým vozidlem Toyota.

Simulace střetu těžkého a lehkého vozidla byla provedeny za účelem analýzy vlivu polohy těžiště vozidla při odlišných hybnostech vozidel na jejich postřetovou dráhu.

Pomoci hodnot získaných z experimentálního měření polohy těžiště vozidla Toyota Corolla, blíže popsáno v kapitole č. 8, bylo výpočtem stanoveno, že pokud dojde k přetížení zadních pneumatik, každé o 100 kg, což se může klidně stát při převozu např. stavebního materiálu v kufru vozidla, posune se těžiště tohoto vozidla podélně o 0,228 m směrem k zadní části vozu.

7.3.1 Situace čelního střetu s 50 % překrytím.

Tato situace může v běžném provozu nastat např. při nevhodném předjíždění, kdy se předjíždějící vozidlo nestihne zařadit do svého jízdního pruhu a čelně se střetne s protijedoucím vozidlem. Simulace byly vytvořeny v programu Virtual CRASH a PC Crash. Grafické znázornění průběhu těchto simulací v jednotlivých programech jsou vyobrazeny na obr. č. 34 a obr. č. 35. Simulace byly modelovány s 50 % překrytím při střetu v rychlosti předjíždějícího vozidla modré barvy 90 km h^{-1} ($v_{in} = 180^\circ$) a rychlostí protijedoucího vozidla červené barvy 50 km h^{-1} ($v_{in} = 0^\circ$). Obě vozidla byla stejného typu Toyota Corolla. Hodnoty postřetových veličin získaných pomocí simulací v programu Virtual CRASH jsou zaznamenány v tabulce č. 11, hodnoty získané ze simulací v programu PC Crash jsou zaznamenány v tabulce č. 12. Protože získané hodnoty z těchto programů se vůči sobě mírně liší, byly porovnány a jejich rozdíly jsou zobrazeny v tabulce č. 13.

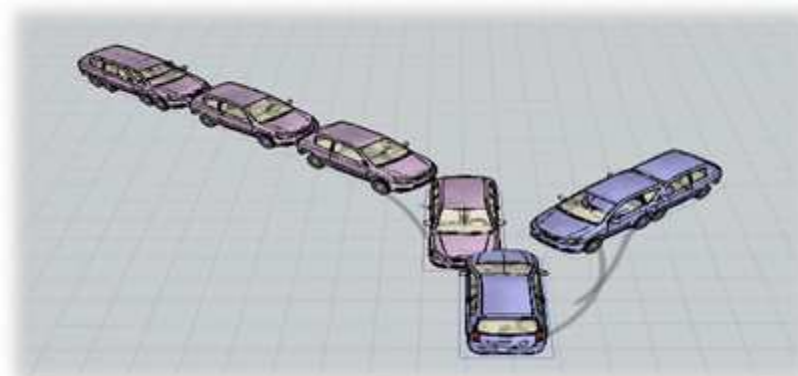
Simulace v obou programech byly nastaveny se shodnými parametry vozidla, bodem rázu, úhlem roviny rázu a třením v bodu rázu, viz tabulka č. 10. Pro simulaci v programu Virtual CRASH bylo opět důležité nastavit hloubku překrytí vozidel na hodnotu 0 m. V obou programech bylo důležité neustále sledovat relativní posun vozidel vůči sobě, protože při podélné změně těžiště vozidla dojde v souřadném systému programu k posunu karosérie vozidla místo posunu pouze polohy těžiště ve vozidle. Relativní posun vozidel vůči sobě bylo nutno korigovat manuálně při každé změně podélné polohy těžiště tak, aby byl bod rázu neustále ve stejné poloze vůči vozidlům. Pro kontrolu je vhodné do programů implikovat bitmapu s vyznačeným rastrem vozidel, aby bylo zcela jasné, že při změně podélné polohy těžiště se vozidla stále nacházejí ve stejné vzdálenosti vůči sobě.

V této simulaci bylo manipulováno s podélnou polohou těžiště protijedoucího červeného vozidla v rozmezí 0,3 m podélně na každou stranu vozidla od standardní vzdálenosti jeho těžiště. Standardní vzdálenost podélné polohy těžiště vozidla Toyota Corolla je 1,04 m od osy přední nápravy. V okolí standardní polohy těžiště, do $\pm 0,1$ m byl pozorován vliv změn postřetových parametrů při změně podélné polohy těžiště o hodnotu 0,05 m. Nad hodnotu $1,04 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$ byly postřetové parametry sledovány se změnou podélné polohy těžiště o 0,1 m.

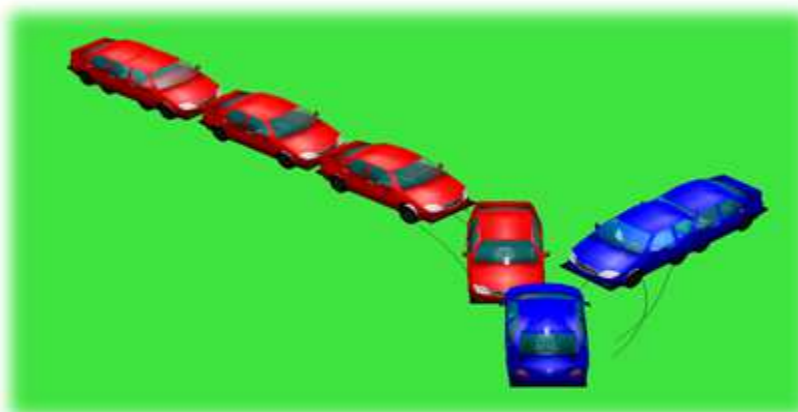
Aby bylo zamezeno ovlivnění sledovaných hodnot postřetových veličin parametry projevující se v simulacích odlišnostmi mezi jednotlivými programy byly simulace zastaveny vždy v čase 1,5 s po střetu. Po střetu nebyla vozidla brzděna.

Tab. č. 10: Hodnoty použité pro simulaci čelního střetu s 50 % překrytím [28].

Veličina	Jednotka	hodnota
typ vozidel		Toyota Corolla
rychlost vozidel	[km h ⁻¹]	90; 50
hmotnost vozidel	[kg]	1250
čas simulace	[s]	1,5
výška těžiště	[m]	0,54
standardní podélná vzdálenost těžiště vozidla od PN	[m]	1,04
úhel rychlosti před střetem - v_{in}	[°]	180; 0
hloubka překrytí	[m]	0
k-faktor	[-]	0,1
phi roviny rázu	[°]	116
psi roviny rázu	[°]	0
adheze	[-]	0,8
tření	[-]	0,6
bod rázu		
x	[m]	1,61
y	[m]	0,42
z	[m]	0,45



Obr. č. 34: Simulace čelního střetu s 50 % překrytím v programu Virtual CRASH [28].



Obr. č. 35: Simulace čelního střetu s 50 % překrytím v programu PC Crash [28].

Tab. č. 11: Postřetové parametry získané programem Virtual CRASH [28].

Virtual CRASH						
podélná poloha těžiště	Předjíždějící vozidlo, 90 km h ⁻¹			Protijedoucí vozidlo, 50 km h ⁻¹		
	dráha [m]	rychlost [km h⁻¹]	natočení [°]	dráha [m]	rychlost [km h⁻¹]	natočení [°]
0,74	5,18	21,40	314,03	8,57	26,00	146,90
0,84	5,23	21,30	313,93	9,67	26,10	98,52
0,94	5,20	21,10	313,97	10,42	26,20	64,32
0,99	5,23	21,10	313,97	10,62	26,20	57,89
1,04	5,26	20,90	314,14	10,80	26,20	46,66
1,09	5,28	20,80	314,24	10,85	26,25	42,15
1,14	5,30	20,70	314,35	10,86	26,30	38,48
1,24	5,34	20,60	314,68	10,78	26,30	33,12
1,34	5,38	20,40	315,08	10,83	26,30	28,96
Δ	0,20	1,00	1,15	2,29	0,30	117,94

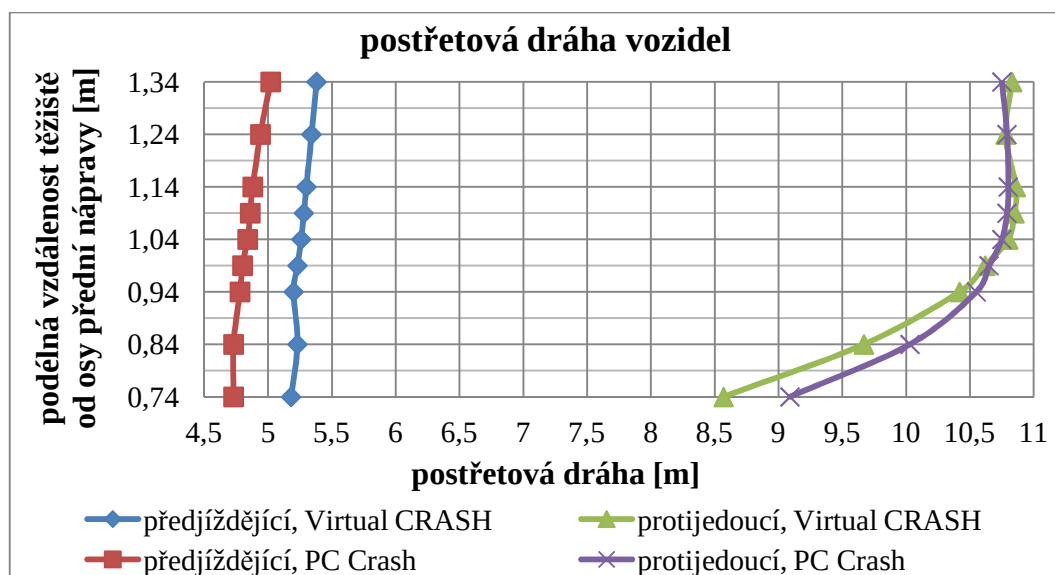
Tab. č. 12: Postřetové parametry získané programem PC Crash [28].

PC Crash						
podélná poloha těžiště	Předjíždějící vozidlo, 90 km h ⁻¹			Protijedoucí vozidlo, 50 km h ⁻¹		
	dráha [m]	rychlost [km h⁻¹]	natočení [°]	dráha [m]	rychlost [km h⁻¹]	natočení [°]
0,74	4,73	21,47	312,77	9,09	26,10	128,2
0,84	4,73	21,47	312,89	10,03	26,22	85,69
0,94	4,78	21,31	313,14	10,55	26,32	62,10
0,99	4,80	21,23	313,32	10,65	26,36	55,01
1,04	4,84	21,15	313,52	10,75	26,39	49,27
1,09	4,86	21,06	313,74	10,79	26,42	44,51
1,14	4,88	20,98	313,99	10,80	26,44	40,61
1,24	4,94	20,81	314,52	10,79	26,47	34,74
1,34	5,02	20,63	315,12	10,75	26,48	30,36
Δ	0,29	0,84	2,35	1,71	0,38	97,84

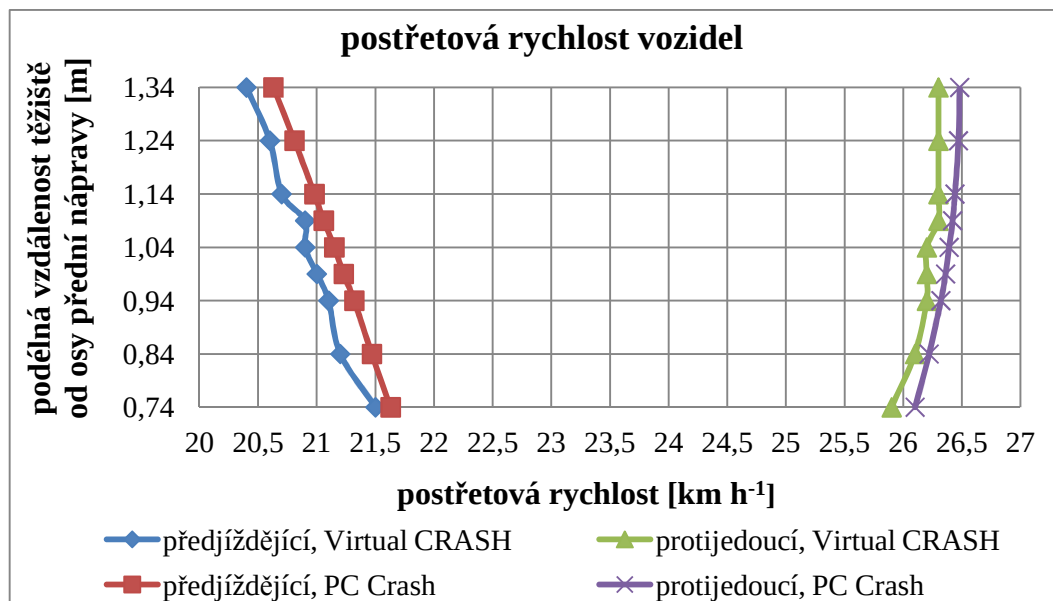
Tab. č. 13: Rozdíly postřetových parametrů jednotlivých programů [28].

