

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav soudního znalectví v dopravě

Diplomová práce

Analýza dopravních nehod – Softwarové simulace

Bc. Jakub Dibelka

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích (N3710)

Studijní obor: Dopravní systémy a technika (3708T009)

Vedoucí: Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.

Praha, 2012

zadání

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu ing. Tomáši Mičunkovi, Ph.D. především za trpělivou spolupráci, odborné vedení, zapůjčené materiály, užitečné rady a věcné připomínky. Nesmím také zapomenout na pracovníky Ústavu soudního znalectví v dopravě, kteří mi poskytli materiály, rady a zázemí ústavu. A v neposlední řadě nemohu zapomenout na své rodiče, nejbližší a kolegy v práci, kteří mi dali možnost tuto školu navštěvovat a poskytli mi potřebný klid a zázemí při studiu.

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

„Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).“

V Praze, dne 04.05.2012

Bc. Jakub Dibelka

Abstrakt

Autor: Bc. Jakub Dibelka

Název diplomové práce: Analýza dopravních nehod – Softwarové simulace

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní

Místo a rok vydání: Praha, 2012

Počet stran: 62

Práce se zabývá využitím výpočetní techniky, resp. simulačních softwarů při analýze dopravních nehod a vzájemně porovnává získané údaje o průběhu jedné dopravní nehody. V teoretické části nastiňuje historii soudního znaleství, možnosti využití výpočetní techniky v tomto oboru, představuje vybrané simulační programy a uvádí matematické zákonitosti při pohybu vozidel a jejich vzájemné kolizi.

Praktická část popisuje vzorovou dopravní nehodu, vybírá podstatné hodnoty charakterizující její průběh a následky. Současně popisuje vytvoření simulace nehodového děje, předkládá výsledné hodnoty a vzájemně je porovnává.

Klíčová slova: dopravní nehoda, simulace nehodového děje, PC-CRASH, Virtual CRASH, Impulz Expert, Carat, sekvence, dynamika, blokovací stopy, automobil, simulační software, matematicko- fyzikální vztahy.

Abstract

Author: Bc. Jakub Dibelka

Name of thesis: Analysis of traffic accidents - Simulation software

University: Czech technical university in Prague, Faculty of transportation sciences

Place and year of issue: Prague, 2012

Number of pages: 62

The work deals with using of computer technology, respectively with simulation software during the analysis of traffic accidents and compares the data that were obtained in the process of traffic accident as well. The theoretical section outlines the legal history of connoisseurship, the possibilities of using computer technology in this field, presents the selected simulation programs and mathematical regularities during the movement of vehicles and their mutual collisions.

The practical part describes the model of traffic accident and chooses the important values that characterized the course and consequences of this accident. At the same time describes a simulation of accident process, presents the resulting values and compare them.

Keywords: traffic accident, simulation of accident process, PC-CRASH, Virtual CRASH, Impulse Expert, Carat, sequence, dynamic, blocking tracks, car, simulation software, mathematical and physical relations.

Obsah

1.	Úvod	- 8 -
2.	Dopravní nehody a jejich znalectví	- 10 -
2.1.	Počátky akademické činnosti soudního znalectví [5],[9]	- 11 -
2.2.	Charakteristika současného stavu analýzy DN v soudním inženýrství	- 12 -
2.3.	Dopravní nehoda.....	- 13 -
3.	Využití počítačového softwaru k analýze dopravních nehod	- 15 -
3.1.	Historie simulačních programů [12]	- 15 -
3.2.	PC softwary k analýze DP	- 17 -
3.2.1.	PC- Crash.....	- 17 -
3.2.2.	Virtual Crash [6],[10]	- 18 -
3.2.3.	Carat [10]	- 19 -
3.2.4.	Impulz expert	- 19 -
4.	Matematicko-fyzikální zákony při analýze dopravních nehod [4]	- 20 -
4.1.	Kinematické zákony	- 20 -
4.2.	Zákony dynamiky	- 23 -
4.2.1.	Newtonovy zákony	- 23 -
4.2.2.	Síly	- 25 -
4.2.3.	Zákony zachování	- 31 -
4.3.	Mechanika tuhého tělesa.....	- 35 -
4.3.1.	Pohyb tuhého tělesa	- 35 -
4.3.2.	Pohyb těžiště tuhého tělesa	- 36 -
4.3.3.	Rotace tělesa kolem pevné osy	- 36 -
4.3.4.	Moment setrvačnosti.....	- 37 -
4.4.	Ráz těles.....	- 39 -
4.4.1.	Přímý centrální ráz.....	- 39 -
4.4.2.	Šikmý centrální ráz	- 42 -
4.4.3.	Excentrický ráz	- 44 -
5.	Popis vzorové dopravní nehody.....	- 47 -
5.1.	Popis místa nehody z protokolu PČR	- 47 -
5.2.	Výpovědi účastníků DN	- 47 -
5.3.	Technické parametry	- 48 -
6.	Simulace nehodového děje	- 51 -
6.1.	Vypracování simulace Virtual CRASH.....	- 52 -
6.2.	Vypracování simulace PC Crash	- 55 -

6.3.	Porovnání výstupů simulací.....	- 55 -
7.	Závěr	- 62 -
8.	Literatura.....	- 63 -
9.	Rejstřík obrázků.....	- 65 -
10.	Slovník zkratk	- 66 -
11.	Příloha.....	- 67 -
11.1.	Výsledné protokoly Virtual Crash	- 67 -
11.2.	Výsledné protokoly PC-Crash	- 77 -

1. Úvod

Jak již název napovídá, diplomová práce se zabývá problematikou úzce spjatou s provozem vozidel na pozemních komunikacích, a to analýzou dopravních nehod za současného využití počítačových softwarů.

Analýza dopravních nehod je každodenní prací dopravní policie při řešení těchto situací. Jejich cílem je stanovení závěru o průběhu dopravní nehody, potažmo určení řidiče, který porušil předpisy silničního provozu a svým chováním zapříčinil vznik této kolize. Jelikož na získání podkladů o příčině nehody mají omezený časový horizont, jsou vystaveny stresujícím podmínkám okolí, charakter jejich práce je nenuť k prohlubování znalostí v oboru a technické zázemí pracoviště přímo na místě střetu nevyužívá nejmodernější prostředky, dokáží stanovit stoprocentní závěr jen u méně složitějších dopravních nehod.

V situacích kdy policie není schopna svépomocí dospět k potřebným závěrům, přizve soudního znalce. Ještě před pár desetiletími bylo běžnou realitou, že znalec stanovil své závěry o příčině vzniku a průběhu dopravní nehody na základě několika výpočtů, ale především se opíral o své zkušenosti získané v průběhu jeho dosavadní praxe. Postup práce a vyřčení závěrů na základě těchto podkladů je dnes již značně zastaralý a nedostatečný. Dnes je kompletní rozbor a vytvoření pravdivého průběhu nehodového děje značně složitý proces založený na matematických operacích, které vycházejí z fyzikálních poznatků o pohybu dvou těles.

Aby samotná práce a očekávaný výsledek při rozboru nehody měl pro všechny zúčastněné co největší vypovídající hodnotu je nutné, pokud možno, využívat co nejpřesnější a nejúčinnější metody práce podpořené nejmodernější dostupnou technikou jako doplňkovým prostředkem.

V současné době se jako nejlepší podpůrný prostředek, který je pro svou spolehlivost a přesnost uznáván odborníky v automobilovém průmyslu a v soudním znalectví oboru dopravních nehod, jeví simulační softwary určené pro rekonstrukci nehodového děje. Práce s nejlépe využívanými programy pro tuto činnost je nastíněna v tomto elaborátu.

Cílem této práce je poskytnutí jednoznačného srovnání výsledků výpočtové analýzy vzorové dopravní nehody v prostředí dvou rozdílných softwarů pro podporu analýzy silničních nehod.

2. Dopravní nehody a jejich znalectví

Za první dopravní prostředky využívané k přepravě osob, jejich zavazadel nebo nákladu lze považovat využívání povozu zapřažené za zvíře. Prvním dopravním prostředkem, kterým nebylo poháněné zvířetem, ale k pohonu využívalo lidské síly, bylo, jízdní kolo. Hlavním faktorem pomalého rozvoje těchto dopravních prostředků byla mizivá síť dopravních cest. První záznamy o dopravní cestě spojujeme s římskou říší. Po jejím úpadku se rozvoj dopravních cest v podstatě zastavil. [6]

Následující největší rozmach v oblasti stavby silnic byl způsoben válečnými konflikty, kdy se vojska potřebovala co nejrychleji přemístit z jednoho místa na druhé, a proto byla stavba silnic velmi podporována. Zásadní zlom v přepravě osob se stal roku 1886, kdy pánové Benz a Daimler sestrojili první vůz poháněný spalovacím motorem. Do této doby pro přepravu osob nebo věcí byly využívány hlavně železnice, lodě a zvířecí povozy.

Tento způsob přepravy začínal získávat na popularitě, především díky své rychlosti a pohodlí, které člověku nabízelo. Díky vysoké ceně byl tento dopravní prostředek určen jen lidem z nejvyšších vrstev společnosti. S odstupem času a postupným snižováním pořizovací ceny automobilu se zvyšovala jejich oblíbenost a s tím spojená dostupnost. Zvyšování hustoty dopravních prostředků a rychlosti, jež mohli dosahovat, mělo za následek vznik kolizních situací.

První zaznamenaná dopravní nehoda se stala 12. Února 1898 v Londýně. Důvodem této kolize bylo selhání brzd při rychlosti okolo 30 km/h. Po střetu se stromem musela být řidiči amputována končetina. Na následky zranění řidič zemřel. [14]

Vzrůstající počet vozidel a nižší kvalita silničních cest přímo úměrně ovlivnili počet dopravních nehod. Při těchto situacích nepochybně dochází k majetkovým ztrátám, v nejhorších případech i ztrátách na lidských životech. Vzhledem k tomu, že naprostá většina dopravních nehod byla, je a vždy bude způsobena bezohledným a neukázněným chováním řidičů, musela společnost viníky těchto prohřešků začít důsledněji trestat. Aby ale mohla hříšníka potrestat, musela rozhodnout, kdo dopravní nehodou vlastně spáchal a kdo se stal její obětí. U jednoduchých a jednoznačných dopravních nehod má tuto pravomoc dopravní policie, jenž se řídí metodikou vyšetřování dopravních nehod. Rozhodnutí o vině či nevině u složitě a ne jasně prokazatelné dopravní nehodě je

předmětem soudního líčení. A právě toto byl impuls pro vznik nového oboru, soudního znalectví, jehož hlavní náplní je shromažďování a předkládání důkazů a průběhu nehodového děje. [1]



Obr. 1: Dopravní nehoda v počátku automobilismu, [2]

2.1. Počátky akademické činnosti soudního znalectví [5],[9]

Od roku 1959 byla znalecká činnost vykonávána převážně soukromou sférou společnosti. V důsledku absence vzdělávacího institutu, který by plnohodnotně vychoval kvalifikované specialisty, docházelo k neprofesionálním a nejednoznačným závěrům. Hlavními důvody byla neznalost v oblasti mechaniky, fyziky a tvorby znaleckého posudku.

Analýza silničních nehod jako vědní disciplína byla založena panem Ing. Jiřím Smrčkem. Dne 1.4.1970 byl založen Ústav soudního inženýrství na VUT v Brně v čele se zakladatelem oboru. V dnešní době tento ústav pořádá kurzy technického znalectví, semináře a konference s tímto zaměřením. Dále se zabývá publikační, konzultační, znaleckou a pedagogickou činností.

Fakulta dopravní ČVUT byla z rozhodnutí ministerstva spravedlnosti ČR zapsána do druhého oddílu seznamu ústavů kvalifikovaných pro znaleckou činnost v oborech doprava a spoje dne 22.7.2002. Ústav soudního inženýrství v dopravě jakou součást Fakulty dopravní ČVUT v Praze zřídil děkan FD ČVUT dne 2.9.2005. Ústav byl zřízen při katedře mechaniky a materiálů FD ČVUT, vedoucím ústavu byl dne 30.9.2005 pověřen doc.Ing. Jindřich Šachl, CSc. Změnou organizačního řádu FD ČVUT dne 15.11.2006 byl ústav povýšen na úroveň ostatních ústavů fakulty a přejmenován na ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav soudního znalectví v dopravě.

2.2. Charakteristika současného stavu analýzy dopravních nehod v soudním inženýrství

V současné době lze technickou analýzu dopravních nehod provádět třemi základními stupni, jež se vyvinuly v průběhu soudního znalectví:

1. Stupeň

Tento typ analýzy využívá především popisný způsob s minimálním množstvím výpočtů. Využívá především profesní zkušenosti a osobní úsudek znalce. Jelikož nedochází k ověření závěrů výpočtem, je riziko chybných závěrů značné. Vzhledem k technickým možnostem dnešní doby jsou takto vypracované znalecké posudky v oboru soudního inženýrství technicky nepřijatelné. [1], [10]

2. Stupeň

Úzké provázání matematiky, chemie, geometrie, fyziky a mechaniky je využíváno pro stanovení přesnějšího popisu pohybu tělesa. Ten je popsán zjednodušeným matematickým modelem pro účely zkoumání. Při sestavování tohoto modelu se využívá tzv. zpětný výpočet, grafické metody a výsledky experimentálních měření, např.: crash testy, brzdné zkoušky atd. Pokud znalec dodržuje požadovaný postup tvorby znaleckého posudku je pravděpodobnost výskytu chybných výsledků malá. Nejčastěji jsou chyby zapříčiněny použitými grafickými metodami a experimentálně získanými výsledky. Na této úrovni je vypracovaný znalecký posudek technicky dostatečný, respektující současný stav v oboru soudního inženýrství. [1], [10]

3. Stupeň

Rozmach výpočetní techniky dal prostor pro vývoj programů pro analýzu dopravních nehod. Tyto programy s pomocí znalce vytvářejí a počítají plošné a prostorové matematické modely vozidel. V moderních počítačových programech existují podpůrné knihovny s technickými údaji vozidel potřebné pro sestavení modelu. S využitím specifických matematických postupů tyto programy umožňují přesně řešit rázy těles, pohyb vozidla před střetem i po něm. Závěry získané tímto způsobem jsou vzhledem

k použitým technologiím velmi srozumitelné a matematicky přesné, doplněné potřebnými grafickými materiály. Chybovost výsledků při správném používání programu a zadávání vstupních dat je minimální. [1], [10]

2.3. Dopravní nehoda

Dopravní nehoda je definována v ustanovení § 47 odst. 1 zákona č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. V tomto ustanovení je uvedeno, že dopravní nehoda je událost v provozu na pozemních komunikacích, například havárie nebo srážka, která se stala nebo alespoň byla započata na pozemní komunikaci a při níž došlo k usmrcení nebo zranění osoby nebo ke škodě na majetku v přímé souvislosti s provozem vozidla. [3]

Z hlediska počtu DN jsou nejčastěji zastoupeny silniční dopravní nehody. Jsou to nehody charakterizované jako silniční dopravní nehody nezamýšlené, s nepředvídanou událostí v silničním provozu na veřejných komunikacích, způsobené dopravními prostředky, které měly škodlivý následek na životech, zdraví osob nebo na majetku. [3]

Každá dopravní nehoda má čtyři základní znaky [1]:

1. Dopravní nehoda je neočekávaná, náhlá událost, u které však vzhledem k chování účastníka silničního provozu lze očekávat, že k ní dojde. Řidič jede na hranici možnosti svých i silničního vozidla a na náhlou změnu situace v silničním provozu již není schopen bezpečně zareagovat. Zda toto chování skončí nehodou či nikoliv není řidič schopen ovlivnit.
2. Silniční dopravní nehodou je kolize, k níž došlo na místech, kde je uzákoněné dodržování pravidel silničního provozu, tedy na místních a účelových komunikacích a na rychlostních silnicích a dálnicích. Za dopravní nehodu nelze považovat událost, ke které došlo na polních nebo lesních cestách, na zahradě, v uzavřených areálech nebo v továrních halách. Tyto kolizní situace neřeší orgány dopravní policie, ale jsou řešeny podle příslušných právních předpisů.

3. Při každé dopravní nehodě vznikají škody způsobené na životě nebo zdraví osoby, nebo na majetku. Škodou je v tomto případě myšlena reálná, přímá škoda vzniklá v souvislosti s nehodou. Pokud v souvislosti s dopravní nehodou vznikne obecné nebezpečí, potom toto jednání účastníka silničního provozu je trestným činem ohrožení. U tohoto jednání není nutnou podmínkou ke spáchání dopravní nehody vznik škody.
4. Posledním znakem dopravní nehody je přímá souvislost s provozem vozidla. K dopravní nehodě musí dojít v přímé souvislosti, pro kterou je vozidlo určeno, tedy s jízdou na pozemní komunikaci.

3. Využití počítačového softwaru k analýze dopravních nehod

Všeobecným úkolem všech simulačních programů je vyhodnotit vstupní informace a uživateli je seskupit a přetransformovat podle pevně daných pravidel do stylu uspořádání, které požaduje. Tyto programy tedy nevykonávají optimalizaci výpočtů, ale vždy poskytnou přesný výsledek na základě vložených dat. Softwary využívané k analýze dopravních nehod nám tedy neřeknou, zda se konkrétní nehoda stala popisovaným způsobem či nikoli, ale kvalifikované a odborně vzdělané osobě poskytnout velmi přesné výpočty z průběhu nehodového děje, které mu pomohou sestavit nehodový děj podložený jednoznačnými důkazy. [10]

Simulace a modelování je nerozdělitelně spojeno s užitím počítače. Prvotními vlastníky a uživateli prvních výpočetních stanic byla armáda a státní instituce působící v leteckém a vesmírném průmyslu. Tyto přístroje byly konstruovány čistě na vědecké a výpočetní činnosti, která měla poskytnout nové informace o chování těles v neznámém prostředí za experimentálních podmínek. V podstatě uživatelé simulovali jednoduché situace výpočtem velmi složitých rovnic, jež byly značně nepřesné a nespolehlivé. [6]

V této době nebyl problém s nedostatkem teoretických podkladů k uskutečnění výpočtu. Problém způsobovaly velmi složité výpočty, které stroje s malou výpočetní kapacitou nebyly schopné v adekvátním časovém horizontu vyřešit. S postupným využíváním a rozšiřováním počítačů do širší veřejnosti se zvyšují výpočetní schopnosti PC. Velmi příznivá cenová dostupnost dostatečně výkonných osobních počítačů dává možnost jejich využívání téměř každému.

