

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta Dopravní
Ústav mechaniky a materiálů

Czech Technical University in Prague
Faculty of Transportation Sciences
Department of Mechanics and Materials

**Studium ochranných vlastností
přilby pomocí hybridní metody**

Study of protective properties of bicycle helmets
using hybrid methods

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Micka, CSc.
Studijní program: N3710 Technika a technologie v dopravě a spojích
Studijní obor: DS Dopravní systémy a technika

Praha, květen 2015

Bc. Petra Kuciaková



K618**Ústav mechaniky a materiálů**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Petra Kuciaková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Studium ochranných vlastností cyklistické přilby pomocí hybridní metody**

Název tématu (anglicky): Study of protective properties of bicycle helmets using hybrid methods

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- V obecné části uvést do problematiky cyklistických přileb. Stručně pojednat o historii, konstrukčních řešeních a normách, podle kterých se cyklistické přilby testují.
- V experimentální části bude provedena a vyhodnocena pádová zkouška cyklistické přilby. V numerické části bude vytvořen výpočetní model pádové zkoušky cyklistické helmy pro řešič LS-DYNA a PAM-Crash (simulace nárazu hlavou). Provedení výpočtu v řešiči LS-DYNA a PAM-Crash.
- Vyhodnocení výpočtu modelu pádové zkoušky pro řešič LS-DYNA a PAM-Crash, vzájemné porovnání a porovnání s výsledky provedeného experimentu.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP v textu nebo příloze


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)


Seznam odborné literatury: ČSN EN 1078 - Přilby pro cyklisty a pro uživatele skateboardů a kolečkových bruslí.
LS-DYNA User's manual, LSTC 2007
PAMCRASH/PAMSAFE User's Manual, ESI Group Software Product Company 2005

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Micka, CSc.**
Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **27. června 2014**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **31. května 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů


.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Petra Kúciaková
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 27. června 2014

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr magisterského studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

„Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

„Nemám závažný důvod proti užití 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).“

.....

podpis

Praha, květen 2015

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory výzkumného záměru MSM6840770043 a Studentské grantové soutěže SGS12/163/OHK2/2T/16.

Ráda bych touto cestou poděkovala následujícím lidem za jejich neocenitelnou pomoc při řešení této práce. Jsou jimi:

- doc. Ing. Michal Micka CSc., kterému děkuji za skvělé vedení mé práce,
- Ing. Jan Vyčichl Ph.D., který mi poskytl podnětné rady v praktické části diplomové práce,
- vedoucí pracovníci ústavu K622 Ústavu soudního znalectví v dopravě, kteří mi zapůjčili měřicí techniku,
- pracovníci Technického vývoje Škoda Auto a.s., oddělení TKF-4, kteří mi poskytli zázemí a cenné rady.

Bez těchto výše jmenovaných by zřejmě nebylo možné práci dokončit v následujícím rozsahu.

Nakonec bych také chtěla poděkovat svým nejbližším za morální podporu při vzniku mé diplomové práce a za materiální podporu v průběhu studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou cyklistických přileb, včetně jejich vývoje, technologií zpracování, používaných materiálů a legislativy, kterou se řídí jejich testování. Hlavním cílem této práce je využití metody reverzního inženýrství pro vytvoření geometrického modelu cyklistické přilby, který byl pro definici numerického modelu, na němž byly sledovány ochranné vlastnosti při pádové zkoušce. Pro tuto studii byl vytvořen virtuální model přilby dvěma metodami (3D skenování, CT snímkování). Modelu byly přiřazeny vlastnosti jako jsou u reálné pádové zkoušky. Dále bylo provedeno experimentální měření. Výsledkem této práce jsou geometrické modely získané metodou reverse engineering, výstupní hodnoty zrychlení pro numerickou analýzu a reálný experiment a stanovení hodnoty HIC.

Klíčová slova

pádová zkouška, cyklistická přilba, reverzní inženýrství, numerická analýza, LS-DYNA, Pamcrash

Abstract

This thesis deals with bicycle helmets, including their development, technology of processing, used materials and legislation which is governing their testing. The main objective of this work is using of reverse engineering for geometrical model creation of bicycle helmet. The model was used for numerical model definition. Protective properties were monitored in this model. For this study the virtual model of the bicycle helmet was created by two methods (3D scan and CT scan). The model obtained the properties which are in real drop test. Furthermore, an experimental measurement was executed. The results of this work are: models of bicycle helmet obtained by method of reverse engineering, output values for acceleration from numerical analysis and real experiment and determination values of the head injury criterion.

Keywords

droptest, bicycle helmet, reverse engineering, numerical analysis, LS-DYNA, Pamcrash

Obsah

Abstrakt	iii
Klíčová slova	iii
Abstract	iii
Keywords	iii
Obsah	iv
1 Úvod	1
2 Nehodovost cyklistů	2
3 Cyklistické přilby	6
3.1 Historie	6
3.2 Typy přileb	8
3.3 Technologie zpracování cyklistických přileb a použité materiály	12
3.3.1 Technologie In-Mold	13
3.3.2 Technologie Double In-Mold	13
3.3.3 Používané materiály	13
3.4 Požadavky na cyklistické přilby	14
4 Legislativa – normy a standardy	16
4.1 Česká republika	16
4.1.1 ČSN EN 960	16
4.1.2 ČSN EN 1078	17
4.2 Zahraniční standardy	19
4.2.1 Evropa	19
4.2.2 USA a Kanada	20
4.2.3 Austrálie, Nový Zéland a Japonsko	20
4.2.4 Porovnání jednotlivých standardů	21
5 Poranění hlavy a kritéria k jejich posouzení	23
5.1 Mechanismy poranění hlavy	23

5.1.1	Poranění obličeje	24
5.1.2	Zlomeniny lebky	24
5.1.3	Poranění mozku	25
5.2	Kritéria poranění hlavy	25
5.2.1	AIS - redukována škála zranění	25
5.2.2	GSI - Gaddův index zranění	26
5.2.3	HIC - kritérium poranění hlavy	27
5.2.4	HIP - kritérium síly dopadu hlavy	29
5.3	Poškození přilby versus poranění hlavy	29
6	Použitý software	31
6.1	Software pro numerickou část diplomové práce	31
6.1.1	VX elements	31
6.1.2	Geomagic Studio	31
6.1.3	Fiji	31
6.1.4	LS-PrePost	32
6.1.5	LS-DYNA	32
6.1.6	ANSA	32
6.1.7	META	32
6.1.8	Pam-Crash	32
6.2	Software pro experimentální část diplomové práce	33
6.2.1	NI SignalExpress	33
6.2.2	NI DIAdem	33
7	Geometrický model	34
7.1	Tvorba geometrického modelu pomocí 3D skeneru	34
7.1.1	Základní principy 3D skenování	35
7.1.2	Tvorba modelu pomocí 3D skeneru VIU Scan	36
7.1.3	Tvorba geometrického modelu pomocí aplikace Geomagic Studio	38
7.2	Tvorba modelu pomocí počítačové tomografie	40
7.2.1	Snímání cyklistické přilby počítačovým tomografem	41
7.2.2	Úprava získaných CT dat	42
8	Výpočtový model pádové zkoušky	44
8.1	Vstupní geometrické modely	44
8.2	Výpočtový model celé sestavy	44
9	Experimentální část	49
9.1	Experimentální zařízení a měřicí technika	50
9.2	Provedení experimentu	51
9.2.1	Měření dopadové rychlosti sestavy	52
9.2.2	Měření zrychlení v těžišti makety hlavy a sběr dat	53

9.3 Zpracování dat	53
10 Výsledky	55
10.1 Numerická část	55
10.2 Experimentální část	56
10.3 Porovnání výsledků	58
11 Závěr	62
Literatura	63
Appendices	67
A Výsledky	68
B Výsledky	69
Seznam symbolů a zkratk	70
Seznam obrázků	71
Seznam tabulek	73

Kapitola 1

Úvod

Cyklistiku lze považovat za jeden ze způsobů dopravy. A i v tomto druhu dopravy dochází při nehodách k těžkým úrazům a úmrtím převážně z důvodu poranění hlavy (až ze 75%). Se zvýšením bezpečnosti úzce souvisí používání ochranných cyklistických přileb. Funkčnost přilby je ovlivněna mnoha faktory: použitými materiály, tvarem přilby a také účinností náhlavního systému a podbradního řemínku. Z tohoto důvodu podléhají cyklistické přilby normám. V České republice se jedná o normu ČSN EN 1078. Jedním z posuzujících měřitelných kritérií je zrychlení, které působí při pádu na hlavu, v případě pádového testu na maketu hlavy. Díky tomu lze adekvátně porovnávat jednotlivé typy přileb. Důležitou zkouškou je pádová zkouška – schopnost tlumení a pohlcování energie vnitřní vložkou cyklistické přilby.

Právě pro tuto zkoušku je vhodné pro finanční úsporu v testovací fázi využítí numerické analýzy. Po validaci numerického modelu není nutné provádět pádovou zkoušku s fyzickými vzorky, ale postačující je numerická analýza. Aby byla numerická analýza úspěšná, je důležitá přesnost převedení cyklistické přilby do virtuálního světa a definice podmínek výpočtu. Převáděním reálných předmětů do virtuálního světa se zabývá metoda reverse engineering (např. 3D skenování, rekonstrukce modelu na základě fotografií, počítačová tomografie).

Kapitola 2

Nehodovost cyklistů

Dle [1] ze všech zaregistrovaných obětí dopravních nehod (usmrcení nebo zranění) jsou v poměru k ujeté vzdálenosti cyklisté vystaveni více než čtyřnásobně vyššímu riziku nehody než motoristé. Dalším ovlivňujícím faktorem přivodění vážného úrazu nebo smrti je bezpochyby věk cyklisty. Ve věku 30 – 39 let je toto riziko 9%, kdežto u seniorů nad 65 let se jedná téměř o 50% riziko.

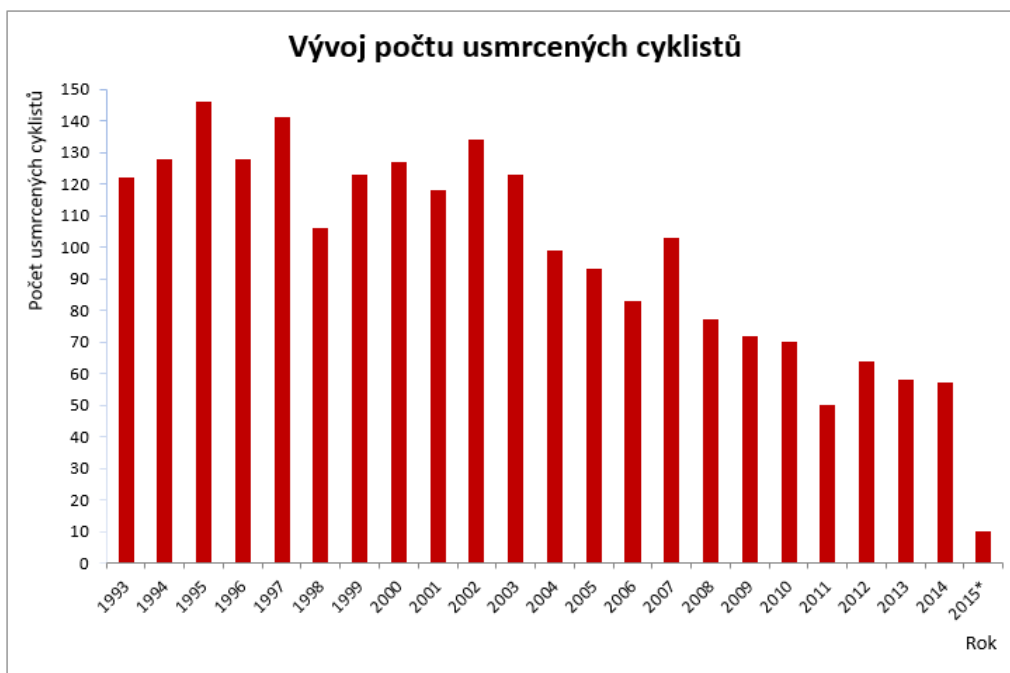
Nehody cyklistů lze rozdělit do dvou základních skupin, a to na nehody se spoluzaviněním jiného účastníka provozu (41%), nebo na nehody bez spoluzavinění jiným účastníkem provozu (59%). Tuto skupinu charakterizují zjednodušeně pády, anebo srážky. Příklady uvádím v tabulce 2.1 včetně procentuálního zastoupení.

Nejčastějšími příčinami smrtelných nehod jsou:

- nevěnování se plně řízení kola,
- nezvládnutí řízení kola,

Tabulka 2.1: Nehody bez spoluzavinění [1]

Pády	%	Srážky	%
přepad přes řídítka	27	obrubník	36
zachycení nohy v drátech	18	sloupky/branky	18
defekt jízdního kola	13	parkující vozidla	11
špatný povrch vozovky	8	stromy/sloupy	10
pád v zatáčce	7	zvířata	9
zavazadlo	6	jiné objekty/překážky	16



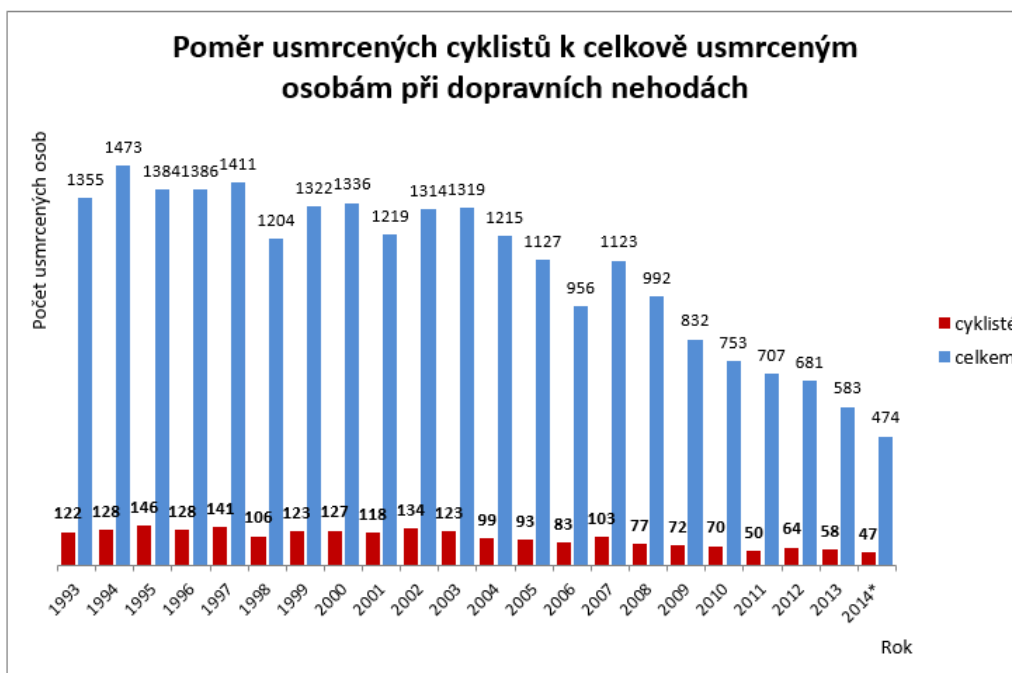
Obrázek 2.1: Vývoj počtu usmrcených cyklistů

- nedání přednosti při jízdě na silnici,
- nedání přednosti upravené značkou,
- jiný druh nesprávné jízdy,
- nepřizpůsobení rychlosti dopravně technickému stavu vozovky,
- vjetí do protisměru,
- chyby při udání směru jízdy a
- nedání vozidlu přednost zprava.

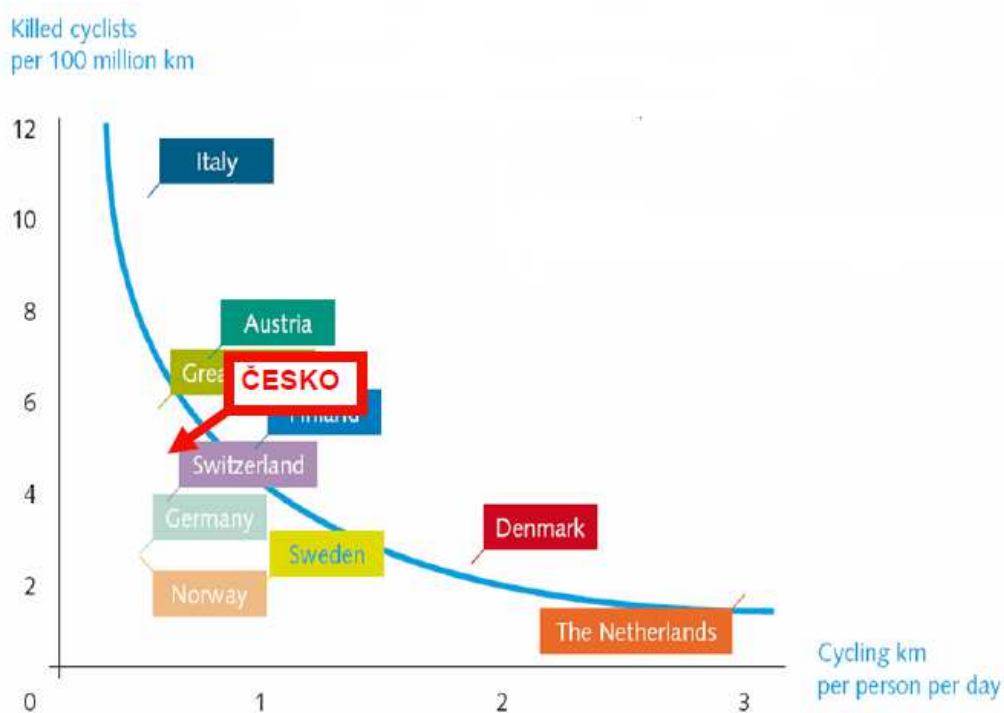
Na následujících obrázcích 2.1 a 2.2 je možné vidět statistiku nehodovosti/úmrťí cyklistů a také porovnání s celkovými úmrtími při dopravních nehodách. Hodnoty byly dohledány k 31.3.2015 [2], [3].

Následující obrázek 2.3 ukazuje stav ČR vůči jiným evropským zemím.

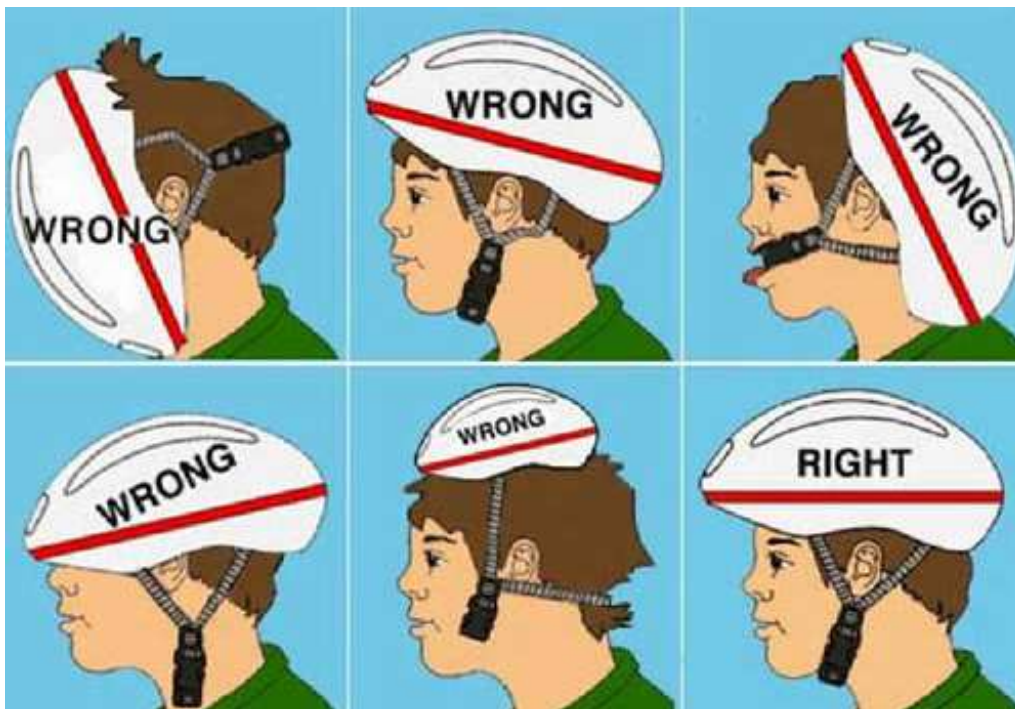
Avšak měli bychom mít na paměti, že proto, aby nás přilba chránila, je nezbytně nutné její správné usazení na hlavě 2.4. Zároveň bychom měli myslet na to, že přilba není všemocná a že by i nadále mělo být naše chování při jízdě na kole obezřetné. Právě tuto skutečnost mnohdy lidé opomíjejí.