Porovnání výsledků z programu Virtual CRASH a PC Crash						
podélná poloha těžiště	Předjíždějící vozidlo, 90 km h ⁻¹			Protijedoucí vozidlo, 50 km h ⁻¹		
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]
0,74	0,45	0,07	1,26	0,52	0,1	18,7
0,84	0,5	0,17	1,04	0,36	0,12	12,83
0,94	0,42	0,21	0,83	0,13	0,12	2,22
0,99	0,43	0,13	0,65	0,03	0,16	2,88
1,04	0,42	0,25	0,62	0,05	0,19	2,61
1,09	0,42	0,26	0,5	0,06	0,17	2,36
1,14	0,42	0,28	0,36	0,06	0,14	2,13
1,24	0,4	0,21	0,16	0,01	0,17	1,62
1,34	0,36	0,23	0,04	0,08	0,18	1,4
Ø	0,42	0,20	0,61	0,14	0,15	5,19

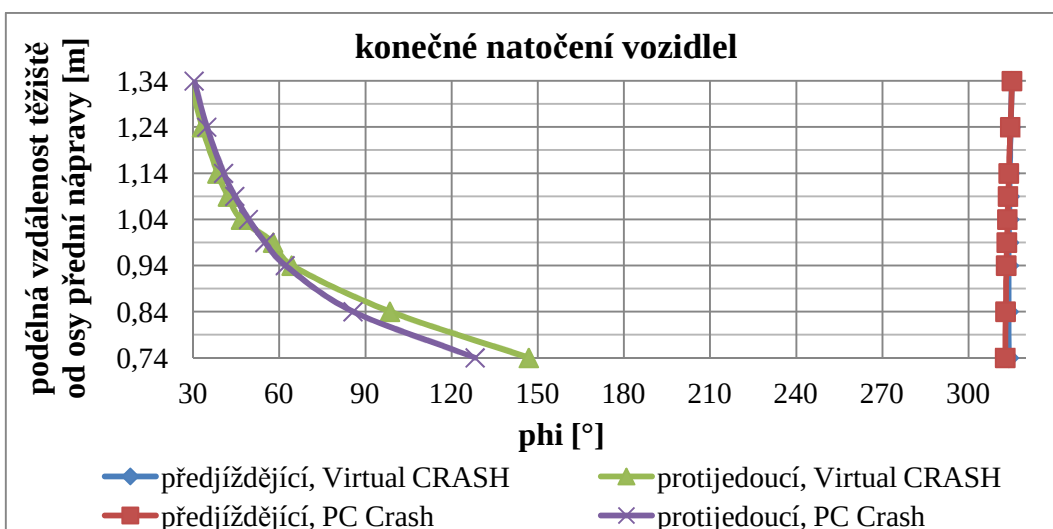
Z hodnot zaznamenaných v tabulkách č. 11 a č. 12 byla vytvořena grafická srovnání postřetových drah, výběhových rychlostí a konečného natočení vozidel v závislosti na podélné poloze těžiště, viz obr. č. 36, 37 a 38. V jednotlivých grafech jsou také znázorněny hodnoty získány programy Virtual CRASH a PC Crash.



Obr. č. 36: Změna postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].



Obr. č. 37: Změna postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].



Obr. č. 38: Změna konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].

Postřetové hodnoty srovnané mezi jednotlivými programy se od sebe příliš nelišily. Rozdíly mezi hodnotami různých programů, zvláště projevující se v extrémních případech posunu těžiště mohou být zapříčiněny odlišnostmi použitých modelů vozidel mezi simulačními programy.

Z provedených simulací čelního střetu dvou vozidel, při změnách podélné polohy těžiště protijedoucího vozidla vyplývá, že se zvětšující se vzdáleností těžiště od osy přední nápravy roste postřetová dráha. Na opak se snižuje výběhová rychlost obou vozidel a natočení vozidel v konečné poloze. Změna polohy těžiště mezi jednotlivými extrémy o 0,6 m vyvolá snížení rychlosti druhého, předjíždějícího vozidla o 1 km h⁻¹.

Ze získaných výsledků při tomto typu střetu je dále patrné, že čím blíže je bod rázu k těžišti vozidla, tím je vozidla náchylnější k následné rotaci.

U většiny běžně se vyskytujících vozidel lze posouvat podélnou polohou těžiště vlivem nákladu pouze směrem od osy přední nápravy, protože přední část vozidla je zcela vyplněna motorem a jeho příslušenstvím.

7.3.2 Šikmý střet vozidla Nissan Pathfinder a Toyota Corolla

Tento střet lze popsat situací rozjíždění pomalu jedoucího těžšího vozidla Nissan Pathfinder v prostoru křižovatky, s jehož zadní levou částí se šikmo střetne rychle jedoucí lehké vozidlo Toyota Corolla.

V této simulaci bylo manipulováno s podélnou polohou těžiště pomalu jedoucího vozidla Nissan Pathfinder. Podélná poloha tohoto vozidla je od výrobce umístěna 1,42 m od osy přední nápravy. Při simulaci bylo manipulováno s touto podélnou polohou těžiště v hodnotách $\pm 0,3$ m od standardní polohy těžiště. Aby bylo zamezeno projevu nežádoucích jevů ovlivňujících postřetový pohyb vozidla, byla simulace zastavena v čase 0,5 s po střetu. Vozidla po střetu nebyla brzděna.

Pro analýzu chování vozidel v programech Virtual CRASH a PC Crash, je nutné neustále sledovat vzájemné umístění vozidel a polohy jejich těžiště prostřednictvím souřadného systému, kterým oba programy disponují. Pro rychlejší zběžnou kontrolu je vhodné do simulace aplikovat vhodnou bitmapu.

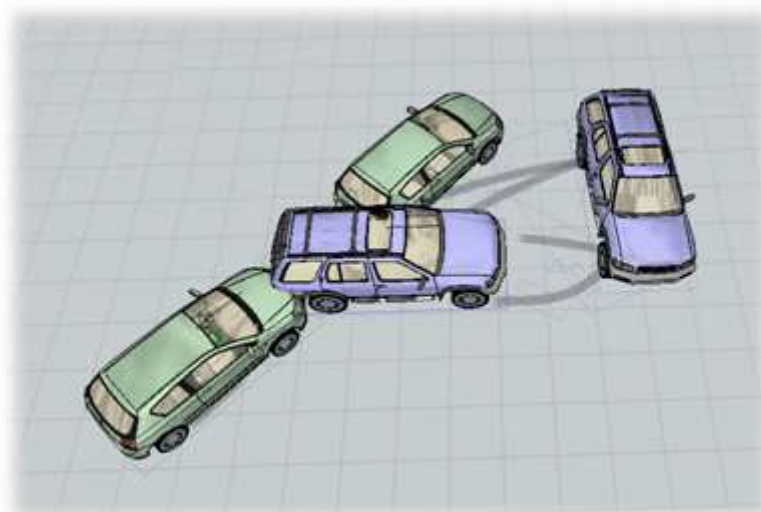
Za předpokladu shodně nastavených vlastností a rozměrů vozidel včetně polohy těžiště jsou vozidla připravena k simulaci. Dále je důležité nastavit shodně v obou programech bod rázu, úhel roviny rázu, adhezi, tření, koeficient restituace a k - faktor. V případě shodného nastavení těchto parametrů v obou programech lze předpokládat shodných, či velice obdobných výstupů simulace. V programu Virtual CRASH je nutné nastavit hloubku překrytí vozidel na hodnotu 0.

Hodnoty parametrů použitých k nastavení simulace výše popsaného děje jsou uvedeny v tabulce č. 14. Simulace střetu vytvořené v jednotlivých programech jsou zobrazeny v obr. č. 39 a obr. č. 40. Hodnoty postřetového pohybu, rozděleny pro každé vozidlo a jednotlivé programy jsou uvedeny v tabulce č. 15 a 16. Dále byla vytvořena tabulka rozdílů hodnot získaných v programech Virtual CRASH a PC Crash. Rozdíly

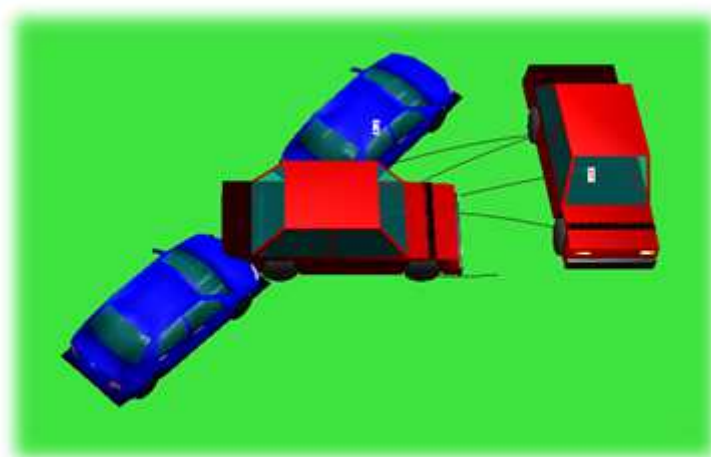
těchto hodnot jsou uvedeny v tabulce č. 17. Získané hodnoty z těchto simulací, obsažené v tabulkách č. 15 a 16, byly následně, pro lepší představivost o vlivu posunu podélné polohy těžiště na sledované parametry, graficky znázorněny v obr. č. 41, 42, 43 a 44. Na konci této podkapitoly byly uvedeny dílčí závěry. Veškeré simulace vedoucí k získání požadovaných hodnot jsou umístěny v příloze 4 pod číslem 3_2.

Tab. č. 14: Počáteční podmínky použité k simulacím v programech Virtual CRASH a PC Crash [28].

veličiny	jednotky	Toyota Corolla	Nissan Pathfinder
hmotnost	[kg]	1250	2245
podélná poloha těžiště	[m]	1,03	1,42
úhel rychlosti před střetem	[°]	45	0
rychlost před střetem	[km h ⁻¹]	90	20
k- faktor	[-]	0,1	
tření	[-]	0,4	
adheze	[-]	0,8	
phi roviny rázu	[°]	135	
psi roviny rázu	[°]	0	
bod rázu			
x	[m]	-2,26	
y	[m]	-0,76	
z	[m]	0,45	



Obr. č. 39: Situace šikmého střetu vytvořená v programu Virtual CRASH [28].



Obr. č. 40: Situace šikmého střetu vytvořená v programu PC Crash [28].

Tab. č. 15: Postřetové hodnoty simulace šikmého střetu získané programem Virtual CRASH [28].

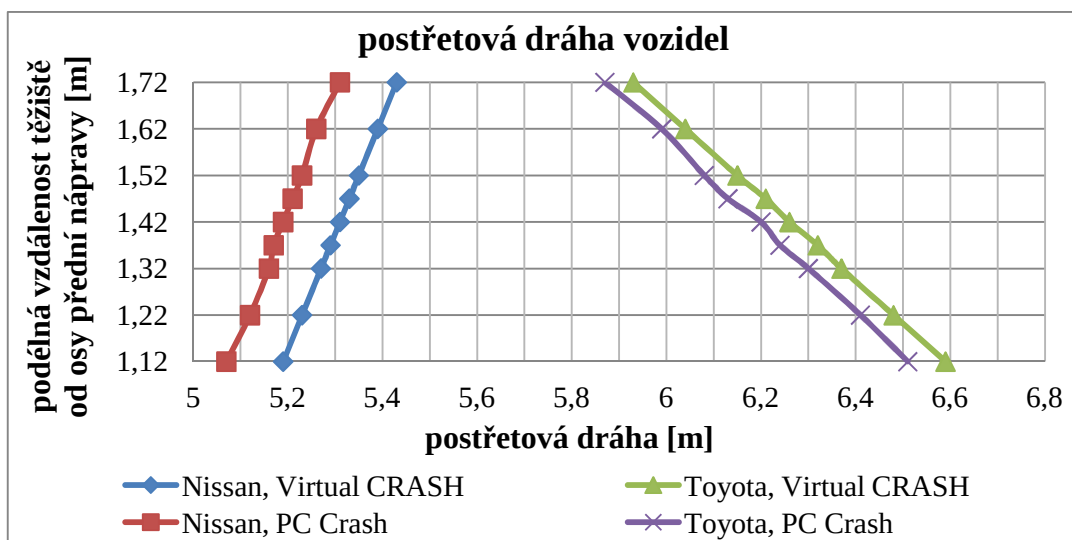
Virtual CRASH								
podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]
1,12	5,19	41,70	261,97	13,37	6,59	47,60	57,38	54,63
1,22	5,23	42,00	264,46	13,66	6,48	46,80	54,89	52,85
1,32	5,27	42,30	267,23	13,88	6,37	46,00	52,38	51,02
1,37	5,29	42,50	268,72	13,96	6,32	45,60	51,13	50,10
1,42	5,31	42,60	270,27	14,03	6,26	45,20	49,88	49,17
1,47	5,33	42,80	271,88	14,08	6,21	44,80	48,64	48,25
1,52	5,35	42,90	273,55	14,11	6,15	44,30	47,41	47,33
1,62	5,39	43,20	277,10	14,15	6,04	43,60	45,00	45,52
1,72	5,43	43,50	280,90	14,13	5,93	42,80	42,59	43,67
Δ	0,24	1,80	18,93	0,78	0,66	4,80	14,79	10,96

Tab. č. 16: Postřetové hodnoty simulace šikmého střetu získané programem PC Crash [28].

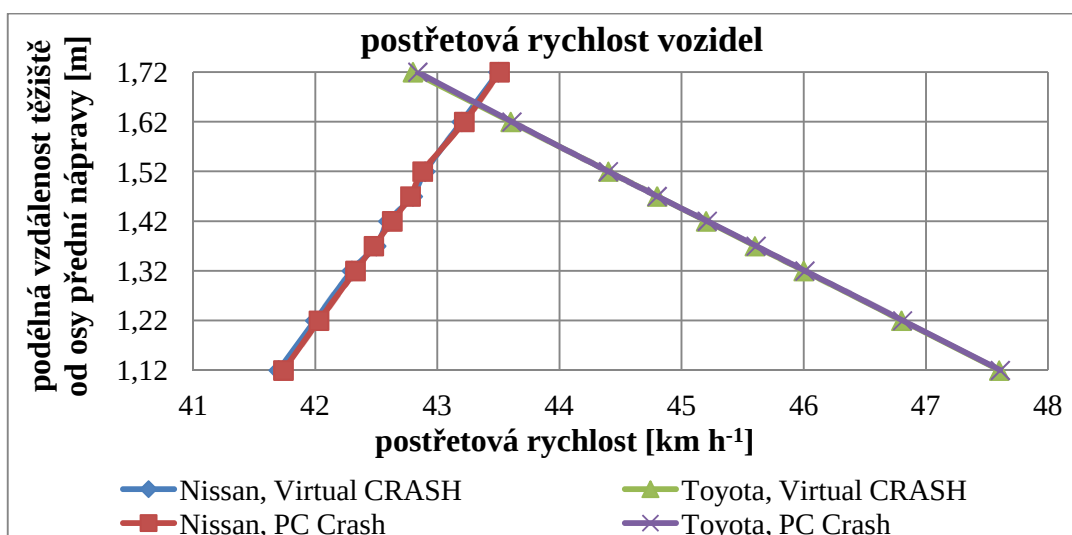
PC Crash								
podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]
1,12	5,07	41,74	267,51	11,78	6,51	47,61	56,61	53,60
1,22	5,12	42,03	269,17	12,49	6,41	46,81	54,41	52,14
1,32	5,16	42,33	271,61	12,78	6,30	46,01	52,04	50,54
1,37	5,17	42,48	272,91	12,89	6,24	45,61	50,87	49,74
1,42	5,19	42,63	274,26	12,98	6,20	45,21	49,68	48,93
1,47	5,21	42,78	275,67	13,06	6,13	44,80	48,54	48,12
1,52	5,23	42,92	277,14	13,10	6,08	44,40	47,39	47,33
1,62	5,26	43,22	280,30	13,14	5,99	43,61	45,14	45,74
1,72	5,31	43,51	283,75	13,10	5,87	42,84	42,90	44,13
Δ	0,24	1,77	16,24	1,36	0,64	4,77	13,71	9,47

Tab. č. 17: Rozdíly postřetových hodnot simulace šikmého střetu [28].