S tímto rozmachem souvisí i rozšíření simulačních a modelačních softwarů širší veřejnosti.

3.1. Historie simulačních programů [12]

Jak již bylo zmíněno dříve, analýza dopravních nehod je založena na matematických a fyzikálních zákonitostech, které znalci využívají pro zjištění průběhu nehodového děje a stanovení co nejpřesnějších závěrů. Značná složitost výpočtů, zejména pak matematické modely pro výpočet rázu byly příčinou vzniku chyb při matematických výpočtech. Tyto chyby mohly zásadním způsobem ovlivnit průběh, potažmo konečný

výsledek celého rozboru dopravní nehody. Zpětný přepočítání a odhalení vzniku chyby byl pro znalce časově velice náročný a neefektivní. Tato skutečnost vedla znalce k neustálému objevování nových možností jak zjednodušit a zpřesnit matematické výpočty. Rozvoj výpočetní techniky a počítačových programů v devadesátých letech minulého století umožnil vznik a postupný vývoj programů, které budou znalci využívat jako podpůrný prostředek při své práci.

Vývojem těchto programů se začalo zabývat několik organizací převážně z německy hovořících zemí. Mezi tyto programy, které jsou odborné veřejnosti známy, patří například EVU-DOS, KOLIZE, WinKol, Cyborg Idea a mnohé další. Tyto programy položily velmi důležité základy pro vývoj dokonalejších simulačních softwarů pro analýzu dopravních nehod. Jelikož ale nebyly přeloženy do českého jazyka, nemohly být používány pro znalecké posudky v České republice. Proto jejich rozšíření mezi odbornou veřejnost je minimální, a dnes jsou spíše na ústupu. Výjimkou je program CARAT, který byl do češtiny přeložen, ale vývoj a uživatelský servis programů PC-Crash a Virtual Crash utlumuje používání tohoto programu. Počet uživatelů, dle prodaných licencí, kteří tento program aktivně využívají, jsou asi dvě desítky.

V současnosti je jeden z nejrozšířenějších simulačních programů program PC-Crash. Tento rakouský program v roce 1990 vytvořila a neustále vyvíjí společnost Dr. Steffan Datentechnik GmbH. Pro českou republiku je společnost DSD zastupována společností c4you, s.r.o., která provozuje web s veškerými informacemi a podporou tohoto programu. Od listopadu roku 2011 je k dispozici verze 9.1 s přepracovanou nástrojovou lištou, aktualizovanou databází vozidel a řadou zdokonalení, např. řešení nehod s pohybujícími se chodci a cyklisty. Přesto dosud neexistuje český manuál jak používat tento program. K dispozici je pouze jeho anglická, německá, italská a alespoň slovenská verze.

Virtual CRASH je asi doposud nejmladším uznávaným a velmi rozšířeným programem pro technickou analýzu nehodového děje. Tento produkt se na trhu objevil v rozmezí let 2004 a 2005. Program prochází neustálým vývojem. Nejprve se objevila první verze. Zde bylo možno provádět simulace pouze ve dvourozměrném prostředí (v rovině), také chyběly některé potřebné funkce pro spolehlivý výpočet. Následovala druhá verze programu doplněná o funkce, jako zpětná kinematika, zpětná akcelerace,

vkládání bitmapové grafiky jako pozadí v 3D zobrazení a řada dalších funkcí, které zrychlují práci s programem. Program se pro svoje komfortní uživatelské prostředí velmi rychle rozšiřuje a získává na oblibě. Stejně jako u předchozího programu ani k tomuto programu zatím neexistuje popis metod, který program využívá ani tištěný manuál v českém jazyce oficiálně vydaný výrobcem. V roce 2007 tyto dokumenty výrobce vydal jen v anglické podobě. Po jejich dokončení budou přeloženy do ostatních jazyků. Základní popis programu byl v České republice poprvé uveden na XII. mezinárodní konferenci znalců - analytiků dopravních nehod v červnu 2006 v Brně.

V současnosti jsou nejvyužívanější programy pro analýzu dopravních nehod v České republice Virtual CRASH verze 2.2 a PC- Crash verze 8.2.

3.2. PC softwary k analýze DP

3.2.1. PC- Crash

PC- Crash je software pro rekonstrukci a zpětnou simulaci dopravních nehod. Největší uplatnění tohoto programu je v oblasti soudního znalectví v oboru dopravních silničních nehod. Její rekonstrukce je za pomoci parametrů jako jsou 3D modely a reálné výpočty reakce těles velmi přesné. [8]

Oproti předchozím verzím je verze 9.0 (a výše) obohacena o kompletně přepracovanou pracovní plochu, nástrojové lišty, nové možnosti zadávání vstupních dat, plnou podporu kolečka myši a navíc je doplněna o výpočty s více tělesovým systémem. Zakomponování tohoto systému do výpočtů software výrazně zdokonalilo a posunulo blíže k realitě. Nově jsou také přidány simulace různých typů kloubů, pohybujících se chodců a cyklistů s přesnou kinetikou. Pokud je nutné do výpočtu zahrnout i pohyb posádky uvnitř vozidla je tato skutečnost doplněna o použití zádržného bezpečnostního systému. Můžeme zohlednit i skutečnost, že posádka tímto systémem nebyla připoutána. Další novinkou je možnost modelování vnitřního prostoru automobilu. Rozšířené možnosti a funkce jsou i při optimalizaci rázu. [8]

Databanka vozidel včetně jejich konstrukčních vlastností obsahuje více jak 1 000 modelů všech výrobců a značek automobilů. Knihovna uložených vozidel je neustále

aktualizována a do budoucna jsou připravovány modely posádek, pěších chodců a jezdců na motocyklech. [8]

Přiblížení výpočtu reality je docíleno využíváním matematických modelů. Nejčastější využívání tohoto softwaru je ve výpočtu základních kinematických modelů, přičemž není problém tyto modely rozšířit o další vstupní parametry a vytvořit tak mnohem složitější model. Veškeré výsledky výpočtu se zobrazují okamžitě, jak v číselné tak grafické podobě. Pro zpřesnění a usnadnění modelování okolního prostředí mají uživatelé možnost toto prostředí vytvořit v libovolném CA modelačním programu, naimportovat ho do PC-Crashe a dále s ním v tomto programu pracovat. [8],[6]

3.2.2. Virtual Crash [6],[10]

Tento program je co do funkce, ovládání a podoby získaných výpočtů velmi podobný softwaru PC-Crash. Výstup výsledku, stejně jako v PC-Crash, je možný formou 3D pohledu nebo videosekvence, nejrůznějších diagramů a tabulek ale také technických výkresů. Tento program je vhodný pro výpočty deformací vozidel, deformačních energií a modelování kinematických a dynamických situací.

Stejně jako vzhled a funkce jsou podobné u obou programů tak i princip analýzy dopravní nehody je postaven na rovnocenném matematickém základu. První krokem, který je třeba učinit a z velké míry ovlivňuje správnost výsledku, je co nejpřesnější určení pozice a úhlu natočení vozidel vůči sobě v okamžiku střetu a to ze způsobu jejich poškození. Poškození určují pohyb vozidel bezprostředně před samotným střetem. Kombinací zadaných hodnot, parametrů rázu (bod rázu, rovina rázu, deformace atd.) a rychlostí jednotlivých vozidel postupujeme od polohy vozidel při střetu do koncových poloh těchto vozidel, které zaujmuly po nehodě. Tomuto postupu výpočtu pohybu říkáme dopředný způsob. Pokud máme vyřešenou tuto fázi střetu, můžeme zpětným kinematickým výpočtem získat pohyb vozidla před střetem.

3.2.3. Carat [10]

Tento simulační software je určený k provádění předkolizních, kolizních a postkolizních dynamických dějů až osmi vozidel současně. Uživatel může vybrat povrch a tvar vozovky. V programu lze provádět simulace dynamiky jízdy i kolizních situací, podložené grafickým a číselným výstupem.

Čtvrtá generace CARAT-4 pracuje v trojrozměrném prostředí. Do prostoru je možno vkládat virtuální kamery pro sledování průběhu simulace. Práce je uživateli usnadněna integrovaným kreslícím modulem CAD, pro kreslení podkladu nebo vkládání výkresů ve formátu *.DXF. Do programu lze taktéž importovat bitmapovou grafiku.

Pro vložení vozidla je připravena rozsáhlá databáze různých vozidel seřazených podle značky. U konkrétního modelu lze dále upravovat podrobnější údaje (např. zatížení vozidla, údaje o pneumatikách apod.).

Při řešení střetů jsou využívány dva zpětné módy a dva dopředné módy. Přesnost výpočtu simulací v programu CARAT byla ověřena řadou skutečných crash-testů, jejichž výsledky byly porovnány s výsledky simulace.

3.2.4. Impulz expert

Práce s tímto programem je založena na hledání průniku ploch pro správné umístění impulzu. Zadání vstupních veličin je z určitého rozmezí hodnot a výsledné řešení musí splňovat všechny zadávané vstupní podmínky. Výhodou tohoto řešení je vymezení oblasti, v níž se ještě můžeme pohybovat s technicky přijatelnými veličinami pro správné řešení. Data, která jsme použili jako vstupní, můžeme použít i pro dopředné řešení a najít technicky akceptovatelné rozmezí. Výsledek průběhu takto vypočteného děje lze popsat diagramem dráha-čas, nebo diagramem dráha-rychlost. Diagramy jsou tímto programem automaticky zpracované a poskytnuté uživateli. Způsob zpětného řešení nehody poskytuje identické výsledky jako dopředný způsob řešení. [6]

4. Matematicko-fyzikální zákony při analýze dopravních nehod [4]

Jsou základním stavebním kamenem výpočtů vedoucí ke stanovení příčin a průběhů dopravních nehod.

4.1. Kinematické zákony

Kinematika je obor mechaniky, který popisuje pohyb tělesa, avšak nezabývá se příčinami pohybu.

Hmotným bodem zjednodušíme těleso na bodový objekt. Jeho rozměry jsou vzhledem ke vzdálenostem pohybu zanedbatelné, umísťuje se do těžiště původního objektu, avšak má hmotnost.

Každé těleso se může pohybovat:

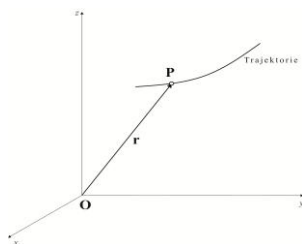
- a) Translačně (přesun)
- b) Rotačně (otáčení kolem osy)
- c) Kombinací obou

4.1.1. Trajektorie hmotného bodu

K jednoznačnému popsání pohybu tělesa musíme zavést „vztažné těleso“ které je spojeno se systémem souřadnicových os, nejčastěji souřadnicovou soustavou $Oxyz$. Umístění hmotného bodu je v takto uspořádané soustavě určeno polohovým vektorem,

$$r = xe_x + ye_y + ze_z, \quad (1)$$

e_x, e_y, e_z jsou jednotkové vektory, jejichž směr je shodný se směrem souřadnicových os, x, y, z jsou souřadnice.



Obr. 2: Trajektorie pohybu

Křivka, po níž se pohybuje hmotný bod, nazýváme „*trajektorie pohybu*“ (Obr. 2). Trajektorii pohybu určujeme množinou koncových bodů polohového vektoru $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$. V soustavě parametrických rovnic trajektorie

$$\begin{aligned}x &= x(t), \\y &= y(t), \\z &= z(t),\end{aligned}\tag{2}$$

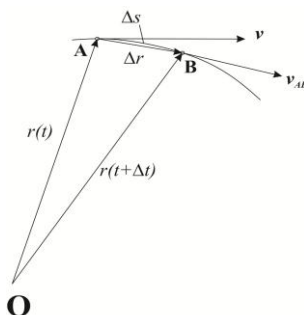
představuje parametr t časové určení.

4.1.2. Rychlost pohybu hmotného bodu

Rychlost je vektorová veličina, která charakterizuje, jak rychle se hmotný bod přemístí po trajektorii a zároveň i směr, jakým se v každém okamžiku pohybuje (Obr. 3). Za přírůstek času Δt se HB dostane z bodu A do bodu B, přitom urazí dráhu

$\Delta s = B - A$. Polohový vektor se v průběhu času tudíž vypočítá

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t).\tag{3}$$



Obr. 3: Rychlost hmotného bodu

a střední rychlost v_s dostaneme dosazením proměnných do

$$v_s = \frac{\Delta s}{\Delta t} \doteq \frac{|\Delta r|}{\Delta t} \quad (4)$$

Rychlost $v_{AB} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$ nevyjadřuje skutečnou rychlost HB v bodě B. Postupným přibližováním bodu B k bodu A se bude zmenšovat časový interval Δt a rychlost v_{AB} bude nabývat hodnot okamžité rychlosti v bodě A.

Okamžitou rychlost v [m/s] vypočítáme dosazením do:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

Vektor rychlosti je shodný se směrem pohybu HB a má směr tečny k trajektorii.

4.1.3. Zrychlení hmotného bodu

V průběhu času HB může měnit svou rychlost, velikostně, směrově, nebo kombinací obou. Pokud se tedy změní rychlost za jednotku času, říkáme, že se HB pohybuje se zrychlením a . Matematicky lze tento vztah zapsat ve tvaru:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v(t)}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r(t)}{dt^2} = a_x e_x + a_y e_y + a_z e_z, \quad (6)$$

kde a_x, a_y, a_z jsou souřadnice zrychlení.

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (7)$$

Tím dostaneme velikost zrychlení ve tvaru:

$$a = |a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (8)$$

Součinem velikosti rychlosti $v(t)$ a jednotkového vektoru $e_v(t)$ ve směru rychlosti vypočítáme vektor rychlosti $v(t)$.

$$a = \frac{d}{dt} [v(t)e_v(t)] = \frac{dv}{dt} e_v + v \frac{de_v}{dt}. \quad (9)$$

Vektor má vždy směr tečny k trajektorii, tudíž $e_v = e_t$ (Obr. 4). První část vztahu

zastupuje tečnou složku zrychlení:

$$a_t = \frac{dv}{dt} e_t. \quad (10)$$

Druhá část rovnice pro zrychlení zastupuje normálovou složku zrychlení, je rovna:

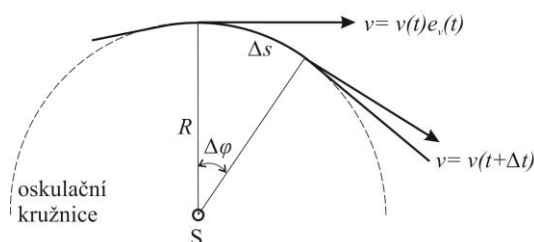
$$a_n = \frac{v^2}{R} e_n. \quad (11)$$

Celkové zrychlení \mathbf{a} je dáno vektorovým součtem tečného (časová změna velikosti vektoru rychlosti) a normálového zrychlení (časová změna směru vektoru rychlosti):

$$\mathbf{a} = a_t + a_n = \frac{dv}{dt} e_t + \frac{v^2}{R} e_n. \quad (12)$$

Velikost celkového zrychlení vypočítáme ze vztahu:

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} \quad [m \cdot s^{-2}]. \quad (13)$$



Obr. 4: Směr vektoru rychlosti

4.2. Zákony dynamiky

4.2.1. Newtonovy zákony

Dynamika se zabývá příčinami, které pohyb tělesa vyvolávají a následně i ovlivňují. Zabývá se souvislostmi mezi pohybem a silami, jež pohyb způsobují. Statika je součástí dynamiky a zabývá se podmínkami rovnováhy sil. Mechanika pohybu tělesa vychází ze tří základních zákonů, říká se jim **Newtonovy pohybové zákony**.

4.2.1.1. První Newtonův pohybový zákon

Každé těleso je v klidu, nebo rovnoměrném přímočarém pohybu do doby, než působením vnějších sil je nuceno tento stav změnit. Pokud předpokládáme dvě soustavy souřadnic, které se vůči sobě pohybují se zrychlením, můžeme tento zákon nazvat **zákonem setrvačnosti**. Předpokládáme, že těleso umístěné v jedné z těchto souřadnic je vzhledem k této soustavě v klidu, pak vzhledem k druhé z těchto soustav je těleso ve zrychleném pohybu. První Newtonův zákon tedy nemůže platit v obou soustavách současně. Soustava, ve které je zákon dodržen, se nazývá inerciální soustava. Soustavu, v níž tento zákon neplatí, nazýváme neinerciální soustavou.

Působení vnější síly na těleso vyvolá změnu jeho rychlosti, těleso je nuceno se pohybovat se zrychlením oproti původnímu stavu. Těleso klade odpor proti této změně, který je přímo úměrný hmotnosti tělesa. Tuto vlastnost nazýváme setrvačnost tělesa.

4.2.1.2. Druhý Newtonův pohybový zákon

Druhý Newtonův zákon je nazýván **zákonem síly**, nebo také **zákonem pohybu**. Jednotkou síly je newton, označován **N**.