Obrázek 2.2: Poměr usmrcených cyklistů k celkově usmrceným osobám při dopravních nehodách



Obrázek 2.3: Počet usmrcených cyklistů na množství ujetých kilometrů[4]



Obrázek 2.4: Správné usazení přilby na hlavě [5]

Kapitola 3

Cyklistické přilby

Cyklistické přilby jsou v cyklistice beze sporu velmi důležitými ochrannými pomůckami. V průběhu desetiletí zaznamenaly přilby velký pokrok, zrovna tak jako cyklistika samotná. Liší se nejen svým tvarem, který je dán jejím použitím, ale také technologií výroby a použitými materiály.

3.1 Historie

Tuto kapitolu jsem zpracovala dle [6] a [7]. Již od počátků jízdy na kole provázela poranění hlavy. Jejich počet vzrůstal s čím dál kvalitnějšími cestami, protože cesty dlážděné, šterkové nebo později asfaltové nebyly vůči zraněním vůbec přívětivé. V 2. polovině 19. století se začali cyklisté, jakožto uživatelé kostitřasů, sdružovat do spolků/klubů a debatovat nad problematikou poranění hlavy. Proto v 80. letech 19. století začali používat jako první cyklistické přilby tzv. safari klobouky, které se v té době používaly i jako součást vojenských uniforem. V té době to byla navíc dostatečná ochrana, protože na komunikacích se pohybovalo velmi málo automobilů a přilba tak chránila jen před pádem samotným, protože ani rychlosti cyklistů nebyly moc velké.

Na přelomu 19. a 20. století se ve Francii objevují první závodní podniky [8] jako propagace novin L'Auto (závod Tour de France), Le Petit Journal (závod Paříž - Brest) a Le Vélo (závod Bordeaux - Paříž) a jejichž jezdci byli vybaveni přilbami vyrobených z pásku kůže kolem hlavy, který byl polstrovaný. Nejčastější výplní byla ovčí vlna. Nástupcem této přilby se stala tzv. síťka, kdy byl polstrovaný prstenec doplněn ještě o další kožené pásky kryjící vrchní část hlavy. Jedny z nejkomfortnějších sítěk pocházely z Itálie, kde se vyráběly z jemné koží kůže. Nicméně tento druh přileb neměl dobré ochranné účinky. V případě pádu a sklouznutí po asfaltu docházelo velmi často k poranění uší. Navíc kůže nasávala pot a shnila nebo tvrdla a praskala. Tyto přilby byly

používané přibližně do 70. let 20. století. Jezdci, kteří si nutnost lepší ochrany hlavy uvědomovali, zkoušeli nosit např. hokejové přilby nebo polstrované čepice.

Ve spojených státech roku 1970 vyhlásila Snellova nadace první standard, který měly cyklistické přilby splňovat. Ale v té době prošel jen jediný druh přilby, a to lehká motocyklová přilba. Pro použití na kolo byla však vcelku nepraktická – byla těžká (vážila v průměru 0,9 kg) a nebyla vůbec odvětrávaná. Přilby byly velmi málo, pokud vůbec, certifikovány a nebyl téměř žádný způsob, jak pro spotřebitele zajistit, aby měla přilba co nejlepší ochranné vlastnosti. Roku 1974 přichází Asociace cyklistů pro washingtonskou oblast WABA společně s výborem pro cyklistiku a snaží se o sběr dat z testovacích jízd. WABA opatřila přilby z mnoha zdrojů a zjistila, že přilby se skládají z pevné skořápky a nedeformovatelné pěny. Jako první, kdo přinesl na trh deformovatelnou pěnu EPS, byly v polovině 70. let 20. století firmy Bell a MSR. Zkušenosti cyklistických klubů rychle ukázaly, že tyto přilby byly ve svém provedení daleko lepší než ostatní přilby na trhu. Na počátku 80. let 20. století přichází firma Bell s návrhem dětských přileb.

V 80. letech 20. století jsou přilby charakterizovány nejen EPS pěnou, ale také tenkou skořápkou, která se vyráběla z ABS plastu nebo z polykarbonátu. Od tohoto kroku bylo poté upuštěno. Dalším výrobcem přileb, který si pěnu EPS oblíbil (ale již bez ABS skořepiny), byla firma Giro, jejíž návrhář Jim Gentes roku 1986 navrhl přilbu jen z EPS pěny, přes kterou se navlékala tkanina z lycry. Tato přilba byla velmi lehká, a proto také oblíbená. Nicméně, tím, že se lycrový potah šil ručně v USA, byla přilba vcelku drahá, a tak si ji kupovali převážně závodníci a lidé, kteří si ji mohli finančně dovolit. Některé firmy používaly pro zpevnění EPS části přilby nylonovou síťovinu, kdy nylonová síť byla vidět ve větracích otvorech.

Rok 1990 a i zbytek 90. let 20. století se nese opět v duchu přileb s vrchní skořápkou. Tentokrát se pěna EPS pokrývá kromě plastu ABS také plastem PET. Tato konstrukce během velmi krátké chvíle nahradila jen EPS přilby nebo přilby vyztužované nylonovou síťovinou. V raných 90. letech je skořápka vyráběna odděleně od EPS pěny a poté jsou obě části slepeny dohromady. V průběhu 90. let se přilby vyrábějí tak, že se jako první do formy přilby vstříkne ABS plast a poté se forma vyplní EPS pěnou. Tato technika je z kvalitativního hlediska výhodná, protože skořápka je zcela vyplněna, tedy mezi pěnou a skořápkou se nevyskytují žádné mezery. Tento způsob výroby se udržel dodnes.

Novinkou 2. tisíciletí se staly přilby skládací viz obr. 3.1, které našly své využití hlavně v městské cyklistice. Díky své skladnosti lze přilbu nosit v tašce (kabelce) a odpadá tak nerudovská otázka, kam s ní. Přilba Morpher navržená Angličanem Jeffem Woolfem byla zatím schválena pro evropský trh a byla patentována v dubnu 2012 [9].

Dalším vývojovým krokem je systém MIPS, neboli „vícesměrový systém



Obrázek 3.1: Skládací přilba Morpher [10]

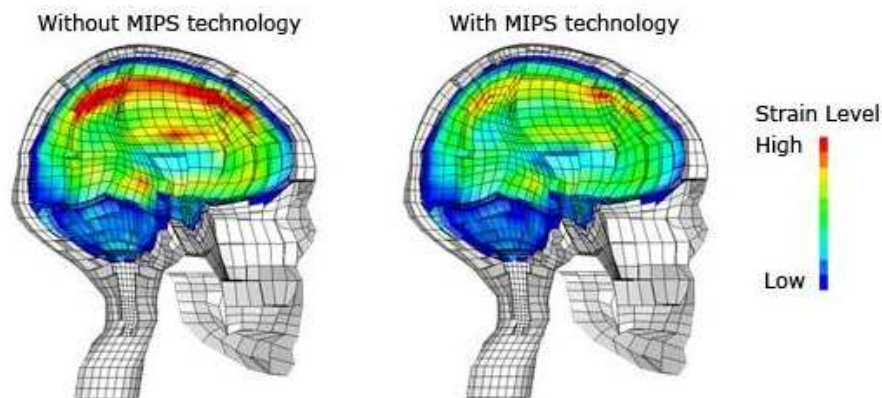
ochrany proti nárazu“ [11]. A jak sám název napovídá, jedná se o systém, který bere v potaz i jiné dopadové úhly než jen vertikální směr. Systém MIPS vznikl na základě myšlenky neurochirurga Hanse von Holsta, který tvrdil, že ochrana hlavy cyklistů, lyžařů nebo jezdců na koních je nedostatečná, vývojáře Petera Halldina a biomechanika Steineho Kleina. Systém sám o sobě je jednoduchý. Do vnitřku přilby je instalovaná tenká, na míru vyrobená, plastová vložka, která se vůči přilbě pohybuje a pohybuje se tak i vůči hlavě. Konstrukce přilby počítá s anatomíí lebky a doplňuje přirozené ochranné prostředky těla. Nejpodstatnějším ochranným prostředkem je mozkomíšní mok, který mozek obklopuje a který v případě nárazu do jisté míry umí pohltit energii a mozek tak ochránit. Podle výsledků výzkumu při úhlu dopadu 45 stupňů dojde u přileb se systémem MIPS k redukci působících sil na hlavu o 40 % 3.2. Systém MIPS je možné vidět zde 3.3.

Historický vývoj cyklistických přileb je uveden na následujícím obrázku 3.4.

3.2 Typy přileb

Orientovat se v dnešní nabídce cyklistických přileb je pro laickou veřejnost velmi obtížné. Avšak základním pravidlem, kterým bychom se měli při výběru přilby řídit, je vlastní druh jízdy, který plánujeme provozovat [12]. Tedy, s nadsázkou, požadavky na přilbu, kdy se chystáme jet na nákup, jsou odlišné od požadavků na přilbu pro závodní jezdce „časovkáře“.

Univerzální cyklistické přilby Tento typ cyklistických přileb patří mezi nejprodávanější a nejrozšířenější. Jsou běžně dostupné ve specializovaných obchodech i v hypermarketech. Vyznačují se vyšší hmotností, průměrným



Obrázek 3.2: Numerické analýza bez a se systémem MIPS [11]



Obrázek 3.3: Vícesměrový systém ochrany proti nárazu [11]

počtem větracích otvorů a také moderním designem. Vybírají se podle napsané velikosti. Dražší modely jsou pak vybaveny systémem nastavení velikosti přilby podle obvodu hlavy. Nejde o profesionální přilby, ale jsou dobrým kompromisem mezi kvalitou a cenou.

Závodní cyklistické přilby U závodních přileb je důležitá především funkčnost, která se odráží na vyšší ceně. Závodní přilby dělíme na silniční a horské. U silničních přileb je preferována nízká hmotnost, maximální odvětrání a bez štítková konstrukce. Oproti tomu přilby určené pro horská kola mají pevnější konstrukci a vyšší hmotnost. U obou typů helem se používá tzv. InMold technologie. Na dražší modely pro horská kola se používají materiály, jako je karbon, který zajišťuje lepší ochranu helmy před deformací během nárazu.



Obrázek 3.4: Historický vývoj cyklistické přilby [6] [7]

Chrono cyklistické přilby Jedná se o přilby [13], které jsou cíleně designované pro maximální aerodynamičnost. Proto její tvar umožňuje jezdcům dosáhnout nejvyšších možných rychlostí s co možná nejnižším odporem vzduchu. Tento druh přileb se testuje ve větrném tunelu. Neustálé zdokonalování tvaru pomohlo vytvořit nejhladší závodní přilbu. Snížená hmotnost a objem, prodloužená zadní část snižující větrný vír, to jsou vlastnosti přilby, které nebrání současně zajištění nejvyšší bezpečnosti jezdce.

Cyklistické přilby na freestyle Těmto speciálním přilbám se říká slangově také „kokosy“ a staly se stále častějším doplňkem sportujících teenagerů. Nejčastěji jsou k vidění na mládeži prohánějící se po městských sídlištích a skate parcích na horských kolech nebo kolech typu BMX. Hojně je využívají také skateboardisté, kteří se učí nejrůznější triky, skoky a finty na schodech či zábradlích. Přilby mají poměrně jednoduchou konstrukci silnějšího skeletu, který je doplněn vnitřní výplní s vycpávkami. Přilby nemají příliš mnoho větracích otvorů ani žádné složitosti v nastavovacím systému uchycení přilby na hlavě.

Fullface/integrální cyklistické přilby Tyto přilby jsou zvláštní tím, že chrání celou hlavu, včetně brady a jsou tak podobné přilbám motocyklovým. Používají se především v disciplínách jako sjezd, fourcross nebo BMX. Jejich obliba však roste i mezi freeridery, kteří vyznávají agresivnější styl jízdy v lese, nebo na speciálně zbudovaných překážkách a skocích. Fullface přilby mají nižší hmotnost a větší odvětrání skeletu ve spodní i horní části. Těmto přilbám se říká také „integrálky“.

Městské cyklistické přilby U těchto přileb je kromě ochranného hlediska řešen i design. Často je s těmito přilbami dodáváno i další příslušenství, např. zrcátka, ukazatele směru. V zimním období je možné doplnění o „klapky“ na uši.

Dětské cyklistické přilby Neméně důležitou skupinou jsou přilby dětské. Na trhu jich najdeme opravdu velký počet. Při výběru je ale nejdůležitější, aby dítěti dobře seděla a nebyla zbytečně velká. Rozhodně se nevyplatí šetřit takovým způsobem, že koupíte přilbu, která bude trochu větší a dítě do ní doroste. Přilba tak ztrácí svůj význam a nedokáže proto dítě vhodně ochránit.

Možné typy přileb jsou k vidění na následujícím obrázku 3.5 v pořadí: (a) univerzální, (b) závodní, (c) chrono, (d) freestyle, (e) fullface, (f) městská, (g) dětská; [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20].



Obrázek 3.5: Typy cyklistických přileb

3.3 Technologie zpracování cyklistických přileb a použité materiály

Cyklistické přilby se skládají ze tří základních částí, kterými jsou vnější plastová vrstva (shell, skořepina), pěnová vložka a upevňovací/retenční systémy (řemínky). Vnější skořepina má za úkol chránit hlavu před proražením přilby, pomáhá rovnoměrně rozkládat sílu procházející pěnovou vložkou. Pěnová vložka slouží k minimalizování nárazové energie, které je hlava vystavena.

3.3.1 Technologie In-Mold

Přilby vyráběné technologií In-Mold [21] jsou přilby, u kterých je plastová skořepina pevně spojena s pěnou tvořící hlavní nosnou část přilby. Procesně výroba probíhá tak, že se do formy umístí tenký kus plastu, který kopíruje její tvar. Poté jsou přidány kuličky polystyrenu. Forma se uzavře a pod tlakem se do ní vstříkují pára. Právě pára způsobuje expanzi polystyrenu, který začne formu vyplňovat. Plast, který je vystavený působení páry, těsně a pevně přilne k EPS pění. V přilnutí se neobjevují žádné mezery mezi jednotlivými materiály – pěna tedy vyplňuje každý volný prostor. Spojení skořepiny s EPS pěnou dává přilbě odolnost proti prasknutí v důsledku vnějšího nárazu. Pěna, která vyplňuje celý prostor, minimalizuje vliv impaktu pro jakoukoli vlastní tloušťku přilby. Skořepina dále určuje velikost, tvar a také počet větracích otvorů. Tato technologie zároveň zajišťuje možnost, aby přilby byly menší, byly lehčí a byly opatřeny větším množstvím větracích otvorů. Touto technologií je vyráběna většina prodávaných přileb.

3.3.2 Technologie Double In-Mold

Další možností, jak cyklistické přilby vyrábět, je technologie Double In-Mold. Rozdíl oproti In-Mold technologii spočívá v přidání další vrstvy skořepiny. Povrch je zpevněný tenkým plastem a to nejen na jejím vnějším povrchu, ale je jím zpevněn také vnitřní povrch přilby. Někdy je tento druh přileb zpevněn jen na vnitřní části v týlní oblasti (nikoli na celém povrchu). Tato technologie zajišťuje ještě větší pevnost. Díky této vlastnosti je však dražší než přilby vyrobené In-Mold technologií.

3.3.3 Používané materiály

Všechny materiály, ze kterých může být skořepina vyrobena, musí splňovat následujícími vlastnostmi: nízká hmotnost, pružnost a pevnost. Cenově přívětivé, běžně dostupné přilby se vyrábějí z termoplastů [22], které jsou od určité teploty tvárné a po ochlazení se stanou pevnými (přičemž tyto teplotou dané změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně). Nejčastěji je zastoupený plast ABS a také polykarbonáty a polyamidy. U přileb ve vyšší cenové kategorii se používají uhlíková a aramidová vlákna. Aramidová vlákna [23] jsou textilie z polyamidů s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, jejichž nejznámějšími zástupci jsou např. Kevlar nebo Twaron.

Pro pěnovou vložku se v současné době nejčastěji používá pěna EPS, která je velmi lehká. Dalšími používanými pěnamy jsou EPP a EPU [24].

ABS Jedná se o polymerní sloučeninu akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Chemická odolnost a tvrdost plastu je dána přítomností akrylonitrilu

se styrenem. Odolnost proti nárazu je zajišťována přítomností butadienu. ABS plast [25] je rozměrově stálý, má vysokou pevnost v tahu, tvrdý povrch a tuhost v širokém rozsahu teplot. Zároveň je flexibilní, chemicky odolný. ABS je velmi dobře mísitelný s dalšími polymery a s použitím dalších aditiv mohou vzniknout různé druhy ABS plastů.

EPS Nejrozšířenějším a nejpoužívanějším typem pěn, které se používají na konstrukci cyklistických přileb, je pěna EPS. Jedná se o tvrdý, ale také zároveň lehký plast, který se skládá z atomů vodíku a uhlíku. Pěna je vysoce odolná proti tlakovému namáhání. Proto je to právě pěnová vrstva, která určuje bezpečnost přilby. Výroba EPS začíná umístěním polystyrenových granulek do tlakové formy ve tvaru budoucí přilby. Za podmínek tlaku a vysoké teploty dochází k nabobtnání granulek až na padesátinásobek jejich původní velikosti. Zároveň je důležité zvolit ideální teplotu a tlak, aby expanze granul probíhala stejnoměrně v rámci celé formy. Pro výrobu cyklistických přileb se k běžným EPS pěnám přidávají ještě např. uhlíková vlákna, pryskyřice nebo nylon. Tyto přísady zvyšují odolnost proti vzniku trhlin. Přilby vyrobené z EPS jsou „jednorázové“ a po každém nárazu je potřeba jejich výměna.

EPP Tato pěna má obdobné využití jako pěna EPS. Avšak základní rozdíl spočívá v možnosti znovu obnovitelnosti vlastností pěny. Po nárazu se pěna postupně navrácí do původního tvaru a navrácí se také velká část ochranných vlastností. Oproti EPS pění se méně odráží (nižší koeficient restituace).

EPU Materiál se opět používá jako pěnová vložka do cyklistických přileb. Vlastnostmi je velmi podobný EPS. Nicméně je těžší, ale také pevnější.