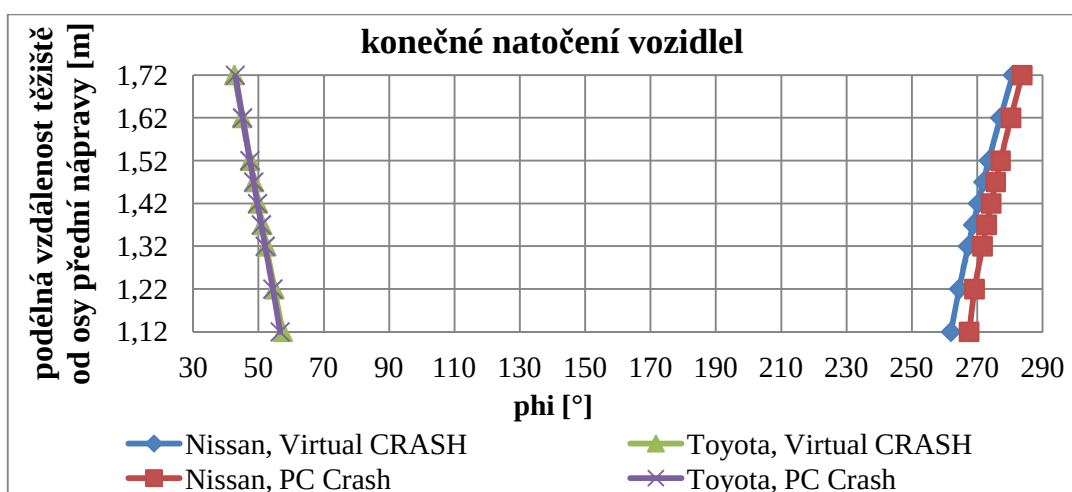
Porovnání hodnot získaných programem Virtual CRASH a PC Crash								
Podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	Dráha [m]	Rychlost [km h ⁻¹]	Natočení [°]	Úhel rychlosti [°]	Dráha [m]	Rychlost [km h ⁻¹]	Natočení [°]	Úhel rychlosti [°]
1,12	0,12	0,04	5,54	1,59	0,08	0,01	0,77	1,03
1,22	0,11	0,03	4,71	1,17	0,07	0,01	0,48	0,71
1,32	0,11	0,03	4,38	1,10	0,07	0,01	0,34	0,48
1,37	0,12	0,02	4,19	1,07	0,08	0,01	0,26	0,36
1,42	0,12	0,03	3,99	1,05	0,06	0,01	0,20	0,24
1,47	0,12	0,02	3,79	1,02	0,08	0,00	0,10	0,13
1,52	0,12	0,02	3,59	1,01	0,07	0,00	0,02	0,00
1,62	0,13	0,02	3,20	1,01	0,05	0,01	0,14	0,22
1,72	0,12	0,01	2,85	1,03	0,06	0,04	0,31	0,46
Ø	0,12	0,02	4,03	1,12	0,07	0,01	0,29	0,40



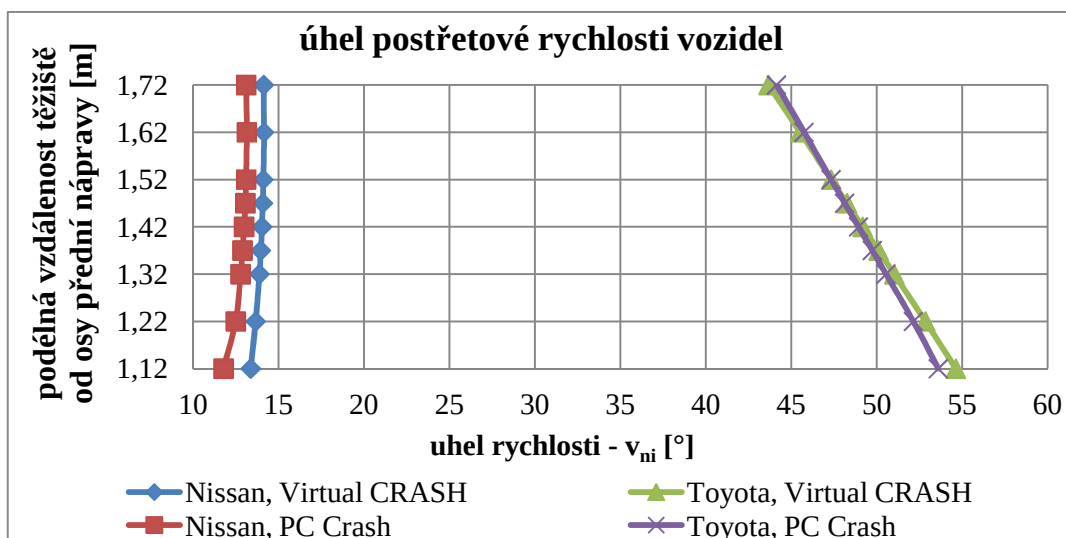
Obr. č. 41: Změny postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].



Obr. č. 42: Změny postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].



Obr. č. 43: Změny konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].



Obr. č. 44: Změny úhlů postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště. [28]

Na základě hodnot obsažených v tabulce č. 17, která porovnává rozdíly postřetových veličin obou vozidel získané simulací v programu Virtual CRASH a PC Crash lze potvrdit, že vytvořené simulace obou programů se v určitých mezích chovají shodně. Rozdíly postřetových hodnot jednotlivých programů se liší především důsledkem odlišně použitých modelů vozidel v jednotlivých programech.

Při podélné změně těžiště vozidla Nissan směrem k ose zadní nápravy u něj nedojde při střetu s lehčím vozidlem Toyota k přílišné změně postřetové dráhy. Postřetová dráha tohoto vozidla se změní při posunu podélné polohy těžiště mezi jednotlivými extrémy v hodnotě 0,6 m pouze o vzdálenost 0,24 m (4,5 %) v obou simulačních programech. Posun podélné polohy těžiště vozidla Nissan má vliv především na postřetovou dráhu lehčího vozidla Toyota. Postřetová dráha vozidla Toyota se změnila při posunu těžiště vozidla Nissan mezi jednotlivými extrémy o hodnotu 0,66 m (10 %) v programu Virtual CRASH a o hodnotu 0,64 m (9,8 %) v programu PC Crash.

Zmenšení postřetové dráhy vozidla Toyota vlivem posunu těžiště vozidla Nissan do jeho zadní části, tedy zmenšení vzdálenosti bodu rázu od těžiště vozidla Nissan, je zapříčiněno tím, že při takto posunutém těžišti střet vozidel vyvolá na vozidle Nissan nižší rotaci a přemění více pohybové energie vozidla Toyota na deformační a pohybovou energii vozidla Nissan.

Výběhové rychlosti vozidel se s měnící se podélnou polohou těžiště vozidla Nissan směrem k zadní části vozidla, tedy zmenšující se vzdáleností bodu rázu od těžiště vozidla, takřka lineárně mění. U vozidla Nissan výběhová rychlost roste, při čemž se zmenšuje jeho postřetová rotace a u vozidla Toyota výběhová rychlost klesá. Se změnou polohy těžiště mezi simulovanými extrémy o hodnotu 0,6 m směrem od přední nápravy vzroste výběhová rychlost vozidla Nissan o hodnotu $1,8 \text{ km h}^{-1}$ (4,3 %) a poklesne výběhová rychlost vozidla Toyota o hodnotu $4,8 \text{ km h}^{-1}$ (10 %) dle programu Virtual CRASH.

Hodnoty konečného natočení vozidla Nissan se s narůstající vzdáleností polohy těžiště od přední nápravy v jednotlivých programech mírně rozcházejí. Tento průběh hodnot lze přisuzovat vlivu vnějších podmínek, jako je odlišný model vozidel v jednotlivých programech.

Úhly postřetových rychlostí, mají taktéž shodný charakter průběhu, u vozidla Nissan se hodnoty mezi jednotlivými programy liší průměrně o $1,12^\circ$.

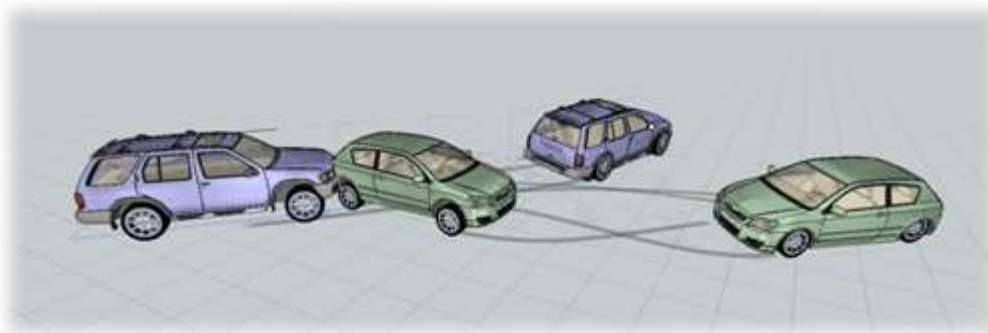
7.3.3 Modifikovaný šikmý střet vozidla Nissan Pathfinder a Toyota Corolla

Pro porovnání simulací šikmého střetu vozidel Toyota Corolla a Nissan Pathfinder byly vytvořeny následující simulace stejného střetu jako v kapitole 7.3.2 s tím rozdílem, že těžší vozidlo Nissan narazí pod úhlem 45° v rychlosti 90 km h^{-1} do lehčího, pomalu jedoucího vozidla Toyota. Toyota jela pod úhlem 0° rychlostí 20 km h^{-1} . V simulacích se měnila podélná poloha vozidla Toyota. Znázornění této situace zpracované v jednotlivých programech Virtual CRASH a PC Crash lze pozorovat na obr. č. 45 a 46.

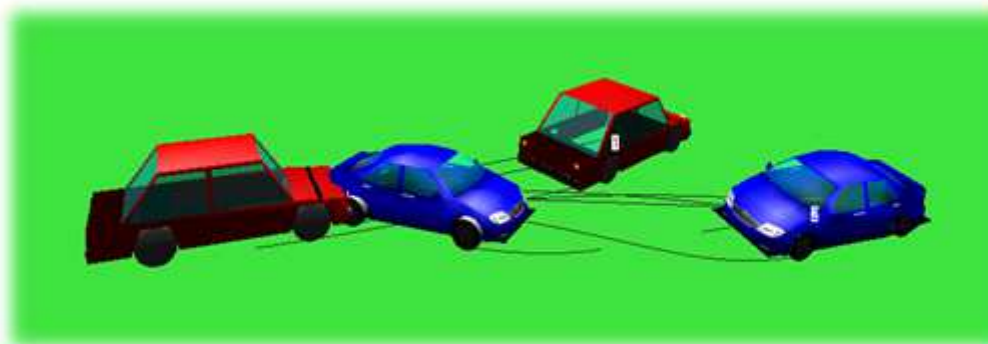
Zbylé parametry počátečních podmínek vozidel a bodu rázu jsou shodné s předchozími simulacemi. Vozidla stejně jako v minulých simulacích po střetu nebyla brzděna a k zastavení simulace došlo 0,5 s po střetu.

Získané hodnoty z provedených simulací v prostředí programu Virtual CRASH jsou uvedeny v tab. č. 18 a z prostředí programu PC Crash jsou postřetové hodnoty uvedeny v tab. č. 19. Bylo taktéž provedeno porovnání získaných hodnot z jednotlivých programů vůči sobě. Tyto rozdíly jsou uvedeny v tab. č. 20. Pro intuitivnější prezentaci

získaných výsledků byly vytvořeny grafy závislostí sledovaných postřetových veličin na podélné poloze těžiště vozidla Toyota viz obr. č. 47, 48, 49 a 50. Veškeré simulace tohoto střetu jsou součástí přílohy č. 4 pod číslem 3_3.



Obr. č. 45: Znázornění modifikovaného střetu v programu Virtual CRASH [28].



Obr. č. 46: Znázornění modifikovaného střetu v programu PC Crash [28].

Tab. č. 18: Hodnoty postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané programem Virtual CRASH [28].