Součin hmotnosti tělesa a jeho zrychlení je rovno síle působící na těleso. Matematicky je tento zákon vyjádřen vztahem:

$$F = m \cdot a \quad (14)$$

Pokud je hmotnost tělesa nezávislá na jeho rychlosti, můžeme předchozí vztah zapsat ve tvaru:

$$F = \frac{d}{dt}(m \cdot v) \quad (15)$$

Hybnost tělesa získáme součinem jeho hmotnosti a rychlosti tělesa, tuto veličinu označujeme **p** a její jednotkou je $kg \cdot m \cdot s^{-1}$.

$$p = m \cdot v \quad (16)$$

Dosažením této veličiny do druhého Newtonova zákona dostaneme tvar:

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (17)$$

4.2.1.3. Třetí Newtonův pohybový zákon

Tento zákon je pro svůj charakter nazýván **zákonem akce a reakce**. Každé působení jednoho tělesa na druhé vyvolává vzájemné působení těles. Síly, kterými na sebe vzájemně působí obě tělesa, jsou stejně velké, ale jejich směr je opačný. Působením jednoho tělesa na druhé silou \mathbf{F}_{12} , působí druhé těleso na první silou $-\mathbf{F}_{21}$.

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad (18)$$

Pokud máme soustavu několika vzájemně působících objektů, na které nepůsobí žádná vnější síla, říkáme, že tato **soustava** je uzavřená, **izolovaná**. Uvnitř této izolované soustavy dochází k neustálému silovému působení těles, těmto silám říkáme **vnitřní síly**.

Tvoří-li tuto soustavu dvě tělesa, pak zákon akce a reakce vypadá takto:

$$F_{12} + F_{21} = \frac{dp_1}{dt} + \frac{dp_2}{dt} = \frac{d}{dt}(p_1 + p_2) = 0, \quad (19)$$

Toto je i zároveň důkaz **zákona zachování hybnosti**: Celková hybnost izolované soustavy je konstantní.

4.2.2. Síly

Současná fyzika se dělí do čtyř typů vzájemného silového působení:

- a) Gravitační
- b) Elektromagnetické
- c) Jaderné (vazbení částic v atomovém jádře)
- d) Slabé (uplatňující se u radioaktivního rozpadu)

Do klasické mechaniky řadíme pouze síly gravitační a elektromagnetické. Tyto síly jsou svým principem základními silami, není možné je vyjádřit jednodušší formou sil.

Zákony základních sil jsou jednoduché a jejich vyjádření je přesné a jednoznačné.

4.2.2.1. Pružné síly

Vystavíme-li těleso zatížení vnější silou, začne měnit svůj tvar a rozměry. Po ukončení působení síly se těleso vrací do původního tvaru, této vlastnosti říkáme **pružná deformace**. Při zatěžování tělesa silou F_{vn} těleso změní svou délku o Δl . Pokud bude platit

$$F_{vn} = k \cdot \Delta l, \quad (20)$$

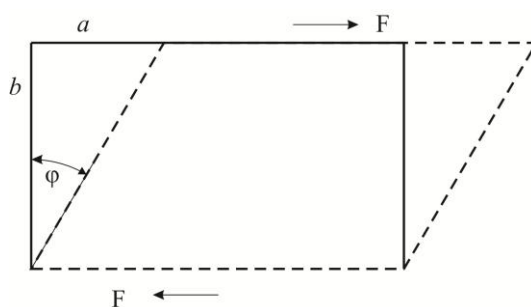
kde k vyjadřuje tuhost pružiny, jedná se o deformaci pružnou, její jednotkou je $[N \cdot m^{-1}]$. Působení síly je rovnoměrně rozloženo do celého průřezu S . Síla působící na jednotkový průřez vyjadřuje napětí, $\sigma = \frac{F}{S}$. Jednotkou této veličiny je Pascal $[Pa]$. Velikost pružné síly není určena absolutním prodloužením Δl , ale relativním prodloužením $\Delta l/l_0$. Pokud deformační síla bude působit ve směru normály k průřezu, pak normálové napětí σ vypočítáme dosazením do:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (21)$$

kde E je Youngův modul pružnosti a charakterizuje pružné vlastnosti materiálu. Jestliže síla bude působit podél průřezu, pak hovoříme o tečném napětí

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (22)$$

Působením tohoto druhu zatížení se těleso začne deformovat tak, že jedna hrana se vůči druhé posune (Obr. 5).



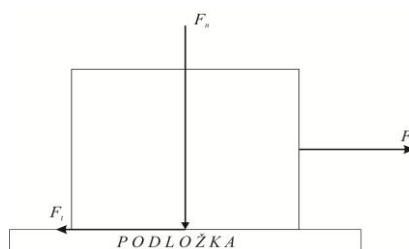
Obr. 5: Deformace tělesa silou F

4.2.2.2. Třecí síly

Jsou síly, které brání vzájemnému pohybu dvou těles a mají směr tečny pohybu těles. Pokud tření vzniká mezi dvěma pohybujícími se tělesy, označujeme to jako tření vnější. Toto tření omezuje pohyb částic uvnitř tělesa. K vnitřnímu tření dochází při pohybu jednotlivých částí uvnitř spjitého prostředí (kapalina, plyn). Tření mezi povrchy dvou tuhých těles bez mezivrstvy je tření suché, např. tření valivé a tření smykem. Pokud dochází k tomuto jevu mezi tuhým tělesem a tekutinou, tření se nazývá vazké (viskózní).

Smykové tření

Síla tření F_t zabraňuje vzniku vzájemnému pohybu povrchů dvou těles. Na Obr. 6 působí horní těleso na dolní silou F_n . Síla F uvede těleso do pohybu, když dosáhne hodnoty F_0 . Pokud je velikost vnější síly v intervalu $0 < F < F_0$, zůstává těleso v klidu, protože síla F je v rovnováze se stejně velkou, ale opačně orientovanou silou tření v klidu. Těleso se začne pohybovat zrychleně, když síla F stejně velká jako F_0 .



Obr. 6: Smykové tření

Součinitel smykového tření

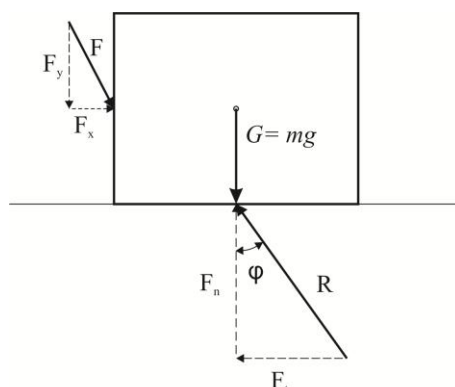
Síla tření F_t je přímo úměrná tlakové síle F_n jež působí na druhé těleso. Úměrnost závislosti mezi těmito silami vyjadřuje součinitel smykového tření. Je to bezrozměrné číslo, které závisí na fyzikálních vlastnostech přilehlých ploch. Součinitel statického smykového tření μ_0 je definován vztahem:

$$F_0 = \mu_0 \cdot F_n. \quad (23)$$

Součinitel kinematického smykového tření μ_k je definován vztahem:

$$F_k = \mu_k \cdot F_n. \quad (24)$$

Úhel tření



Obr. 7: Úhel tření

Těleso o hmotnosti m ležící na vodorovné podložce je zatíženo silou F . Je to síla, která se snaží uvést těleso do pohybu. Síla F je výsledná síla působení sil F_x, F_y .

V místě kontaktu podložky s tělesem působí síla R , která snižuje účinky síly F na těleso. R je výslednou silou působení složek F_t, F_n , silou normálovou a silou třecí.

Pro uvedení tělesa do pohybu musí být síla F_x alespoň stejně velká jako síla F_t . Velikost úhlu mezi silou R a silou F_n , nazývaný jako úhel statického tření, vypočítáme ze vztahu:

$$\tan \varphi_0 = \mu_0 \quad (25)$$

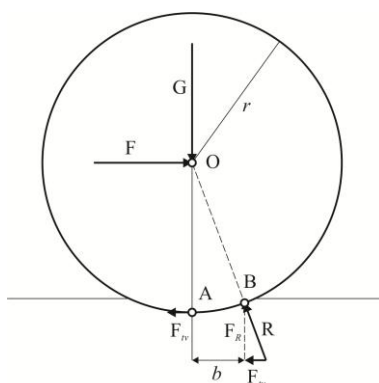
Tato závislost platí pro případ, kdy je těleso v klidu. Při pohybu tělesa se změní třecí síla F_t na F_k a φ se nazývá úhel kinematického tření. Jeho velikost dostaneme dosazením do:

$$\tan \varphi_k = \mu_k \quad (26)$$

Pokud bude těleso umístěné na šikmé ploše, zůstává v klidu do doby, kdy pohybová složka síly nebude minimálně stejně velká jako síla statického tření:

$$G \cdot \sin \varphi_0 = \mu_0 \cdot G \cdot \cos \varphi_0 \quad (27)$$

Valivý odpor



Obr. 8: Valivý odpor

Při pohybu rotačního tělesa valením po rovné podložce dochází ke vzniku sil bránící tělesu v pohybu. Vzájemným kontaktem dochází k deformaci dotýkajících se ploch. Tomuto jevu říkáme valivé tření. Po překonání třecí síly F_{tv} silou F se těleso začne pohybovat. Vlivem rotačního pohybu narůstají na náběžné hraně síly bránící pohybu tělesa. Působíště výsledné síly R se oproti tělesu v klidu posune o vzdálenost b do bodu B . Pokud jsou zachovány podmínky rovnováhy, součet všech sil a momentů působících na těleso je roven nule.

$$\uparrow : F_R - G = 0$$

$$\rightarrow : F - F_{tv} = 0 \quad (28)$$

$$\curvearrowright : r \cdot F - b \cdot F_R = 0$$

Můžeme vyjádřit vztah:

$$F_{tv} = \mu_v \cdot G \quad (29)$$

Kde μ_v označujeme jako součinitel valivého odporu a jeho přibližnou hodnotu dostaneme podílem vzdálenosti b a poloměrem rotujícího tělesa.

Odpor prostředí

Při pohybu tělesa vznikají síly působící proti pohybu. Velikost této síly je ovlivněna způsobem obtékání tělesa okolním prostředím. Při malých rychlostech je proudění laminární, se zvyšující se rychlostí se postupně mění na turbulentní.

Jestliže rychlost proudění nepřevyšuje rychlost šíření zvuku v tomto prostředí, je odpor působící proti pohybu určen Newtonovým zákonem. Pro matematické vyjádření se velmi často využívá vztahu:

$$F_r = \frac{1}{2} c_r \rho S v^2, \quad (30)$$

ρ je hustota prostředí (vzduch, tekutina, atd.), S je účinný průřez tělesa, c_r je součinitelem odporu. V následující tabulce jsou přibližné hodnoty součinitele odporu pro některé tvary těles.

koule	0,37
dutá polokoule (vypuklá)	0,41
dutá polokoule (dutá)	1,33
kapkovitý tvar tělesa	0,08
kruhová deska	1,12

Tabulka 1: Hodnoty součinitele odporu

4.2.2.3. Setrvačné síly

Zákon setrvačnosti, první Newtonův zákon, nelze uplatnit při pohybu v libovolné soustavě souřadnic. Soustava, ve které tento zákon lze aplikovat se nazývá inerciální soustava.

Neinerciální soustavou tedy naopak rozumíme soustavu, která se vzhledem k inerciální soustavě pohybuje jiným pohybem než rovnoměrným přímočarým. V této soustavě nelze uplatnit samostatně vztah $F=ma$. Aby tedy tato rovnost platila i v neinerciální soustavě souřadnic, je nutno k ní ještě připočíst tzv. setrvačné síly.

Předpokládejme pohyb soustavy S' vůči soustavě S rychlostí V . Její směr a velikost se v průběhu pohybu může měnit. Rovnice závislosti polohových vektorů hmotného bodu

v obou soustavách má tvar:

$$r(t) = R(t) + r'(t). \quad (31)$$

Derivací tohoto vztahu časem získáme transformační rovnici rychlosti pohybu:

$$v = V + v', \quad (32)$$

kde v' je rychlost hmotného bodu v soustavě S' .

4.2.3. Zákony zachování

V izolovaných soustavách známe funkce souřadnic a rychlostí hmotných bodů, které nemění své hodnoty v průběhu pohybu, nazýváme je integrálem pohybu. Tento integrál celé soustavy částic je stejně velký jako součet integrálu pohybu jednotlivých částic, jež tvoří soustavu. Tuto soustavu tvoří moment hybnosti, energie a hybnost. Zákony zachování těchto energií nám umožňují získat potřebné informace o chování mechanických soustav, i když síly mezi jednotlivými částicemi neznáme.

4.2.3.1. Zákon zachování mechanické energie

❖ Kinetická energie

Pokud budeme uvažovat soustavu o jediné částici, její pohyb vypočítáme dosazením do vztahu:

$$F = \frac{dv}{dt} m, \quad (33)$$

dostaneme výslednici sil F působících na soustavu (částici). Přemístěním částice za čas dt , dostaneme rovnici kinetické energie:

$$T = \frac{mv^2}{2}. \quad (34)$$

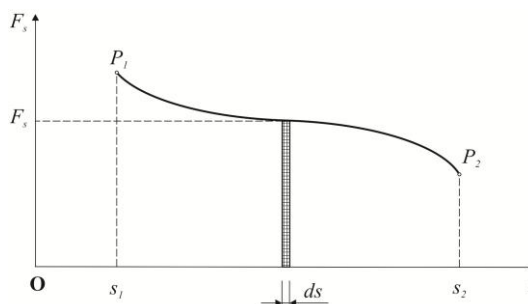
V izolované soustavě bude tato veličina konstantní. Působení síly F na částici vyvolá zvýšení kinetické energie, která je rovna práci.

❖ Výkon a práce

Pokud částice bude ovlivněna silovým působením síly F , bude zvýšení kinetické energie rovno práci na této částici vykonané. Jednotkou práce je joule (J). Velikost elementární práce je možné vypočítat dosazením do vzorce:

$$dA = F ds = F_s ds = F \cos \alpha ds, \quad (35)$$

F_s představuje průmět síly do směru pohybu, α je úhel, který je sevřen mezi směrem síly a směrem pohybu částice. Tato práce je rovna obsahu vyšrafované plochy na Obr. 9. Obsah plochy ohraničené křivkou F_s , osou s a vertikálami procházející body s_1 a s_2 odpovídá celkové práci.



Obr. 9: Závislost průmětu síly na poloze

Pokud budeme uvažovat skutečnost, že velikost $ds = v dt$ pak vztah pro výpočet elementární práce upravíme na:

$$dA = F v dt. \quad (36)$$

Pro výpočet práce vykonané mezi dobou t_1 a t_2 tento vztah dále upravíme na tvar:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} F v dt. \quad (37)$$

Práci vykonanou za jednotku času označujeme jako výkon. Definujeme ho vztahem:

$$P = \frac{dA}{dt}, \quad (38)$$

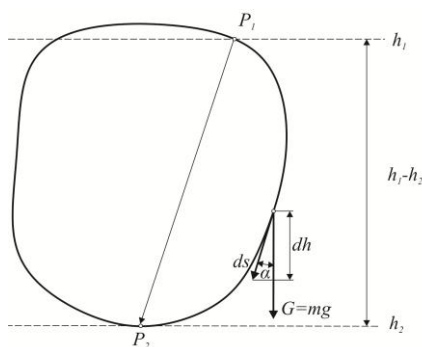
kde dA reprezentuje vykonanou práci a dt je doba práce. Tento vztah lze zjednodušit na skalární součin vektoru rychlosti a síly. Jednotku výkonu nazýváme watt a značíme ji (W).

❖ Konzervativní síly

Pokud na částici uloženou v prostoru působí ostatní částice nebo tělesa, pak říkáme, že je tato částice v silovém poli. Toto silové pole působí na všechna tělesa v okolí Země, jsou v tíhovém poli. Tělesa jsou ke středu Země přitahována tíhovou silou G . Pro přemístění částic o hmotnosti m z bodu P_1 do bodu P_2 je potřeba vykonat práci. Velikost této práce je možno spočítat dle:

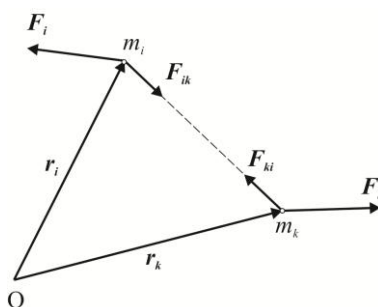
$$\begin{aligned} A_{12} &= \int_{P_1}^{P_2} G ds = \int_{P_1}^{P_2} mg ds = mg \int_{P_1}^{P_2} \cos \alpha ds \\ &= mg \int_{P_1}^{P_2} (-dh) = mg(h_1 - h_2). \end{aligned} \quad (39)$$

Tato práce tedy závisí pouze na počáteční a koncové poloze částice, nikoli na trajektorii, po které se pohybovala.



Obr. 10: Práce vykonaná při přemístění částice

4.2.3.2. Zákon zachování hybnosti



Obr. 11: Vzájemné působení dvou částic

Představme si soustavu s N počtem částic, kde všechny tyto částice na sebe vzájemně působí vnitřními silami. Spolu s vnitřními silami působí na každou částici soustavy i síly vnější. Pro jednoduchost uvažujme pouze jednu dvojici částic, Obr. 11. Síly F_{ik} a F_{ki} jsou vnitřní, mají stejnou velikost, ale jsou opačně orientované. Síly F_i a F_k jsou síly vnější. Pohybovou rovnici pro jednu částici soustavy lze vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{dp_i}{dt} = \sum_{k=1, k \neq i}^N F_{ik} + F_i. \quad (40)$$

Pokud sečteme N pohybových rovnic jednotlivých částic, dojdeme k závěru:

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N p_i \right) = \sum_{i=1}^N F_i. \quad (41)$$

Jelikož hybnost celé soustavy je rovna součtu hybností všech jejích částic dostaneme:

$$\frac{dp}{dt} = \sum_{i=1}^N F_i. \quad (42)$$

Pokud tedy na izolovanou soustavu nepůsobí vnější síly, je hybnost této soustavy hmotných bodů konstantní. Tento zákon nazýváme zákon zachování hybnosti. Derivací předchozího vztahu dostaneme:

$$v_T = \frac{dr_T}{dt} = \frac{p}{m}, \quad (43)$$

kde v_T označuje rychlost těžiště, r_T je polohový vektor těžiště. Odtud vyplývá, že hybnost soustavy vypočítáme součinem její hmotnosti a rychlosti těžiště soustavy.