3.4 Požadavky na cyklistické přilby

Na cyklistické přilby jsou kladeny rozličné požadavky a představy [26]. Je vhodné zdůraznit, že se jedná o požadavky na přilbu pro běžného uživatele (nikoli pro konkrétně zaměřené cyklisty). Přilba by měla být schopna pohltit maximum při střední nebo těžké srážce a udržovat úroveň zrychlení při laboratorním testu pod hranicí 200g. Zároveň by měla být opatřena silným řemínkem, který ji udrží na hlavě nejen po prvním nárazu (automobil nebo jiná překážka), ale i po druhém nárazu (silnice, chodník). Přilba pro děti a batolata by měla mít sponu s pojistkou, která drží pevně během srážky, avšak po 5 vteřinách stejnoměrného tlaku by se měla uvolnit, aby nedošlo ke škrčení dítěte. Zároveň by měla přilba mít jednoduchý, ale líbivý design a systém pro usazení, který podporuje dobrý pocit z nošení. Kromě designu a pohodlnosti, musí být přilba dobře odvětratelná. Co do povrchu má být přilba hladká a tvarem kulatá, aby

se při nárazu předešlo tříštění. Jako ne úplně vhodný se jeví aerodynamický ocas, díky němuž může dojít k natočení přilby do strany a hlava by zůstala nechráněna. V USA jsou zaváděny nové komponenty (zrcátko a nerozbitný štít), které by měly mít možnost se při nárazu oddělit. Přilba by měla být pro motoristy jasně viditelná jak v noci, tak ve dne. Přilba by měla být odolná, neměla by se poškozovat při běžném používání.

Kapitola 4

Legislativa – normy a standardy

Zkoušení přileb podléhá různým normám a standardům, které musí splňovat. Tyto normy však nepopisují jen zkoušky ochranných přileb, ale také makety hlavy, které se k těmto zkouškám používají a zkušební zařízení, na kterých se zkoušky vykonávají.

I v této oblasti platí rčení „Jiný kraj – jiný mrav“ a jednotlivé státy se k této problematice staví různě. Mají rozdílné požadavky na splnění testů i na vlastní užívání cyklistických přileb (do jakého věku je nošení přilby povinné, jestli ji mít na hlavě po celou dobu jízdy nebo jen mimo město atd).

Jedinečné postavení v této problematice zaujímají země, kterými jsou Dánsko a Holandsko. V těchto zemích panuje velká tolerance vůči cyklistům a je jim plně přizpůsobena i infrastruktura. Z tohoto důvodu mají tyto země nejnížší úroveň používání cyklistických přileb – jedná se přibližně 0,1% cyklistů a zároveň také nejnížší počet nehod cyklistů na ujeté kilometry.

4.1 Česká republika

4.1.1 ČSN EN 960

Norma ČSN EN 960 Maketa hlavy pro zkoušení ochranných přileb [27] stanovuje jednotlivé velikosti a konstrukční provedení maket hlavy, které se pro zkoušení ochranných přileb používají.

Maketa hlavy musí splňovat řadu požadavků, například materiál, který se volí dle testu, vnitřní obvod přilby a hmotnost. V tabulce 4.1 uvádím charakteristiky přileb používaných pro zkoušky odolnosti proti nárazu .

Tabulka 4.1: Parametry testovacích maket hlavy [27]

Písmenné označení	Vnitřní obvod [mm]	Hmotnost [kg]
A	495	3.1±0.10
E	535	4.1±0.12
J	575	4.7±0.14
M	605	5.6±0.16
O	625	6.1±0.18

Dle revize normy z roku 2007 jsou v normě rozlišovány 3 základní tvary maket hlavy:

- celková — svým tvarem pokrývá celou oblast hlavy od brady po temeno a včetně krku,
- tříčtvrteční — svým tvarem pokrývá oblast směrem dolů od temene pod vztahnou rovinu,
- poloviční — svým tvarem pokrývá oblast směrem dolů od temene, ale již nedosahuje vztahné roviny.

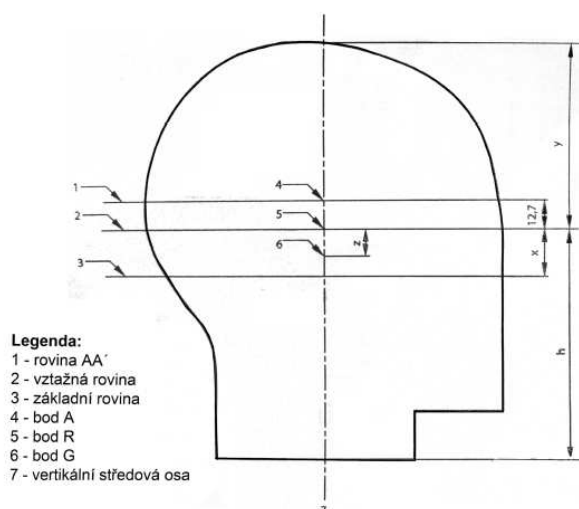
Na následujícím obrázku 4.1 je zobrazen tvar makety hlavy. Zároveň jsou na něm vyznačeny důležité roviny a body. Rovina AA' je rovina, ve které by se měl nacházet spodní okraj přidržovacího pásku přilby. Také pomáhá stanovit rozměr přilby. Základní rovina oproti tomu reflektuje základní rovinu lidské hlavy, která prochází spodními okraji očí a horní úrovní vnějších zvukovodů. Bod A je těžiště tříčtvrteční makety, v bodě G je umístěno těžiště celkové makety hlavy. Vzdálenost celkového těžiště od vztahné roviny se řídí velikostí makety. Rozměry makety jsou definovány bodem R.

Jako materiál se používá kov o nízkém rezonančním kmitočtu. Rezonanční kmitočet by neměl být však menší než 3000 Hz. Jako vhodný kov byla shledána slitina hořčíku a zirkonia (0,3% - 0,8%) o hustotě $1,79 \text{ kg/dm}^3 \pm 0,01 \text{ kg/dm}^3$. Na maketu hlavy lze použít i jiný tuhý materiál – tvrdé dřevo o hustotě 640 - 720 kg/m^3 a vlhkosti 12% nebo umělé dřevo o stejných vlastnostech).

4.1.2 ČSN EN 1078

Norma ČSN EN 1078 Přilby pro cyklisty a pro uživatele skateboardů a kolečkových bruslí vychází z normy EN 1078 z roku 1997.

Požadavky na konstrukční provedení přilby ukládají dle [28] přítomnost částí potřebných pro tlumení nárazové energie a pro udržení přilby uživatele při nehodě. Dále musí mít dostatečnou pevnost a odolávat běžné manipulaci. Musí být konstruována a tvarována tak, aby žádná její součást (zorníky, nýty, větrací otvory nebo hrany) nemohla být příčinou úrazu uživatele při běžném používání.



Obrázek 4.1: Geometrická definice makety hlavy [27]

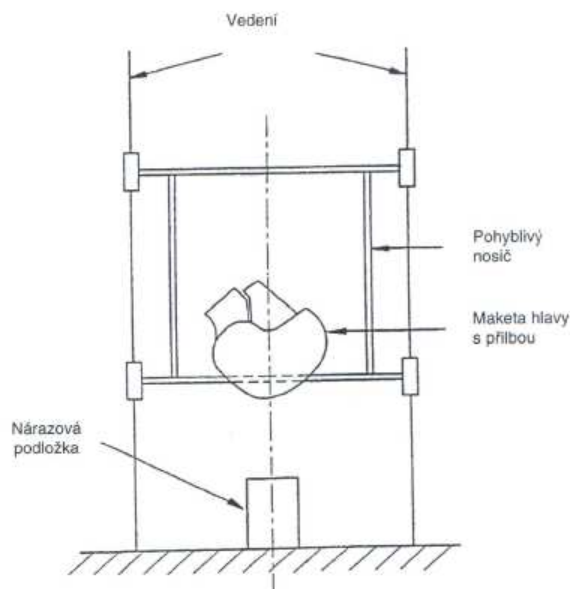
Přilba by měla:

- mít nízkou hmotnost,
- být větrána,
- umožňovat snadné nasazování a snímání,
- být použitelná spolu s brýlemi a
- málo ovlivňovat sluchovou vnímavost uživatele pro hluk způsobený dopravou.

V normě jsou popisovány následující zkoušky: odolnost proti nárazu, pevnost náhlavní vložky a snadnost jejího uvolňování a účinnost uchycení (přípevnění) náhlavní vložky.

Ve své diplomové práci se zabývám zkouškou odolnosti proti nárazu na plochou nárazovou podložku, tedy schopností tlumit náraz. Přilba musí chránit čelo, týl, boční strany, spánky a temeno uživatele. Největší zrychlení nesmí přesáhnout při každém nárazu 250 g při rychlosti 5,42 m/s (tato hodnota odpovídá výšce pádu 1497 mm).

V laboratorních podmínkách je možné provádět pádovou zkoušku dvěma způsoby. Buď se jedná o statickou sestavu přilba – maketa hlavy vybavená měřícím zařízením, na kterou dopadá pohyblivý razník. Nebo je statická dopadová podložka a pohybuje se sestava přilby s maketou hlavy. Právě tento druh pádové zkoušky jsem prováděla v laboratoři K618 Ústavu mechaniky a materiálů. Pádovou zkoušku jsem prováděla na speciálním zařízení, tzv. padostroji, a následně jako numerickou analýzu. Hlavní úlohou padostroje je



Obrázek 4.2: Zkušební zařízení pro zkoušku odolnosti proti nárazu (schopnost tlumení nárazu) [28]

zabezpečení lineárního vedení dynamického prvku, proto musí být konstrukce dostatečně tuhá, musí umožňovat nastavitelnost různých pádových výšek. Padostroj by měl stát na betonovém nebo ocelovém bloku. Na následujícím obrázku je možno vidět schematické znázornění padostroje 4.2.

Přilba s maketou hlavy vybavenou akcelerometrem je umístěna do pohyblivé části konstrukce, tzv. pojezdu, a je z určité výšky spuštěna na dopadovou podložku. Tvar dopadové podložky je opět daný normou. Plochá dopadová podložka je charakterizována dopadovou plochou o průměru 130 mm s tolerancí ± 3 mm. Dále se ještě používá dopadová podložka představující obrubník. Je definován dvěma plochami, jejichž svírající úhel činí $52,5^\circ$ s tolerancí $\pm 2,5^\circ$. Výška dopadových podložek je 50 mm. Obě nárazové podložky by měly být vyrobené z oceli.

Na tuto zkoušku se používají makety hlavy označení A, E, J, M, O. Na FD disponujeme maketou označení J.

4.2 Zahraniční standardy

4.2.1 Evropa

Standard EN 1078 je téměř totožný s českou normou ČSN 1078, proto ji zde už nebudu popisovat. Za zmínku stojí skutečnost, že pro testování přileb používá makety hlavy velikosti A, J a O, které se potom označují jako S (small), M (medium) a L (large).

BS 6863 Na vnitřní straně přilby nejsou povoleny ostré hrany. Podbradní pásky musí mít šířku mezi 15 mm a 26 mm a musí být nastavitelné bez jakýchkoli pevných částí spony. Pokud je skořápka vyrobena z termoplastické hmoty, nesmí splývat žádné nepravidelnosti vnitřního nebo vnějšího povrchu do okolního povrchu v zakřivených (obloukových) částech, jejichž poloměr zakřivení je menší než polovina tloušťky skořepiny v tomto bodě.

4.2.2 USA a Kanada

Americký národní normalizační institut (ANSI) Americký národní standard pro ochranné pomůcky hlavy - pro cyklisty norma ANSI Z90.4-1984 je historická. K 31. prosinci 1984 byla její platnost ukončena a byla nahrazena přijetím norem ASTM.

Americká společnost pro testování a materiály (ASTM) Standardní specifikace pro ochranné pomůcky hlavy používaných cyklisty, F1447-12 a F1446-11a, se zabývá zkušebními metodami cyklistických přileb, postupy užívanými při vyhodnocování vlastností charakterizující ochranné vlastnosti ochranných pomůcek hlavy. V roce 1998 byly provedeny změny v hmotnosti testovací makety hlavy, které byly uvedeny v platnost roku 2012.

Americká komise pro ochranu spotřebitele (CPSC) Norma tvrdí, že by přilba měla redukovat zrychlení, kterému je nositelova hlava vystavena a během pádu by měla zůstat upevněna na hlavě. Přídavné vybavení (sluneční štítek) nesmí způsobit zranění. Výčnělky na vnější straně přilby nesmí být větší než 7 mm a výčnělky uvnitř přilby nesmí překročit 2 mm.

Americký standard Snell B95 Tento standard vyžaduje hladký vnější i vnitřní povrch. Vnější výčnělky nesmí být větší než 5 mm. Upevňovací příslušenství na vnitřním povrchu nesmí přesahovat 2 mm. Všechny hrany musí být hladce zaoblené. Pokud se v průběhu pádu oddělí nějaká část přilby, nesmí tato část nositele zranit. Retenční systém musí být navržen tak, aby se přezka sama od sebe neuvolnila.

Kanadský standard CAN-CSA-D113.2-M Tato norma definuje přilbu jako vnější plášť a vnitřní armaturu, kterou se rozumí pěnová vložka pro tlumení nárazů a upevňovací systém. Na vnitřní straně vložky přilby nesmí být žádné pevné výčnělky. Minimální šířka popruhu retenčního systému je 12 mm. Hledí musí být odnímatelné.

4.2.3 Austrálie, Nový Zéland a Japonsko

Standard pro Austrálii a Nový Zéland Legislativa těchto ostrovů se skládá ze tří standardů. Standard 2063: 1996 (Cyklistické přilby), standard 2512.1:

Tabulka 4.2: Porovnání nejčastěji používaných standardů [29]

	EN 1078	BS:6863	Snell B-95
plochá podložka (velikost a energie)	S –M –L 46–69–90 J	52.2 J	110 J
hemisférická podl.	N/A	N/A	72 J
obrubníková podl. (velikost a energie)	S –M –L 35–49–64 J	52.2 J	72 J
počet impaktů na přilbu	2 (1 na každý terč)	2 (1 na každý terč)	4 (2 na každý terč)
celková energie dopadu	min 81 J max 154 J	104 J	min 326 J max 364 J
maximální zrychlení	250 g	300 g	300 g

1996 (Metody testování ochranných přileb - Definice a makety hlavy) a standard 2512.9: 1996 (Metody testování ochranných přileb - Stanovení jednotlivých zatěžovacích stavů). Standardy dále obecně popisují složení cyklistické přilby - materiál pohlcující nárazovou energii a zádržný systém. Všechny komponenty musí být k sobě trvale připojeny, a to včetně montážní pěny, která se smí odstranit při testování přilby. Uvnitř přilby nesmí být žádné výčnělky, které by při nehodě mohly způsobit zranění. Podbradní pásky musí být alespoň 12 mm široké.

Japonská průmyslová norma JIS T 8134-1982 Tato norma pro uživatele cyklistických přileb specifikuje, jak by přilba měla vypadat. Předpokládá pevnou hladkou skořepinu se zakulacenými okraji. Pokud je na přilbě integrováno hledí, nesmí zasahovat do zorného pole jezdce. Hlavičky nýtů nesmí vyčnívat nad 2 mm nad vnitřním povrchem a 5 mm nad vnějším povrchem. Podbradní pásek musí být pevně k přilbě uchycen. Pokud je přilba vybavena klapkami přes uši, nesmí se během jízdy odpojit.

4.2.4 Porovnání jednotlivých standardů

Zpracováno dle [29]. Výsledky jsem shrnula do následující tabulky 4.2.

Pro ostatní standardy se podařilo zjistit jen, které dopadové podložky používají a jaká jsou povolená maximální zrychlení, viz 4.3.

Tabulka 4.3: Porovnání nejčastěji používaných standardů [30]

	CPSC	Kanada	Austrálie/Nový Zéland	Japonsko
plochá podložka	ano	ano	ano	ano
hemisférická podložka	ano	N/A	N/A	N/A
obrubníková podl.	ano	ano	N/A	N/A
maximální zrychlení	300 g	250 g	300 g	400 g

Kapitola 5

Poranění hlavy a kritéria k jejich posouzení

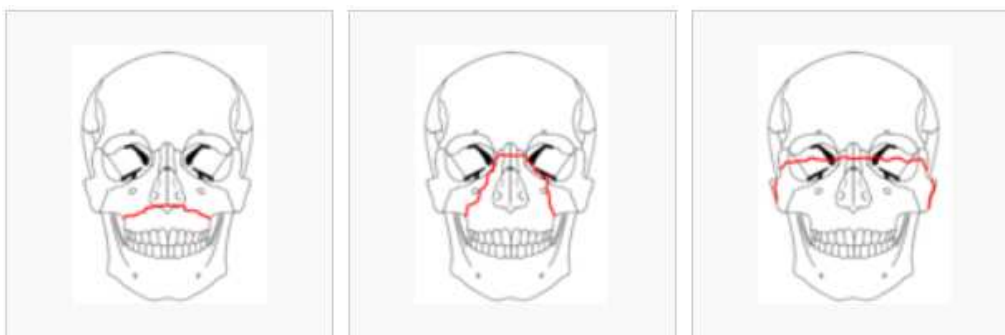
Jízda na kole je dynamický děj, a proto není možné zastavit v jediném časovém okamžiku. Z toho důvodu může používání cyklistické přilby při nehodě cyklistu uchránit před trvalými následky nebo tyto následky snížit.

Poranění lebky a mozku jsou závažná a představují, v celosvětovém měřítku, vysoký podíl úrazovosti. Tento druh poranění vzniká působením kinetické energie na lebku a mozek. Tím dochází k podmíněným reakcím a patofyziologickým změnám mozku a okolních tkání na mechanický náraz. Velikost poranění nemusí vždy odpovídat rozsahu viditelných zevních poranění hlavy a obličeje. Často může dojít ke zlomeninám klenby i spodiny lebni se závažným poraněním mozku a to vše současně bez viditelných poranění měkkých tkání.

5.1 Mechanismy poranění hlavy

Lidský obličej a hlava jsou navzájem propojeny švy a kostním spojením. Tyto kosti jsou různě silné (tlusté) a jsou i jinak zakřivené, tím dostáváme velké množství biomechanických dat. Na počátku 20. století proběhla studie [31] zabývající se mapováním typických zlomenin obličejových partií po frontálním impaktu, jak je možno vidět na obr. 5.1. Mezi tři nejvýznamnější poranění hlavy, která jsou způsobena přímým dopadem nebo přímým vysokým zrychlením, patří:

- poranění mozku – způsobené přímým dopadem nebo vysokými zrychlením,



Obrázek 5.1: Linie zlomenin obličejových kostí Le Fort I, II, III [32]

- poranění lebky – způsobené přímým dopadem
- poranění obličeje, pohmoždění a zlomeniny obličejových kostí – způsobené přímým dopadem.

V závislosti na jejich charakteru jsou zranění rozdělena dle [33] následovně:

- otevřená zranění – cizí předmět během nehody penetruje do mozkové tkáně (po proražení lebky dochází k přímému kontaktu s mozkovou tkání) a
- uzavřená zranění – v tomto případě nedochází k průrazu lebky a ani k tvorbě trhlin na lebečním povrchu.

5.1.1 Poranění obličeje

Ve velké míře se u poranění obličeje jedná o kosmetický aspekt, zranění hůře vypadá, než jakým ve skutečnosti je. Avšak závažnost poranění spočívá v možnosti poranění očí s následnou poruchou/ztrátou zraku, zborcení obličejových kostí nebo krvácení z nosu a z úst. Rovněž komplikace v podobě krvácení, uvolněných zubů nebo cizího tělesa v ústní dutině může ohrožovat lidský život vdechnutím nebo udušením.