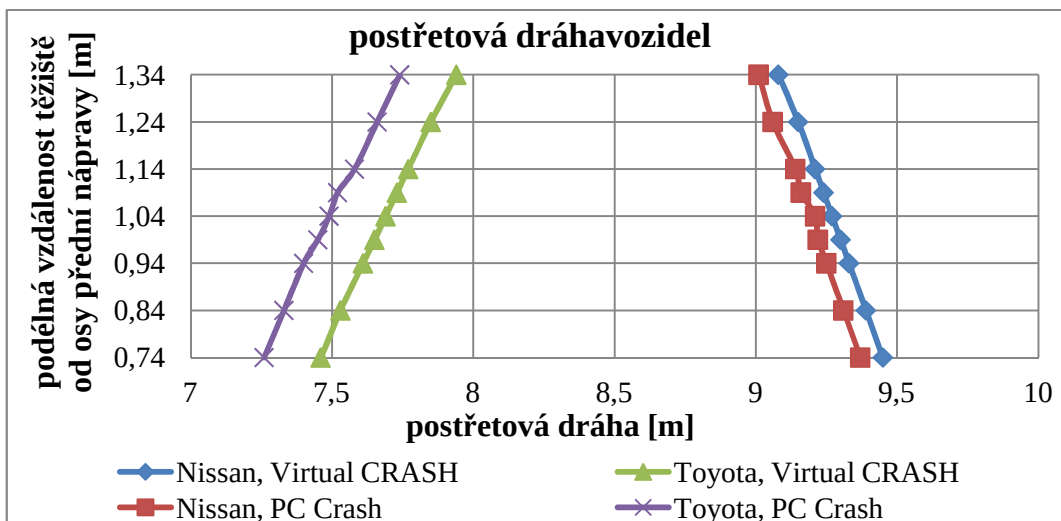
Virtual CRASH								
podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]
0,74	9,45	68,9	80,15	57,47	7,46	57,8	219,01	21,79
0,84	9,39	68,40	77,95	57,35	7,53	58,40	218,99	22,45
0,94	9,33	67,90	75,55	57,20	7,61	58,90	219,39	23,08
0,99	9,3	67,70	74,27	57,11	7,65	59,10	219,74	23,40
1,04	9,27	67,40	72,93	57,00	7,69	59,40	220,22	23,73
1,09	9,24	67,17	71,52	86,88	7,73	59,80	220,83	24,07
1,14	9,21	66,90	70,03	56,72	7,77	60,10	221,56	24,42
1,24	9,15	66,40	66,84	56,29	7,85	60,70	223,44	25,16
1,34	9,08	65,80	63,49	55,66	7,94	61,34	225,2	25,93
Δ	0,37	3,10	16,66	31,22	0,48	3,54	6,21	4,14

Tab. č. 19: Hodnoty postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané programem PC Crash [28].

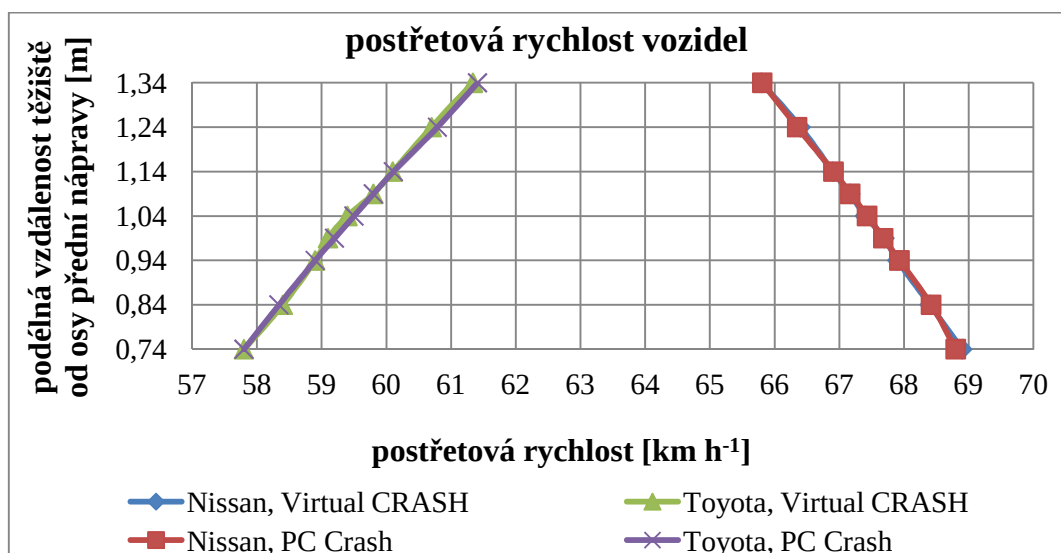
PC Crash								
podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]
0,74	9,37	68,80	75,81	56,65	7,26	57,80	227,42	20,35
0,84	9,31	68,42	73,71	56,44	7,33	58,34	227,19	21,41
0,94	9,25	67,93	71,46	56,19	7,40	58,90	227,29	22,45
0,99	9,22	67,68	70,26	56,05	7,45	59,20	227,44	22,97
1,04	9,21	67,43	69,03	55,89	7,49	59,50	227,64	23,50
1,09	9,16	67,17	67,75	55,71	7,52	59,80	228,13	24,07
1,14	9,14	66,91	66,42	55,51	7,58	60,11	228,63	24,56
1,24	9,06	66,35	63,67	54,96	7,66	60,79	229,99	25,56
1,34	9,01	65,81	61,01	54,31	7,74	61,41	231,90	26,50
Δ	0,36	2,99	14,80	2,34	0,48	3,61	4,71	6,15

Tab. č. 20: Rozdíly postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané porovnáním hodnot programu z Virtual CRASH a PC Crash [28].

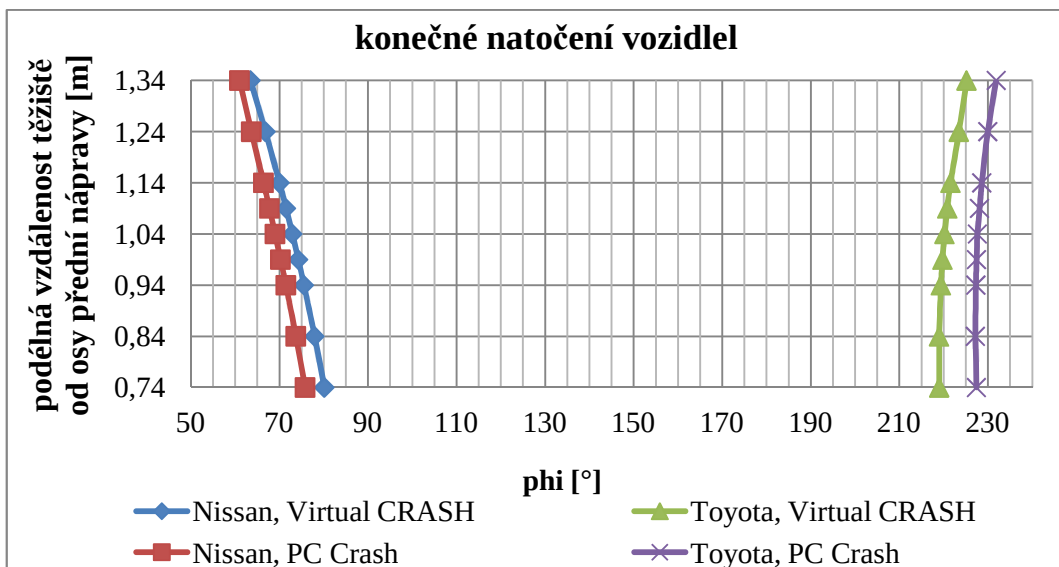
Porovnání výsledků mezi programy Virtual CRASH a PC Crash								
podélná poloha těžiště	Nissan Pathfinder				Toyota Corolla			
	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]	dráha [m]	rychlost [km h ⁻¹]	natočení [°]	úhel rychlosti [°]
0,74	0,08	0,10	4,34	0,82	1,91	0,00	8,41	1,44
0,84	0,08	0,02	4,24	0,91	0,20	0,06	8,20	1,04
0,94	0,08	0,03	4,09	1,01	0,21	0,00	7,90	0,63
0,99	0,08	0,02	4,01	1,06	0,20	0,10	7,70	0,43
1,04	0,06	0,03	3,90	1,11	0,20	0,10	7,42	0,23
1,09	0,08	0,00	3,77	31,17	0,21	0,00	7,30	0,00
1,14	0,07	0,01	3,61	1,21	0,19	0,01	7,07	0,14
1,24	0,09	0,05	3,17	1,33	0,19	0,09	6,55	0,40
1,34	0,07	0,01	2,48	1,35	0,20	0,07	6,70	0,57
Ø	0,08	0,03	3,73	4,44	0,39	0,05	7,47	0,54



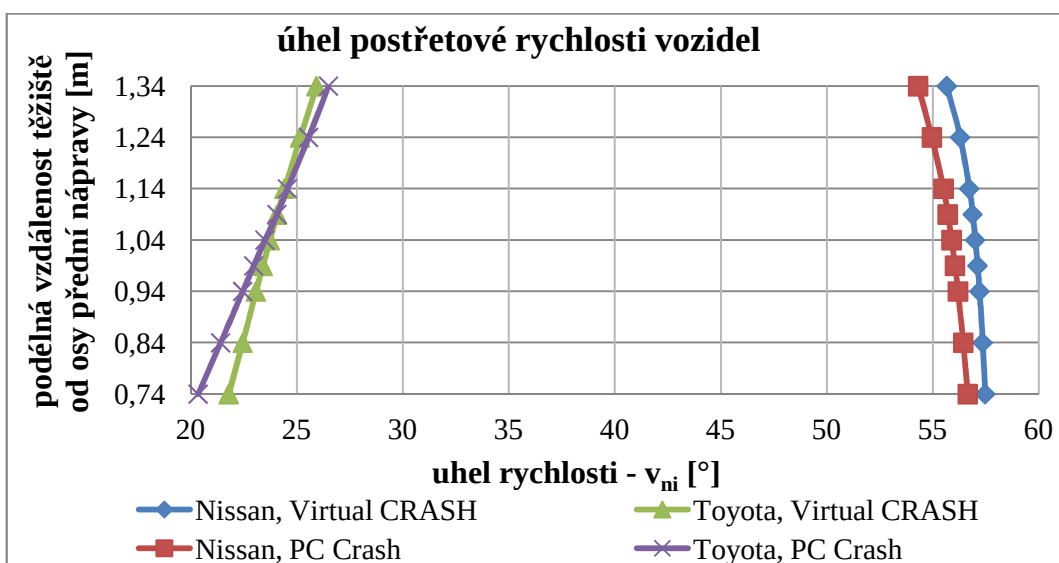
Obr. č. 47: Změny postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].



Obr. č. 48: Změny postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].



Obr. č. 49: Změny konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].



Obr. č. 50: Změny úhlů postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota. [28]

Při tomto typu střetu hraje podstatnou roli v postřetovém chování vozidel právě jejich odlišná hybnost. Postřetový pohyb vozidla Toyota v závislosti na jeho podélné poloze těžiště při střetu s vozidlem Nissan vykazuje větší roli rotační složka pohybu než v předešlém případě střetu těchto vozidel.

Při změně podélné polohy těžiště vozidla Toyota od standardní polohy těžiště (1,04 m) směrem k bodu rázu, tedy k ose zadní nápravy o hodnotu 0,3 m dojde

následkem střetu ke snížení podílů rotační složky v pohybu vozidla Toyota, což se projeví zvýšení postřetové rychlosti tohoto vozidla o $1,94 \text{ km h}^{-1}$ (3,3 %), zvýšení postřetové dráhy o 0,25 m (3,3 %) a úhlu postřetových rychlostí o $2,2^\circ$ (9,2 %). To vše za dobu simulace 0,5 s s použitím hodnot z programu Virtual CRASH.

U vozidla Nissan se tato změna polohy těžiště vozidla Toyota projeví snížením postřetové dráhy o 0,19 m (2 %), snížením postřetové rychlosti o $1,6 \text{ km h}^{-1}$ (2,4 %) a snížením postřetového úhlu rychlosti o $1,34^\circ$ (2,3 %) taktéž za dobu simulace 0,5 s s použitím hodnot z programu Virtual CRASH.

Při porovnání rozdílů mezi získanými postřetovými parametry z jednotlivých programů zjistíme, že tyto programy vykazovaly mezi sebou pouze nepatrné odchylky těchto postřetových hodnot, tedy vozidla se chovala takřka stejně.

Hybnosti vozidel vypočteny pro tuto a předchozí situaci jsou znázorněny v tabulce č. 21.

Tab. č. 21: Předstřetové hybnosti vozidel obou sledovaných situací [28].

situace střetu	vozidlo	rychlost vozidla [m s ⁻¹]	hmotnost vozidla [kg]	hybnost vozidla [kg m s ⁻¹]
první neupravená situace, změna polohy těžiště vozidla Nissan	Nissan	5,55	2245	12472
	Toyota	25,00	1250	31250
druhá modifikovaná situace, změna polohy těžiště vozidla Toyota	Nissan	25,00	2245	56125
	Toyota	5,55	1250	6944

Přes značný rozdíl hybnosti střetnutých vozidel, obou provedených situací šikmého střetu, byl charakter postřetového chování vozidel velmi podobný. Se zvyšující se vzdáleností bodu rázu od těžiště vozidla se zvyšuje podíl rotační složky pohybu střetnutých vozidel. Vozidlu, na němž byla prováděna korekce podélné polohy těžiště, jedoucího pod úhlem 0° se v tomto důsledku snížila postřetová rychlost a dráha. Druhému vozidlu, které se s prvním vozidlem střetne, jedoucího pod úhlem 45° se naopak postřetová rychlost a dráha zvyšuje.

8 Experimentální měření polohy těžiště

Nad rámec zadání této diplomové práce bylo provedeno experimentální měření a následné vyhodnocení polohy těžiště osobního automobilu Toyota Corolla. Měření horizontální polohy těžiště bylo provedeno vážením jednotlivých kol a přepočtem byla určena výsledná horizontální poloha těžiště, viz kapitola č. 2.1 - měření podélné a příčné polohy těžiště. Výšková poloha těžiště byla stanovena metodou vážení vozidla při naklánění na přední nápravu. Tato metoda je podrobně popsána v kapitole č. 2.2.1. Cílem této metody je naklonit vozidlo na jednu nápravu o určitý úhel a změřit přírůstek hmotnosti na nápravě spočívající v klidu.

Následující měření bylo provedeno v kamenolomu Podhůra u Lipníka nad Bečvou. Jako váha byla použita mostní spediční váha GX2SS s přesností III. třídy, přírůstkem 10 kg a minimální váživostí 300 kg. Přesto, že tato váha nebyla zcela přesná, pro účely experimentálního ověření polohy těžiště u osobního vozidla byla dostačující. Vyhodnocovací panel váhy je znázorněn na obr. č. 53.

Jako experimentální vozidlo bylo použito osobní vozidlo Toyota Corolla s následujícími parametry:

Tab. č. 22: Parametry experimentálního vozidla Toyota Corolla [28].

typ vozidla	Toyota Corolla	
rok výroby	2004	
výkon motoru	71	[kW]
objem motoru	1398	[cm ³]
celková délka	4,277	[m]
celková šířka	1,710	[m]
celková výška	1,475	[m]
rozvor náprav	2,6	[m]
rozchod předních kol	1,48	[m]
rozchod zadních kol	1,46	[m]

Před měřením byly do vozidla doplněny provozní kapaliny a palivo do maximálního stavu dovoleného výrobcem vozidla. Na vozidle nebyly provedeny žádné úpravy zamezující vzájemný posun karosérie vůči podvozku a tím nebylo zamezeno vzniku chyby měření způsobené stlačením pružin a tlumičů při naklánění vozidla.