4.3. Mechanika tuhého tělesa

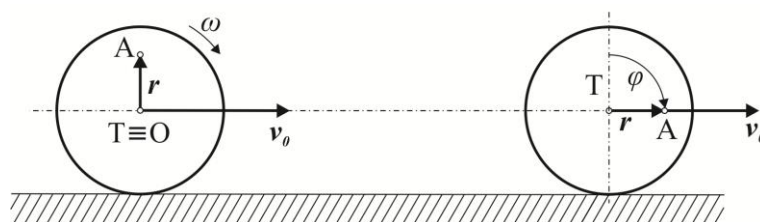
Tuhým tělesem rozumíme idealizovaný předmět, jehož částice nemění svou vzdálenost a působením vnějších sil nemění svůj tvar ani rozměry oproti skutečnosti. Tyto deformace vzhledem k povaze našich výpočtů můžeme zanedbat.

4.3.1. Pohyb tuhého tělesa

Pohyb každého tuhého tělesa se skládá ze dvou složek. Těleso by vykonávalo posuvný pohyb a pohyb rotační. Tímto způsobem se například pohybuje válec při valení po rovinné ploše. Analogicky, lze tedy odvodit vztah pro výpočet rychlosti konkrétního bodu tohoto válce:

$$v = v_0 + \omega \times r, \quad (44)$$

v_0 je rychlost posuvného pohybu, ω je úhlová rychlost rotace válce.



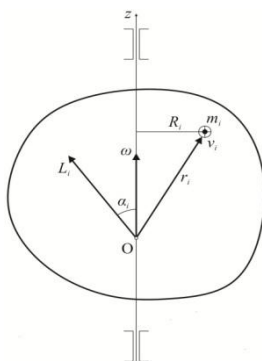
Obr. 12: Valení po rovinné podložce

4.3.2. Pohyb těžiště tuhého tělesa

Těleso uvažujeme jako soubor jednotlivých částí, na něž mohou působit síly vnitřní a vnější. Součet všech vnitřních sil působící na těleso je roven nule. Tudíž se těžiště tělesa pohybuje identicky jako hmotný střed o hmotnosti tělesa působením vnějších sil.

4.3.3. Rotace tělesa kolem pevné osy

Rotací libovolného tělesa kolem osy otáčení vznikají vnější síly působící na těleso. Součet všech vnějších sil označujeme jako $\sum M_{vn}$. Výpočet této veličiny provedeme pomocí momentu hybnosti tělesa značenou jako L . Vztahy 45, 46, 47 vyjadřují rovnice pro výpočet těchto veličin.



Obr. 13: Moment hybnosti vybrané části

$$\text{Součet vnějších sil:} \quad \sum M_{vn} = \frac{dL}{dt} \quad (45)$$

$$\text{Moment hybnosti částice:} \quad L_i = m_i r_i \omega R_i \quad (46)$$

$$\text{Moment hybnosti k ose:} \quad L_z = \sum_i Z_{zi} = \left(\sum_i m_i R_i^2 \right) \omega_z \quad (47)$$

Zavedeme veličinu nazývanou moment setrvačnosti tělesa k ose otáčení značenou jako I , jejíž hodnota je rovna:

$$I = \sum_i m_i R_i^2. \quad (48)$$

Pak dosazením vztahu 48 do rovnice 47 můžeme moment hybnosti zapsat ve tvaru:

$$L_z = I\omega_z. \quad (49)$$

Pokud bude rotující těleso homogenní a symetrické k ose otáčení dostaneme vztah:

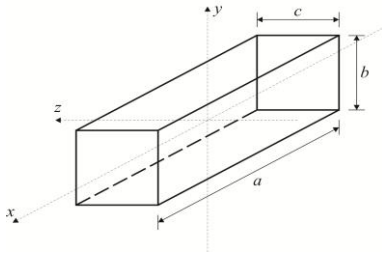
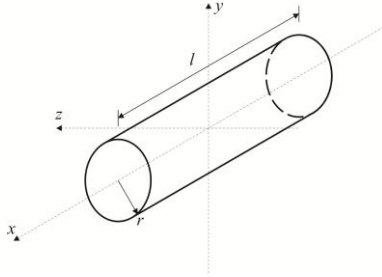
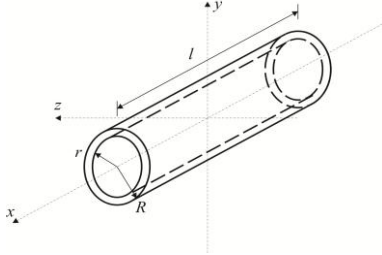
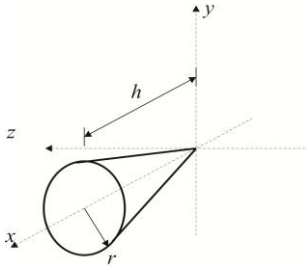
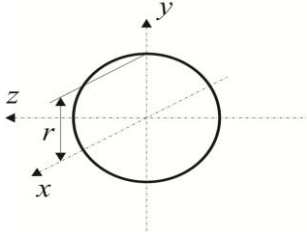
$$L = I\omega. \quad (50)$$

4.3.4. Moment setrvačnosti

Je veličina, která vyjadřuje velikost setrvačnosti tělesa při rotačním pohybu. Při tomto pohybu tělesa (soustavy hmotných bodů) kolem nehybné osy je trajektorií jejich pohybu kružnice se středem na ose otáčení. Velikost momentu setrvačnosti závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose. Rozložení hmoty je charakterizováno hustotou tělesa. Pro libovolnou část z objemu ΔV_i nehomogenního tělesa je moment setrvačnosti vyjádřen vztahem:

$$I = \sum_i \rho_i R_i^2 \Delta V_i. \quad (51)$$

Momenty setrvačnosti nejčastěji se objevujících těles jsou uvedeny v následující tabulce:

<p>Kvádr:</p> 	$I_x = \frac{1}{12}m(b^2+c^2)$ $I_y = \frac{1}{12}m(a^2+c^2)$ $I_z = \frac{1}{12}m(a^2+b^2)$ <p>Pokud $c \ll a$:</p> $I_y = \frac{1}{12}ma^2; I_A = \frac{1}{3}ma^2.$
<p>Válec:</p> 	$I_x = \frac{1}{2}mr^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{12}m(3r^2+l^2)$ <p>Pokud $r \ll l$:</p> $I_y = I_z = \frac{1}{12}ml^2$
<p>Dutý válec:</p> 	$I_x = \frac{1}{2}m(R^2 + r^2)$ $I_y = I_z = \frac{1}{4}m\left(R^2 + r^2 + \frac{1}{3}l^2\right)$
<p>Kužel:</p> 	$I_x = \frac{3}{10}mr^2$ $I_y = I_z = \frac{3}{5}m\left(\frac{1}{4}r^2 + h^2\right)$
<p>Koule:</p> 	$I_x = I_y = I_z = \frac{2}{5}mr^2$

Tabulka 2: Momenty setrvačnosti pravidelných těles

4.4. Ráz těles

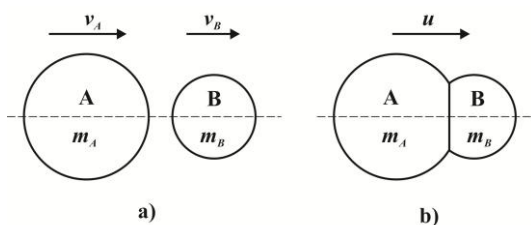
Pro správné určení rázu je nutné znát relativní rychlost obou těles a v okamžiku střetu těles určit v bodě dotyku rovinu tečnou k oběma tělesům. Normálou rázu označujeme přímkou kolmou k tečné rovině a procházejícím bodem dotyku obou těles. Při rázu dvou těles dochází k jejich deformacím a vzrůstu potenciální energie vznikem nárazových sil.

Při střetu dvou pružných těles se tělesa mají tendenci vrátit do původního stavu. Dochází k přeměně potenciální energie na kinetickou, která je využita na vzájemné oddálení těles po střetu. Pokud dojde ke vzájemnému střetu dvou nedokonale pružných těles, část potenciální energie se přemění na kinetickou energii a druhá část je nevratně spotřebovaná na trvalou deformaci těles. Koeficientem restituce k , vyjadřujeme poměr takto ztracené energie k celkové potenciální energii před rázem.

Jestliže těžiště obou těles leží právě na normále v bodě dotyku, pak mluvíme o centrálním rázu. Síly způsobující náraz těles mají vliv pouze na posuvný pohyb, nikoli na rotační. Pokud nárazové síly přivedou těleso do rotace a normála neprochází těžišti těles, jedná se o ráz excentrický.

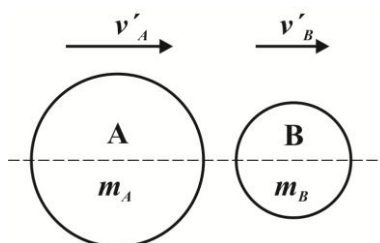
4.4.1. Příčný centrální ráz

K jednoduššímu matematickému popisu tohoto stavu je vhodné celý průběh pomyslně rozdělit na dvě části. Uvažme tělesa A, B o hmotnostech m_a a m_b . Těžiště těchto těles se pohybují stejným směrem a jsou stejně orientované rychlostmi v_a a v_b .



Obr. 14: Proces deformace těles

- I. Fáze stlačení (deformace, Obr. 14) : Pokud bude $v_a > v_b$ dojde ke střetu těles. Obě tělesa se zdeformují a jejich rychlosti se budou zmenšovat do doby, než se vyrovnají. Dále se budou tělesa pohybovat stejnou rychlostí u .
- II. Fáze vzpružení (restituce, Obr. 14b) : Do této fáze se mohou dostat jen tělesa pružná. Energie nahromaděná v tělese vlivem deformace se postupně přeměňuje na energii kinetickou obou těles. Po skončení přeměny na kinetickou energii se tělesa pohybují rychlostmi v'_A a v'_B .



Obr. 15: Proces restituce těles

Zákon o zachování hybnosti soustavy vypočítáme vztahem ve tvaru:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B. \quad (52)$$

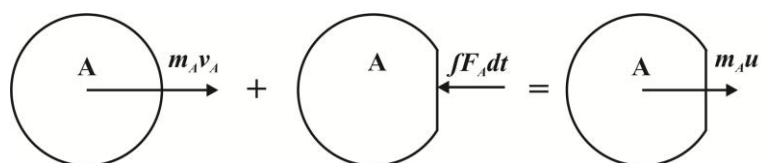
Pro jednotlivé složky, z nichž je pohyb soustavy složen, je zákon zachování hybnosti zapsán ve tvaru:

$$\text{I. Fáze} \quad m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B)u \quad (53)$$

$$\text{II. Fáze} \quad (m_A + m_B)u = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (54)$$

Jelikož při deformaci, působí těleso B na těleso A silou F_A , platí při tomto silovém působení vztah:

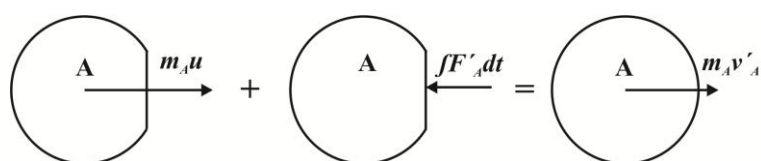
$$m_A v_A - \int F_A dt = m_A u. \quad (55)$$



Obr. 16: Fáze deformace

Obdobnou silou F'_A také působí těleso B na těleso A pokud se soustava nachází ve stavu restituce:

$$m_A u - \int F'_A dt = m_A v'_A \quad (56)$$



Obr. 17: Fáze restituce

Stejným způsobem můžeme sestavit rovnice, které budou vyjadřovat změnu hybnosti tělesa B vlivem působení síly při střetu s tělesem A. Výsledné rovnice pro obě fáze pohybu jsou přehledně zobrazeny zde:

I. Fáze (deformace):

$$I_A = \int F_A dt = m_A (v_A - u) \quad (57)$$

$$I_B = \int F_B dt = m_B (u - v_B) \quad (58)$$

II. Fáze (restituce):

$$I'_A = \int F'_A dt = m_A (u - v'_A) \quad (59)$$

$$I'_B = \int F'_B dt = m_B (v'_B - u) \quad (60)$$

Jelikož síly při restituci (vzpružování) F' jsou obecně menší, než síly při deformaci (stlačování) F platí vztah $\frac{F'}{F} < 1$. Tento podíl definuje součinitel restituce (vzpružování). Jeho hodnotu vypočítáme dosazením do následující rovnice:

$$k = \frac{u - v'_A}{v_A - u} = \frac{v'_B - u}{u - v_B} = \frac{(u - v'_A) + (v'_B - u)}{(v_A - u) + (u + v_B)} = \frac{v'_B - v'_A}{v_A - v_B} \quad (61)$$

Podle hodnot, které tento součinitel může nabývat, jednoznačně určíme o jaký typ rázu se jedná. Pokud:

- $k = 0$ jedná se o ráz zcela nepružný
- $k = 1$ říkáme, že ráz je dokonale pružný
- $0 < k < 1$ v těchto mezích je ráz obecný (nepružný).

Vyjádřením předchozích vztahů v jedné rovnici dostaneme vztah pro výpočet kinetické energie po rázu dvou těles ve tvaru:

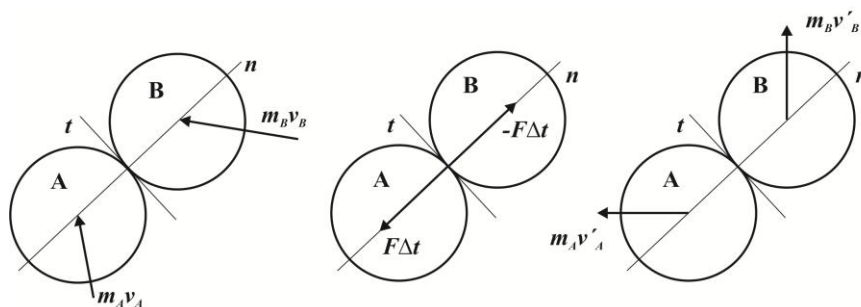
$$\frac{1}{2} m_A v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B'^2 = \frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 - \left[(1 - k^2) \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (v_A - v_B)^2 \right] \quad (62)$$

kde výraz ohraničený hranatou závorkou reprezentuje energii přeměněnou v teplo důsledkem nedokonale pružného rázu. Tato energie byla touto přeměnou ztracena.

4.4.2. Šikmý centrální ráz

Při vzájemném střetu dvou těles dojde k rázu mezi těmito tělesy, avšak vektory rychlostí v_A a v_B nemají směr normály rázu n jako v případě přímého rázu. Dochází tedy k šikmému centrálnímu rázu. U tohoto typu rázu dochází k deformacím dvojího typu závislé na struktuře povrchu stykových ploch.

- a) Hladké tělesa: Při styku těchto těles dochází ke vzniku nárazových sil, které působí ve směru normály a způsobují deformaci v blízkém okolí dotyku.
- b) Drsná tělesa: Zde navíc vznikají ještě tečné nárazové síly směřující podél tečny t (Obr. 18), způsobující tečné deformace v místě dotyku.



Obr. 18: Šikmý ráz dvou hladkých koulí

Pro jednoduchost matematických operací a dostatečnou přesnost budeme uvažovat styk dvou hladkých těles. Pohyb lichoběžníku A je omezen pouze na vodorovnou rovinu. Koule B se může pohybovat volně v rovině nákresny (viz. Obr.18). Pro tuto situaci je dobré si uvědomit tři základní vlastnosti, které budeme využívat při odvození jednotlivých vztahů.

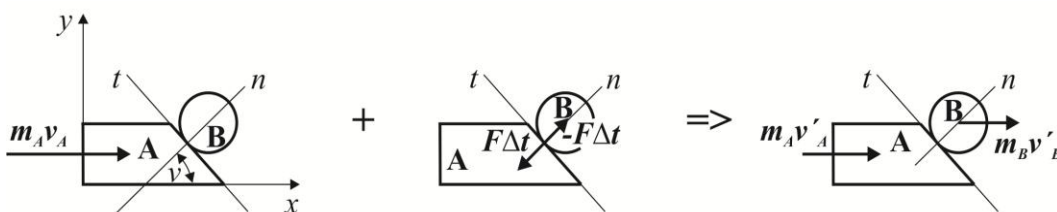
- 1) Tečné složky hybností obou těles zůstávají konstantní.
- 2) Rázem dvou těles se normálové složky hybnosti soustavy nemění.
- 3) Normálová složka relativní rychlosti dvou těles po skončení rázu je dána součinem záporné normálové složky relativní rychlosti před rázem a koeficientem restituce.

Tyto vlastnosti vyjádřené matematicky jsou zobrazené v následující tabulce:

$$\text{ad 1)} \quad (v_A)_t = (v'_A)_t, (v_B)_t = (v'_B)_t \quad (63)$$

$$\text{ad 2)} \quad m_A (v_A)_n + m_B (v_B)_n = m_A (v'_A)_n + m_B (v'_B)_n \quad (64)$$

$$\text{ad 3)} \quad (v'_B)_n - (v'_A)_n = k[(v_A)_n - (v_B)_n] \quad (65)$$



Obr. 19: Šikmý ráz dvou těles s omezeným pohybem

Těmito třemi vztahy je popsán průběh rázu. Po proběhnutí rázu dojde ke změně velikosti rychlosti v'_A tělesa A, velikosti a směru rychlosti v'_B tělesa B. Pro odvození předchozích vztahů (rovnice 56, 57, 58) jsme využili vztahů mezi změnou hybnosti a impulzem lichoběžníku A.

$$\text{Fáze deformace:} \quad m_A v - \left(\int F_A dt \right) \cos \vartheta = m_A u, \quad (66)$$

kde integrál zastupuje impulz I_I během deformace, u je rychlost pohybu tělesa A před koncem deformace a začátkem restituce.