5.1.2 Zlomeniny lebky

Zlomeniny lebky obvykle nejsou smrtelné a vyjma těžkých případů nezanechávají trvalé zdravotní postižení. Zlomeniny jsou zpravidla lineární nebo impresivní. Lineární zlomeniny vznikají tupým nárazem působícím na širokou plochu lebky. Okraje lomu se od sebe oddálí a pak se vrátí zpět. Impresivní zlomeniny vznikají přímým úderem ostrého předmětu na malou plochu. Vzniklé úlomky jsou vtlačeny do nitrolebního prostoru.

5.1.3 Poranění mozku

Obecně lze mozková poranění rozdělit na dvě velké skupiny [34]. Jedná se o zranění difúzní a zranění fokální.

Fokální zranění [35], [36] jsou způsobena přímým dopadem k umístění oblasti mozku v rozsahu od menších podlitin až k přímé penetraci mozku. Nejčastěji vyskytujícími se zraněními jsou zranění označovaná jako "3K": komoce mozku (otřes), kontuze mozku (zhmoždění) a komprese mozku (stlačení). Otřes mozku je krátkodobá reverzibilní funkční porucha vědomí bez anatomických změn poškození mozku. Zhmožděním mozku se rozumí ložiskové poškození mozkové tkáně důsledkem prudkého nárazu lebky na předmět. Ložisko poškození může vzniknout i na opačné straně od působící síly nebo na protilehlé straně nárazu. Stlačení mozku je mechanické, sekundární poškození, které je způsobené utlačováním tkáně intrakraniálními krevními hematomy.

Zranění difúzní [36], [37], [38] jsou způsobena vysokými zrychleními, kterým je mozek vystaven a může způsobit široké spektrum zranění (od mírného otřesu až po smrt). Postihují větší oblast než předchozí typ. Těžší variantou je například difúzní axonální poranění, při kterém dochází k střížnému pohybu mezi bílou a šedou hmotou mozkovou. Bílá mozková hmota se může natáhnout takovým způsobem, že dojde k jejímu poškození a její následné degradaci. U takto postižených obětí dochází ke ztrátě vědomí, ze kterého už nemusí být probuzeni. Právě na difúzní zranění připadají až tři čtvrtiny poranění hlavy při dopravních nehodách.

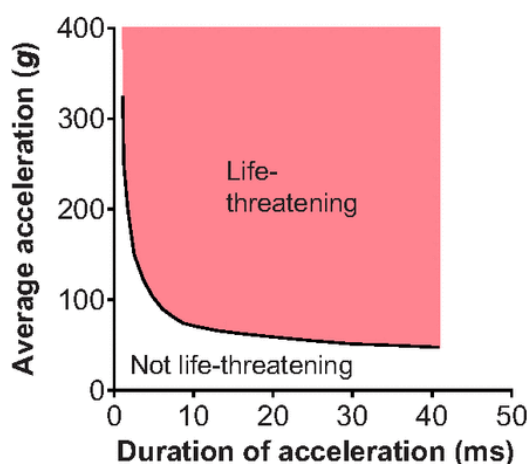
5.2 Kritéria poranění hlavy

Poranění hlavy a obličeje vzniklé nahodilým silovým účinkem mají pro člověka často vážné následky.

Pro popis závislosti mezi mechanickým působením a biomechanickou odezvou je pro zkoumání potřeba definovat kritéria, která vyjadřují míru předpokládané biomechanické odezvy na mechanické zatížení. Zranění vzniká tehdy, když biomechanická odezva překročí limitní hodnotu a v biologickém systému dochází k nevratným změnám. Exaktní vyjádření hranice tolerance organismu na vnější zátěž charakterizují různá kritéria (stupnice, škály).

5.2.1 AIS - redukováná škála zranění

Redukovaná škála zranění [39] je nejznámějším anatomickým číselným vyjádřením používaným na celém světě.



Obrázek 5.2: Křivka WSTC [41]

Tato stupnice byla stanovena pro zranění vznikající při nárazu a rozeznává 6 úrovní zranění:

0 – bez zranění, 1 – lehké zranění, 2 – střední zranění, 3 – vážné zranění, 4 – těžké zranění, 5 – kritické zranění a 6 – maximální zranění (zranění neslučitelné se životem).

5.2.2 GSI - Gaddův index zranění

Kvantifikování hodnot zrychlení a časového účinku přetížení při zraněních vzniklých v oblasti hlavy se vyjadřuje pomocí křivky WSTC [40],[41]. WSTC určuje vzájemný vztah mezi přetížením a délkou trvání přetížení, viz obr. 5.2 . Kombinací přetížení a jeho délkou trvání vznikají poranění o různých intenzitách. WSTC popisuje takové kombinace, při nichž dochází ke zraněním životu nebezpečným (hranice smrti). Podkladem pro tuto křivku byly tři oblasti silového působení:

- přetížení trvající 1-6 ms (krátký impuls) nevyhnutelné pro vznik fraktury lebky (většinou spojené s otřesem mozku). Objektem zkoumání byly lidské mrtvolky.
- přetížení trvající 6–10 ms (středně dlouhý impuls). Objekt zkoumání — porovnání odezvy u lidských mrtvol a zvířecího mozku,
- dlouhý impakt, dlouhá doba brzdění pohybu hlavy. Objekt zkoumání – dobrovolníci. Takovéto přetížení nezpůsobilo žádné zranění.

Na základě těchto měření byla sestrojena asymptota křivky (původně pro 42 g, později byla tato hodnota ustálena na 80 g).

$$GSI = \int_{t_1}^{t_2} a^{2,5}(t) \quad (5.1)$$

kde a je zrychlení při nárazu vyjádřené v násobcích gravitační konstanty g , t je impakt, čas zátěže. Tento index signalizuje, že při překročení kritické hodnoty $GSI \geq 1000$ vznikají podmínky pro počátek netolerovaného nebezpečného tupého nárazu. Gadd uvádí, že pro otřes při čelním nárazu je maximální přípustná hodnota $GSI = 1000$. Pokud se jedná o nekontaktní náraz, je maximální přípustná hodnota rovna 1500.

5.2.3 HIC - kritérium poranění hlavy

Kritérium poranění hlavy HIC [42], [34] je nejčastěji používaným kritériem pro posouzení poranění hlavy. Jeho hodnotu je možné určit na základně následujícího vztahu:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \right\}_{max} \quad (5.2)$$

kde a reprezentuje zrychlení při nárazu v násobcích gravitačního konstanty g , t je doba impaktu (délka času zátěže).

Ze vztahu můžeme rovněž pozorovat, že kromě zrychlení bere v potaz také čas, po který je lidský mozek zrychlení vystaven. Mozek je schopen vydržet hodnotu zrychlení 200 g , ale jen po dobu 2 ms, aniž by došlo k jeho trvalému poškození. Zde platí, že čím nižší je hodnota zrychlení, tím delší době mu může být mozek vystaven (pro zrychlení 80 g se jedná už o 200 ms).

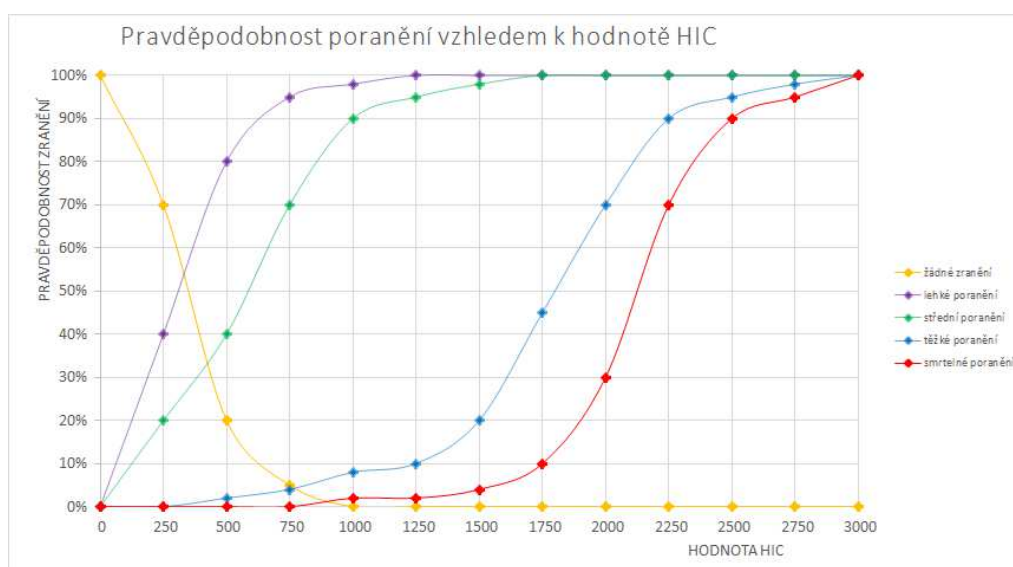
Výsledná hodnota kritéria by však dle [42] neměla přesáhnout hodnotu 1000, která je hodnotou hraniční mezi úrazy velmi vážnými a smrtelnými a těmi, které lze přežít. Na základě hodnoty HIC lze určit pravděpodobnost, k jakému zranění dojde, viz obr. 5.1 a obr. 5.3.

Hodnoty kritéria HIC je také možné uvádět ve vztahu se stupnicí AIS, jak je možné vidět v následující tabulce 5.2.

I když lze toto kritérium považovat za mocný nástroj, kterým beze sporu je, nezahrnuje úhlový pohyb hlavy, který má také za následek poranění. Je ho možné použít jen pro "tvrdé" nárazy hlavy, protože vychází z metody WSTC, která je odvozena jen od zatížení v předozadním směru. Také nebere v potaz anizotropii lidského mozku a hlavu předpokládá jako rigidní těleso [43].

Tabulka 5.1: Pravděpodobnost zranění vzhledem k hodnotě HIC [44]

HIC	Žádné zranění	Lehké zranění	Střední zranění	Těžké zranění	Smrtelné zranění
0	100%	0%	0%	0%	0%
250	70%	40%	20%	0%	0%
500	20%	80%	40%	2%	0%
750	5%	95%	70%	4%	0%
1000	0%	98%	90%	8%	2%
1250	0%	100%	95%	10%	2%
1500	0%	100%	98%	20%	4%
1750	0%	100%	100%	45%	10%
2000	0%	100%	100%	70%	30%
2250	0%	100%	100%	90%	70%
2500	0%	100%	100%	95%	90%
2750	0%	100%	100%	98%	95%
3000	0%	100%	100%	100%	100%



Obrázek 5.3: Pravděpodobnost zranění vzhledem k hodnotě HIC [45]

Tabulka 5.2: Stupeň vědomí ve vztahu k hodnotě HIC a AIS [34]

Hodnota HIC	Stupeň AIS	Stupeň vědomí a poranění hlavy
135 – 519	1	bolest hlavy, závratě
520 – 899	2	bezvědomí méně než 1 hodinu, lineární zlomeniny
900 – 1254	3	bezvědomí 1 – 6 hodin, vpáčené zlomeniny
1255 – 1574	4	bezvědomí 6 – 24 hodin, otevřené zlomeniny
1575 – 1859	5	delší než 25 hodin, rozsáhlé hematomy
> 1860	6	zranění neslučitelná se životem

5.2.4 HIP - kritérium síly dopadu hlavy

Kritérium bylo formulované v roce 2000. Dle [46], [47] toto kritérium již přihlíží i k účinkům úhlových zrychlení, která vznikají během kontaktu hlavy s cizím předmětem. Kritérium zachycuje poměr změny translačního (první závorka vztahu) a rotačního (druhá závorka vztahu) kinetické energie, jak je možno vidět v následujícím vztahu.

$$\begin{aligned} HIP = & (C_1 a_x \int a_x dt + C_2 a_y \int a_y dt + C_3 a_z \int a_z dt) + \\ & + (C_4 \alpha_x \int \alpha_x dt + C_5 \alpha_y \int \alpha_y dt + C_6 \alpha_z \int \alpha_z dt) + \end{aligned} \quad (5.3)$$

I toto kritérium je za pomoci měřicí techniky pozorováno v těžišti makety hlavy. Koeficienty C_1 , C_2 , C_3 představují hmotnost makety hlavy v kg a koeficientu C_4 , C_5 , C_6 reprezentují momenty setrvačnosti k jednotlivým osám souřadného systému v ms^{-2} . Translační zrychlení je zde vyjádřeno pomocí a_x , a_y a a_z a α_x , α_y a α_z představují úhlová zrychlení v rads^{-2} .

Toto kritérium, je časově závislé a jeho výsledkem je maximální hodnota funkce pokrývající náraz v průběhu celého časového intervalu. [48] uvádí, že získaná hodnota představuje maximální vstupní sílu, které je mozek vystaven a z které je potom odhadován rozsah poranění.

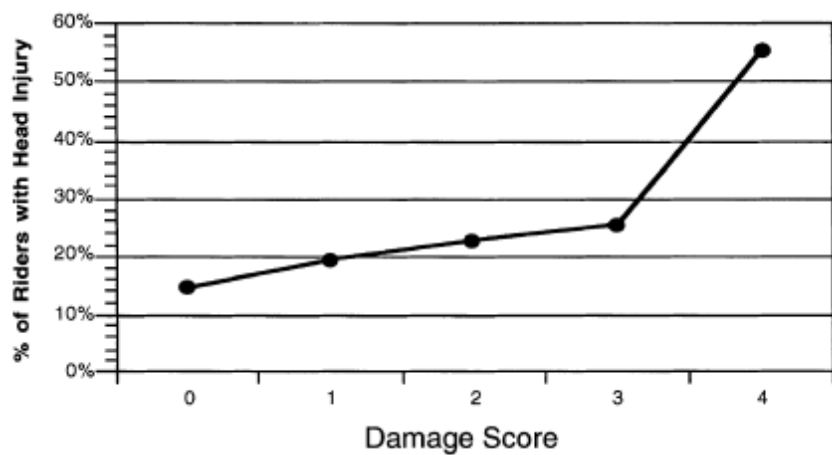
5.3 Poškození přilby versus poranění hlavy

Zpracováno dle [49]. Již v minulosti byl prokázán vztah mezi poškozením přilby a případným poraněním hlavy.

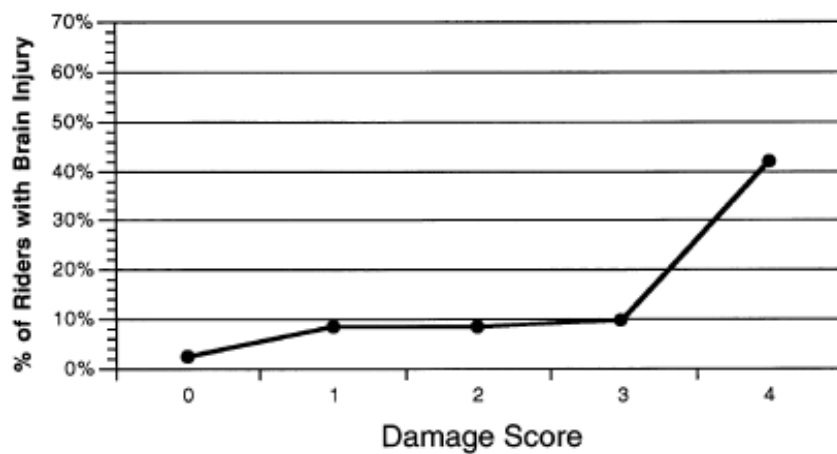
Studie vycházela z 3390 nehod cyklistů, kde přibližně 50% účastníků mělo během nehody nasazenou přilbu. Jednalo se o cyklisty bez rozdílu pohlaví a v různých věkových kategoriích. Na základě diagnózy pacienta a prohlídky jeho přilby byla stanovena závislost pravděpodobnosti poranění mozku na poškození přilby (5.5) a závislost pravděpodobnosti poranění hlavy v závislosti na poškození přilby (5.4).

Po vyhodnocení byla jednotlivá poškození přileb rozdělena do pěti stupňů:

0. stupeň – nepoškozené přilby (40% vzorků)
1. stupeň – neporušená vnitřní vložka, jen vnější poškození (20% vzorků)
2. stupeň – na vnitřní vložce pozorovány změny, nikoli praskliny (18% vzorků)
3. stupeň – prasknutí vnitřní vložky po celé své tloušťce nebo velké zdeformování vložky (14% vzorků)
4. stupeň – ztráta integrity přileb (8% vzorků).



Obrázek 5.4: Pravděpodobnosti poranění hlavy na poškození přilby [49]



Obrázek 5.5: Pravděpodobnosti poranění mozku na poškození přilby [49]

Kapitola 6

Použitý software

Pro vypracování své diplomové práce jsem použila řadu aplikací. Specializované nástroje jsem použila nejen při tvorbě modelu, ale i při provádění experimentu na padostroji. Proto tedy aplikace rozdělují do dvou skupin: na software použitý při tvorbě modelu, simulaci pádové zkoušky, jejího vyhodnocení a na software použitý během reálné pádové zkoušky a následně pro jeho vyhodnocení.

6.1 Software pro numerickou část diplomové práce

6.1.1 VX elements

Jedná se o plně integrovaný software sloužící k získávání 3D dat vyvinutý společností Creaform [50]. Skládá se z následujících softwarových modulů: VXscan , VX sonda , VX shot. Tato platforma sdružuje všechny potřebné prvky a nástroje v uživatelsky přívětivém a intuitivním pracovním prostředí.

6.1.2 Geomagic Studio

Geomagic Studio [51] je kompletní sada nástrojů pro transformaci 3D naskenovaných dat používaných zejména v reverzním inženýrství nebo v designu výrobků. Aplikace nabízí automatizované nástroje, které umožňují uživatelům tvorbu kvalitních modelů. Zabývá se celým cyklem tvorby modelu - od 3D naskenování až po možný 3D tisk.

6.1.3 Fiji

Fiji [52] je aplikace založená na editoru ImageJ a slouží k analyzování a upravování obrázků v rozličných formátech (TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM,

FITS a RAW). Umožňuje implementaci řady různých knihoven. Jedná se o svobodný software.

6.1.4 LS–PrePost

Společnost LSTC [53] nabízí tento svobodný software jako podpůrný software řešiče LS–Dyna. LS–PrePost umožňuje tvorbu, definici numerických modelů a po provedení analýzy také zobrazení vypočítaných výsledků.

6.1.5 LS–DYNA

LS–Dyna [54] je řešič, tedy slouží k vlastním numerickým analýzám. Je určený pro rychlé dynamické děje, které jsou spojené s velkými deformacemi, protože ty leží mimo řešitelnou oblast běžných FEM softwarů.

6.1.6 ANSA

ANSA je dle [55] moderní multidisciplinární CAE nástroj pro preprocessing (předpracování) dat, který poskytuje všechny potřebné funkce pro celkové vytvoření modelu. Vstupním souborem jsou CAD data, která jsou zpracovávána v jediném integrovaném prostředí. Pro svoji všestrannost a schopnost řešit spoustu úloh je velmi vyhledávaným nástrojem nejen v automobilovém průmyslu.

6.1.7 META

Jedná se o účelný postprocessor, který dle [56] nabízí interakci mezi animacemi, grafy, videy, zprávami a dalšími objekty. Dále poskytuje širokou škálu funkcí, kterými lze úspěšně řešit i ty nejnáročnější požadavky na strukturální analýzu. Zároveň podporuje i načítání výsledků z ostatních solverů (řešičů) nebo též podporuje data neutrálních formátů ASCII, Universal nebo ASCII Patran.