Naklápění testovaného vozidla na přední nápravu bylo zajištěno s použitím sklopného kontejneru a vozidla Avia - kontejnerový speciál viz obr. č. 54.

Průběh měření:

V první části bylo testovací vozidlo umístěno vždy na váhu tak, aby byly postupně zváženy hmotnosti připadající na každé kolo samostatně, bez řidiče, a následně i na přední i zadní nápravu. Hodnoty hmotnosti připadající na každé kolo jsou znázorněny v tab. č. 23. Na základě takto získaných hmotností byla dopočítána příčná a podélná poloha těžiště, viz kapitola 2.1

Aby bylo možno dopočítat výškovou polohu těžiště, bylo testovací vozidlo umístěno do sklopného kontejneru a následně bylo doplněno přípravky zamezující jeho svévolné podélné přemístění znázorněné na obr. č. 55. Tyto přípravky společně s výškou kontejneru zajišťovaly vozidlo ve vodorovné poloze. Hmotnost přípravků byla odečtena od každé naměřené hodnoty hmotnosti vozidla.

Následně byl kontejner postupně nadzvedáván pomocí hydraulické ruky o určitou výšku. Tato výška byla společně s přírůstkem hmotnosti připadajícím na přední nápravu spočívající na váze zaznamenávána. Celkem proběhlo 15 měření, pokaždé v jiné výšce kontejneru, resp. vertikální vzdálenosti osy zadní nápravy měřeného vozidla od výšky přípravku spočívající pod předními koly vozidla. Těchto 15 měření bylo následně vyhodnoceno a výsledky měření jsou zaznamenány v tab. č. 24.

Tab. č. 23: Hmotnosti připadající na jednotlivá kola měřeného vozidla [28].

Hmotnosti rozloženy na jednotlivá kola			
PP	LP	PZ	LZ
340	360	240	230

Kde:

PP je pravé přední kolo,
PZ je pravé zadní kolo,

LP je levé přední kolo,
LZ je levé zadní kolo,

Tab. č. 24: Naměřené a dopočítané hodnoty potřebné k nalezení výškové polohy těžiště [28].

č. měření	váha [kg]	výška h_1 [m]	Δm_P [kg]	úhel θ [°]	tg (θ) [-]
1	790	0,40	90	8,82	0,155
2	800	0,45	100	9,93	0,175
3	800	0,48	100	10,60	0,187
4	810	0,54	110	11,94	0,211
5	820	0,63	120	13,97	0,249
6	830	0,80	130	17,85	0,322
7	830	0,87	130	19,47	0,354
8	840	0,90	140	20,17	0,367
9	850	0,93	150	20,87	0,381
10	850	1,01	150	22,77	0,420
11	860	1,12	160	25,41	0,475
12	860	1,20	160	27,37	0,518
13	860	1,35	160	31,15	0,604
14	870	1,40	170	32,44	0,636
15	870	1,50	170	35,08	0,702

Kde:

Váha je naměřená hmotnost připadající na přední nápravu vozidla během jednotlivého měření.

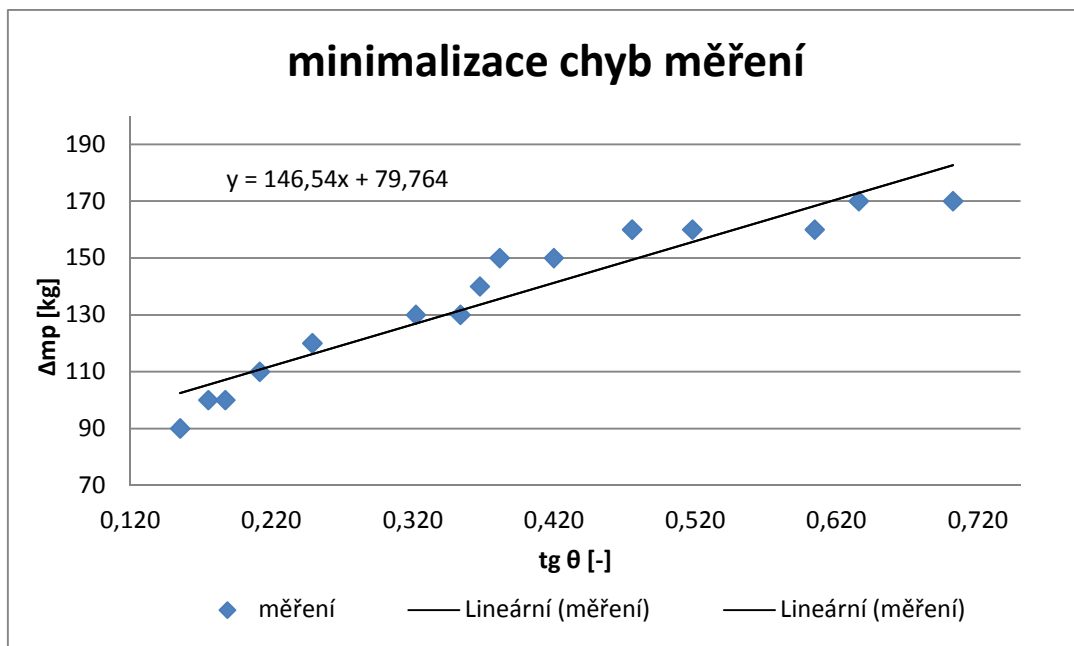
Výška h_1 je kolmá vzdálenost měřená od osy zadní nápravy k vodorovné výšce přípravku spočívajícího pod předními koly vozidla.

Δm_P je dopočítaný přírůstek hmotnosti připadající na přední nápravu mezi nenadzdvíženou a nadzdvíženou zadní nápravou.

Úhel θ je dopočítaný úhel nadzdvížení zadní nápravy.

Tg $_{\theta}$ je dopočítaná hodnota tg (úhlu θ).

Pro zpřesnění výsledné výškové polohy těžiště vozidla byl vytvořen graf závislosti tg (θ) jednotlivých měření na hodnotách Δm_P .



Obr. č. 51: Graf závislosti $\text{tg } (\theta)$ na Δm_P jednotlivých měření [28].

Tento bodový graf jednotlivých měření byl doplněn přímkou popisující střední vývoj trendů, ke které byla následně určena směrnice. Po dosazení $\text{tg } (\beta)$ této směrnice do vzorce č. 17 bylo možno dopočítat výškovou polohu h_2 těžiště vozidla.

Výsledná poloha těžiště měřeného vozidla se nachází ve vzdálenosti:

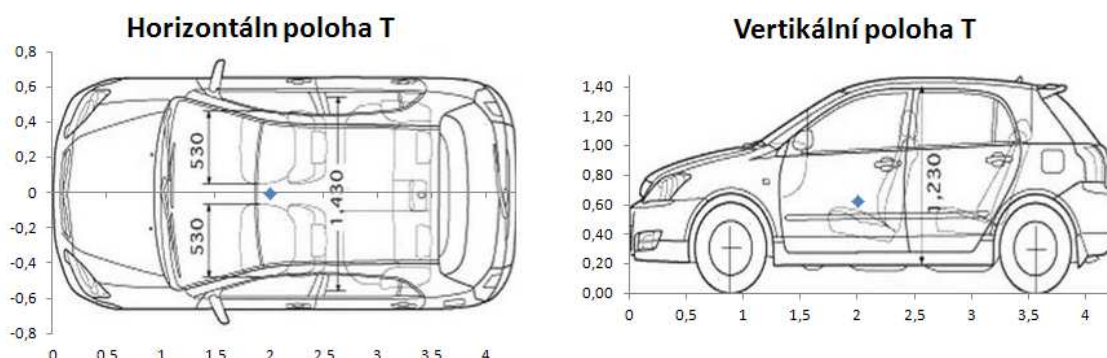
$$l_z = 1,562 \text{ m od zadní nápravy}$$

$$l_p = 1,048 \text{ m od přední nápravy}$$

$$y = 0,006 \text{ m vlevo od podélné osy vozidla}$$

$$h_2 = 0,32 \text{ m od spojnice přední a zadní nápravy}$$

Pro lepší představu o poloze těžiště vozidla byl vytvořen následující obrázek č. 52 znázorňující přesnou polohu těžiště v testovaném vozidle.



Obr. č. 52: Zobrazení skutečné polohy těžiště testovaného vozidla [28].



Obr. č. 53: Vyhodnocovací panel váhy [28].



Obr. č. 54: Nakládění testovaného vozidla [28].



Obr. č. 55: Pohled na vozidlo před a během měření výškové polohy těžiště [28].



Obr. č. 56: Průběh měření výškové polohy těžiště [28].

Pomoci experimentálního měření vozidla Toyota Corolla byly získány souřadnice těžiště tohoto vozidla. Těžiště se nachází 1,048 m od přední nápravy směrem k zadní části vozidla, 0,006 m vlevo od podélné osy vozidla a 0,63 m výškově od země.

Porovnáním hodnot získaných experimentálním měření s hodnotami publikovanými v [20, tab. 5.3.2], kde podélná vzdálenost těžiště od přední nápravy je 1,054 m a výšková vzdálenost těžiště od země je 0,514 m lze potvrdit, že experimentální měření proběhlo úspěšně.

Rozdíl výškové polohy těžiště o 0,116 m mezi experimentálním měřením a publikovanými hodnotami v [20, tab. 5.3.2] lze zdůvodnit výskytem nežádoucích vlivů ovlivňujících přesnost měření výškové polohy těžiště. Mezi tyto vlivy lze zařadit použití měřicí váhy III. třídy přesnosti s přírůstkem 10 kg. Zároveň nebylo zamezeno vzájemnému posuvu odpružené části vozidla vůči neodpružené, což může mít vlivem nadzvedávání zadní nápravy za následek mírné posunutí těžiště směrem k přední nápravě a mírně vzhůru.

9 Zhodnocení výsledků simulačních programů

Při simulaci byly sledovány především tyto postřetové parametry:

Postřetová dráha, tedy dráha kterou vozidlo po střetu urazilo do konečné pozice, nebo do konce předem stanoveného časového intervalu.

Postřetová rychlost neboli výběhová rychlost vozidla bezprostředně po střetu.

Natočení vozidla v konečné poloze, nebo na konci předem stanoveného časového intervalu.

Úhel rychlosti z těžiště vozidla v místě střetu do těžiště v konečné poloze vozidla, či do místa kde se vozidlo nacházelo v době uplynutí nastaveného časového intervalu.

Změna příčné polohy těžiště

Protože ani jeden z použitých programů nedokáže přímo měnit příčnou polohu těžiště, bylo k analýze vlivu příčného posunu těžiště na postřetové chování vozidla použito srovnání pomoci DRHI – diagramu rovnováhy hybností a impulzů.

Početně bylo stanoveno, že v extrémních případech při přetížení pneumatik jedné strany vozidla (PP a PZ nebo LP a LZ) každé pneumatiky o 100 kg, dojde k vychýlení příčné polohy těžiště o 0,11 m směrem k přetížené straně vozidla.

Srovnáním směrů postřetových rychlostí vozidel s nezměněnou polohou těžiště a s vychýlenou polohou těžiště o 0,11 m bylo stanoveno pomoci diagramu DRHI, že tato změna má pouze minimální vliv na předstřetovou rychlost vozidla, kterou lze kompenzovat zpomalením o $0,09 \text{ km h}^{-1}$, při zatížení levé části vozidla a o hodnotu $0,1 \text{ km h}^{-1}$ při zatížení pravé části vozidla.

Nepřímá změna polohy těžiště simulovaná v programu Virtual CRASH byla provedena pomocí manuálního umístění závaží (200 kg) na jednu stranu vozidla. Závaží simulovalo přetížení vozidla a následný posun polohy těžiště.

Při srovnání konečné postřetové polohy takto zatíženého a nezatíženého vozidla nastala změna v hodnotě - 8,59 m, což je zkrácení postřetové dráhy o 37 %.

Změna výškové polohy těžiště

Výšková poloha těžiště vozidla má vliv z hlediska analýzy silničních nehod především na převrácení vozidla. V této práci byl analyzován vliv výškové polohy těžiště na převrácení vozidla při průjezdu neklopenou zatáčkou a vliv výškové polohy těžiště při střetu s pevnou překážkou.

Simulacemi bylo prokázáno, že výškový vliv polohy těžiště vozidla na jeho převrácení je značně individuální a záleží na přesně stanovených okolnostech dopravní nehody, jako je charakter zatáčky, rychlost, typ a rozměry vozidla aj.

Porovnáním situací v programu Virtual CRASH bylo stanoveno, že pokud bude umístěno závaží o hmotnosti 300 kg na střechu vozidla Toyota Corolla, navýší se poloha těžiště o 0,245 m.

V analyzované situaci průjezdu zatáčkou dojde k převrácení vozidla Toyota s navýšenou polohou těžiště o 0,245 m v rychlostech 41 až 78 km h⁻¹. Nad touto rychlostí projede vozidlo zatáčku smykem. Tato simulace byla porovnána s terénním vozidlem Nissan Patrol, kterému stačilo navýšit výškovou polohu těžiště (0,72 m) o 0,11 m, čemuž odpovídá závaží o hmotnosti 158 kg umístěné na střeše vozidla a v rychlostech 43 až 62 km h⁻¹ dojde k jeho převrácení ve výše uvedeném typu zatáčky.

Při šikmém nárazu vozidla do pevné překážky v rychlostech 50 a 90 km h⁻¹ při různých změnách výškové polohy těžiště simulovaného vozidla došlo buď k podélnému skluzu vozidla po překážce (v nízkých polohách těžiště) nebo k převrácení vozidla (vysoká poloha těžiště vozidla). K převrácení vozidla v rychlosti 50 km h⁻¹ došlo v programu PC Crash při navýšení polohy těžiště (0,54 m) o 0,3 m. Při srážce v 90 km h⁻¹ již stačila navýšit poloha těžiště o 0,2 m a vozidlo se opět převrátilo.