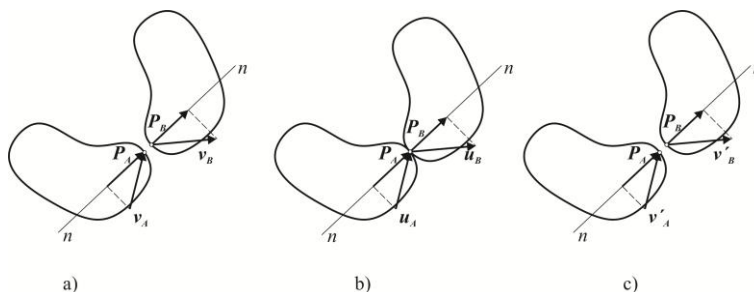
$$\text{Fáze restituce:} \quad m_A v - \left(\int F'_A dt \right) \cos \vartheta = m_A v'_A, \quad (67)$$

kde je integrál zástupcem impulzu I_{II} .

Vzhledem k definici součiniteli restituce pro přímý centrální ráz (rovnice 54) můžeme tento součinitel pro šikmý ráz zapsat ve tvaru:

$$k = \frac{I_I}{I_{II}} = \frac{\int F'_A dt}{\int F_A dt} = \frac{u - v'_A}{v_A - u}. \quad (68)$$

4.4.3. Excentrický ráz



Obr. 20: Excentrický ráz dvou těles

Na Obr. 20 je vyobrazen průběh excentrického rázu dvou těles. Každý z těchto obrázků reprezentuje charakteristický stav průběhu rázu.

Obrázek 20a: Krátký časový úsek před rázem se obě tělesa pohybují rychlostmi v_A a v_B .

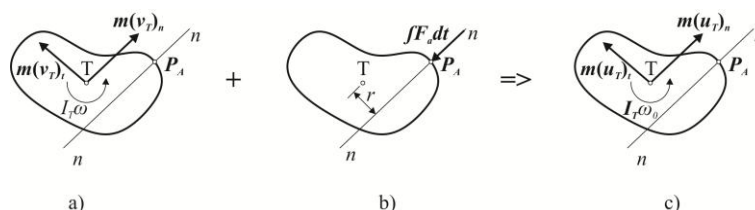
Obrázek 20b: V tomto okamžiku již proběhl ráz a bezprostředně po jeho skončení se začínají tělesa deformovat. Po deformaci se tělesa pohybují rychlostmi u_A a u_B , které mají směr normály rázu n totožné složky.

Obrázek 20c: V konečné fázi restituce se již tělesa pohybují rychlostmi v'_A a v'_B . Pokud třecí síly v místě dotyku budou zanedbatelné, budou síly působit ve směru normály rázu.

Aplikováním vztahů popsaných v předchozích kapitolách, na tyto tělesa s ohledem na jejich směry a rychlosti pohybu dostaneme vztah:

$$(v'_B)_n - (v'_A)_n = k[(v_A)_n - (v_B)_n]. \quad (69)$$

Stejně jako v předchozích případech, můžeme i tento průběh rázu a chování těles po něm popsat matematicky.



Obr. 21: Excentrický ráz dvou těles během fáze

Hybnost ve fázi deformace:
$$m(v_T)_n - \left(\int F_A dt \right) = m(u_T)_n, \quad (70)$$

Moment hybnosti ve fázi deformace:
$$I_T \omega - r \int F_A dt = I_T \omega_0, \quad (71)$$

kde v_T, u_T jsou rychlosti těžiště těles na počátku a před koncem deformace. Úhlové rychlosti těles ve stejném okamžiku značíme ω, ω_0 . Vzdálenost těžiště a normály n označujeme r .

$$\text{Hybnost ve fázi restituce:} \quad m(u_T)_n - \left(\int F'_A dt \right) = m(v'_T)_n, \quad (72)$$

$$\text{Moment hybnosti ve fázi deformace:} \quad I_T \omega_0 - r \int F'_A dt = I_T \omega', \quad (73)$$

kde $(v'_T)_n$ je rychlost těžiště a ω' je úhlová rychlost tělesa po rázu.

Vzhledem k definici součinitele restituce pro přímý centrální ráz (rovnice 54) můžeme tento součinitel pro šikmý ráz zapsat ve tvaru:

$$k = \frac{\int F'_A dt}{\int F_A dt} = \frac{(u_T)_n - (v'_T)_n}{(v_T)_n - (u_T)_n}. \quad (74)$$

Tento vztah lze postupně upravit až na tvar:

$$k = \frac{(u_A)_n - (v'_A)_n}{(v_A)_n - (u_A)_n}. \quad (75)$$

Obdobným způsobem lze vyjádřit koeficient restituce při pohybu styčného bodu druhého tělesa.

5. Popis vzorové dopravní nehody

5.1. Popis místa nehody z protokolu PČR

Dle protokolu o dopravní nehodě došlo dne 5. listopadu 2004 v 19.50 hod k dopravní nehodě v obci Pardubice na křížení ulice Chrudimská (sil. II/324) s ulicí Raisova. Osobní automobil Škoda Felicia Combi řízený panem L.N. jedoucí po ulici Chrudimská, jež je značena jako hlavní silnice se střetl s osobním automobilem Hyundai Lantra vyjíždějícím z ulice Raisova (vedlejší ulice), který řídil D.M. Vlivem střetu bylo vozidlo Hyundai posunuto směrem k ulici Raisova. Vozidlo Škoda zůstalo stát v místě střetu. Posádka tohoto vozidla utrpěla lehká zranění, řidič druhého vozidla byl převezen do nemocnice k ošetření. Technická závada na vozidle nebyla na místě nehody zjištěna ani uplatňována.

5.2. Výpovědi účastníků DN

Z výpovědí všech zúčastněných osob u dopravní nehody ze dne 5.11.2004 jsou pro technické posouzení této nehody podstatné následující okolnosti.

Obecný stav okolí nehody: okolo 20.00 hod, po dešti, nepršelo, povrch komunikace byl mokrý, byla tma, zapnuté pouliční osvětlení, viditelnost dobrá, vozidla technicky v pořádku, provoz vozidel mírný.

Pan „DM“, řidič automobilu HYUNDAI Lantra, jel sám, před 20.00 h, připoután bezpečnostním pásem ulicí Raisova směrem k centru města. Na křižovatce Chrudimská-Raisova odbočoval vlevo. Vozidlům projíždějícím po ulici Chrudimská musel proto dát přednost v jízdě. Řidič tuto křižovatku zná velmi dobře, bydlí nedaleko. Avšak konstatuje jí jako nepřehlednou, v dostatečném rozhledu mu bránily po obou stranách zaparkované automobily. Proto se ke křižovatce přibližoval menší rychlostí, před přechodem pro chodce přibrzdil a na hranici křižovatky zastavil. Po několikeré vizuální kontrole pravé a levé strany nespatořoval žádné vozidlo v bezprostřední blízkosti, vlevo viděl přes zaparkovaná vozidla světla ve vzdálenosti 80-100m. Na zařazený první rychlostní stupeň se začal rozjíždět do křižovatky tzv. „krokem“, jel okolo 7 km/h. Při najíždění do křižovatky opět vizuálně kontroloval pravou a levou stranu, když v tom viděl záblesk světel vozidla

přijíždějícího zleva. V době střetu se přední část jeho vozidla pohybovala na hranici dělící čáry. Z dopravní nehody si pamatuje, jak se probudil v zakouřeném osobním automobilu, u kterého vypnul běžící motor, z automobilu byl vyproštěn HZS a vozidlo Škoda Felicie jelo velice rychle.

Řidič automobilu ŠKODA Felicia Combi pan „LN“ jel s kolegou „DH“, dne 5.11.2004, ulicí Chrudimská směrem od centra, rychlostí 50-60 km/h. Ve vzdálenosti cca. 15 m před křižovatkou Chrudimská- Raisova mu směr jeho pohybu náhle zkřížilo vozidlo černé barvy vyjíždějící z ulice Raisova. Viděl jej pohybovat se, není schopen říci, zda se rozjíždělo nebo křižovátku projelo. Neviděl zapnuté směrové světlo vozidla HYUNDAI. Neprodleně začal brzdit. Po střetu vystoupil z vozu a utíkal k druhému vozidlu. Dovnitř nebylo přes hustý dým vidět. Motor mu stále běžel. Pokoušel se otevřít dveře, bezúspěšně. Vyproštění řidiče provedl HZS. Z jeho pohledu, bylo příčinou nehody nedání přednosti v jízdě vozidlem přijíždějícím zprava.

Pan „DH“, spolucestující v automobilu ŠKODA Felicia Combi, jel se spolupracovníkem v uvedeném směru jízdy. V bezprostřední blízkosti křižovatky jim z pravé strany vjel do cesty osobní automobil HYUNDAI Lantra. Uvedl, že jeli rychlostí 50 km/h, ve vlastním jízdním pruhu, před nehodou neviděl přijíždět vozidlo z pravé strany, ani osvětlený prostor před vozidlem. Není schopen si vybavit, zda místem nehody před anebo po nehodě projíždělo nějaké vozidlo v protisměru.

5.3. Technické parametry

K nehodě došlo na čtyřramenné křižovatce ulic Chrudimská (hlavní) a Raisova (vedlejší). Úsek křižovatky je bez jakýchkoli spádových poměrů. Rozhledové i výhledové podmínky jsou zhoršené okolní okrasnou zelení a parkujícími automobily. V době ohledání byla tma, po dešti, ale již nepršelo, povrch komunikace byl mokrá, ale neznečištěný, veřejné osvětlení bylo v provozu. Viditelnost byla dobrá, neovlivněna povětrnostními podmínkami. Provoz vozidel středně silný.

Prostorové uspořádání komunikací:

Chrudimská ulice: dvoupruhová, rozdělená podélnou čarou souvislou, oba pruhy jsou široké 3,6 m, po obou stranách ohraničené podélnou čarou souvislou oddělující krajnice široké 2,3 m pro zaparkování vozidel. Po obou stranách vozovky jsou vyvýšené obruby chodníků. Před křižovatkou v obou směrech je vyznačen přechod pro chodce vodorovným dopravním značením. Povrch komunikace tvoří živice v dobrém stavu bez výtluků. Obrusná vrstva vozovky je tvořena asfaltovým kobercem hrubozrnným, makrotextura je mimořádně výrazná, mikrotextura je drsná, protismykové vlastnosti povrchu jsou i za mokra vynikající. V místech přechodu pro chodce se nachází asfaltový výpotek, na němž jsou protismykové vlastnosti za mokra snižené.

Raisova ulice: obousměrná, není rozdělená vodorovným dopravním značením na jízdní pruhy, široká 6 m. Před křižovatkou je v obou směrech vyznačen přechod pro chodce vodorovnou dopravní značkou. Povrch komunikace tvoří živice v dobrém stavu bez výtluků. Struktura povrchu této komunikace je stejná jako v ulici Chrudimská.

Bod číslo 1: znázorňuje začátek blokovací stopy od levých kol vozidla Škoda, po střetu se mění na stopu dřecí. Počátek stopy byl ve vzdálenosti 21 m od roviny VBM a 6,7 m vpravo od levého okraje komunikace. Stopa končila pod levým předním kolem vozidla Škoda.

Bod číslo 2: označuje osobní automobil Škoda v konečném postavení v křižovatce. Přední část byla stočena mírně do ulice Raisova. Přední levá část automobilu byla naměřena ve vzdálenosti 3,7 m od roviny VBM a 5 m vpravo od levého okraje komunikace. Levá zadní část

byla ve vzdálenosti 6,5 m od roviny VBM a 8,2 m vpravo od levého okraje komunikace.

Bod číslo 3: představuje pozici osobního automobilu Hyundai, jenž v konečném postavení stál pravou stranou přídě 1,9 m od roviny VBM a 2,9 m od okraje komunikace. Pravá zadní část vozidla byla 2,1 m od roviny VBM a 6,1 m od okraje komunikace.

Technické parametry vozidel:

Škoda Felicia Combi: rok výroby 1996, délka 4237 mm, rozvor náprav 2550 mm, šířka 1635 mm, výška 1420 mm, pohotovostní hmotnost 960-1090 kg, kapalinové brzdy s posilovačem, barva bílá, zdvihový objem 1289 ccm, výkon 45 kW, rozměr pneu 165/70 R13.

Hyundai Lantra: rok výroby 1996, délka 4420 mm, rozvor náprav 2500 mm, šířka 1700 mm, výška 1393 mm, pohotovostní hmotnost 1247 kg, kapalinové brzdy s posilovačem, barva zelená, zdvihový objem 1599 ccm, 84 kW, 195/60 R14, kapalinové brzdy s ABS.

Poškození vozidel vlivem vzájemného střetu:

Škoda Felicia Combi: kompletní poškození přední části: nárazník, náprava, kapota, maska vozidla, chladič, přední světlomety, motor a příslušenství, oba přední blatníky, čelní sklo, zkřížení karoserie.

Hyundai Lantra: poškozen levý přední a zadní blatník, zadní nárazník, přední a zadní levé dveře, levé přední kolo, přední náprava a čelní sklo.

6. Simulace nehodového děje

Než přistoupíme k zadávání dat do simulačního programu a tvorbě simulace samotné je nutné si uvědomit určitá pravidla, bez kterých nelze získat pravdivé a jednoznačné výsledky o průběhu nehodového děje. Na počátku by si každý uživatel měl udělat rozvahu o konfiguraci střetu, nejlépe ze stop zanechaných na povrchu komunikace, konečné polohy, v níž zůstalo vozidlo po nehodě a fotodokumentace poškození obou automobilů. Výsledkem této úvahy je konkrétní konfigurace střetu vozidel, jejich rychlost, úhel pod jakým se střetla, poloměr zatáčení a jejich orientace. Každou situaci se vzájemným střetem dvou těles pomyslně dělíme na tři části:

- a) předstřetový pohyb
- b) pohyb při střetu
- c) postřetový pohyb

Časem simulace $t_{(o)}$ rozumíme okamžik, ve kterém došlo ke střetu vozidel. Hodnoty času se záporným znaménkem odpovídají předstřetovému pohybu, který je pro zjednodušení matematických operací vypočten kinematickými vztahy. Vlastní střet a postřetový pohyb jsou počítány jako dynamický děj. U tohoto děje jsou časové údaje značeny kladným znaménkem.

Jako výchozí pozici vozidel zvolíme vzájemnou polohu vozidel v okamžiku vzájemného střetu (maximální deformace). Do této polohy vložíme oba naše automobily s nulovou rychlostí. Pokud máme takto připravena vozidla ve střetových polohách, musíme softwaru pomocí vstupních veličin zadat (definice sekvencí), jak se vozidla pohybovala v předstřetovém pohybu a ověřit technickou přijatelnost. V našem případě budeme vycházet z plánu Policie ČR, abychom zjistili poloměr zakřivení dráhy a tím rychlost jakou se automobily, hlavně vůz Hyundai, mohly pohybovat do místa střetu. Na základě takto vložených dat a parametrů před střetem simulační program vypočítá nejen parametry pohybu během střetu a po něm, ale i koncové polohy vozidel. Tuto metodu označujeme jako dopředný výpočet pohybu.

6.1. Vypracování simulace Virtual CRASH

Po spuštění aplikace Virtual CRASH 2.2 se uživateli otevře okno s čistou pracovní plochou. Na levé straně v těsné blízkosti této plochy je umístěn panel nástrojů, z něhož kliknutím na ikonu vybereme činnost, kterou chceme provést (např.: kreslit polygon, vkládat text, narýsovat měřicí čáru, vložit bitmapovou grafiku a jiné další). Jelikož v této práci simuluji dopravní nehodu, která se reálně stala, z mapové databáze jsem získal mapový podklad tohoto místa. Abych se co nejvíce přiblížil rozhledovým a uzemním poměrům v místě dopravní nehody, vypracoval jsem třírozměrný model okolí příslušné křižovatky.

Jako podklad jsem použil ortofoto místa nehody ve formátu *.bmp. Na tomto pokladu je pak vidět přesné rozmístění blízké zástavby, okrasné zeleně a veškerých překážek, které by nemuseli být z fotodokumentace viditelné. Pro zachování rozměrů je potřeba nastavit měřítko vkládaného obrázku. Na obrázku se vyznačí dva body, u nichž známe skutečnou vzdálenost a vepíšeme ji do příslušného okna. Tím vytvoříme přesné měřítko mapového podkladu místa nehody.

Na vloženém obrázku vytvoříme vozovku dle předlohy s rozměry, které odpovídají skutečnosti a byly zaznamenány v protokolu o dopravní nehodě. Při tomto kroku zvolíme počet a šířku jízdních pruhů vozovky. Jelikož ze všech stran tuto křižovatku obklopuje chodník pro chodce, bylo potřeba tuto skutečnost brát na vědomí a vytvořit plochu, která bude výškově odsazena od povrchu komunikace. To proto, aby v případě pohybu vozidel přes překážku bylo to zohledněno ve výpočtech. Pro jednoznačnou orientaci v situaci je nutné určit výchozí bod měření (VBM). Tím v našem případě je dle protokolu Policie ČR roh domu ulic Raisova a Chrudimská na pravé straně silnice směrem do centra města. Pro jednodušší vzájemné grafické porovnání konečných poloh vozidel byla naznačena funkcí „kreslení polygonu“ tato pozice na vozovce. Veškeré vzdálenosti odečítáme od VBM. Pro kreslení přechodu pro chodce a krajní čáry vozovky využijeme opět nástroj na kreslení polygonu, přičemž zvolíme barvu a šířky čar. Pro úplnost je zapotřebí celou křižovatku označit dopravními značkami (rozhledové poměry). Svislé dopravní značení je možno vybrat z knihovny obsahující rozsáhlou databázi běžně používaných značek v silniční dopravě. Tuto značku můžeme jakkoliv upravovat do všech potřebných směrů

a jednoduchým přetažením umístit kdekoli v situaci. V tuto chvíli máme vytvořenou silnici jako podklad pro pohyb vozidel.