6.1.8 Pam–Crash

Pam–Crash je plně integrovaná a efektivní aplikace využívaná převážně, stejně jako ANSA, v automobilovém průmyslu pro simulace crash testů a konstrukcí bezpečnostních systémů pro cestující. Zohledňuje i jednotlivé výrobní efekty (lití, hydroforming, kontinuální svařování), které mají přímý dopad na celkovou odolnost proti nárazu [57].

6.2 Software pro experimentální část diplomové práce

6.2.1 NI SignalExpress

Aplikace NI SignalExpress [58] je interaktivní aplikace, která umožňuje rychlý sběr dat o velkém datovém objemu. Lze v ní provést i vyhodnocení a prezentaci výsledků. Nevyžaduje naprogramování.

6.2.2 NI DIAdem

NI DIAdem [59] je softwarový nástroj, který slouží k rychlému hledání, načítání, zobrazování/vizualizaci a analýze naměřených dat nebo k vytvoření průběhu simulací. Je navržen tak, aby splňoval požadavky dnešních testovacích prostředí, které vyžadují rychlý přístup, zpracování a podávání reportů z dat o velkých objemech.

Kapitola 7

Geometrický model

Jednou ze ztěžejších částí mé diplomové práce je vytvoření geometrického modelu cyklistické přilby. Cest, jak se dostat ke kvalitnímu geometrickému modelu, je několikero. Patří sem například parametrický model, 3D skenování nebo tvorba modelu pomocí počítačové tomografie.

Nejčastěji používanou metodou je parametrický model. Metoda spočívá ve změření objektu a vytvoření modelu pomocí parametrického modelování. Pro tento způsob je nezbytné přesné změření daného objektu. Jedná se o metodu velice přesnou, ačkoli nepoužitelnou pro složité objekty. Tyto objekty není možné přesně změřit a získat tak geometrický model.

3D skenování je další metodou pro tvorbu geometrického modelu. Touto metodou lze tvořit i modely složitějších objektů. Nabízí vysokou přesnost, a přitom není nutné znát jejich přesnou geometrii. Objekty lze skenovat dvěma způsoby: kontaktně a bezkontaktně.

Počítačová tomografie je převážně známa z lékařského prostředí, ale je možné ji úspěšně používat i v technických oblastech.

Skenování může probíhat i za pomoci destruktivních nebo ultrazvukových skenerů, avšak toto použití je vzácné.

Takovéto způsoby tvorby geometrického modelu se nazývají reverse engineering.

7.1 Tvorba geometrického modelu pomocí 3D skeneru

Tato metoda zaručuje možnost vytvářet modely i složitých objektů s vysokou přesností bez předchozí znalosti jejich přesné geometrie. 3D skenování lze provádět dvěma základními způsoby, a to buď kontaktním, nebo bezkontaktním skenováním. Volba metody skenování závisí především na daném skenovaném objektu a také přesnosti.



Obrázek 7.1: Kontaktní skenery [61],[62]

7.1.1 Základní principy 3D skenování

3D skenery můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na skenery kontaktní (mechanické) a bezkontaktní (optické, laserové).

Kontaktní skenery [60] Princip zařízení spočívá ve fyzickém „ohmatání“ objektu hrotem, který je zavěšený na mechanickém ramenu. Rameno má v každém kloubu senzor, který zaznamenává natočení ramena v daném místě. Poloha skenovaného bodu se získá vyhodnocením údajů ze všech kloubů ramena. Před skenováním je vhodné na objektu vyznačit body, které se musí nasnímat, aby se získal přesný digitální obraz objektu. Počet bodů je závislý na složitosti objektu a také na požadované přesnosti. Výstupem těchto zařízení je velké množství bodů definovaných třemi souřadnicemi (x, y, z). Touto metodou se nedají získat informace o textuře povrchu tělesa. Kromě postupu, kdy se rameno ovládá ručně, lze využít i principu CNC frézky s inverzním tokem dat. Oba dva druhy skenerů je možno vidět na obrázku 7.1.

Bezkontaktní skenery [60] Laserový skener pracuje na stejném principu jako například sonar. Využívají se vlastnosti laserového paprsku. Vlastní skenování spočívá v kolmém vyslání laserového paprsku proti předmětu. Laserový paprsek, který se odrazí od povrchu objektu se vrací zpět do skenovacího zařízení, kde se vyhodnotí. Vyhodnocením doby, která uplyne od vyslání paprsku do jeho vrácení, získáme informaci o rozměru objektu ve směru pohybu paprsku. Informace o zakřivení povrchu vychází z úhlu, pod kterým se paprsek vrací zpět do zařízení. Spojením obou dvou základních informací skener získává přesnou polohu bodu, kterou odešle do počítače. Výstupem je soubor dat v polygonech definující geometrii povrchu tělesa.



Obrázek 7.2: Bezkontaktní ruční 3D skener [63]



Obrázek 7.3: Cyklistická přilba Giro Skyline [64]

Fakulta dopravní disponuje bezkontaktním ručním 3D zařízením VIU Scan firmy Creaform 7.2.

7.1.2 Tvorba modelu pomocí 3D skeneru VIU Scan

Předlohou pro tvorbu modelu jsem použila cyklistickou přilbu značky Giro, model Skyline, viz obr. 7.3.

Abych mohla přilbu ručním 3D skenerem skenovat, musela jsem přilbu upravit. Tyto úpravy však musely umožnit skenování, ale nesměly ovlivnit přesnost výsledného modelu. Příprava přilby na skenování spočívala v odstranění veškerého příslušenství, například slunečního štítku, upevňovacích pásků, komfortních molitanových vycpávek a šroubu na nastavování velikosti).

Skořepina cyklistické přilby byla provedena v lesklé úpravě. Ze zkušenosti z mé bakalářské práce [45] jsem věděla, že lesklý povrch není pro 3D skenování vhodný, a proto jsem i tuto přilbu přelakovala matným černým lakem (zn. Vallejo – k dostání v potřebách pro modeláře).

Fakultní 3D skener VIU Scan využívá k určení své polohy vůči skenovanému objektu reflexních pozičních značek (terčičků, targetů). Poziční terčičky fungují na



Obrázek 7.4: Přelakovaná a pozičními terčičky polepená přilba

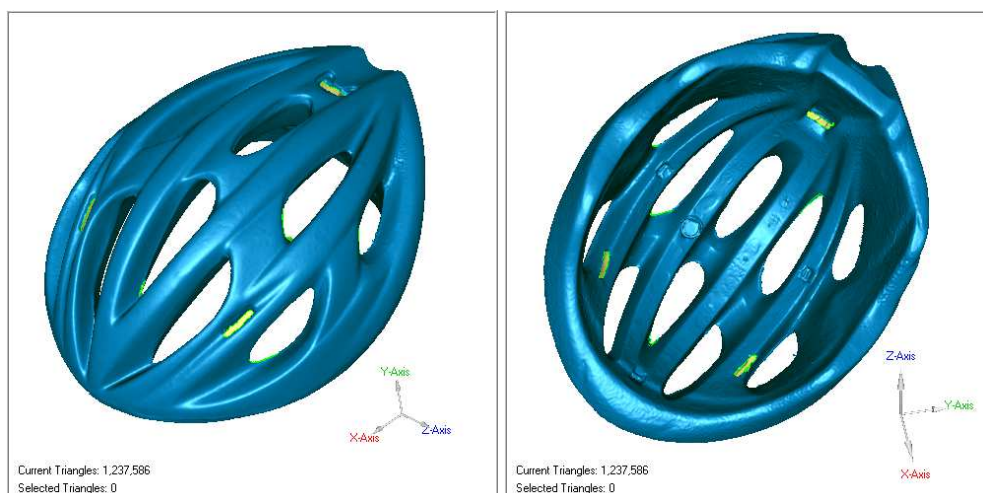
principu samolepky a měla jsem je dostupné ve dvou variantách: v jednobarevné reflexní úpravě, nebo jako mezikruží s reflexním středem a černým vnějším ohraničením.

Protože jsem předem upravila povrch přilby, postačily pro skenování jednobarevné reflexní terčičky. Tyto terčičky jsem náhodně nalepila po povrchu skenovaného předmětu ve vzdálenosti 2 – 2,5 cm daleko od sebe tak, aby pod každým úhlem, ze kterého bude skenování probíhat, bylo vidět dostatečné množství terčičků pro určení polohy skeneru (optimálně 6 a více terčičků). Přelakovanou a pozičními terči polepenou přilbu jemožné vidět na obrázku 7.4.

Před samotným použitím skeneru jsem musela provést činnost „2K“: kalibraci a konfiguraci skeneru.

Kalibrace skeneru slouží k naladění skeneru pro dané světelné podmínky v daném prostředí. Kalibrace se provádí za pomoci speciální podložky, která je určena pro konkrétní typ skeneru, ve spolupráci s kalibračním protokolem skeneru.

V dalším kroku, tedy konfiguraci, dochází k nakonfigurování skeneru pro daný materiál. Při konfiguraci se skener namíří na skenovaný objekt a samočinně mění svoji konfiguraci, při čemž vyhledává optimální nastavení. V průběhu konfigurace je vhodné mírně měnit zaměřované místo a skener pomalu přibližovat a vzdalovat od skenovaného objektu, čímž se zajistí, že skener bude nakonfigurován na celý povrch (nikoli jen na jeden bod). Rovněž je možné ruční nakonfigurování skeneru – nastavuje se intezita laseru (0 – 100%) a doba závěrky (max. 30 ms). I když jsem přelakovala přilbu stejným lakem, musela jsem provést konfiguraci při přechodu z vnější skořápky na vnitřní stranu přilby, protože polystyrenová vložka část barvy absorbovala a povrch byl drsnější.



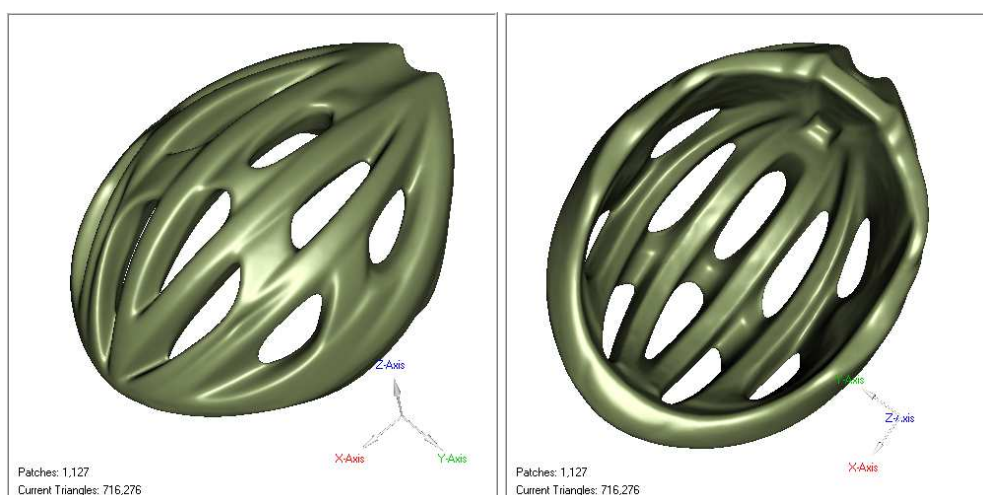
Obrázek 7.5: *.stl model získaný z 3D skeneru z vnější a vnitřní strany

Než jsem začala skenovat vlastní přilbu, nasnímal jsem polohy jednotlivých pozičních terčů. Prostředí VXelements umožňuje uložit soubor s pozicemi terčů, který lze otevřít i při dalším skenování. Tento soubor lze dále upravovat, např. mazat terče. Průběh skenování lze po celou dobu sledovat na monitoru. Díky matnému nástrihu na přilbě jsem mohla použít laser nastavený na vyšší intenzitu. Laser byl proto vidět na povrchu přilby, což mi usnadňovalo orientaci při skenování. Během skenování se mi podařilo nasnímat i část podložky. Plochy nesouvisějící s modelem jsem ořízla v prostředí VXelements. Výsledný naskenovaný model jsem uložila ve formátu *.stl. Výsledný *.stl model si lze prohlédnout na následujícím obrázku 7.5.

Tento formát je podporován velkou většinou aplikací, které pracují s 3D modely. Popisuje prostorový objekt pomocí uzlových bodů a normál ploch mezi těmito body.

7.1.3 Tvorba geometrického modelu pomocí aplikace Geomagic Studio

Výsledný *.stl model obsahoval řadu chyb a nedokonalostí, které neumožňovali přímé převedení na model geometrický. Takovýto model jsem musela patřičně zpracovat, tedy data doplnit, upravit. K tomuto účelu mi posloužila aplikace Geomagic Studio. Po načtení modelu jsem pomocí funkce opravy povrchové sítě detekovala uzly, které nezapadaly do koncepce povrchu, a vyhladila jsem je. Dále jsem zacelila velmi malé otvory, místa, kde chyběly trojúhelníkové plošky, případně průsečíky protínající sebe sama. Poté jsem zacelila všechny diskontinuity povrchu. V této fázi jsem musela brát v potaz možnosti, které tuto funkci ovlivňovaly. Těmito faktory jsou například křivost v místě okraje původních polygonů, tečné napojení nové a stávající sítě nebo

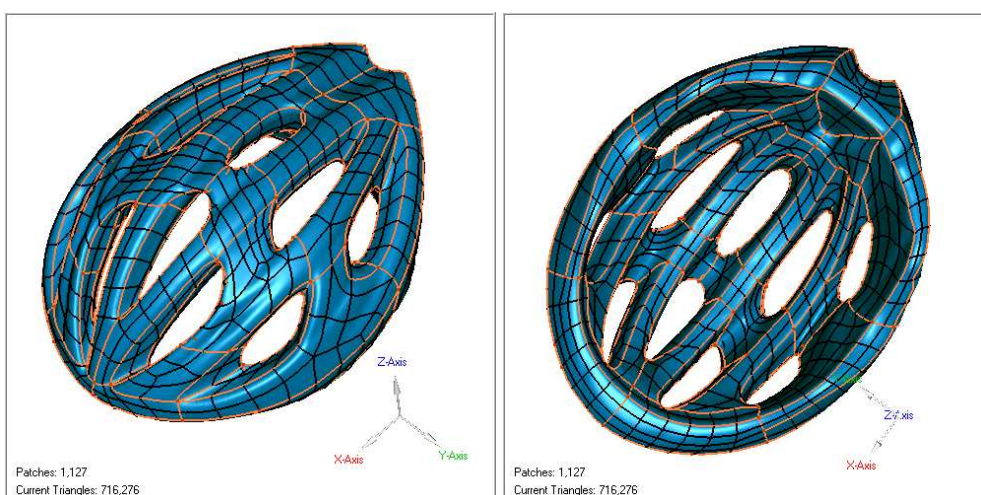


Obrázek 7.6: Vyhlazený *.stl model z vnější a vnitřní strany

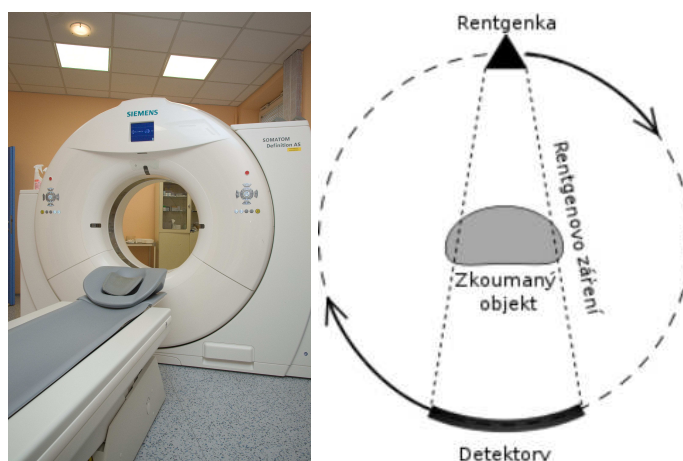
prosté zacelení otvoru přímou plochou. Dále jsem odstraňovala lokality, kde se původně nacházely otvory pro montáž retenčního systému, podbradních řemínek a čelního štítku. Společně s předchozími úpravami došlo k zacelení celého povrchu. V dalším kroku jsem z kontrolních důvodů provedla opravu celé polygonové sítě. Bylo to pro případ, že by „zalepováním“ míst mohlo dojít k vytvoření nekvalitních polygonů. V tuto chvíli jsem mohla přistoupit k vyhlazování. K vyhlazování jsem použila funkce pro redukování nerovností. Vyhlažování povrchu je závislé na třech faktorech. Jsou to úroveň vyhlazení, intenzita vyhlazení a priorita křivosti. Vzhledem k tomu, že jsem přesně nevěděla, co od těchto faktorů očekávat, hrála jsem si s jejich nastavením tak dlouho, dokud se mi výsledně vyhlazený model nelíbil. Finálně vyhlazený model je možné vidět zde 7.6.

Dalším důležitým krokem bylo hledání kontur. Zkušebně jsem vyzkoušela poloautomatické hledání a definování kontur. Tento proces je relativně rychlý, bohužel však na této složité geometrii neměl moc uspokojivý výsledek. Definice geometrického modelu byla sice pravdivá (shodovala se s realitou), nicméně nalezené kontury na levé a pravé straně modelu byly nesymetrické, zobrazené plochy a hranice byly velmi chaotické, neuspořádané, a proto nevhodné. Takto definovaný geometrický model nebyl příliš vhodný pro další úpravu a zpracování, např. pro tvorbu MKP sítě. Proto jsem se uchýlila k ručnímu definování kontur a předpisů pro definici ploch. Ručně definované kontury a plochy je možno vidět na následujícím obrázku 7.7.

Takto upravený model jsem uložila do formátu STEP, který jsem načetla do softwaru ANSA.



Obrázek 7.7: Ručně definované kontury a plochy na vyhlazeném modelu přilby



Obrázek 7.8: Počítačový tomograf [66] a princip jeho fungování [65]

7.2 Tvorba modelu pomocí počítačové tomografie

Počítačová tomografie [65] je radiologickou vyšetřovací metodou umožňující zobrazování vnitřní struktury nekovových objektů. Tato metoda nachází největší využití v medicínské oblasti.

Počítačový tomograf 7.8 pracuje na stejném principu [65] jako rentgen, ale značně se liší svými výstupy. Počítačový tomograf vytváří sérii snímků, ze kterých potom tvoří řez daným objektem. Řezy mohou být vytvořeny buď celým objektem, nebo jen částí. Pokud se umístí jednotlivé řezy nad sebe (složí se), získá se tak 3D zobrazení daného objektu.

Principem vytvoření řezu je vložení snímaného objektu do přístroje, kde po kruhové dráze obíhají rentgenka a detektory, tímto způsobem je zkoumaný objekt prozářen pod různými úhly, tím se získá až několik set snímků. Na

základě těchto projekcí počítač zrekonstruuje plošný řez daným objektem. Rekonstrukce spočívá v pokrytí daného řezu maticí voxelů, kterými rozumíme objemové pixely. Na základě jednotlivých projekcí a řešení soustavy rovnic je každému voxelu přiřazen koeficient absorpce rentgenového záření, který je na výsledném snímku reprezentován přesně stanoveným stupněm šedi. Počítačové tomografy vykonávají rotační pohyb okolo snímaného objektu a posun současně a rentgenka s detektory se vůči snímanému objektu pohybují po spirálové dráze. Výhodou tohoto způsobu je menší míra vystavení pacientů záření, nicméně je díky tomu metoda méně přesná, protože počítač musí ve vizualizaci dopočítávat větší úseky a také interpolovat.