Při shodných parametrech simulace dojde v programu PC Crash k převrácení vozidla vždy dříve, než je tomu v programu Virtual CRASH.

Změna podélné polohy těžiště

Vliv podélné polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb byl analyzován ve třech typech střetů vozidel.

Prvním typem byl čelní střet vozidel s překrytím 50 %. Ze získaných výsledků při tomto typu střetu lze usuzovat, že s narůstající vzdáleností podélné polohy těžiště od osy přední nápravy, a taktéž od bodu rázu narůstá postřetová dráha a zmenšuje se úhel natočení v konečné poloze vozidla se změněnou polohou těžiště (protijedoucího vozidla).

Vlivem změny podélné polohy těžiště protijedoucího vozidla z běžné polohy těžiště (1,04 m) o 0,3 m směrem od osy zadní nápravy k bodu rázu se sníží postřetová dráha protijedoucího vozidla o 2,23 m (20,6 %), sníží postřetová rychlost o 0,2 km h⁻¹ (0,8 %). Pro předjíždějící vozidlo se vlivem těchto změn polohy těžiště na protijedoucí vozidlo sníží postřetová dráha o 0,08 m (1,5 %) a zvýší se postřetová rychlost o 0,5 km h⁻¹ (2,4 %). Tyto hodnoty byly získány programem Virtual CRASH za dobu simulace 1,5 s.

Při simulaci v programu PC Crash nastaly při posunu těžiště protijedoucího vozidla o hodnotu 0,3 z běžné polohy těžiště tohoto vozidla (1,04 m) směrem k bodu rázu následující. Snížila se postřetová dráha protijedoucího vozidla o 1,66 m (15 %), sníží postřetová rychlost o 0,29 km h⁻¹ (1 %). Pro předjíždějící vozidlo se vlivem těchto změn polohy těžiště na protijedoucí vozidlo sníží postřetová dráha o 0,11 m (2,2 %) a zvýší se postřetová rychlost o 0,32 km h⁻¹ (1,5 %). Tyto hodnoty byly získány za dobu simulace 1,5 s.

Druhým typem střetu byl šikmý střet rychle jedoucího lehkého vozidla Toyota Corolla do pravé zadní části karosérie rozjíždějícího se těžkého vozidla Nissan Pathfinder. Při tomto typu střetu bylo manipulováno s těžištěm vozidla Nissan. Během simulace trvající 0,5 s byly zjištěny tyto poznatky.

Při zmenšující se vzdálenosti bodu rázu vozidel od polohy těžiště vozidla Nissan roste postřetová rychlost a dráha vozidla Nissan, při čemž klesá postřetová rychlost a dráha vozidla Toyota. Tyto průběhy se chovají takřka lineárně. Při změně podélné polohy těžiště ze standardní polohy vozidla Nissan (1,42 m) směrem k bodu rázu o hodnotu (0,3 m) se navýší postřetová rychlost vozidla Nissan o 0,9 km h⁻¹ (2,1 %),

prodlouží se postřetová dráha o 0,12 m (2,3 %), při čemž poklesne postřetová rychlost vozidla Toyota o $2,4 \text{ km h}^{-1}$ (5,3 %) a postřetová dráha se zkrátí o 0,33 m (5,3 %). Tyto hodnoty byly získány z programu Virtual CRASH při délce simulace 0,5 s.

Při simulaci v programu PC Crash došlo při posunu těžiště vozidla Nissan ze standardní polohy těžiště (1,42 m) směrem k bodu rázu o hodnotu 0,3 m k navýšení postřetové rychlosti vozidla Nissan o $0,88 \text{ km h}^{-1}$ (2 %) a k prodloužení postřetová dráha o 0,12 m (2,3 %). Při čemž poklesla postřetová rychlost vozidla Toyota o $2,37 \text{ km h}^{-1}$ (5,2 %) a zkrátila se postřetová dráha o 0,33 m (5,3 %) za dobu simulace 0,5 s.

Třetím typem střetu byl šikmý střet rychle jedoucího těžkého vozidla Nissan do pravé zadní části karosérie rozjíždějícího se lehkého vozidla Toyota. Simulace byla zastavena po 0,5 s. Bylo manipulováno s těžištěm vozidla Toyota. V tomto typu střetu hrál velikou roli rozdíl hybností jednotlivých vozidel.

Vlivem snižující se vzdálenosti těžiště vozidla Toyota od bodu rázu vozidel rostla postřetová dráha, výběhová rychlost i úhel natočení v konečné poloze vozidla Toyota. Postřetová dráha při posunu těžiště vozidla Toyota ze standardní polohy (1,04 m) o hodnotu 0,3 m směrem k bodu rázu se zvýšila o 0,25 m (3,3 %), postřetová rychlost se zvýšila o $1,94 \text{ km h}^{-1}$ (3,3 %), úhel rychlosti vzrostl o $2,2^\circ$ (9,3 %) a úhel natočení tohoto vozidla po uplynutí času simulace (0,5 s) vzrostl o $4,98^\circ$ (2,3 %).

Při posunu těžiště vozidla Toyota směrem k bodu rázu o hodnotu 0,3 m došlo u vozidla Nissan během času simulace 0,5 s k poklesu postřetové dráhy o 0,91 m (2 %), poklesu postřetové rychlosti o $1,6 \text{ km h}^{-1}$ (2,3 %), snížení úhlu natočení vozidla o $9,4^\circ$ (12,9 %) a snížení úhlu rychlosti o $1,3^\circ$ (2,3 %). Tyto hodnoty byly získány z programem Virtual CRASH. Při tomto typu střetu se hodnoty mezi programy PC Crash a Virtual crash v přiměřené míře shodovaly.

10 Závěr

V teoretické části této diplomové práce jsou uvedeny metody vedoucí k nalezení příčné, podélné a výškové polohy těžiště. Jednotlivé metody jsou následně rozepsány a okomentovány. Dále byla popsána problematika stability vozidla v závislosti na poloze těžiště a prováděného manévru vozidla. V této kapitole jsou popsány vlivy působící na vozidlo během brzdění nebo při jízdě v zatáčce. Kdy a za jakých okolností se stane vozidlo přetáčivé či nedotáčivé, a za jakých okolností dojde k příčnému smyku či převrácení vozidla při průjezdu zatáčkou. Následuje stručné rozdělení dopravních nehod a metod běžně používaných k analýze silničních nehod. Dále je popsán pohyb vozidla po střetu a hlavní vlivy ovlivňující jeho pohyb. V závěru teoretické části diplomové práce byly vytyčeny problematické manévry a situace běžně se vyskytující v silničním provozu. Tyto situace byly dále určeny k výběru vhodných situací pro následnou analýzu vlivu polohy těžiště na jeho postřetový pohyb.

Vybrané situace byly nasimulovány v prostředí programů Virtual CRASH a PC Crash za účelem nalezení vlivu polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb. Vybrané situace dále byly rozděleny do skupin dle vlivu působení výškové, podélné či příčné polohy těžiště na výsledný postřetový pohyb vozidla. Jednotlivé skupiny byly následně analyzovány. Podrobné srovnání výsledků jednotlivých simulací je obsaženo v předchozí kapitole. Výstupy z použitých simulačních programů jsou protokoly obsahující žádané informace o průběhu simulace či nastavených technických údajích vozidla. Jako příklad byl k této práci přiložen jeden vytisknutý protokol z každého programu na jednu, stejnou simulaci. Tyto protokoly lze nalézt v příloze č. 1 a v příloze č. 2.

Přímá analýza příčné polohy těžiště nebyla provedena ani v jednom z programů Virtual CRASH či PC Crash, protože ani jeden z uvedených programů nedokáže přímo měnit příčnou polohu těžiště vozidla. Proto bylo k analýze vlivu polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb použito nepřímých metod.

Byly použity dvě nepřímé metody. První spočívala v použití řešení pomocí diagramu rovnováhy hybností a impulsů. Druhá metoda byla založena na porovnání postřetového pohybu zatíženého a nezatíženého vozidla závažím umístěným na kapotu

vozidla v prostředí programu Virtual CRASH. Výstupy těchto metod nelze považovat za příliš korektní a přesné, přesto poukázaly na skutečnost, že změna příčné polohy těžiště vozidla v určitých mezích nemá žádný zásadní vliv na postřetové chování vozidla. Přetížení vozidla na jeho jedné podélné straně vychýlí polohu těžiště jen v řádech centimetrů.

Dále byl zpracován vliv změny výškové polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb. V této kapitole byly simulovány situace vyskytující se v běžném silničním provozu. Jsou zde zpracovány simulace zabývající se převrácením vozidla při jízdě v nenakloněné zatáčce či střetu vozidla s pevnou překážkou simulovány v různých rychlostech. Z výstupů těchto simulací vyplývá, že vozidla s vysoko umístěným těžištěm jsou náchylnější k převrácení nejen při jízdě v zatáčce, ale i při střetu s např. jiným vozidlem či domovní zdí. Samotné převrácení vozidla je značně individuální a záleží především na typu vozidla a jeho faktoru statické stability, charakteru zatáčky a zatížení vozidla, nebo např. na aktuálních povětrnostních podmínkách či adhezi. Obecně platí, že velkou roli při převrácení vozidla hraje vzdálenost bodu rázu od polohy těžiště. Výšková poloha těžiště při analýze dopravních nehod za pomoci SW je důležitou vlastností vozidla, která by měla být vždy aspoň orientačně nastavena.

Pro analýzu vlivu změny podélné polohy těžiště vozidla na jeho postřetový pohyb byly nasimulovány tři typy střetů vozidel. Prvním byl čelní střet s překrytím 50 %, druhý a třetí typ střetu byl šikmý střet dvou různých vozidel Toyota Corolla a Nissan Pathfinder. Z průběhů těchto simulací vyplývá, že podélná změna těžiště má nesporný vliv projevující se především při šikmém střetu. V závislosti na změně vzdálenosti bodu rázu vozidel od podélné polohy těžiště se mění rotační složka pohybu střetnutých vozidel, což má za následek změnu celkového průběhu postřetové dráhy či postřetové rychlosti vozidel. Při analýze silničních nehod s využitím SW je podélná poloha těžiště, v závislosti na typu střetu, velice důležitý parametr.

Nad rámec zadání diplomové práce bylo provedeno experimentální měření polohy těžiště vozidla Toyota Corolla. Měření bylo provedeno na spediční váze III. třídy přesnosti v objektu kamenolomu Podhůra. Měření prokázalo běžnou polohu těžiště tohoto vozidla. Těžiště tohoto vozidla se nacházelo ve vzdálenosti 1,048 m od přední nápravy, 0,006 m vlevo od podélné osy vozidla a 0,63 m výškově od opěrné roviny.

Pro analýzu postřetového pohybu vozidla lze vymyslet nespočet vhodných situací, které by bylo zajímavé simulovat. Ve skutečnosti stačí změnit jeden parametr, například bodu rázu, a celá simulace se chová zcela odlišně reálné situaci. Zde je kámen úrazu, protože znalci pracují s velice konkrétními údaji. Málokdy znalec dostane i od policie úplné a přesné či nezkreslené podklady pro následné vytvoření simulace i zdánlivě jednoduché nehody. Pomocí vhodné variace parametrů, kterými disponují počítačové programy určené k analýze dopravních nehod, lze nastavit a prezentovat jakýkoliv průběh i fyzicky nemožné nehody.

Počítačová simulace nikdy nemůže 100 % odpovídat skutečnému průběhu dopravní nehody, protože samotná simulace může být maximálně tak přesná, kolik i zdánlivě zanedbatelných parametrů dokáže přesně postihnout.

Použité zdroje

- [1] FLORIÁN, Z., PELLANT, HÁNEK, M., *TECHNIK., Mechanika i- statika*, vydavatel: Vysoké učení technické v Brně, 181 s., 2004, str. 76., dostupná z: < http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Tech_mech_I.pdf>.
- [2] VLK, F., *Diagnostika motorových vozidel*, 1. Vydání, Brno, nakladatelství Vlk, 2000, 434 s., ISBN 80-238-5274-6.
- [3] FEDRA, T., *Měření výškové polohy těžiště vozidla*. Brno, VUT-FSI., 2010, 97 s., str. 19 až 24, [on-line], [cit. 2012-10-02]. Dostupné z: < https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29233>.
- [4] SKOPALÍK, A., *Zjištění polohy těžišť osobních motorových vozidel*. Brno, 2004. 5 s. Referát. VUT, FSI, Katedra ÚSI, [on-line], [cit. 2012-10-02]. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/07_Soudni%20inzenyrstvi/7_01_Soudni%20inzenyrstvi/Skopalik_Adam.pdf>.
- [5] VLK, F., *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*, 1. Vydání, Brno: nakladatelství Vlk, 2000, 576 s., ISBN 80-238-6573-0.
- [6] GRAJA, M., *Zkoušení vozidel, podklady k přednášce, Hmotnostní parametry silničních vozidel*, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků, oddělení silničních vozidel, 2009.
- [7] VYKOUKAL, R., *AUTOMOBILY, UČEBNICE PRO 1., 2. A 3. ROČNÍK OU A UŠ*, nakladatelství SNTL Praha, 1971, 412 s., první vydání, typové číslo: L 13-C1-IV-33/25299/IV.
- [8] VLK, F., *Automobilová elektronika 2: Systémy řízení podvozku a komfortní systémy*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství František Vlk, 2006, 308 s., ISBN 80-239-7062-3.
- [9] HALAMKA, J., *Nové nařízení: všechny automobily musí mít stabilizační systém ESP.*, auto- inden, [on-line], 3.12.2011, [cit. 2012-10-02]. Dostupné z: <http://auto.idnes.cz/nove-narizeni-vsechny-autonovinky-musi-mit-stabilizacni-system-esp-1ib-/automoto.aspx?c=A111202_151405_automoto_hig>.
- [10] SZTWIERTNIA, Č. *Stabilita vozidel při jízdě v zatáčce*. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, katedra dopravních prostředků, 2006, 61 s., Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Juraj Slamka, PhD.
- [11] MRÁZEK, Z., *Modelování střetu vozidel v technickém znalectví*, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Disertační práce, školitel: Janíček, Přemysl., 2007, 64 s.
- [12] NOVOTNÝ, V., *Analýza dokumentace skutečných poškození vozidel při dopravní nehodě*, VUT v Brně, Ústav soudního inženýrství, Diplomová práce, 2010, 89 s.
- [13] PORADA, V. a kol., *Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi*. Praha: Linde Praha a.s., 2000, 378 s., ISBN 80-7201-212-6.