Pro dokončení modelu místa nehody vytvoříme okolní zástavbu. Přes uživatelsky příjemné a intuitivní vytváření objektů tato část práce zabrala znatelně dlouho dobu. Princip tvorby třírozměrných objektů je v zásadě stejný pro všechny typy objektů. Nejprve vytvoříme půdorys objektu, u kterého poté editujeme souřadnice osy z. V našem případě jsou jako půdorys obkresleny budovy z mapového podkladu. Tímto způsobem je vytvořena veškerá zástavba v okolí křižovatky. Všechna vytvořená tělesa mají stejný odstín barvy a nelze tento odstín u jednotlivých stěn měnit. Existuje ovšem možnost na stěnu budov vložit opět bitmapovou grafiku. Proto byla veškerá zástavba podrobně digitálně zdokumentována a následně upravená pro importování do Virtual CRASH. Samotné umístění obrázku na stěnu domu se na počátku zdá složité, ale v principu je velmi jednoduché a účinné. Nejprve vytvořenou grafiku nakopírujeme do složky, ve které máme nainstalovaný Virtual CRASH, do podsložky s databází dopravních značek. Poté vytvoříme svislou dopravní značku s naší vybranou grafikou. Přesunutím značky na plochu stěny docílíme změny grafiky stěny. Editací značky přizpůsobíme velikost „značky“ tak, aby zakrývala požadovanou plochu domu. Postupným, posouváním, otáčením, zvětšováním nebo zmenšováním značky finálně doladíme celkový vzhled objektu.

Vložení a výběr konkrétního modelu vozidla s danou motorizací lze rychle provést z knihovny předdefinovaných vozidel z každodenního provozu kolem nás. Samotný výběr provedeme rozbalením nabídky „model“ v levé části okna programu. Zde si z aktuální nabídky vybereme z abecedně seřazených vozidel dle výrobce požadovaný typ. Označením a následným přetažením s držením levého tlačítka myši umístíme vozidlo do zvoleného prostoru simulace. V editačním okně toto vozidlo můžeme otáčet, udílet mu zrychlení jak kladné tak záporné, měnit směr pohybu, dráhu po jaké má danou rychlostí jet a měnit další nezbytné parametry pro okamžitou kontrolu nad vozidlem. Tímto způsobem do situace vložíme všechna vozidla, která se na silnici pohybovala nebo zde byla jen zaparkována. Parkujícím vozidlům ponecháme po celou dobu simulace nulovou rychlost. Vozidlo pomocí myši následně natočíme do požadované polohy. Po otevření okna editovat a výběrem daného vozidla můžeme upravovat specifické vlastnosti vozidla. Můžeme zohlednit, zda je vozidlo vybaveno ABS, upravovat hodnoty dynamických veličin, určovat

rozchod kol, zadávat vlastnosti pneumatik, měnit součinitel adheze, měnit vlastnosti tlumičů vozidla, měnit výšku, počet náprav, hmotnost, délku, výšku těžiště a pokud je třeba vkládat hmotnost nákladu převážený na střeše, v zavazadlovém prostoru, v přední nebo zadní části automobilu. Možnosti úprav vlastností vozidla jsou velmi široké a pro běžné případy použití vozidel dostačující. Tímto bychom měli připravenou celkovou situaci a můžeme přistoupit k samotné simulaci pohybu vozidel.

Jak jsem již zmínil výše, budeme vycházet z polohy vzájemného střetu, odkud začneme definovat předstřetový pohyb. Uchopíme tedy vozidlo, které chceme přesunout, a přetažením za současného držení klávesy „ctrl“ ho umístíme do požadované polohy předstřetového pohybu. Kliknutím na polohu příslušné sekvence příslušného automobilu a následným zmáčknutím pravého tlačítka myši otevřeme okno pro rychlou editaci údajů vozidla (počáteční rychlost pohybu v ($t=0s$), počáteční směr, počáteční úhlovou rychlost omega-z ($t=0s$) a mnohé další). Nastavíme vozidlu rychlost pohybu. Jakmile má vložené vozidlo nenulovou počáteční rychlost a pokud je aktivovaná položka „přečítat simulaci“, automaticky se ve směru pohybu vykreslují na povrchu komunikace obrysy vozidla v jednotlivých pozicích pohybu ve zvolených časových intervalech. Najetím kurzorem myši na libovolnou polohu vybraného pohybu vozidla se zobrazí všechny důležité údaje týkající se dané pozice (např.: ujetá dráha a uběhnutý čas od počátku simulace apod.). Kliknutím pravým tlačítkem myši na obrys vozidla se opět zobrazí editační tabulka pro zadávání vstupních údajů. Tuto možnost budeme následně využívat při tvorbě modelu pohybu vozidla (sekvencí). Přímým směrem vozidlo necháme dojet až do bodu 1. V tomto bodě začalo skutečné vozidlo zanechávat brzdné stopy, když řidič ukončil reakci na vyjíždějící vozidlo z vedlejší silnice. Jakmile tedy máme vozidlo v bodě 1, musíme dát vozidlu pokyn k brždění. To učiníme otevřením editačního okna vozidla a ikonku zrychlení změním kliknutím, na brždění a v příslušném okně zadáme hodnotu záporného zrychlení. Obdobným způsobem pokračujeme ve všech místech pohybu, kde automobil měnil způsob pohybu. Takto vytvoříme soubor vstupních podmínek, podle kterých se bude vozidlo pohybovat a které jsou základními veličinami pro výpočet postřetového chování vozidel. Pokud máme vytvořený předstřetový pohyb prvního automobilu můžeme ve 3D módu spustit videosekvenci a zkontrolovat, zda se vozidlo pohybuje správným způsobem. Pokud již není třeba jízdu prvního vozidla dále upravovat, přistoupíme k definování pohybu druhého vozidla. Opět budeme vycházet z polohy vozidla při střetu a stejným

způsobem jako u prvního automobilu nastavíme způsob jízdy i u tohoto vozidla. Nyní máme vytvořený předstřetový model chování a způsobu jízdy obou vozidel. Pokud nyní opět spustíme vizualizaci, vozidla se začnou pohybovat z počátečních pozic, avšak pouze do okamžiku střetu. Výpočet do střetové pozice probíhá kinematicky. Abychom zjistili, jak se vozidla budou pohybovat po vzájemné kolizi, zahájíme výpočet střetu tlačítkem na horní nástrojové liště „spustit simulaci“. V tuto chvíli software spustí dynamický výpočet a během několika sekund prezentuje výsledek pomocí videosekvence zobrazující celý průběh simulace. Výstup je možný i psanou formou pomocí tabulek a grafů přístupných z horní nástrojové lišty pod tlačítka „diagram“ a „protokol“. Tímto způsobem získáme veškeré hodnoty vypočítané během simulace, které budou prezentovány v následující kapitole. Při aktivovaném přepočítání simulace se v místě střetu automaticky vykresluje rovina rázu, třecí kužely a vypočtené impulzy. V případě nutnosti je možno s hodnotami pracovat a upravovat je dle potřeb a aktuální situace.

Pro zjištění rozhledových podmínek v jakémkoli místě simulace byla do prostor interiéru obou vozidel vložena virtuální kamera. Pomocí této kamery můžeme průběh celého nehodového děje sledovat přímo z pozice řidiče automobilu a udělat si představu o tom, do jaké míry měl zhoršené rozhledové podmínky.

6.2. Vypracování simulace PC Crash

Naprosto stejné vstupní parametry vozidel, konfigurace bodu rázu a sekvence v postřetovém pohybu, které vstupovaly a zasahovaly do simulace střetu a postřetového pohybu v prostředí Virtual Crash, byly vloženy do počátečních podmínek modelu v programu PC Crash.

Vizualizace, grafy a protokol simulace je v níže uvedené kapitole porovnán s obdobnými výstupy simulačního programu Virtual Crash.

6.3. Porovnání výstupů simulací

Tato práce porovnává výsledky simulace dopravní nehody dvou vozidel s daty naměřenými přímo na místě dopravní nehody. Proto se zabývá pozičními hodnotami

vozidel v poloze vzájemného střetu a konečných pozic, ve kterých vozidla skončila. U tohoto programu máme možnost závěrečná data získat exportem do tabulek či diagramů. Veškeré takto získané hodnoty jsou přehledně zpracovány v příloze.

Vozidlo Škoda Felicie:

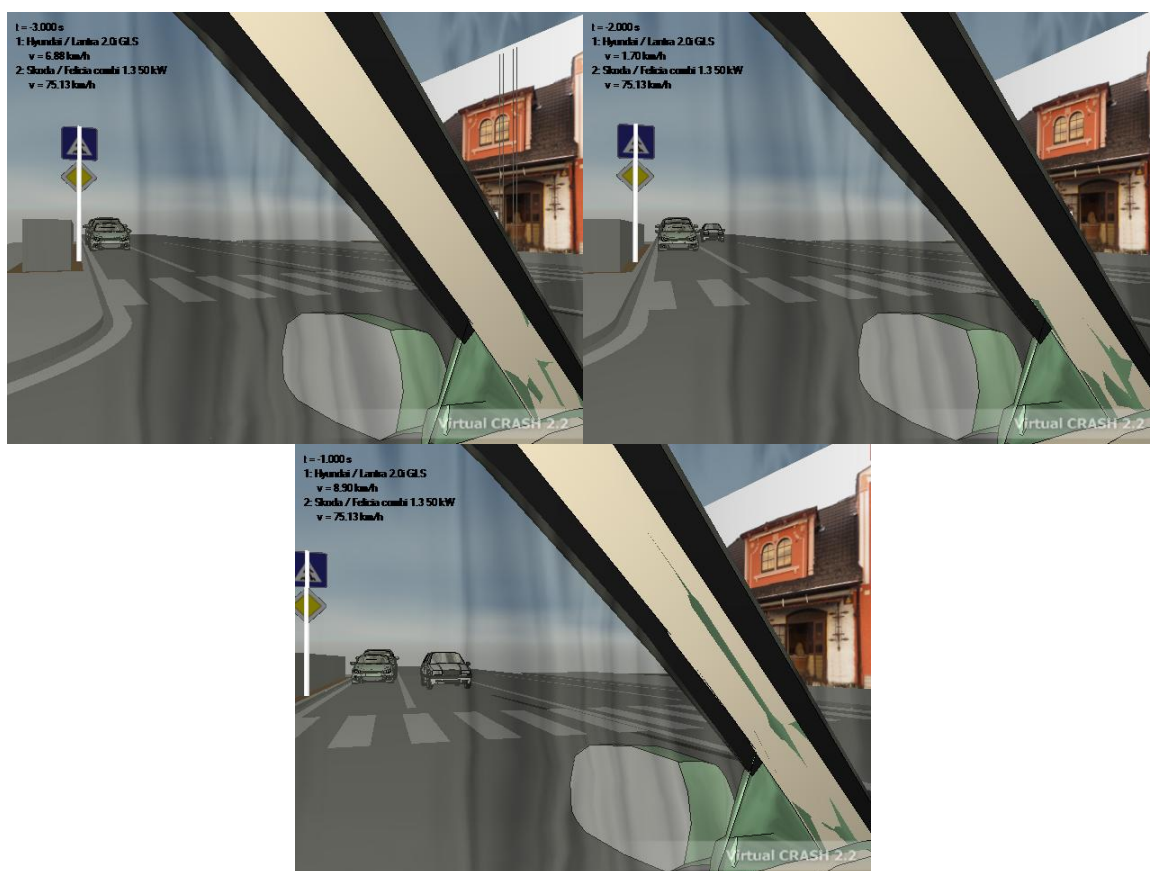
Ze simulace plyne (viz protokol Příloha 11.1), že vozidlo Škoda se přibližovalo ke křižovatce rychlostí 75 km/h ulicí Chrudimská, kde byly po pravé straně komunikace podélně zaparkované automobily. Tyto vozy řidiči spolu s okrasnou zelení omezovaly výhled směrem k ulici Raisova. Řidič strhl řízení vlevo a ve vzdálenosti 14,5 m před místem střetu vozidlo již zanechávalo brzdné stopy na vozovce tj. řidič již reagoval na vozidlo vyjíždějící z vedlejší komunikace. Ve snaze zabránit vzájemnému střetu s druhým vozidlem začal řidič brzdit se zpomalením 7 m/s^2 . Vlivem adheze 0,78 a absenci ABS se tento vůz začal pohybovat se zablokováným předním levým kolem (neřiditelný), čemuž nasvědčuje blokovácí stopa zanechaná na vozovce začínající v bodě 1, procházející místem střetu (zlom) a končící pod předním levým kolem tohoto vozidla v konečné poloze. Ke střetu došlo při pohybu vozidla dobřovou rychlostí 55 km/h.

Nárazem do překážky byl automobil zdeformován o 0,357 m energií o velikosti 749 kJ. Po kolizi se vozidlo dále pohybovalo výběhovou rychlostí 22 km/h ve směru jízdy. Vozidlo se ze zpomalením $7,649 \text{ m/s}^2$ dosunulo do konečné polohy. Vlivem excentrického střetu začal automobil po střetu rotovat kolem svislé osy s obvodovou rychlostí 1,90 radiánů za sekundu. Vozidlo zůstalo stát v konečné poloze pravým předním kolem před středovou čarou komunikace, nasměrováno přední částí vozu směrem k VBM. Vzájemným střetem se vůz Škoda Felicie zpomalil o 33 km/h.

Vozidlo Hyundai Lantra:

Ze simulace plyne, že automobil Hyundai projížděl ulicí Raisova (pravděpodobně běžnou provozní rychlostí) a začal před křižovatkou brzdit se zpomalením $2,5 \text{ m/s}^2$ aby mohl bezpečně zastavit. Vzhledem k rozhledovým poměrům v okolí křižovatky musel řidič zastavit vozidlo v poloze, kdy přední část automobilu byla na úrovni spojnic postranních čar oddělující místa pro stání vozidel a místa určeného pro provoz vozidel (chybí STOP

čára – složitější orientace v křižovatce). Ani v této poloze však řidič nemohl přes okrasnou zeď a podélně zaparkovaná vozidla v ulici Chrudimská vidět dále než do vzdálenosti cca. 50m vlevo od vozidla. Téměř před úplným zastavením, 5 m před místem střetu, začal řidič vozidla Hyundai vizuálně kontrolovat bezprostřední okolí křižovatky, aby mohl odbočit na hlavní silnici. Nejprve pohlédl doleva, aby se přesvědčil, že z tohoto směru nepříjíždí žádné vozidlo. V tomto směru neviděl žádné příjíždějící vozidlo, zkontroloval tedy ještě druhou (pravou) stranu. Když ani z této strany neviděl žádné přibližující se vozidlo, začal se rozjíždět do křižovatky se zrychlením 2 m/s^2 . V tu chvíli byl řidič osvětlen světlem přicházejícím zleva. Podíval se tedy ještě jednou směrem doleva a vidí, jak se z levé strany rychle přibližuje vozidlo. Vzhledem k rychlostem obou vozidel a vzájemnému postavení se již kolizi nedá zabránit. Rozhledové poměry z vozidla Hyundai jsou zachyceny na obrázku 22. Po uplynutí 2,3 s a ujetí vzdálenosti 5 m od nájezdu do křižovatky dochází k vzájemnému střetu. Vlivem vyhýbacího manévru vozidla Škoda a odbočování vozidla Hyundai dochází ke střetu pravou přední částí automobilu Škoda a odbočování vozidla Hyundai dochází ke střetu pravou přední částí automobilu Škoda a levou přední částí vozu Hyundai v rozhraní blatníku a předních dveří.



Obr. 22: Výhledové poměry z vozidla Hyundai při nájezdu do křižovatky

Před kolizí se automobil Hyundai pohyboval rychlostí 16 km/h. Střetem byl vůz zdeformován o 0,238 m energií o velikosti 749 kJ. Po kolizi se vozidlo pohybovalo výběhovou rychlostí 26 km/h. Bržděním řidiče zpomalením 2 m/s^2 se vozidlo po uplynutí 2,47 s od doby střetu zastavilo ve vzdálenosti 5,279 m. Do koncové pozice se automobil přemístil rotačním pohybem kolem svislé osy s obvodovou rychlostí 1,26 radiánů za sekundu. Vlivem samotného střetu vůz změnil rychlost o 28 km/h.