7.2.1 Snímání cyklistické přilby počítačovým tomografem

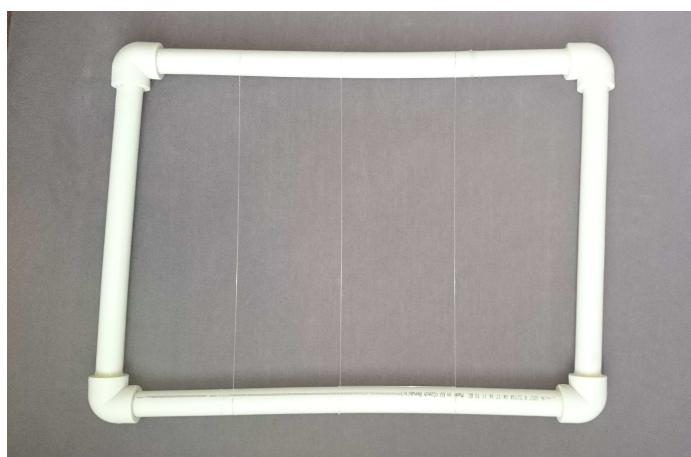
Na základě předchozích zkušeností [67] jsem věděla, že cyklistická přilba je vhodným objektem pro CT snímkování. Tedy odpadla nutnost nechávat přilbu rentgenovat jako ověření, že v přilbě nejsou kovové součásti, které by mohly bránit využití počítačové tomografie.

Pro CT snímání jsem použila lékařský počítačový tomograf. Počítačový tomograf se skládá z vlastního přístroje a ovládacího terminálu. Kvůli radiaci se přístroj nachází v samostatné odstíněné místnosti a práce přístroje je sledována přes olovnaté sklo jiné místnosti, kde se rovněž nachází ovládací terminál.

Nezbytnou součástí přístroje je podložka, na kterou se umísťuje snímáný předmět. Tato podložka byla však pro moje potřeby nevyhovující, protože se přilba do ní zanořovala. Podložení přilby jinou podložkou opět nepřineslo kýžený výsledek, protože se podložka zobrazovala ve stejném odstínu šedé barvy jako byly zobrazené okrajové části přilby, které jsou vyrobené z EPS pěny. Odstranění podložky bez poškození výsledného modelu nebylo možné. Z toho důvodu bylo potřeba improvizovat a vymyslet důmyslnější podložku [67]. Jednalo se o rám z PVC trubek 7.9, ve kterém byl napnutý vlasec.

Princip snímání: Nejdříve je přístrojem zhotovený celkový plošný snímek, na němž se pomocí kurzoru vybere perimetr, který se bude snímat. Je žádoucí, aby byl perimetr zvolen těsně kolem snímaného objektu. Minimalizace perimetru přináší dvě výhody. První a významnější výhoda spočívá v nesnímání okolí objektu, tedy nevznikají prázdné snímky okolí objektu. Druhou výhodou je zrychlení práce přístroje. Ke zrychlení dochází díky tomu, že perimetr nemusí být vybrán před každým snímáním, ale může být použit perimetr z předchozího snímání. Jakmile je perimetr stanoven, je nutné nastavit krok a rozlišení přístroje. Krokem se rozumí vzdálenost mezi jednotlivými řezy. V mém případě jsem nastavila krok na 0,4 mm a rozlišení na 512 x 512 pixelu na jeden snímek.

Výstupem snímkování počítačovým tomografem je sekvence snímků, které reprezentují jednotlivé řezy. Formátem snímků je formát *.dcm. Pro vizualizaci nasnímaných předmětů slouží aplikace xVision, která pracuje na



Obrázek 7.9: Rámová podložka pro podporu přilby během CT snímání



Obrázek 7.10: Snímky z CT - neupravené

základě standardu DICOM (slouží k zobrazování, distribuci, skladování a tisk medicínských dat pořízených snímacími metodami [68]).

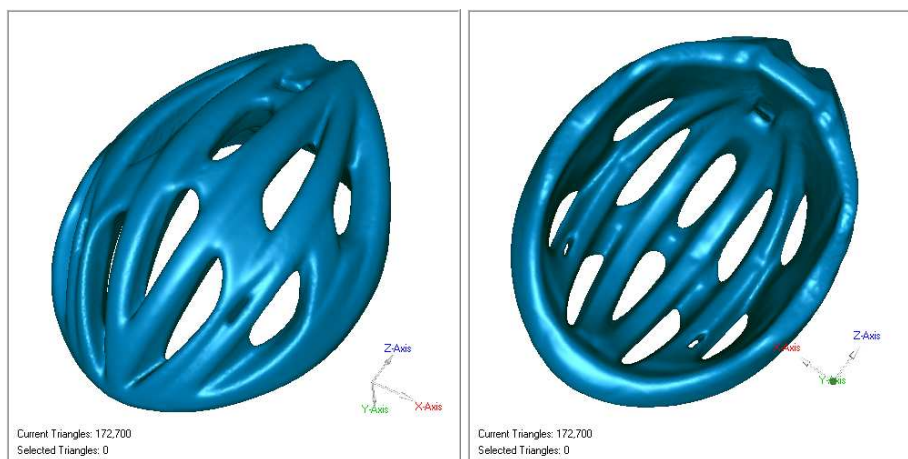
7.2.2 Úprava získaných CT dat

Z přístroje CT jsem získala sérii 830 snímků. Snímky jsem následně načetla do aplikace Fiji 7.10.

Jedná se o bezplatný grafický program pracující s DICOM protokolem. Sekvenci načtených snímků jsem dále upravovala. Primárně jsem zvýšila jas a kontrast snímků. Sekundárně jsem odstranila šum, který se objevil u části přilby z EPS pěny. EPS pěna byla na původních snímcích reprezentována ve stupních šedi, který se blížil právě hladině šumu. Následkem zvýšení jasu a kontrastu byly snímky značně zašuměné. Následně jsem na snímcích provedla filtraci, kdy se pomocí dolní a horní meze vybere rozsah stupňů šedi, které na snímcích zůstanou. Po nastavení a použití filtru (threshold), jsem získala snímky 7.11, kde se určité stupně šedi reprezentují bílou barvou a zbytek je černý. Nakonec jsem snímky invertovala a odstranila rám. Takto upravené snímky jsem uložila do formátu *.bmp.



Obrázek 7.11: Snímky z CT - upravené



Obrázek 7.12: Výsledný model získaný CT snímkováním.

K aplikaci Fiji jsem doinstalovala Plugin IntSeg 3D, který mi pomohl vytvořit 3D model se sekvenční snímky. Při jeho použití došlo k segmentaci ploch. Pro segmentaci byl použit algoritmus „marching cubes“. Tento algoritmus produkuje 3D trojúhelníkovou síť, která reprezentuje povrch objektu. Před spuštěním pluginu jsem načítala sekvenci snímků do Fiji, protože jsem musela upravit tzv. vertex (obdobu 2D pixelu ve 3D zobrazení). Charakterizuje 3D velikost nejmenšího bodu. Formát *.bmp v sobě nese informaci o velikosti vertexu a aplikace předpokládá vertex 1 x 1 x 1 mm. Formát *.dcm nese všechny informace o nastavení CT, jsem získala odpovídající velikost vertexu 0,96 x 0,96 x 0,4 mm a nastavila jsem ji jako výchozí. Pokud bych velikost vertexu neupravila, byla by síť povrchu zdeformovaná. Nechala jsem proběhnout segmentaci povrchů a výslednou síť jsem uložila ve formátu *.stl. Výsledná model přilby je možno vidět na obrázku 7.12.

Kapitola 8

Výpočtový model pádové zkoušky

8.1 Vstupní geometrické modely

Numerický model pádové zkoušky se sestává ze tří dílčích modelů. Jsou jimi: nedeformovatelný povrchový model ploché dopadové desky, nedeformovatelný dokonale tuhý povrchový model makety hlavy a objemový model cyklistické přilby.

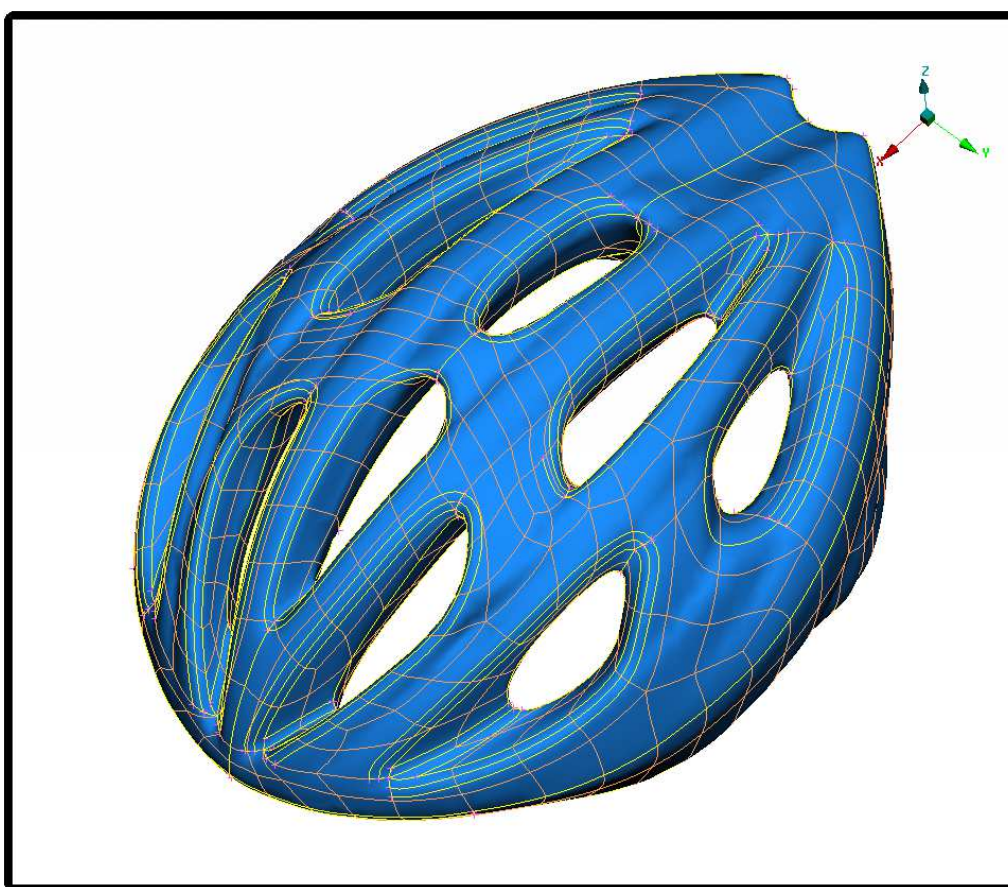
Jak geometrický model, tak fyzický model makety hlavy jsem získala na Ústavu mechaniky a materiálů FD ČVUT. Byly zpracovávány v rámci předchozích závěrečných prací. Proto nebylo nutné, abych je znovu zpracovávala nebo je upravovala. Jedná se o maketu velikosti M.

Geometrický model přilby jsem tvořila dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo bezkontaktní 3D skenování. Druhým způsobem bylo snímkování z počítačového tomografu. Pro další zpracování jsem vybrala geometrický model pořízený bezkontaktním 3D skenováním.

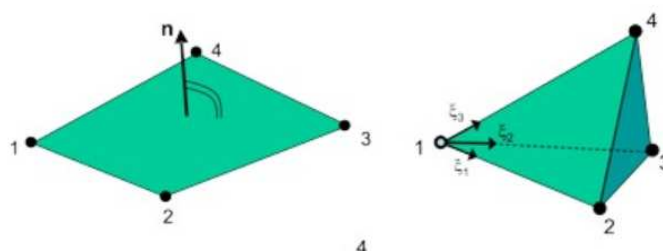
Dopadovou podložku jsem modelovala jako desku o velikosti 200 x 200 mm a tloušťce 2 mm.

8.2 Výpočtový model celé sestavy

Do aplikace ANSA jsem načetla geometrický model přilby pořízený bezkontaktním 3D skenováním 8.1. Na přilbě jsem definovala elementy na základně interní dokumentace pro práci s modelem ve ŠKODA AUTO. Tedy pro shellovou vrstvu reprezentující ABS plast jsem definovala plošné čtyř uzlové elementy QUAD4 a pro objemovou část přilby reprezentující EPS pěnu jsem



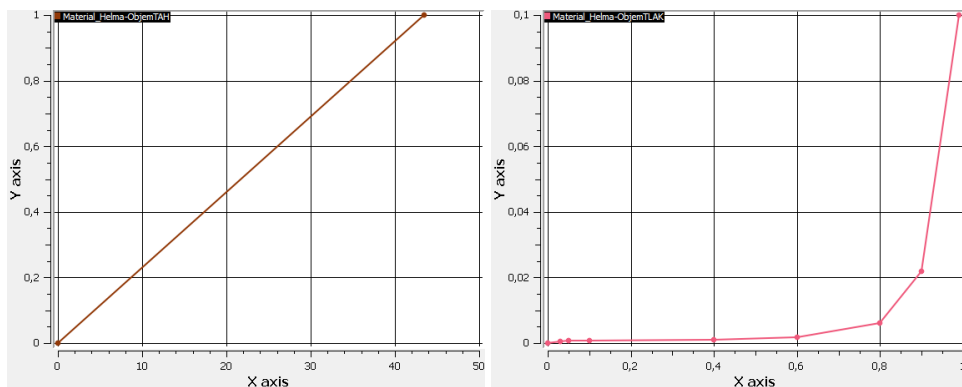
Obrázek 8.1: FEM model cyklistické přilby



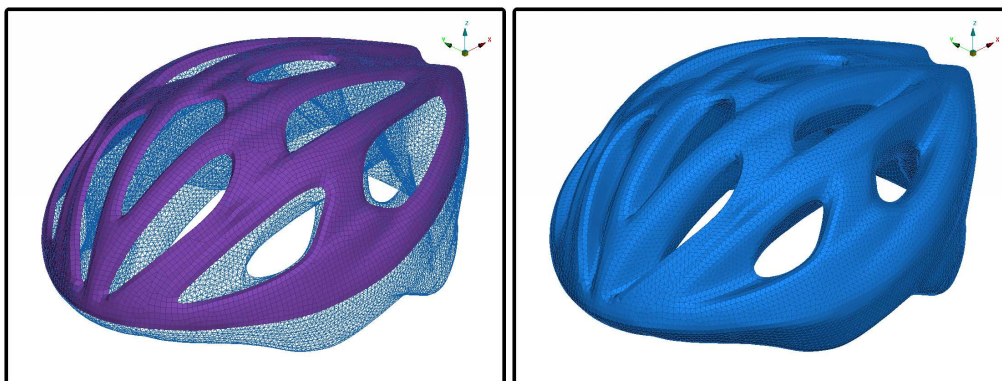
Obrázek 8.2: Typy použitých elementů: plošný QUAD4 (vlevo), objemový TET4 (vpravo) [69]

definovala elementy jako čtyř uzlové objemové elementy TET4, viz obr 8.2. QUAD4 elementy jsem použila rovněž pro dopadovou podložku. Velikost hrany elementů jsem si určila 3 mm.

V dalším kroku jsem přiřadila jednotlivým částem sestavy materiálové charakteristiky. Pro objemovou část jsem vycházela z vlastností EPS a definovala jsem je jako materiál deformační. Je popsán hustotou, modulem



Obrázek 8.3: Pracovní křivky EPS: tahová (vlevo) a tlaková (vpravo)

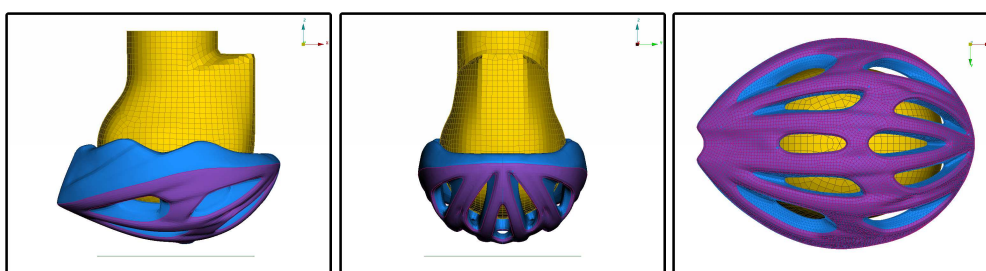


Obrázek 8.4: FEM model cyklistické přilby - ABS skořepina (vlevo) a EPS skelet (vpravo)

pružnosti, Poissonovým číslem a dvěma pracovními křivkami materiálu - křivkami poměrné deformace ku napětí: tahovou a tlakovou 8.3.

ABS plast jsem v numerickém modelu definovala jako lineárně plastický materiál. Tento materiál je opět definovaný základními parametry, kterými jsou hustota, modul pružnosti, Poissonovo číslo, mez pevnosti a tangenciální modul. Síť shellových elementů modelu ABS jsem určila na základě povrchové sítě objemového modelu cyklistické přilby. Na určitých plochách modelu pěny cyklistické přilby jsem vytvořila offset uzlů ve vzdálenosti 0,2 mm, což odpovídá polovině šířky shellového elementu skořepiny ABS plastu. Tyto sítě nemají společné uzly, a proto bylo nezbytné mezi nimi definovat pevné spojení, tzv. tied 8.3. Celý FEM model cyklistické přilby je možné vidět na obrázku 8.4.

Dopadovou podložku(desku) jsem definovala jako nedeformovatelnou, rigidní. Současně jsem definovala kontakt mezi podložkou a kontaktním modelem (deska - skořepina přilby) 8.3. V nastavení kontaktu byla respektována tloušťka shellu. K této sestavě jsem přidala rigidní model makety hlavy a definovala jsem kontakt mezi povrchem hlavy a objemovou částí přilby 8.3,



Obrázek 8.5: Sestava FEM – pohledy: boční (vlevo),zpředu a zhora (vpravo)

Tabulka 8.1: Základní materiálové vlastnosti sestavy – Pamcrash

	materiálový model		
tied vazba	PAM LINK Material 301		
akcelerometr	PAM SOLID Material 99		
hlava	PAM SHELL Material 100		
deska	PAM SHELL Material 100		
pěna	PAM SOLID Material 45		
skořepina	PAM SHELL Material 103		
	hustota [kgmm ⁻³]	Young [GPa]	Poisson [-]
tied vazba	7.89E-9	-	-
akcelerometr	7.89E-9	210E3	0.3
hlava	7.89E-9	210E3	0.3
deska	7.89E-9	210E3	0.3
pěna	1.00E-7	0.025	-
skořepina	1.05E-6	2.168	0.48

rovněž s respektováním tloušťky sheelu. Celou sestavu je možné vidět na obr. 8.5.

Akcelerometru jsem přiřadila hmotnost hlavy a její setrvačné účinky 8.3.

Modelu cyklistické přilby a maketě hlavy jsem přidělila počáteční rychlost 5,42 m/s ve směru osy Z. Osa Z je normálovou osou rigidní dopadové desky. Protože je tato analýza dějem dynamickým, použila jsem explicitní metodu řešení. Délku trvání děje jsem nastavila na 15 ms. Během této doby došlo k nárazu přilby s maketou hlavy na rigidní podložku, k deformaci modely cyklistické přilby, šíření trhliny v přilbě a odeznění celého děje. Takto definovaný model jsem uložila do textových souborů *.pc pro řešič Pamcrash a *.k-file pro řešič LS-DYNA.

Protože vlastní výpočet úlohy probíhal v řešičích Pamcrash a LS-DYNA, uvádím základní materiálové vlastnosti a nastavení vazeb/kontaktů pro oba dva řešiče. Jejich shrnutí je možno nalézt v tabulkách 8.1, 8.2 a 8.3.