- [14] BUREŠ, J., *Archimédes ze Syrakus*, [on-line], 2002, [cit. 2012-10-02]. Dostupné z: <<http://www.converter.cz/fyzici/archimedes.htm>>.
- [15] BRADÁČ, A. a kol., *Soudní inženýrství*, Akademické nakladatelství CERM, 725 s, Brno 1999, ISBN 80-7204-133-9. Str. 377, 427 až 453.
- [16] SEMELA, M. *Komplexní systém pro analýzu silniční nehody - střet dvou automobilů na křižovatce*. Brno: VUT v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2010. 126 s. Vedoucí dizertační práce Ing. Albert Bradáč, Ph.D.
- [17] HUGEMANN, W. a rozsáhlý autorský tým.: *Unfall-rekonstruktion*, dva svazky, 1. vydání, 2007, 645 s., ISBN 3-00-019419-3.
- [18] TESÁŘÍK, J., SVOBODA, P., *Informace o nehodovosti na pozemních komunikacích České republiky za rok 2011*, Ředitelství služby dopravní policie Policejního prezidia ČR, 22 s., str. 1, [on-line], 11.1.2012, [cit. 2012-10-02]. Dostupné z: <<http://www.policie.cz/soubor/2011-12-informace-pdf.aspx>>.
- [19] CELOSTĚTOVÝ REGIST, *Dohody o vytvoření celosvětových technických předpisů pro kolová vozidla a pro zařízení a části, které mohou být montovány anebo užity na kolových vozidlech (ECE/TRANS/132 a corr.1)*, uzavřené v Ženevě 25.6.1998, přeložena 31.7.2008, 14 s., [on-line], [cit. 2012-10-02]. Po přihlášení dostupné z: <mezinarodni-predpisy.tuv-sud.cz/cs/predpisy/gtr.../gtr008c2.pdf>.
- [20] WIERCIŃSKI, J., REZA, A., *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego*, 2. vydání, 2006, 1095 s., ISBN 83-87425-32-X.
- [21] SEMELA, M., *Analýza silničních nehod I*, Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Brno 2012, první vydání, 83s, ISBN 978-80-214-4559-8.
- [22] Virtual CRASH 2.2, User`s Manual, str. 3.
- [23] PC-CRASH 8.0, Program na simulaci dopravných nehod, Uživatelská příručka, str. 11 až 15.
- [24] KŘEPELKA, J., *Aktivní bezpečnost motorových vozidel*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s. Vedoucí diplomové práce ing. Petr Hejtmánek.
- [25] VALA, M., TESÁŘÍK, M., *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*, Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera, 2003, 229 s., ISBN 807194503X, 9788071945031.
- [26] VLK, F., *Karosérie motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a zasilatelství vlk, 2001, ISBN 80-238-5277-9.
- [27] BRADÁČ, A., Podklady k výuce na USI – VUT v Brně k výpočtu DRHI, soubor Microsoft Office Excel ke stanovení DRHI.
- [28] Archiv autora.

Seznam symbolů

označení	popis	jednotka
E_{def}	energie deformační	J
E_R	energie rotační	J
E_T	energie translační	J
f	součinitel tření	-
g	tíhové zrychlení	m s^{-2}
h_2	kolmá vzdálenost od roviny středů pneumatik vozidla k výškové poloze těžiště.	m
h_T	výška těžiště	m
l	rozvor	m
l_P	podélná vzdálenost těžiště od přední nápravy	m
l_Z	podélná vzdálenost těžiště od zadní nápravy	m
m_A	hmotnost závaží	kg
m_C	hmotnost celková	kg
m_{LP}	hmotnost levého předního kola	kg
m_{LZ}	hmotnost levého zadního kola	kg
m_{odl}	součet hmotností na odlehčené straně vozidla nakloněného o úhel θ .	kg
m_{odl-0}	součet hmotností připadající na pravou přední a pravou zadní pneumatiku vozidla umístěného ve vodorovné poloze, před započítáním naklání	kg
m_P	hmotnost přední nápravy	kg
m_{PP}	hmotnost pravého předního kola	kg
m_{PZ}	hmotnost pravého zadního kola	kg
r_{MEZ}	minimální poloměr zatáčky při průjezdu vozidlem před vznikem příčného smyku	m
$t_{P,Z}$	rozchod přední, resp. Zadní nápravy	m
$t_{PP,PZ}$	kolmá vzdálenost od těžiště k ose pravého předního kola, resp. pravého zadního kola	m
v_{in}	úhel předstřetové rychlosti	°
v_{MEZ}	maximální rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou, před vznikem příčného smyku	m s^{-1}
y'	příčná vzdálenost těžiště vozidla od ohniskového středu pneumatik	m
θ	úhel měřený mezi vodorovnou a nakloněnou rovinou spojnice středů pneumatik	°
DRRHI	Diagram rovnováhy rotačních hybností a impulsů	
MDRHI	Modifikovaného diagramu rovnováhy hybností a impulsů	
EES	Energetický ekvivalent rychlosti	

Seznam obrázků

Obr. č. 1: Schéma vozidla pro výpočet: a) podélné polohy těžiště vozidla [28].....	13
Obr. č. 2: Měření výškové polohy těžiště metodou naklánění na nápravu [28].	16
Obr. č. 3: Graf určený k minimalizaci chyby měřením výškové polohy těžiště [5].....	19
Obr. č. 4: Metoda vážení vozidla při naklápění na bok [28].	20
Obr. č. 5: Metoda zjištění úhlu překlopení [28].....	22
Obr. č. 6: Metoda zvedání celého vozidla [28].....	24
Obr. č. 7: Působení odstředivé síly na vozidlo projíždějící zatáčkou [7].	27
Obr. č. 8: Vozidlo při jízdě v zatáčce: a) přetáčivé [7], b) nedotáčivé [7].....	28
Obr. č. 9: Síly působící na vozidlo při jízdě v oblouku [21].....	29
Obr. č. 10: Zásah EPS při přetáčivém chování vozidla [24].....	31
Obr. č. 11: Síly působící na vozidlo při brzdění [7].....	31
Obr. č. 12: Relativní četnost nehody podle různých směrů rázu [26].	34
Obr. č. 13: Základní rozdělení jednotlivých střetů vozidel [28].....	35
Obr. č. 14: Střet dvou vozidel [28].	41
Obr. č. 15: Průjezd vozidla zatáčkou [28].	42
Obr. č. 16: Podélný náraz s nízko umístěnou pevnou překážkou [28].	43
Obr. č. 17: Příčný náraz s nízko umístěnou pevnou překážkou [28].	43
Obr. č. 18: a) Kolmý střet s pevnou překážkou [28].....	44
Obr. č. 19: Čelní střet dvou vozidel s překrytím 50 % [28].....	44
Obr. č. 20: Šikmý střet dvou vozidel [28].....	45
Obr. č. 21: Situace kolmého střetu dvou vozidel [28].	45
Obr. č. 22: Střet dvou vozidel pro analýzu vlivu příčné polohy těžiště [28].	48
Obr. č. 23: Diagram rovnováhy hybností a impulzů [27].....	50
Obr. č. 24: Střet vozidel bez použití závaží [28].	51
Obr. č. 25: Střet vozidel s použitím závaží na modrém vozidle [28].	51
Obr. č. 26: Simulace průjezdu zatáčkou v programu Virtual CRASH [28].	53
Obr. č. 27: Simulace průjezdu zatáčkou v programu PC Crash [28].....	54
Obr. č. 28: Průjezd zatáčkou vozidlem Nissan Patrol [28].....	55
Obr. č. 29: Šikmý náraz do bariéry v prostředí programu Virtual CRASH [28].....	57
Obr. č. 30: Šikmý náraz do bariéry v prostředí programu PC CRASH [28].	57
Obr. č. 31: Vliv výškové polohy těžiště na postřetovou dráhu při rychlosti 50 km h ⁻¹ [28].....	58

Obr. č. 32: Vliv výškové polohy těžiště na postřetovou dráhu při rychlosti 90 km h ⁻¹ [28].	59
Obr. č. 33: Rozdíly postřetových drah mezi jednotlivými programy v rychlostech 50 a 90 km h ⁻¹ [28].	59
Obr. č. 34: Simulace čelního střetu s 50 % překrytím v programu Virtual CRASH [28].	63
Obr. č. 35: Simulace čelního střetu s 50 % překrytím v programu PC Crash [28].	63
Obr. č. 36: Změna postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	65
Obr. č. 37: Změna postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	66
Obr. č. 38: Změna konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	66
Obr. č. 39: Situace šikmého střetu vytvořená v programu Virtual CRASH [28].	68
Obr. č. 40: Situace šikmého střetu vytvořená v programu PC Crash [28].	69
Obr. č. 41: Změny postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	71
Obr. č. 42: Změny postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	71
Obr. č. 43: Změny konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště [28].	71
Obr. č. 44: Změny úhlů postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště. [28].	72
Obr. č. 45: Znázornění modifikovaného střetu v programu Virtual CRASH [28].	74
Obr. č. 46: Znázornění modifikovaného střetu v programu PC Crash [28].	74
Obr. č. 47: Změny postřetových drah vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].	76
Obr. č. 48: Změny postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].	76
Obr. č. 49: Změny konečných natočení vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota [28].	77
Obr. č. 50: Změny úhlů postřetových rychlostí vozidel vlivem podélného posunu těžiště vozidla Toyota. [28].	77
Obr. č. 51: Graf závislosti tg (θ) na Δ m _P jednotlivých měření [28].	82
Obr. č. 52: Zobrazení skutečné polohy těžiště testovaného vozidla [28].	82
Obr. č. 53: Vyhodnocovací panel váhy [28].	83
Obr. č. 54: Naklápění testovaného vozidla [28].	83
Obr. č. 55: Pohled na vozidlo před a během měření výškové polohy těžiště [28].	83
Obr. č. 56: Průběh měření výškové polohy těžiště [28].	83

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Dosažené zpomalení vozidel na různých površích [16, str. 41].	40
Tab. č. 2: Použité parametry k simulaci a diagramu DRHI [28].	48
Tab. č. 3: Výsledné hodnoty DRHI1, DRHI2 a DRHI3 [28].	49
Tab. č. 4: Parametry střetu vozidel Toyota Corolla [28].	50
Tab. č. 5: Výšky těžiště, střední hodnoty rozchodů kol a SSF vybraných typů vozidel. [20, 21]	52
Tab. č. 6: Počáteční a konečné hodnoty simulací [28].	54
Tab. č. 7: Parametry simulace střetu vozidla s pevnou překážkou [28].	56
Tab. č. 8: Postřetové parametry střetu s pevnou překážkou v rychlosti 50 km h ⁻¹ [28].	57
Tab. č. 9: Postřetové parametry střetu s pevnou překážkou v rychlosti 90 km h ⁻¹ [28].	58
Tab. č. 10: Hodnoty použité pro simulaci čelního střetu s 50 % překrytím [28].	63
Tab. č. 11: Postřetové parametry získané programem Virtual CRASH [28].	64
Tab. č. 12: Postřetové parametry získané programem PC Crash [28].	64
Tab. č. 13: Rozdíly postřetových parametrů jednotlivých programů [28].	65
Tab. č. 14: Počáteční podmínky použité k simulacím v programech Virtual CRASH a PC Crash [28].	68
Tab. č. 15: Postřetové hodnoty simulace šikmého střetu získané programem Virtual CRASH [28].	69
Tab. č. 16: Postřetové hodnoty simulace šikmého střetu získané programem PC Crash [28].	70
Tab. č. 17: Rozdíly postřetových hodnot simulace šikmého střetu [28].	70
Tab. č. 18: Hodnoty postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané programem Virtual CRASH [28].	74
Tab. č. 19: Hodnoty postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané programem PC Crash [28].	75
Tab. č. 20: Rozdíly postřetových veličin simulace modifikovaného šikmého střetu získané porovnáním hodnot programu z Virtual CRASH a PC Crash [28].	75
Tab. č. 21: Předstřetové hybnosti vozidel obou sledovaných situací [28].	78
Tab. č. 22: Parametry experimentálního vozidla Toyota Corolla [28].	79
Tab. č. 23: Hmotnosti připadající na jednotlivá kola měřeného vozidla [28].	80
Tab. č. 24: Naměřené a dopočítané hodnoty potřebné k nalezení výškové polohy těžiště [28].	81

Seznam příloh

Listinné přílohy:

- | | |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Protokol provedené simulace dopravní nehody řešené v kapitole 7.3.2 s podélnou polohou těžiště vozidla Nissan vzdálenou 1,52 m od osy přední nápravy. Protokol je vygenerován programem Virtual CRASH 2.2. |
| Příloha 2 | Protokol provedené simulace dopravní nehody řešené v kapitole 7.3.2 s podélnou polohou těžiště vozidla Nissan vzdálenou 1,52 m od osy přední nápravy. Protokol je vygenerován programem PC Crash 8.0. |

Přílohy na CD:

- | | |
|-----------|---|
| Příloha 3 | Diplomová práce v elektronické podobě
Kunovský_DP_2012 |
| Příloha 4 | Modely řešených situací |

Zkušební verze programu Virtual CRASH 2.2 je volně dostupná on-line z:

< <http://www.vcrash3.com/download/vcrash22full.exe> >

Program PC Crash není volně publikovaný a k jeho provozu je zapotřebí platný certifikát. Více informací on-line na: < <http://www.pccrash.cz> >

Rozřazení přílohy 4

1_PŘÍČNÁ POLOHA TĚŽIŠTĚ

- 1_1 střet k DRHI
- 1_2_1 střet 2-Toyot_nezatížené
- 1_2_2 střet 2 Toyot_zatížené