Vozidlo :	Hyundai-Lantra GLS 1.6		Skoda-Felicia Combi 1.3 LXi Comfort	
Řidiči :	DM		LN	
STARTOVACÍ ÚDAJE :				
	Virtual Crash	PC-Crash	Virtual Crash	PC-Crash
Rychlost (V) [km/h] :	16,00	16,00	55,00	55,05
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	21,73	21,73	-83,43	-83,43
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	28,61	28,61	-83,43	-83,43
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0,42	0,41	0,00	0,00
Poloha těžiště x [m] :	-28,35	-28,35	-28,97	-28,97
Poloha těžiště y [m] :	70,52	70,52	72,88	72,88
Poloha těžiště z [m] :	0,54	0,54	0,54	0,54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0,23	-0,23	2,50	2,30
ÚDAJE PŘI VZÁJEMNÉM STŘETU :				
Rychlost (V) [km/h] :	25,97	26,04	21,95	21,86
Poloha těžiště x [m] :	-28,35	-28,35	-28,98	-28,97
Poloha těžiště y [m] :	70,52	70,52	72,88	72,88
Poloha těžiště z [m] :	0,54	0,54	0,54	0,54
KONEČNÉ ÚDAJE :				
Rychlost (V) [km/h] :	0,02	0,09	0,02	0,00
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	75,77	70,81	-19,03	-13,01
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	143,98	105,27	71,19	76,94
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0,00	0,00	0,00	0,00
Poloha těžiště x [m] :	-25,94	-26,21	-29,04	-28,95
Poloha těžiště y [m] :	66,05	65,48	69,86	69,53
Poloha těžiště z [m] :	0,54	0,54	0,54	0,54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-5,42	0,06	3,80	0,00

Tabulka 3: Porovnání hodnot vozidel v jednotlivých pozicích

Vozidlo :	Hyundai-Lantra GLS 1.6	Skoda-Felicia Combi 1.3 Lxi	Hyundai-Lantra GLS 1.6	Skoda-Felicia Combi 1.3 Lxi
Řidiči :	DM	LN	DM	LN
KOLIZE				
	Virtual Crash		PC-Crash	
Rychlost [km/h]:	16,00	55,00	16,00	55,05
Rychlost výběhu [km/h]:	25,96	21,95	26,04	21,86
Změna rychlosti dv [km/h] :	27,88	33,11	28,00	33,25
Deformace e [m] :	0,24	0,36	0,12	0,36
EES [km/h] :	24,97	33,31	19,94	36,90
Tuhosti [kN/m]:	nevypisuje se	nevypisuje se	2490,90	863,70
k-faktor :	0,10		0,10	
Tření při rázu (MUE) :	1,00		1,00	
Poloha bodu rázu x [m] :	-28,56		-28,56	
Poloha bodu rázu y [m] :	71,21		71,22	
Poloha těžiště z [m] :	0,33		0,33	
Směr roviny tření (phi) [Grad] :	18,73		18,73	
Směr roviny tření (psi) [Grad] :	0,00		0,00	
Celková deformační energie [J] :	74944,05		74275,09	
Impulz rázu [Ns] :	9657,46		9698,57	
GEV :	1,12	0,99	1,40	0,90

Tabulka 4: Parametry vzájemné kolize

Vyhodnocení:

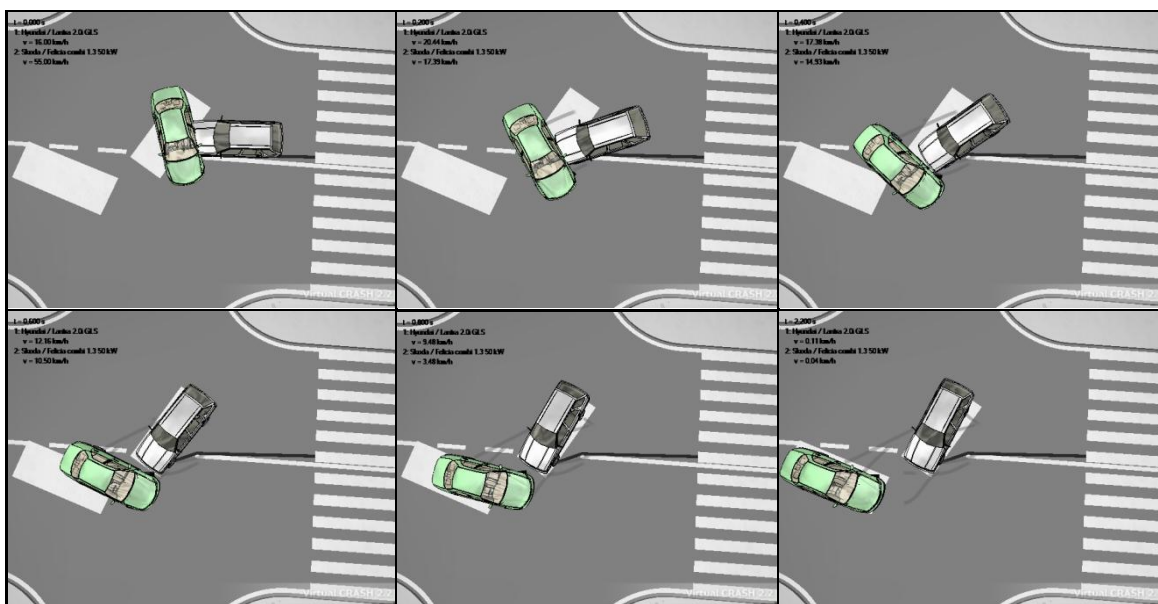
Pro srovnání výsledných hodnot z jednotlivých simulačních programů vycházím z tabulky 3 a 4. Zdrojovými daty pro vytvoření těchto tabulek jsou protokoly z obou programů.

Jednou ze zásadních veličin je rychlost výběhová. Výběhovou rychlostí rozumíme rychlost, jakou měla vozidla po prvním kontaktu. V programu Virtual Crash byla tato rychlost vypočtena na 25,97 km/h vozidla Hyundai a 21,95 km/h pro vozidlo Škoda. V prostředí PC-Crash byla rychlost automobilu Hyundai stanovena na 26,04 km/h a 21,86 pro vozidlo Škoda. Dále vozidlo Hyundai dle výpočtů Virtual Crash bylo zdeformováno

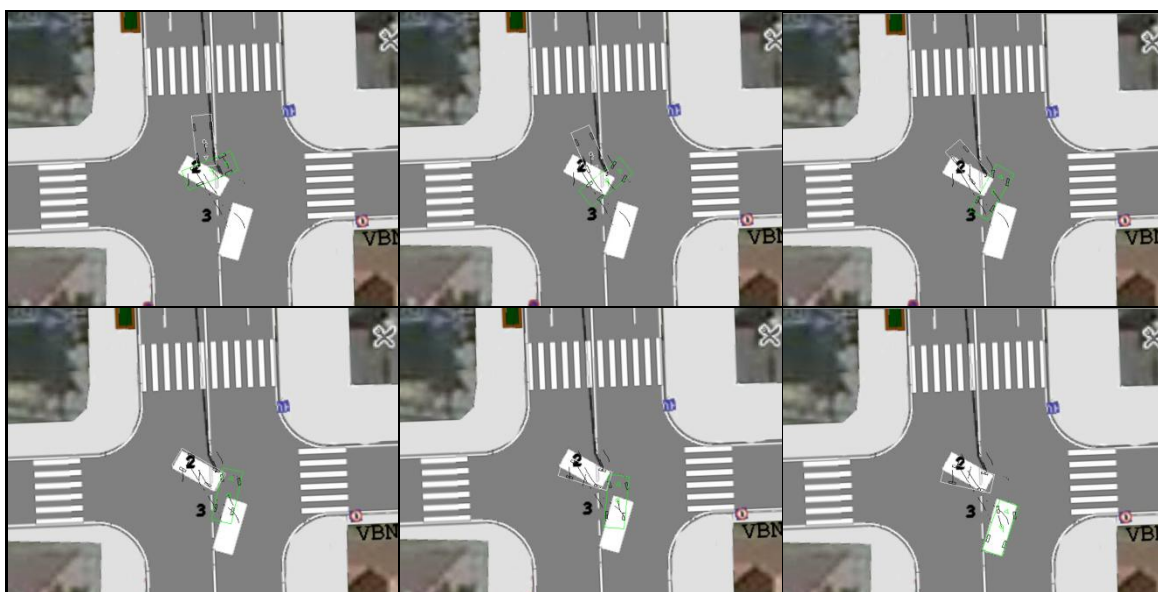
o 0,24 m, v programu PC-Crash byla tato hodnota poloviční. U vozidla Škoda došlo k deformaci o 0,36 m v obou výpočtových softwarech. Velikost hodnot EES jsou pro vozidlo Hyundai 24,97 km/h ve Virtual Crash a 19,94 km/h v PC-Crash. U vozidla Škoda jsou tyto hodnoty 33,31 km/h a 36,90 km/h. Tyto rozdíly ve Virtual Crash jsou způsobeny konstantní tuhostí karoserie vozidel ve všech jejích částech (před, bok, střecha) ačkoli u reálných vozidel jsou tyto hodnoty zcela rozdílné. Simulaci lze přizpůsobit těmto podmínkám změnou hodnoty EES u prvního z vozidel. V programu PC-Crash je databáze vozidel s předdefinovanou databankou tuhostí dle směru nárazu. Lze tedy simulaci přizpůsobit nejen změnou EES ale i změnou tuhostí. Pokud změním hodnotu EES u prvního vozidla v simulačním programu PC Crash, dopočítané hodnoty EES druhého vozidla jsou stejné jako ve Virtual Crash.

Po střetu se obě vozidla pohybovala se zpomalením až do konečné polohy, kde zastavila. Konečné polohy těžiště obou vozidel byly softwarem Virtual Crash stanoveny na -25,94 m, 66,05 m a 0,54 m vozidla Hyundai, respektive -29,04 m, 69,86m a 0,54m pro automobil Škoda. Simulační program PC-Crash určil konečnou polohu Hyundai v místě se souřadnicemi -26,21 m, 65,48 m a 0,54, pro vozidlo Škoda jsou to hodnoty -28,95 m, 69,53 m a 0,54 m. Vozidlo Hyundai Lantra dle hodnot i vizuální kontrolou v simulaci dosáhlo zdokumentované polohy Policií ČR na místě dopravní nehody. Diference konečné polohy těžiště u automobilu Škoda Felicie je spojena i s diferencí úhlu natočení vozidla. Vozidlo se po střetu více stočilo vlevo a to přibližně o 5°. Tato odchylka není spojena s rozdílnými vstupními parametry simulace ani rozdílným výpočtem, ale může mít původ v databázi modelů a tvarů karoserie, kterou si každý výrobce simulačních programů tvoří sám a nelze ji uživatelsky měnit.

Grafické zhodnocení průběhu kolize a konečné polohy obou vozidel jsou zobrazeny na obrázcích 23 a 24.



Obr. 23: Sřet a postřetový pohyb vozidel v modelu Virtual Crash



Obr. 24: Sřet a postřetový pohyb vozidel v modelu PC-Crash

7. Závěr

Cílem této práce není pouze seznámit čtenáře se simulačními softwary a tvorbou simulace nehodového děje, ale hlavně snaha prakticky ověřit výsledky výpočtové analýzy vzorové dopravní nehody s veličinami naměřenými přímo na místě dopravní nehody.

Teoretická část je zaměřena na dopravní nehody a jejich znalectví. Pojednává o využití počítačových softwarů k analýze dopravních nehod a předkládá matematickofyzikální zákony, které jsou při tomto procesu využívány.

V praktické části diplomové práce jsou předloženy nejen důležité informace z výpovědi účastníků dopravní nehody, jak byly zaznamenány v protokolu PČR o dopravní nehodě, ale i ucelené a jednoznačné informace ke specifikování průběhu a vzniku této nehody, jako jsou prostorové podmínky v okolí místa nehody, povětrnostní podmínky, stav komunikace, detailní informace o vlastnostech vozidel a jejich poškození vlivem vzájemného střetu a v neposlední řadě koncové polohy obou vozidel. Stěžejní úsek praktické části vzájemně porovnává výstupní hodnoty z obou simulačních programů a porovnává je s daty z místa nehody a protokolu PČR.

Dle výsledků obou simulací, které jsou přehledně zobrazeny v tabulkách 3 a 4 je možno ověřit, že výstupní hodnoty veličin z obou simulačních programů jsou téměř totožné. Diference hodnot EES souvisí s již výše popsaným definováním tuhosti vozidla. Ohledně difference úhlu natočení v konečné poloze vozidla po střetu lze uvést, že může mít souvislost s prostorovým modelem každého vozidla, kdy tyto jsou závislé na kompletnosti databáze těchto 3D modelů každého z programů.

Ze získaných výsledků modelového případu v této diplomové práci lze konstatovat, že výsledné simulace v obou prezentovaných simulačních programech pro podporu analýzy silničních nehod jsou pro potřeby analýzy dopravních nehod srovnatelné.

8. Literatura

- [1] **Prof. JUDr. Ing. Viktor Porada, DrSc., a kolektiv:** *Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi*, Linde Praha, 2000.
- [2] **Pollak, J.:** *V roce 1930 zemřelo na Curyšských ulicích 33 lidí.* [Online]:<http://www.i-veteran.cz/novinky/v-roce-1930-zemrelo-na-curysskych-ulicich-33-lid-276>.
- [3] **Chmelík, J.:** *Vyšetřování silničních dopravních nehod*, Ministerstvo vnitra ČR, odbor person. Práce a vzdělávání PČR, Úřad vyšetřování pro Českou republiku, Praha, 1998.
- [4] **Liška, Miroslav:** *Fyzika a matematika při analýze dopravních nehod*, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2004.
- [5] **Doc. Ing. Jindřich Šachl, CSc., a kolektiv:** *Analýza nehod v silničním provozu*, ČVUT Praha, 2010.
- [6] **Ing. Drahomír Schmidt, Ph.D.:** *Softwarové simulace a analýzy dopravních nehod*, ČVUT, Fakulta dopravní, Ústav mechaniky a materiálů, Praha, 2007.
- [7] **Dr. Steffan Datentechnik:** *PC-Crash 9.0*, Linz, 2010. Překlad (SK): Prof. Ing., Gustav Kasanický, CSc., ve spolupráci s EMG Košice.
- [8] **Domovská stránka PC Crash** [Online]. Dostupné z: www.pccrash.cz
- [9] **Ústav soudního inženýrství, VUT v Brně**, [online]. Dostupné z : <http://www.usi.vutbr.cz>
- [10] **Bc. Petr Hlaváč:** *Aplikace výpočetní techniky při analýze dopravních nehod*, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Zlín, 2011.
- [11] **Ing. Bc. Marek Semela:** *Komplexní systém pro analýzu silniční nehody- střet dvou automobilů na křižovatce*, VUT v Brně, Ústav soudního inženýrství, Brno, 2009.
- [12] **Ing. Aleš Vémola, Ph.D.:** *Analýza silničních nehod s podporou simulačních programů*, časopis Soudní inženýrství, ročník 20- 2009.
- [13] **Ústav soudního znalectví v dopravě K622 a analýza dopravních nehod** [online]. Dostupné z [www: <http://k622.fd.cvut.cz>](http://k622.fd.cvut.cz).

- [14] **ČT24**,[online]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/kalendarium/5334-ve-velke-britanii-se-stala-prvni-dopravni-nehoda-pri-ktere-zahynul-ridic/>

9. Rejstřík obrázků

Obr. 1: Dopravní nehoda v počátku automobilismu, [2].....	- 11 -
Obr. 2: Trajektorie pohybu	- 21 -
Obr. 3: Rychlost hmotného bodu.....	- 21 -
Obr. 4: Směr vektoru rychlosti	- 23 -
Obr. 5: Deformace tělesa silou F	- 26 -
Obr. 6: Smykové tření	- 27 -
Obr. 7: Úhel tření.....	- 28 -
Obr. 8: Valivý odpor.....	- 29 -
Obr. 9: Závislost průmětu síly na poloze.....	- 32 -
Obr. 10: Práce vykonaná při přemístění částice	- 33 -
Obr. 11: Vzájemné působení dvou částic	- 34 -
Obr. 12: Valení po rovinné podložce.....	- 35 -
Obr. 13: Moment hybnosti vybrané části	- 36 -
Obr. 14: Proces deformace těles	- 39 -
Obr. 15: Proces restituce těles	- 40 -
Obr. 16: Fáze deformace	- 41 -
Obr. 17: Fáze restituce.....	- 41 -
Obr. 18: Šikmý ráz dvou hladkých koulí.....	- 43 -
Obr. 19: Šikmý ráz dvou těles s omezeným pohybem	- 43 -
Obr. 20: Excentrický ráz dvou těles	- 44 -
Obr. 21: Excentrický ráz dvou těles během fáze	- 45 -
Obr. 23: Výhledové poměry z vozidla Hyundai při nájezdu do křižovatky.....	- 57 -
Obr. 24: Sřet a postřetový pohyb vozidel v modelu Virtual Crash	- 61 -
Obr. 25: Sřet a postřetový pohyb vozidel v modelu PC-Crash	- 61 -

10.Slovník zkratk

3D	označuje zobrazení objektu ve třech rovinách
*.DXF	Drawing Exchange Format, je CAD formát, umožňující výměnu dat mezi AutoCADem a dalšími programy
*.bmp	Bitmapa, označuje formát rastrové grafiky
ABS	Anti-lock Brake Systém, systém aktivní bezpečnosti vozidla, zabraňuje zablokování kol vozidla
VBM	výchozí bod měření
HZS	Hasičský záchranný sbor

11. Příloha

11.1. Výsledné protokoly Virtual Crash

Virtual Crash 2.2 protokol; licence: ČVUT - student

vozidlo/překážka: 1 - Hyundai/Lantra 2.0i GLS; řidič: DM	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	16.000			0.019		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	21.728	-0.091	0.128	75.768
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	28.606	-0.226		143.980	-5.416	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.002	0.013	0.415	-0.009	0.002	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-28.348	70.516	0.542	-25.937	66.045	0.540

vozidlo/překážka: 2 - Skoda / Felicia combi 1.3 50 kW ; řidič: LN	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	55.000			0.015		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-83.431	-0.049	0.001	-19.027
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-83.431	2.497		71.191	3.800	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	-0.021	0.000	-0.007	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-28.976	72.882	0.540	-29.043	69.862	0.540

vozidlo/překážka: 3 - Vw / Golf5 R32; řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-87.034	0.000	0.000	-87.034
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-87.034	89.989		172.273	89.957	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-30.851	42.850	0.540	-30.851	42.850	0.540

vozidlo/překážka: 4 - Vw / Scirocco III; řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-86.608	0.000	0.000	-86.608
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-86.608	89.746		-23.642	89.916	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-34.253	96.864	0.540	-34.253	96.864	0.540

vozidlo/překážka: 5 - Vw / Touareg R5 TDI;	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-88.668	0.000	0.000	-88.668
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-88.668	-89.455		167.001	-89.918	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-34.442	101.465	0.540	-34.442	101.465	0.540

vozidlo/překážka: 6 - Vw / Touareg R5 TDI; řidič:	startovací údaje			konečné údaje		
rychlost (v) [km/h]	0.000			0.000		
úhel natočení - X,Y,Z [deg]	0.000	0.000	-87.125	0.000	0.000	-87.125
směr rychlosti (vni,vnz) [deg]	-87.125	89.971		-144.855	89.953	
uhlová rychlost - X,Y,Z (omega) [rad/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
poloha těžiště - X,Y,Z [m]	-34.888	106.730	0.540	-34.888	106.730	0.540

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: Hyundai / Lantra 2.0i GLS		2: Skoda / Felicia combi 1.3 50 kW	
										1	0.005	0.0	-28.563	0.10	1.00	18.728	6.236	9657.463	74944.052	24.968		33.312	
0.238		0.357																					
16.000	0.415	55.000	0.000																				
25.965	1.255	21.947	1.884																				
27.880		33.111																					
1.117		0.994																					