Tabulka 8.2: Základní materiálové vlastnosti sestavy – LS-DYNA

materiálový model					
akcelerometr	MAT20 MAT RIGID				
hlava	MAT20 MAT RIGID				
deska	MAT20 MAT RIGID				
pěna	MAT63 MAT CRUSHABLE FOAM				
skořepina	MAT123 MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY				
	hustota [kgmm ⁻³]	Young [GPa]	Poisson [-]	mez pevn. [GPa]	tangen. [GPa]
akcelerometr	7.89E-6	210E3	0.3	-	-
hlava	7.89E-6	210E3	0.3	-	-
deska	7.89E-6	210E3	0.3	-	-
pěna	1.00E-7	0.025	-	0.0013	-
skořepina	1.05E-6	2.168	0.48	0.06	0.07

Tabulka 8.3: Definice vazeb/kontaktů v Pamcrash a LS-DYNA

Pamcrash				
vazba/kontakt	typ	slave	master	tření
skořepina – objem	node-surface tied	skořepina	objem	-
skořepina – deska	33 (node to segm.)	deska	skořepina	0.3
objem – hlava	33 (node to segm.)	hlava	objem	0.3
hlava – acc	rbody	hlava	acc	-
LS-DYNA				
vazba/kontakt	typ	slave	master	tření
skořepina – objem	node to surface	skořepina	objem	-
skořepina – deska	automatic surf to surf	deska	skořepina	0.3
objem – hlava	automatic surf to surf	objem	hlava	0.3
hlava – acc	constrained rigid bodies	hlava	acc	-

Kapitola 9

Experimentální část

Ochranné vlastnosti nejen cyklistických, ale také ostatních sportovních přileb (uživatelé kolečkových bruslí, lyžařské, horolezecké, jezdecké) musí splňovat normu ČSN EN 1078 [28]. Testování schopnosti tlumení, neboli pádová zkouška, se dle [70] provádí na testovacím zařízení, padostroji. Z hlediska konstrukce můžeme rozlišovat dva druhy - jedním je jednokolejnicový sloupový systém s lineárním vedením a druhým je rámový systém s pojezdovým zařízením pro uložení přilby.

Jednokolejnicový sloupový systém s lineárním vedením a ramenem k osazení přilby

Toto testovací zařízení je využíváno k testování cyklistických přileb zejména v zámoří. V USA splňuje normy ANSI a CSPS. Přilba je umístěna na rameni pojezdového sloupu a je pomocí upevňovacích pásků připevněna k maketě hlavy. Tato maketa je s ramenem testovacího zařízení pevně spojena. Přilba je vytažena do požadované výšky a následně uvolněna pro pád proti dopadové ploše.

Rámový systém s pojezdovým zařízením pro uložení přilby Toto zařízení musí splňovat normu ČSN EN 1078. Účelem pojezdu je nesení testované přilby s maketou hlavy do požadované výšky a potom nesení přilby s maketou během vlastního pádu. Po „odpálení“ padá pojezd volným pádem na dopadovou podložku. Na rozdíl od jednokolejnicového systému je pojezd proveden tak, aby jeho vlastnosti neměly vliv na měření hodnot zrychlení.

Oba druhy testovací zařízení je možno vidět na následujícím obrázku společně se zařízením konstruovaném na FD ČVUT 9.1.



Obrázek 9.1: Jednokolejnicové zařízení (vlevo), rámová zařízení

9.1 Experimentální zařízení a měřící technika

Experimentální měření pádové zkoušky cyklistické přilby prováděné na Ústavu mechaniky a materiálů Fakulty dopravní byly provedeny na rámovém zařízení a dle požadavků výše uvedené normy. Zařízení bylo postaveno v rámci Studentské grantové soutěže SGS12/163/OHK2/2T/16. Měřící technika mi byla zapůjčena vedoucím Ústavu soudního znaleství v dopravě.

Pro provedení pádové zkoušky cyklistické přilby jsem použila následující zařízení a měřící techniku:

- testovací zařízení – padostroj
- maketa hlavy o hmotnosti 4,7 kg
- 18 teplotně ustálených cyklistických přileb zn. Giro, model Skyline
- notebook s aplikací NI Labview SignalExpres
- 3-osý akcelerometr MEAS 1203-0500
- 4 měřící datové karty – NI N9237
- datová sběrnice NI cDAQ-9172
- zdroj – dobíjecí baterie Shimatsu NP 1,3 – 12 V



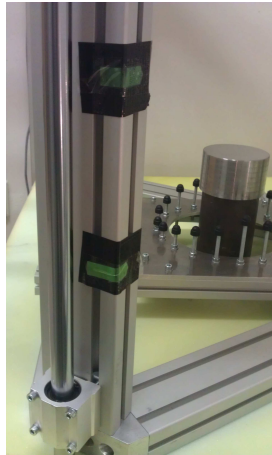
Obrázek 9.2: Maketa hlavy a její osazení 3-osým akcelerometrem

- rychloběžná kamera IDT - model NX 3-S3 s maximální snímkovací frekvencí 62000 fps (pro tuto práci jsem použila snímkovací frekvenci 4000 fps)
- osvětlovací lampy

9.2 Provedení experimentu

Obecný průběh experimentu lze popsat takto: Před vlastním měřením jsem provedla kontrolu testovacího zařízení, konkrétně tedy pevnost šroubového spojení. Poté jsem si připravila maketu hlavy. Maketu jsem osadila 3-osým akcelerometrem, viz obr. 9.2. Část kabelu akcelerometru jsem smotala do dutiny hlavy, aby nedošlo k jeho poškození. Také jsem maketu opatřila jistícím systémem (v mém případě se jednalo o provázek uvázaný okolo krku makety a přelepený silnou montážní páskou).

Dále bylo potřeba připravit na měření přilbu. Do přilby jsem vložila maketu hlavy osazenou akcelerometrem. Velmi důležité bylo zkontrolovat její správné usazení (aby nebyla posunuta moc do čela nebo naopak do týlu nebo šikmo na spánky). Přilba byla k maketě hlavy upnuta podbradním páskem a také pomocí utahovacího šroubu. Dalším, neméně důležitým, krokem bylo usazení přilby s maketou hlavy do koruny pojezdu, která je osazena stavěcími šrouby. Ty pomáhají udržet polohu přilby během vytažování pojezdu do stanovené výšky a také během volného pádu až do vlastního nárazu na dopadovou podložku. Po vytažení pojezdu do stanovené výšky (168,5 cm nad úroveň terče) a kontrole veškerého měřícího zařízení jsem celý pojezd pomocí uvolňovacího zařízení spustila volným pádem proti dopadové podložce. Po nárazu, jeho odeznění a zastavení měřících přístrojů jsem naměřená data zkontrolovala a uložila.



Obrázek 9.3: Umístění reflexních terčů na konstrukci pojezdu

Experimentálnímu měření pádové zkoušky jsem podrobila 18 cyklistických přileb, které jsem vkládala do pojezdu testovacího zařízení a pro které bylo zařízení stejně nastavené.

Experiment, jako takový, však probíhal v několika dílčích krocích, které rozeberu podrobněji:

- měření dopadové rychlosti sestavy,
- měření zrychlení v těžišti makety hlavy,
- sběr dat z akcelerometru a
- zpracování dat

9.2.1 Měření dopadové rychlosti sestavy

Vzhledem ke skutečnosti, že měření muselo probíhat v souladu s normou ČSN EN 1078, jsem musela nastavit dopadovou rychlost 5,42 m/s. K jejímu změření jsem zvolila metodu analýzy digitálního záznamu. K digitálnímu záznamu posloužila rychloběžná kamera IDT, model NX 3-S3. Při měření rychlosti v mém případě jsem využila možnosti, že lze jednotlivým snímkům záznamu přiřadit reálný čas. Potom lze porovnávat odstup uvažovaných snímků a je tedy možné stanovit hodnoty rychlosti pohybujících se prvků. Aby bylo možné rychlost stanovit, opatřila jsem konstrukci pojezdu dvěma reflexními terčů 9.3, kdy vzdálenost jejich spodních hran činila 150,5 mm. Z videozáznamu jsem odpočítala počet snímků a ze známé snímací frekvence rychlokamery jsem určila čas mezi průchodem prvního a druhého terčů hraniční oblastí. A nakonec ze znalosti vzdálenosti mezi terčů jsem dopočítala rychlost pojezdu padostroje.

9.2.2 Měření zrychlení v těžišti makety hlavy a sběr dat

Měření zrychlení v těžišti makety hlavy probíhalo za pomoci 3-osého akcelerometru MEAS 1203-0500. jedná se o akcelerometr určený k měření hodnot zrychlení v průběhu nárazu. Rozsah tohoto akcelerometru činí 1000 g a frekvenční rozsah je 1500 Hz. Vlastní frekvence akcelerometru je pak 7000 Hz. Kvůli své malé velikosti je možné tento akcelerometr uchytit i na hůře dostupných místech. Další využití pro takovýto akcelerometr může být využit pro nárazové testy, měření různých otřesů nebo pro crash testy.

Výstupem změřených hodnot z akcelerometru jsou hodnoty napětí pro vektor zrychlení, přesněji jeho složky X, Y, Z. Přes stíněný kabel jsou hodnoty vedeny do datové karty NI 9237 a sběrnice NI cDAQ-9172, které jsou analogově digitálním převodníkem. Takto rychlé děje, kterým pádová zkouška je, se vzorkují maximální frekvencí daného typu převodníku, tedy 25 kHz. Pro sběr dat jsem využila prostředí aplikace NI LabView Signal Express, ve kterém jsou data uložena v jednotlivých kanálech, které odpovídají složkám zrychlení.

9.3 Zpracování dat

„Posbíraná“ data z Labview Signal Express jsem zpracovávala v aplikaci NI DIAdem, který je speciálně vyvinutý pro zpracování a analýzu dat. Pracovní prostředí je modulové. Moduly odpovídají různým stupňům analýzy (načítání dat, správa projektu, práce s daty a jejich úprava, matematické a statistické funkce a řada dalších). Z naměřených dat jsem musela nejdříve odstranit offset pro jednotlivé kanály. Po jeho odstranění jsem musela pomocí kalibrační konstanty akcelerometru přepočítat pořízené hodnoty z mV na g. Dále jsem musela vhodně nadefinovat a vložit časový kanál. Další nedílný krok, který jsem musela provést byla filtrace dat pomocí filtru CFC 1000, který vychází ze standardu ISO 6487 a který je doporučován pro zrychlení hlavy. Filtr má za úkol odfiltrovávat vysokofrekvenční šum nad 1250 Hz. Na tuto filtraci byl použit skript. Ukázka skriptu je součástí přílohy.

Z celkového průběhu zrychlení, které působilo v těžišti makety hlavy jsem vybrala oblast primárního nárazu, do jehož počátku jsem umístila časovou nulu. Toto jsem zopakovala všechny zbylé naměřené průběhy zrychlení. Z průběhů zrychlení jsem také vypočítala hodnotu kritéria poranění HIC. Tato hodnota se rovná velikosti plochy pod píkem maximálního zrychlení. V mém případě jsem zvolila HIC pro 15 ms, který se používá pro tvrdé nárazy. Nicméně by výsledek neovlivnil ani výpočet HIC pro 36 ms používaný pro měkké nárazy (airbagy), protože můj čas byl podstatně kratší (v průměru 5 ms). Odečtení hodnoty maximálního zrychlení a kritérium HIC jsem opět provedla pro všech 18 vzorků cyklistických přileb. Pro větší počet měřených vzorků jsem provedla alespoň základní statistické vyhodnocení, které spočívalo v nalezení křivky znázorňující

aritmetický průměr. Dále jsem vypočítala směrodatné odchylky křivek a na jejich základě jsem vytvořila obalové křivky aritmetického průměru.

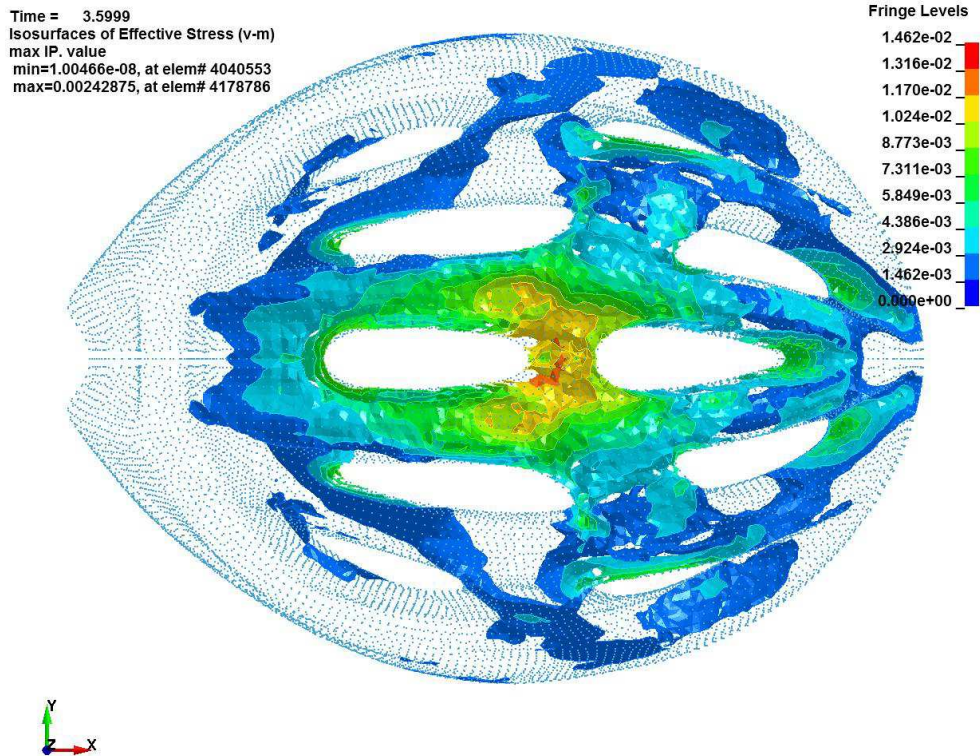
Kapitola 10

Výsledky

10.1 Numerická část

V numerické části práce jsem vytvořila model sestavy maketa hlavy – přilba – terč. Pro definici toho modelu jsem použila geometrický model cyklistické přilby získaný pomocí 3D ručního skeneru. Na základě geometrického modelu cyklistické přilby a geometrického modelu cyklistické přilby a geometrického modelu makety hlavy jsem vytvořila síť prvků, která posloužila jako základ pro numerický model celé soustavy. Po nadefinování materiálových vlastností, kontaktů a nastavení počátečních podmínek, jsem provedla numerickou analýzu celé soustavy v řešičích LS-DYNA a Pamcrash. Numerická analýza v LS-DYNA probíhala na osobním počítači na 1 jádru a trvala 7 hod 8 min 32 s. Numerická analýza v řešiči Pamcrash probíhala ve výpočetním středisku ŠKODA AUTO a.s., na výpočet bylo použito 8 jader a výpočetní čas byl 13 min 30 s. Výsledkem byly křivky zrychlení makety hlavy v jejím těžišti, obr. 10.7. Dalšími možnými výsledky numerické analýzy je popis chování numerického modelu cyklistické přilby jak na povrchu, tak v celém objemu modelu. Těmito výsledky může být pole ekvivalentního napětí (von Mises), které charakterizuje namáhání materiálu. Maximálních hodnot nabývá v místě kontaktu modelu cyklistické přilby s temenem makety hlavy 10.1, 10.2. Průběh změny pole ekvivalentních napětí je zobrazeno na sekvenci snímků v příloze.

Dalším výstupem je pole poměrné deformace charakterizující přetvoření materiálu v průběhu pádové zkoušky. Na modelu lze pozorovat, jak místa s velkou kladnou deformací (stlačení, zborcení) materiálu v místě kontaktu centrálních žeber s temenem makety hlavy, tak místa, kde dochází k většímu protažení materiálu s následným rozvojem trhliny. Pole maximálních hodnot přetvoření lze vidět na 10.3. Průběh změny pole poměrné deformace s rozvojem trhliny je zobrazeno na sekvenci snímků v příloze.



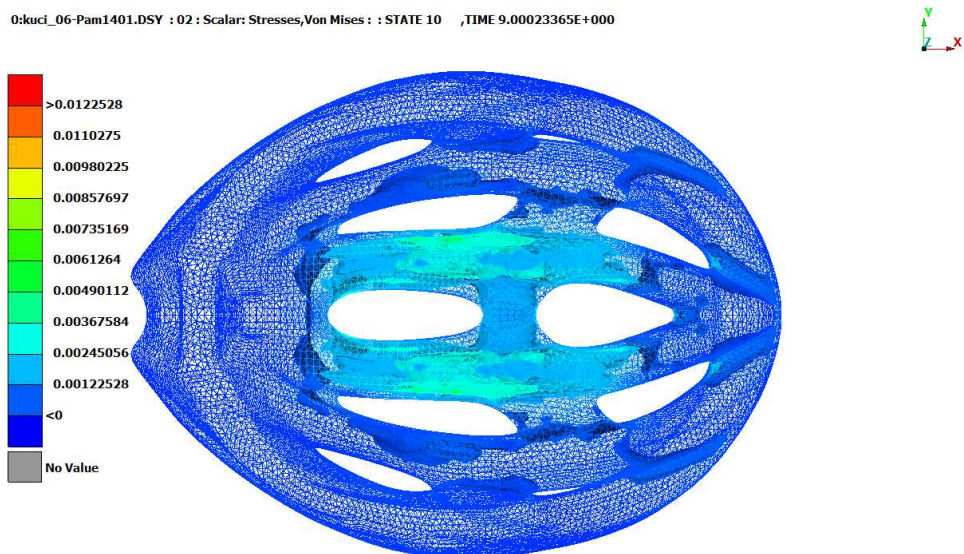
Obrázek 10.1: Maximální pole von Mises napětí v LS-PrePost

Kritérium poranění hlavy HIC jsem v numerické části nepočítala, protože podle [28] jsou za relevantní hodnoty považované je hodnoty, které se zjistily experimentálně.

10.2 Experimentální část

Pádové zkoušky jsem podrobila 18 vzorků cyklistických přileb. Naměřila jsem tedy 18 křivek průběhů zrychlení, které působí na maketu hlavy v jejím těžišti. Po odfiltrování vysokofrekvenčního šumu dat a posunu časové osy, jsem z křivek odečetla maximální hodnoty zrychlení a stanovila jsem hodnotu kritéria poranění hlavy HIC v závislosti na zrychlení. Zjištěné výsledky jsem zesumarizovala do tabulky 10.1.

Po statistickém zpracování jsem stanovila průměrnou hodnotu kritéria poranění hlavy HIC na $(850,82 \pm 34,61)$. Statisticky jsem také zpracovala samotné průběhy křivek zrychlení. Nejdříve jsem určila křivku aritmetického průměru, po té jsem dopočítala směrodatnou odchylku, která po přičtení a odečtení vytvořila obalové křivky průměru. Naměřené křivky a statisticky vyhodnocené křivky je možno vidět na obr. 10.4 a na obr. 10.5.