2_VÝŠKOVÁ POLOHA TĚŽIŠTĚ

2_1 PŘEVŘÁCENÍ V ZATÁČCE

- 2_1_1 porovnání výškové polohy těžiště a hmotnosti na střeše
- 2_1_2 překlopení v zatáčce Toyota Corolla_V CRASH
- 2_1_3 překlopení v zatáčce Toyota Corolla_PC Crash
- 2_1_4 překlápění v zatáčce Nissan Patrol

2_2 PEVNÁ PŘEKÁŽKA

- 2_2_1 RYCHLOST 50 km_h-1
- 2_2_2 RYCHLOST 90 km_h-1

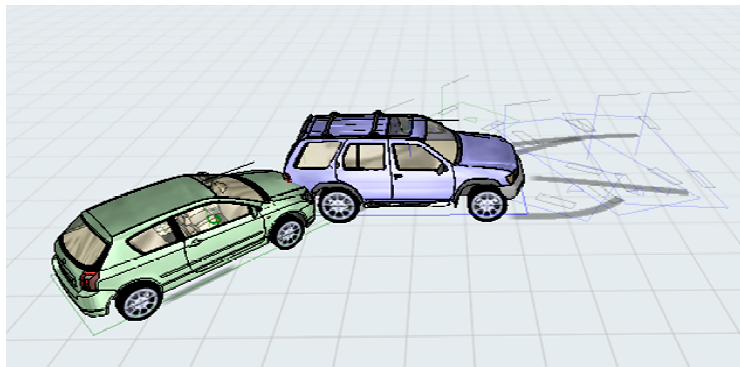
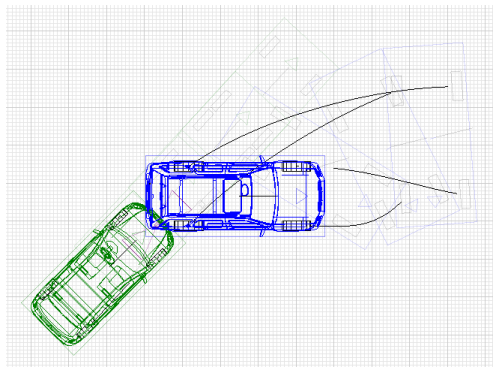
3_PODÉLNÁ POLOHA TĚŽIŠTĚ

- 3_1 ČELNÍ STŘET DVOU VOZIDEL
- 3_2 ŠIKMÝ STŘET _ POSUN TĚŽIŠTĚ VOZIDLA NISSAN
- 3_3 ŠIKMÝ MODIFIKOVANÝ STRET _ POSUN TĚŽIŠTĚ VOZIDLA TOYOTA

Přílohy

PŘÍLOHA č. 1
List 1

Protokol provedené simulace dopravní nehody řešené v kapitole 7.3.2 s podélnou polohou těžiště vozidla Nissan vzdálenou 1,52 m od osy přední nápravy. Protokol je vygenerován programem Virtual CRASH 2.2.



Virtual Crash 2.2 protokol

vozidlo/překážka: 1 - Nissan / Pathfinder 2.5 dCi ; řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	20.000			32.675		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	0.000	-5.666	-1.298	-86.448
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	0.000	0.000		14.115	-2.132	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	-0.033	0.243	-2.997
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-0.100	0.000	0.540	5.023	1.526	0.458

vozidlo/překážka: 2 - Toyota / Corolla 1.4 ; řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	90.000			44.305		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	45.000	-0.612	-0.352	47.415
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	45.000	0.000		47.333	1.349	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.082	-0.053	0.012
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-3.520	-1.870	0.540	0.594	2.705	0.505

PŘÍLOHA č. 1

List 2

Kolize

typ kolize - automatická / manuální										vozidlo/překážka 1	vozidlo/překážka 2		
pořadí	t [s]	překrytí [s]	X Y Z [m]	k	tření	phi psi [deg]	delta v [km/h]	impulz rázu [Ns]	deformační energie [J]	EES [km/h]	EES [km/h]		
										deformace [m]		deformace [m]	
										doběh			
										v [km/h]	omega-z [rad/s]	v [km/h]	omega-z [rad/s]
										výběh			
										v [km/h]	omega-z [rad/s]	v [km/h]	omega-z [rad/s]
										delta v [km/h]		delta v [km/h]	
										GEV		GEV	
manuální										1: Nissan / Pathfinder 2.5 dCi	2: Toyota / Corolla 1.4		
1	0.005	0.000	- 2.260	0.100	0.400	135.000	7.716	15966.096	148581.316	34.339		31.035	
			0.427							0.194			
			- 0.760			20.000				0.000	90.000	0.000	
			42.923			-3.312				44.405	0.431		
			25.603			45.982							
			0.746			1.482							

Technické údaje

vozidlo/překážka: 1 - Nissan / Pathfinder 2.5 dCi; řidič:			
délka [m]	4.740		
šířka [m]	1.850		
výška [m]	1.760		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	2245.000 (2245.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm^2]	1154.576 (1154.576)	3848.586 (3848.586)	3848.586 (3848.586)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převís přední [m]	0.750		
těžiště - přední náprava [m]	1.520		
rozvor 1 - 2 [m]	2.850		
rozchod - náprava 1 [m]	1.570		
rozchod - náprava 2 [m]	1.570		
max. úhel směr. odch. - náprava 1 vlevo/vpravo [deg]	10.000	10.000	
max. úhel směr. odch. - náprava 2 vlevo/vpravo [deg]	10.000	10.000	
pružnost - náprava 1 vlevo/vpravo [N/m]	41986.000	41986.000	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	31425.000	31425.000	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	4723.000	4723.000	

PŘÍLOHA č. 1

List 3

vozidlo/překážka: 1 - Nissan / Pathfinder 2.5 dCi ; řidič:		
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	3535.000	3535.000
zatížení v kabině vpředu [kg]	0.000	
zatížení v kabině vzadu [kg]	0.000	
zatížení v kufru [kg]	0.000	
zatížení střechy [kg]	0.000	
ABS	Ne	
adheze	0.800	

vozidlo/překážka: 2 - Toyota / Corolla 1.4; řidič:			
délka [m]	4.180		
šířka [m]	1.710		
výška [m]	1.470		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	1250.000 (1250.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm^2]	517.181 (517.181)	1723.937 (1723.937)	1723.937 (1723.937)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převis přední [m]	0.830		
těžiště - přední náprava [m]	1.040		
rozvor 1 - 2 [m]	2.600		
rozchod - náprava 1 [m]	1.480		
rozchod - náprava 2 [m]	1.460		
max. úhel směr. odch. - náprava 1 vlevo/vpravo [deg]	10.000	10.000	
max. úhel směr. odch. - náprava 2 vlevo/vpravo [deg]	10.000	10.000	
pružnost - náprava 1 vlevo/vpravo [N/m]	24525.000	24525.000	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	16350.000	16350.000	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	2759.063	2759.063	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	1839.375	1839.375	
zatížení v kabině vpředu [kg]	0.000		
zatížení v kabině vzadu [kg]	0.000		
zatížení v kufru [kg]	0.000		
zatížení střechy [kg]	0.000		
ABS	Ne		
adheze	0.800		

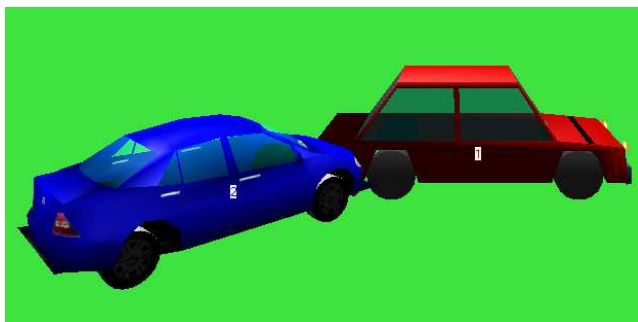
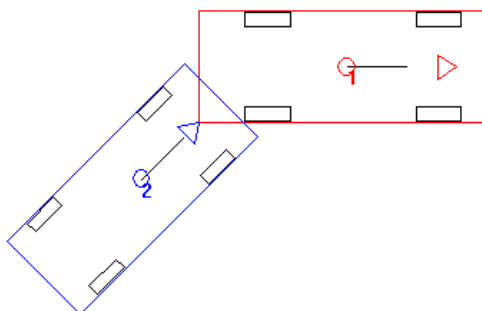
Nastavení

integrační krok [s]		0.005
ráz	hloubka překrytí [s]	0.000
	implicitní hodnota k	0.100
	implicitní hodnota tření	0.400

PŘÍLOHA č. 2

List 1

Protokol provedené simulace dopravní nehody řešené v kapitole 7.3.2 s podélnou polohou těžiště vozidla Nissan vzdálenou 1,52 m od osy přední nápravy. Protokol je vygenerován programem PC Crash 8.0.



Vozidlo :
Corolla 1.4 - M20

Nissan-Pathfinder 2.5 dCi - R51 Toyota-

STARTOVACÍ ÚDAJE

Rychlost (V) [km/h] :	20.00	90.00
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	0.00	45.00
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	0.00	45.00
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0.00	0.00
Poloha těžiště x [m] :	-0.10	-3.52
Poloha těžiště y [m] :	0.00	-1.87
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0.00	-0.00
Klopení os y [Grad] :	0.00	-0.00
Klopení os x [Grad] :	0.00	0.00
Klopení os y [1/sec] :	0.00	0.00
Klopení os x [1/sec] :	0.00	0.00

KONEČNÉ ÚDAJE

Rychlost (V) [km/h] :	31.47	44.29
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	-82.86	47.39
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	13.10	47.33
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	-2.57	0.01
Poloha těžiště x [m] :	4.91	0.56
Poloha těžiště y [m] :	1.49	2.66
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	0.32	-0.01
Klopení os y [Grad] :	-8.64	-0.61
Klopení os x [Grad] :	-1.35	-0.36
Klopení os y [1/sec] :	-0.15	0.08
Klopení os x [1/sec] :	0.46	-0.06

PŘÍLOHA č. 2
List 2

1.Kolize

Vozidlo :	1 NISSAN-P	2 TOYOTA-C
Řidič :		
t [s]:	0.00	0.00
Rychlost [km/h]:	20.00	90.00
Rychlost výběhu [km/h]:	42.92	44.40
Změna rychlosti dv [km/h] :	25.60	45.98
Deformace e [m] :	0.25	0.20
EES [km/h] :	30.98	36.74
Tuhosti [kN/m]:	2659.7	3396.7
k-faktor :	0.10	
Rychlost bodu rázu [km/h]:	7.7	
Tření při rázu (MUE) :	0.40	
Poloha bodu rázu [m] :	-2.26	
Poloha bodu rázu y [m] :	-0.76	
Poloha těžiště z [m] :	0.45	
Směr roviny tření (phi) [Grad] :	135.00	
Směr roviny tření (psi) [Grad] :	0.00	
Celková deformační energie [J] :	148205.37	
Impulz rázu [Ns] :	15966.10	
Směr rázové síly [Grad] :	39.79	
Směr rázové síly vertikálně[Grad] :	-0.15	
Rameno bodu rázu [m] :	0.80	0.05
Úhel bodu rázu [Grad] :	39.79	174.79
GEV :	0.83	1.25

ÚDAJE O KOLIZI

Rychlost (V) [km/h] :	20.00	90.00
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	0.00	45.00
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	0.00	45.00
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0.00	0.00
Poloha těžiště x [m] :	-0.10	-3.52
Poloha těžiště y [m] :	0.00	-1.87
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0.00	-0.00
Klopení os y [Grad] :	0.00	-0.00
Klopení os x [Grad] :	0.00	0.00
Klopení os y [1/sec] :	0.00	0.00
Klopení os x [1/sec] :	0.00	0.00

ÚDAJE O KOLIZI

Rychlost (V) [km/h] :	42.92	44.40
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	0.00	45.00
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	22.44	50.40
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	-3.31	0.43
Poloha těžiště x [m] :	-0.10	-3.52
Poloha těžiště y [m] :	0.00	-1.87
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0.07	0.12
Klopení os y [Grad] :	0.00	-0.00
Klopení os x [Grad] :	0.00	0.00
Klopení os y [1/sec] :	0.82	0.24
Klopení os x [1/sec] :	-0.31	0.79

TECHNICKÉ ÚDAJE

Vozidlo :	Nissan-Pathfinder 2.5 dCi - R51 Toyota-Corolla 1.4 - M20	
Délka [m] :	4.74	4.18
Šířka [m] :	1.85	1.71
Výška [m] :	1.76	1.47
Počet náprav :	2.00	2.00
Rozvor [m] :	2.85	2.60
Převis přední [m] :	0.75	0.83
Rozchod vpředu [m] :	1.57	1.48
Rozchod vzadu [m] :	1.57	1.46
Poh. hmotnost [kg] :	2245.00	1250.00
Zatížení v kabině vpředu [kg] :	0.00	0.00
Zatížení v kabině vzadu [kg] :	0.00	0.00
Zatížení v kufru [kg] :	0.00	0.00
Zatížení střechy [kg] :	0.00	0.00
Těžiště - přední náprava [m] :	1.52	1.04
Výška těžiště[m] :	0.54	0.54
Moment setr. /os X/ [kgm ²] :	1154.60	517.20
Moment setr. /os Y/ [kgm ²] :	3848.60	1723.90
Moment setr. /os Z/ [kgm ²] :	3848.60	1723.90
Pružnost 1.nápravy vlevo [N/m] :	41986.00	24682.00
Pružnost 1.nápravy vpravo [N/m] :	41986.00	24682.00
Pružnost 2.nápravy vlevo [N/m] :	31425.00	16192.00
Pružnost 2.nápravy vpravo [N/m] :	31425.00	16192.00
Tlumení 1.nápravy vlevo [Ns/m] :	4723.00	2776.00
Tlumení 1.nápravy vpravo [Ns/m] :	4723.00	2776.00
Tlumení 2.nápravy vlevo [Ns/m] :	3535.00	1821.00
Tlumení 2.nápravy vpravo [Ns/m] :	3535.00	1821.00
max.úhel směr.odch.PN vlevo. [Grad] :	10.00	10.00
max.úhel směr.odch.PN vpravo[Grad] :	10.00	10.00
max.úhel směr.odch.ZN vlevo [Grad] :	10.00	10.00
max.úhel směr.odch.ZN vpravo[Grad] :	10.00	10.00
ABS :	Ne	Ne