Kinematika

vozidlo/překážka: 1 - Hyundai / Lantra 2.0i GLS; řidič: DM						zatáčení - poloměr [m]	Z [m]	min. rychlost max. rychlost [km/h]	natočení - X natočení - Y natočení - Z [deg]
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	a [m/s ²]				
-5.436 -17.775 27.900	3.000	(11.250)	brzdění	0.200	-2.500	54.904	0.540	0.000 200.000	0.000 0.000 0.000
-2.236 -5.000 0.000	(2.236)	5.000	zrychlení	0.000	2.000	24.461	0.540	0.000 200.000	0.000 0.000 0.000

vozidlo/překážka: 2 - Skoda / Felicia combi 1.3 50 kW ; řidič: LN						zatáčení - poloměr [m]	Z [m]	min. rychlost max. rychlost [km/h]	natočení - X natočení - Y natočení - Z [deg]
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	a [m/s ²]				
-2.586 -51.740 75.129	(0.787)	16.434	-	0.000	0.000	-567.966	0.540	0.000 0.000	0.000 0.000 0.000
-1.799 -35.306 75.129	1.000	(20.869)	-	0.000	0.000	247.890	0.540	0.000 0.000	0.000 0.000 0.000
-0.799 -14.437 75.129	(0.799)	14.437	brzdění	0.000	-7.000	0.000	0.540	0.000 200.000	0.000 0.000 0.000

Sekvence

vozidlo/překážka: 1 - Hyundai / Lantra 2.0i GLS; řidič: DM							řzení 1 [deg]	řzení 2 [deg]	brzdění 1 [%]		brzdění 2 [%]	
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]	a [m/s ²]			vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000 0.000 16.000	-	-	zrychlení	0.000	0.000	1.500	8.000	0.000	15.296	15.296	15.296	15.296
0.100 0.671 22.647	0.100	(0.671)	brzdění	0.000	0.000	2.000	22.000	0.000	20.394	20.394	20.394	20.394
2.500 5.279 0.019	-	-	-	-	-	2.000	22.000	0.000	20.394	20.394	20.394	20.394

vozidlo/překážka: 2 - Skoda / Felicia combi 1.3 50 kW ; řidič: LN							řízení 1 [deg]	řízení 2 [deg]	brzdění 1 [%]		brzdění 2 [%]	
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]	a [m/s ²]			vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000 0.000 55.000	-	-	brzdění	0.000	1.000	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034
2.500 3.248 0.015	-	-	-	-	-	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034

vozidlo/překážka: 3 - Vw / Golf5 R32; řidič:							řízení 1 [deg]	řízení 2 [deg]	brzdění 1 [%]		brzdění 2 [%]	
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]	a [m/s ²]			vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000 0.000 0.000	-	-	brzdění	0.000	1.000	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034
2.500 0.000 0.000	-	-	-	-	-	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034

vozidlo/překážka: 4 - Vw / Scirocco III; řidič:							řízení 1 [deg]	řízení 2 [deg]	brzdění 1 [%]		brzdění 2 [%]	
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]	a [m/s ²]			vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000 0.000 0.000	-	-	brzdění	0.000	1.000	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034
2.500 0.000 0.000	-	-	-	-	-	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034

vozidlo/překážka: 5 - Vw / Touareg R5 TDI; řidič:							řízení 1 [deg]	řízení 2 [deg]	brzdění 1 [%]		brzdění 2 [%]	
čas [s] dráha [m] rychlost [km/h]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]	a [m/s ²]			vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000 0.000 0.000	-	-	brzdění	0.000	1.000	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034
2.500 0.000 0.000	-	-	-	-	-	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034

vozidlo/překážka: 6 - Vw / Touareg R5 TDI; řidič:							řízení 1 [deg]	řízení 2 [deg]	brzdění 1[%]		brzdění 2[%]		
čas [s]	dráha [m]	dt [s]	ds [m]	typ	náběh brzd [s]	čas zatáčení [s]			a [m/s ²]	vlevo	vpravo	vlevo	vpravo
0.000	0.000	-	-	brzdění	0.000	1.000	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034
0.000	0.000	-	-	-	-	-	7.649	0.000	0.000	100.034	100.034	100.034	100.034

Technické údaje

vozidlo/překážka: 1 - Hyundai / Lantra 2.0i GLS; řidič: DM			
délka [m]	4.420		
šířka [m]	1.702		
výška [m]	1.393		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	1247.000 (1247.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	535.071 (535.071)	1783.572 (1783.572)	1783.572 (1783.572)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převis přední [m]	0.830		
těžiště - přední náprava [m]	0.970		
rozvor 1 - 2 [m]	2.550		
rozchod - náprava 1 [m]	1.460		
rozchod - náprava 2 [m]	1.450		
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]	25265.687	25265.687	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	15511.213	15511.213	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	2842.390	2842.390	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	1745.011	1745.011	
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	Ano		
adheze	0.780		

vozidlo/překážka: 2 - Skoda / Felicia combi 1.3 50 kW ; řidič: LN			
délka [m]	4.237		
šířka [m]	1.635		
výška [m]	1.420		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	1050.000 (1050.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	414.951 (414.951)	1383.170 (1383.170)	1383.170 (1383.170)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převis přední [m]	0.830		
těžiště - přední náprava [m]	1.225		
rozvor 1 - 2 [m]	2.450		
rozchod - náprava 1 [m]	1.420		
rozchod - náprava 2 [m]	1.380		
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]	17167.500	17167.500	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	17167.500	17167.500	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	1931.344	1931.344	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	1931.344	1931.344	
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	0.780		

vozidlo/překážka: 3 - Vw / Golf5 R32; řidič:			
délka [m]	4.250		
šířka [m]	1.760		
výška [m]	1.460		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	1620.000 (1620.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	707.702 (707.702)	2359.008 (2359.008)	2359.008 (2359.008)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převis přední [m]	0.780		
těžiště - přední náprava [m]	1.290		
rozvor 1 - 2 [m]	2.700		
rozchod - náprava 1 [m]	1.530		
rozchod - náprava 2 [m]	1.520		
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]	27664.200	27664.200	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	25309.800	25309.800	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	3112.223	3112.223	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	2847.353	2847.353	
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	0.780		

vozidlo/překážka: 4 - Vw / Scirocco III; řidič:			
délka [m]	4.256		
šířka [m]	1.810		
výška [m]	1.404		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	1298.000 (1298.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	542.178 (542.178)	1807.261 (1807.261)	1807.261 (1807.261)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převís přední [m]	0.930		
těžiště - přední náprava [m]	1.290		
rozvor 1 - 2 [m]	2.578		
rozchod - náprava 1 [m]	1.569		
rozchod - náprava 2 [m]	1.575		
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]	21205.836	21205.836	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	21238.764	21238.764	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	2385.657	2385.657	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	2389.361	2389.361	
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	0.780		

vozidlo/překážka: 5 - Vw / Touareg R5 TDI; řidič:			
délka [m]	4.760		
šířka [m]	1.930		
výška [m]	1.720		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	2195.000 (2195.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	1151.524 (1151.524)	3838.413 (3838.413)	3838.413 (3838.413)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převís přední [m]	0.900		
těžiště - přední náprava [m]	1.380		
rozvor 1 - 2 [m]	2.895		
rozchod - náprava 1 [m]	1.660		
rozchod - náprava 2 [m]	1.670		
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]	37561.795	37561.795	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	34214.705	34214.705	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	4225.702	4225.702	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	3849.154	3849.154	
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	0.780		

vozidlo/překážka: 6 - Vw / Touareg R5 TDI; řidič:			
délka [m]	4.760		
šířka [m]	1.930		
výška [m]	1.720		
výška těžiště [m]	0.540		
poh. hmotnost [kg]	2195.000 (2195.000)		
moment setr. - X,Y,Z [kgm ²]	1151.524 (1151.524)	3838.413 (3838.413)	3838.413 (3838.413)
součinitel tření - podložka	0.500		
restituce - podložka	0.050		
počet náprav	2		
převis přední [m]	0.900		
těžiště - přední náprava [m]	1.380		
rozvor 1 - 2 [m]	2.895		
rozchod - náprava 1 [m]	1.660		
rozchod - náprava 2 [m]	1.670		
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]	37561.795	37561.795	
pružnost - náprava 2 vlevo/vpravo [N/m]	34214.705	34214.705	
tlumení - náprava 1 vlevo/vpravo [Ns/m]	4225.702	4225.702	
tlumení - náprava 2 vlevo/vpravo [Ns/m]	3849.154	3849.154	
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	0.780		

Nastavení

integrační krok [s]		0.005
ráz	hloubka překrytí [s]	0.000
	implicitní hodnota k	0.100
	implicitní hodnota tření	1.000

11.2. Výsledné protokoly PC-Crash

ČVUT V PRAZE - Education Version

Vozidlo : Hyundai-Lantra GLS 1.6 - Skoda-Felicia Combi 1.3 LXi Comfort -
Řidič : DM LN

STARTOVACÍ ÚDAJE

Rychlost (V) [km/h] :	16.00	55.05
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	21.73	-83.43
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	28.61	-83.43
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0.41	0.00
Poloha těžiště x [m] :	-28.35	-28.97
Poloha těžiště y [m] :	70.52	72.88
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0.23	2.30
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] :	0.01	-0.02

KONEČNÉ ÚDAJE

Rychlost (V) [km/h] :	0.09	0.00
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	70.81	-13.01
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	105.27	76.94
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0.00	-0.00
Poloha těžiště x [m] :	-26.21	-28.95
Poloha těžiště y [m] :	65.48	69.53
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	0.06	0.00
Klopení os y [Grad] :	0.02	-0.00
Klopení os x [Grad] :	0.00	-0.00
Klopení os y [1/sec] :	-0.02	-0.00
Klopení os x [1/sec] :	0.03	0.00

1.Kolize

Vozidlo :	1 HYUNDAI	2 SKODA-F
Řidič :	DM	LN
t [s]:	0.00	0.00
Rychlost [km/h]:	16.00	55.05
Rychlost výběhu [km/h]:	26.04	21.86
Změna rychlosti dv [km/h] :	28.00	33.25
Deformace e [m] :	0.12	0.36
EES [km/h] :	19.93	36.90
Tuhosti [kN/m]:	2490.2	863.2
k-faktor :	0.10	
Rychlost bodu rázu [km/h]:	6.2	
Tření při rázu (MUE) :	1.00	
Poloha bodu rázu x [m] :	-28.56	
Poloha bodu rázu y [m] :	71.22	
Poloha těžiště z [m] :	0.33	
Směr roviny tření (phi) [Grad] :	18.73	
Směr roviny tření (psi) [Grad] :	0.00	
Celková deformační energie [J] :	74275.09	
Impulz rázu [Ns] :	9698.57	
Směr rázové síly [Grad] :	-85.21	
Směr rázové síly vertikálně[Grad] :	1.26	
Rameno bodu rázu [m] :	0.16	0.26
Úhel bodu rázu [Grad] :	-106.94	178.22
GEV :	1.40	0.90

ÚDAJE O KOLIZI

Rychlost (V) [km/h] :	16.00	55.05
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	21.73	-83.43

DP Dibelka_01.pro - 1/4

ČVUT V PRAZE - Education Version

Směr rychlosti (NY) [Grad] :	28.61	-83.43
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	0.41	0.00
Poloha těžiště x [m] :	-28.35	-28.97
Poloha těžiště y [m] :	70.52	72.88
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	-0.23	2.30
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] :	0.01	-0.02

ÚDAJE O KOLIZI

Rychlost (V) [km/h] :	26.04	21.86
Úhel natočení (PSI) [Grad] :	21.73	-83.43
Směr rychlosti (NY) [Grad] :	-51.00	-80.71
Úhlová rychlost z(OM) [1/sec] :	1.24	1.87
Poloha těžiště x [m] :	-28.35	-28.97
Poloha těžiště y [m] :	70.52	72.88
Poloha těžiště z [m] :	0.54	0.54
Rychlost ve směru z [km/h] :	0.39	1.57
Klopení os y [Grad] :	0.00	0.00
Klopení os x [Grad] :	0.00	0.00
Klopení os y [1/sec] :	-3.38	0.04
Klopení os x [1/sec] :	0.34	1.71

SEKVENCE

1 HYUNDAI : DM

ZRYCHLOVÁNÍ

Maximální čas zrychlování [s] :	2.24
Síla zrychlení [%]	
1. náprava vlevo :	20.39
1. náprava vpravo :	20.39
2. náprava vlevo :	20.39
2. náprava vpravo :	20.39
Střední zrychlení [m/s2] :	2.00

ZATÁČ.

Čas zatáčení [s] :	1.00
Úhel natočení na [Grad]	
1. náprava :	6.36
2. náprava :	0.00
Průměr kruhu [m] :	48.87

STARTOVACÍ ÚDAJE

Rychlost [km/h] :	16.00
Součinitel tření :	0.78

ZRYCHLOVÁNÍ

Maximální čas zrychlování [s] :	0.10
Síla zrychlení [%]	
1. náprava vlevo :	15.29
1. náprava vpravo :	15.29
2. náprava vlevo :	15.29
2. náprava vpravo :	15.29
Střední zrychlení [m/s2] :	1.50

ZATÁČ.

Čas zatáčení [s] :	0.00
Úhel natočení na [Grad]	
1. náprava :	8.00
2. náprava :	0.00
Průměr kruhu [m] :	36.65

BRZDĚNÍ

maximální čas brzd [s] :	2.40
Brzdná síla [%]	
1. náprava vlevo :	20.39
1. náprava vpravo :	20.39
2. náprava vlevo :	20.39
2. náprava vpravo :	20.39

DP Dibelka_01.pro - 2/4

 ČVUT V PRAZE - Education Version

střední zpomalení [m/sec2] :	-2.00
ZATÁČ.	
Čas zatáčení [s] :	0.00
Úhel natočení na [Grad]	
1. náprava :	22.00
2. náprava :	0.00
Průměr kruhu [m] :	13.61
2 SKODA-F : LN	
REAKCE	
Reakční čas [sec] :	1.00
ZRYCHLOVÁNÍ	
maximální dráha zrychl. [m] :	100.00
Síla zrychlení [%]	
1. náprava vlevo :	0.00
1. náprava vpravo :	0.00
2. náprava vlevo :	0.00
2. náprava vpravo :	0.00
Střední zrychlení [m/s2] :	0.00
NÁBĚH.	
Čas náběhu [sec] :	0.20
BRZDĚNÍ	
maximální čas brzd [s] :	0.79
Brzdná síla [%]	
1. náprava vlevo :	0.00
1. náprava vpravo :	0.00
2. náprava vlevo :	0.00
2. náprava vpravo :	0.00
střední zpomalení [m/sec2] :	0.00
ZATÁČ.	
Čas zatáčení [s] :	1.00
Úhel natočení na [Grad]	
1. náprava :	-0.25
2. náprava :	0.00
Průměr kruhu [m] :	-1123.00
BRZDĚNÍ	
maximální čas brzd [s] :	1.00
Brzdná síla [%]	
1. náprava vlevo :	0.00
1. náprava vpravo :	0.00
2. náprava vlevo :	0.00
2. náprava vpravo :	0.00
střední zpomalení [m/sec2] :	0.00
ZATÁČ.	
Čas zatáčení [s] :	1.00
Úhel natočení na [Grad]	
1. náprava :	0.57
2. náprava :	0.00
Průměr kruhu [m] :	492.55
BRZDĚNÍ	
maximální čas brzd [s] :	0.80
Brzdná síla [%]	
1. náprava vlevo :	100.00
1. náprava vpravo :	100.00
2. náprava vlevo :	42.71
2. náprava vpravo :	42.71
střední zpomalení [m/sec2] :	-7.00
STARTOVACÍ ÚDAJE	
Rychlost [km/h] :	55.05
Součinitel tření :	0.78
BRZDĚNÍ	
maximální čas brzd [s] :	3.50
Brzdná síla [%]	
1. náprava vlevo :	100.00
1. náprava vpravo :	100.00
2. náprava vlevo :	100.00
2. náprava vpravo :	100.00

DP Dibelka_01.pro - 3/4

ČVUT V PRAZE - Education Version

střední zpomalení [m/sec²] : -7.45

TECHNICKÉ ÚDAJE

Vozidlo :	Hyundai-Lantra GLS 1.6 - Skoda-Felicia Combi 1.3 LXi Comfort -	
Řidič :	DM	LN
Délka [m] :	4.42	4.24
Šířka [m] :	1.70	1.64
Výška [m] :	1.39	1.42
Počet náprav :	2	2
Rozvor [m] :	2.55	2.45
Převis přední [m] :	0.83	0.83
Rozchod vpředu [m] :	1.46	1.42
Rozchod vzadu [m] :	1.45	1.38
Poh. hmotnost [kg] :	1247.00	1050.00
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] :	1.25	1.23
Výška těžiště[m] :	0.54	0.54
Moment setr. /os X/ [kgm ²] :	535.07	414.95
Moment setr. /os Y/ [kgm ²] :	1783.57	1383.17
Moment setr. /os Z/ [kgm ²] :	1783.57	1383.17
Pružnost 1.nápravy vlevo [N/m] :	25265.69	17167.50
Pružnost 1.nápravy vpravo [N/m] :	25265.69	17167.50
Pružnost 2.nápravy vlevo [N/m] :	15511.21	17167.50
Pružnost 2.nápravy vpravo [N/m] :	15511.20	17167.50
Tlumení 1.nápravy vlevo [Ns/m] :	2842.39	1931.34
Tlumení 1.nápravy vpravo [Ns/m] :	2842.39	1931.34
Tlumení 2.nápravy vlevo [Ns/m] :	1745.00	1931.34
Tlumení 2.nápravy vpravo [Ns/m] :	1745.01	1931.34
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 :	0.10	Ne

Rázy: 6919

DP Dibelka_01.pro - 4/4