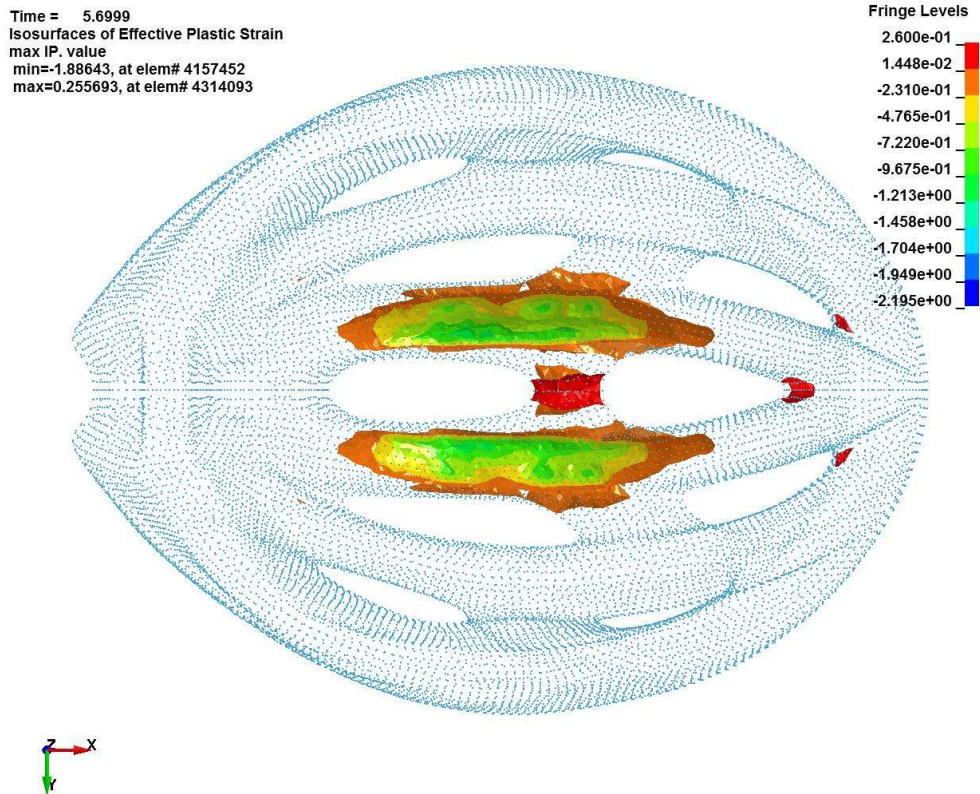


Obrázek 10.2: Maximální pole von Mises napětí v Meta

Tabulka 10.1: Maximální hodnoty zrychlení a hodnoty kritéria poranění hlavy HIC

Vzorek přilby	Maximální hodnota G	Hodnota HIC	Vzorek přilby	Maximální hodnota G	Hodnota HIC
1	148,96	922,38	10	139,16	815,08
2	142,37	839,31	11	140,46	811,28
3	147,12	885,34	12	144,02	856,86
4	144,20	874,11	13	142,14	844,01
5	138,00	823,65	14	143,77	863,96
6	142,62	839,55	15	146,95	876,03
7	143,98	826,71	16	139,50	838,01
8	151,43	925,77	17	137,07	794,60
9	144,14	848,41	18	139,65	829,75

Pro všechny vzorky byl v průběhu měření zhotoven videozáznam průběhu pádové zkoušky pomocí rychlokamery. Tyto videa mohou sloužit pro detailní studium průběhu dopadu. Všech 18 vzorků cyklistických přileb jsem také pečlivě prohlédla, kdy jsem se zaměřila na vzniklé trhliny, velké deformace a jiné vnější

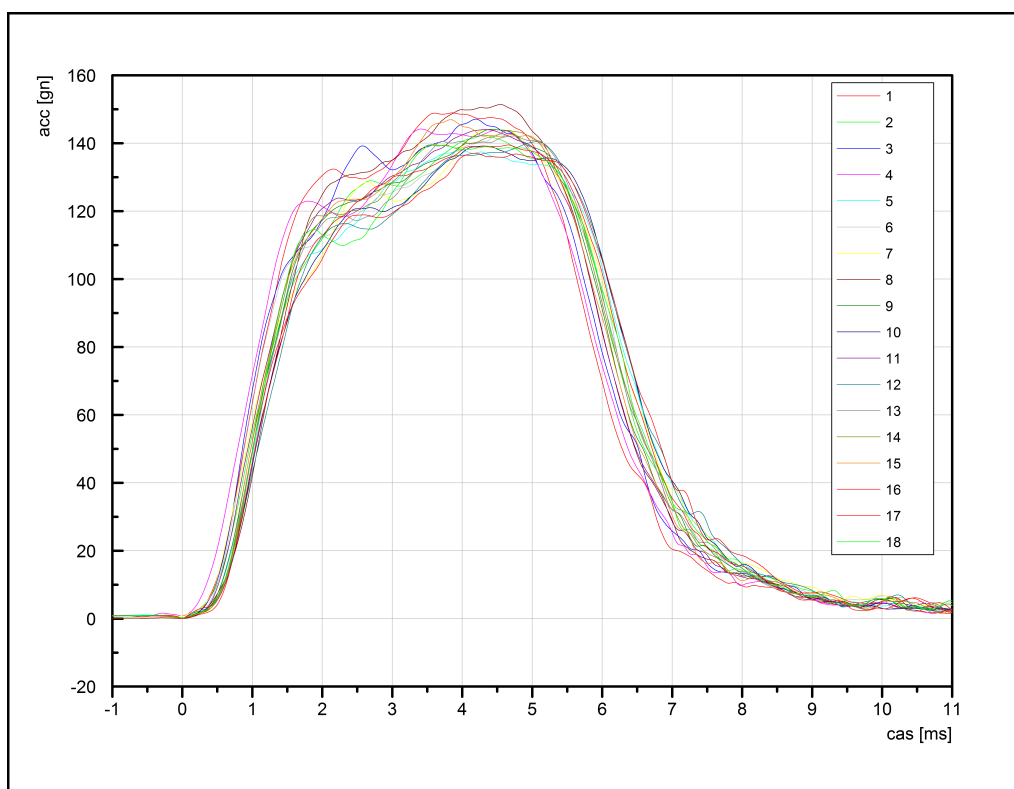


Obrázek 10.3: Maximální pole poměrné deformace

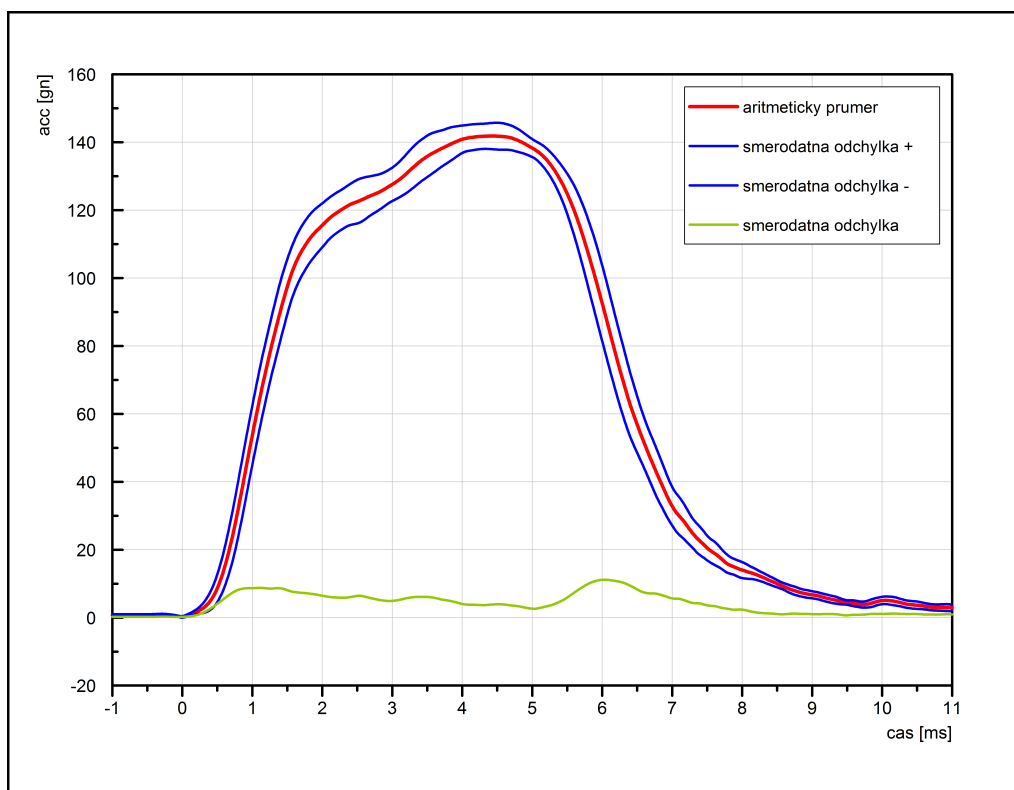
defekty. Na všech přilbách jsem našla velké deformace (zborcení materiálu) na centrálním a přilehlých žebrech v oblasti kontaktu s temenem makety hlavy. U všech vzorků jsem dále našla trhlinu na spoji mezi žebry 10.6.

10.3 Porovnání výsledků

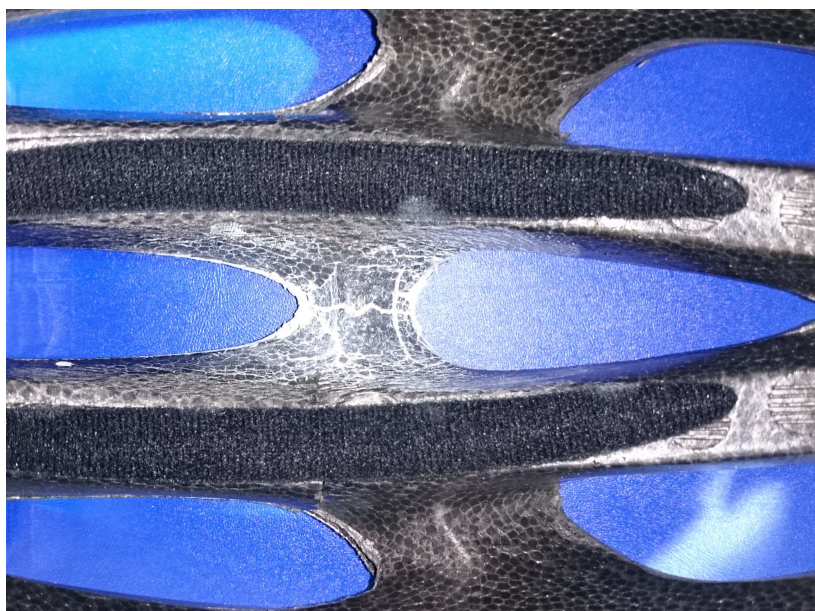
Výsledky z numerické analýzy v LS-DYNA a Pamcrash a experimentálního měření jsem porovnala na základě průběhů zrychlení v těžišti makety hlavy, viz 10.7. Křivky jsou si navzájem podobné svým trendem. K největší nepřesnosti došlo na základě neznalosti materiálových vlastností. Stejně jako u experimentů dojde v numerickém modelu k porušení materiálu v podobě trhliny na spoji mezi centrálními žebry.



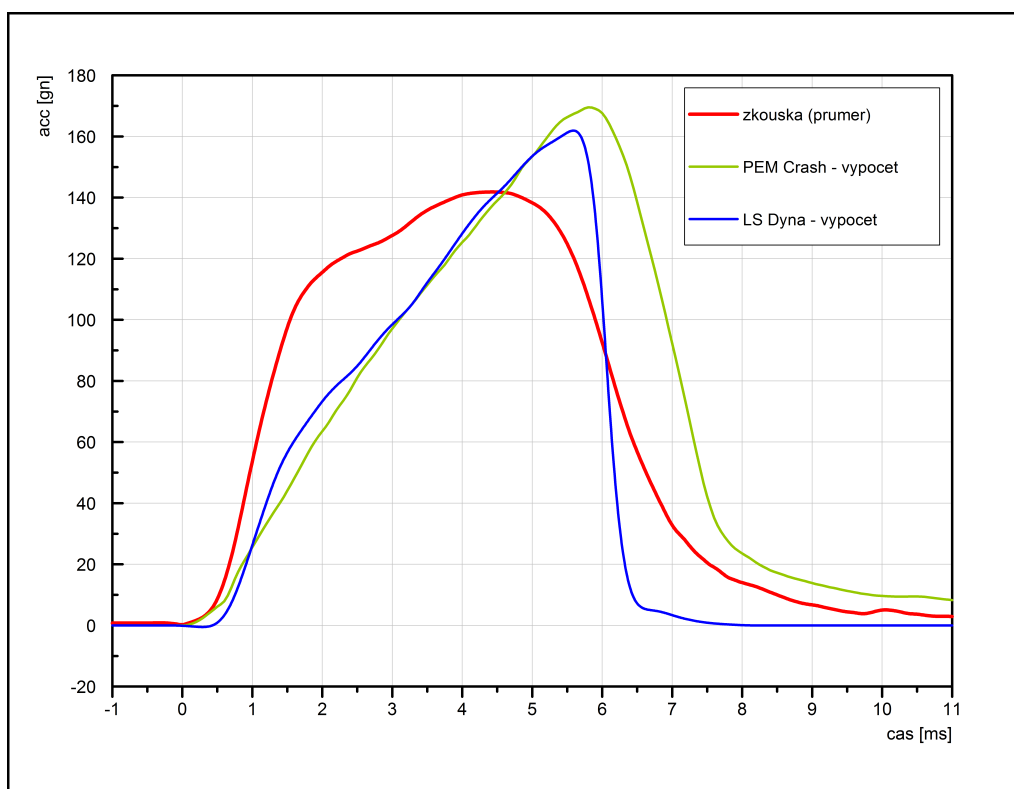
Obrázek 10.4: Naměřené průběhy zrychlení 18 vzorků cyklistických přileb



Obrázek 10.5: Průběh průměrné křivky a obalové křivky



Obrázek 10.6: Trhliny na cyklistické přilbě



Obrázek 10.7: Porovnání získaných křivek zrychlení

Kapitola 11

Závěr

V této práci jsem pro potřeby numerické analýzy nejprve vytvořila geometrický model pomocí 3D skenování a pomocí snímků z počítačové tomografie. Dále jsem vytvořila numerický model sestavy: maketa hlavy – cyklistická přilba – dopadová podložka. Této sestavě jsem přiřadila vlastnosti podobné vlastnostem reálných objektů a udělila ji počáteční rychlost ve svislém směru. Tento model jsem použila jako vstup pro řešiče LS-DYNA a Pam-Crash. Výsledkem byl průběh zrychlení působící v těžišti makety hlavy. Dalšími výsledky numerické analýzy pádové zkoušky byly charakteristiky, které popisují chování numerického modelu v průběhu analýzy nejen na povrchu, ale také v celém objemu modelu.

Dále jsem provedla experimentální pádovou zkoušku cyklistické přilby. Zkouška probíhala na 18 vzorcích cyklistických přileb. Získané křivky průběhů zrychlení v těžišti makety hlavy jsem po počátečních úpravách statisticky vyhodnotila. Odvodila jsem průměrný průběh zrychlení a ze směrodatné odchylky jsem vytvořila obalové křivky. Z jednotlivých křivek průběhů zrychlení jsem pod píkem maxima stanovila kritéria poranění hlavy HIC a opět jsem našla průměrnou hodnotu.

Porovnáním naměřených křivek zrychlení z obou řešičů jsem zjistila, křivky jsou si velice podobné. Odlišnost je v tomto případě způsobena rozdílným matematickým popisem obou použitých řešičů. Při porovnání křivek z numerické analýzy a průměrné křivky z reálného experimentu jsou si křivky rovněž podobné, avšak nikoli totožné. Zde je rozdílnost dána neznalostí materiálů. Materiály, které jsem použila, byly odvozené z materiálové databáze ŠKODA AUTO a.s.

Literatura

- [1] Centrum dopravního výzkumu, P. Pokorný. *Konference národní strategie rozvoje cyklistické dopravy ČR*, 2007.
- [2] Statistiky nehodovosti. Dostupné z <http://www.policie.cz/reditelstvi-sluzby-dopravni-policie-zpravodajstvi-statistika.aspx>.
- [3] Statistiky nehodovosti. Dostupné z <http://www.autoklub.cz/text/72-statistiky-nehodovosti.html>.
- [4] Centrum dopravního výzkumu, J. Martinek. *Bezpečnost cyklistické dopravy*.
- [5] Cyklistická doprava. Dostupné z <http://www.opavounakole.info/opava/>.
- [6] R. SWART. The history of bicycle helmets. Dostupné z: <http://www.bhsi.org/history.htm>.
- [7] RUDY PROJECT. Triple threat triathlon. Dostupné z <http://triplethreattriathlon.blogspot.cz/2014/12/from-skin-hat-to-speed-monster-brief.html>.
- [8] Tour de france. Dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Tour_de_France.
- [9] Patent morpher. Dostupné z <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails>.
- [10] Skládací přilba morpher. Dostupné z <http://www.huffingtonpost.com/2015/04/21/>.
- [11]
- [12] Typy cyklistických přileb. Dostupné z <http://jumpsport.cz/poradna/technologie-prileb-giro-bell-uvex>.
- [13] Chrono cyklistická přilba. Dostupné z <http://www.supshop.cz/prilba-catlike-chrono-aero-plus-2012-r282-modro-bila/>.
- [14] Univerzální přilba. Dostupné z <http://www.cykloplus.cz/prilba-bell-event-mat-black-white-road-block-m-2015/d-64009/>.
- [15] Závodní přilba. Dostupné z <http://www.e-kola.cz/bell-sweep-p2749>.
- [16] Chrono přilba. Dostupné z <http://www.cyklofit.cz/detail/casovkarske/prilba-catlike-chrono-aero-2015-r009-cerno-seda/c41231p211255.html>.

- [17] Freestyle přilba. Dostupné z <http://www.bike24.com/p274249.html>.
- [18] Fullface přilba. Dostupné z <http://www.bikester.ch/uvex-hlmt-9-bike-helm-blackblue-344344.html>.
- [19] Městská přilba. Dostupné z <http://www.citybikes.cz/prislusenstvi/cyklisticka-prilba-yakkay-tokyo-blue-stripe>.
- [20] Dětska přilba. Dostupné z <http://www.insportline.cz/3850/detska-cyklo-prilba-kellys-buggie/cerveno-cerna>.
- [21] Molded in the Shell. Dostupné z: <http://helmets.org/molded.htm>, 2005.
- [22] Vojtěch D. Kratochvíl B., Švorčík V. *Úvod do studia materiálů*. ISBN 80-7080-568-4. 2005.
- [23] Aramidová vlákna. Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Aramidov>
- [24] Bicycle helmet safety institute – foams used in bicycle helmets. Dostupné z <http://www.bhsi.org>, 2010.
- [25] B.C. LEVIN and J. V. RUTKOWSKI. Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (abs.). *Fire and Materials*, 10(3 - 4):93–105, 1986.
- [26] Požadavky a představy o cyklistické přilbě. Dostupné z <http://www.ibesip.cz/cz/cyklista/bezpecne-jizdni-kolo/pouzivani-cyklisticke-prilby/predstava-o-idealni-prilbe>.
- [27] ČSN EN 960 - Makety hlavy pro zkoušení ochranných přileb. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=77728>.
- [28] ČSN EN 1078 - Přilby pro cyklisty a pro uživatele skateboardů a kolečkových bruslí. Dostupné z <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=51779>.
- [29] Standards-helmets-etc.pdf.
- [30] A comparison of bicycle helmet standards. Dostupné z <http://www.bhsi.org/stdcomp.htm>, 2015.
- [31] R. LE FORT. Etude experimentale sur les fractures de la machoire supérieure. *Rev Chir de Paris*, 23, 1901.
- [32] Zlomeniny Le Fort . Dostupné z <http://www.wikiskripta.eu/>.
- [33] F.C. VINAS. Penetrating head trauma. Dostupné z <http://emedicine.medscape.com/article/247664-overview>, 2013.
- [34] A.R. PAYNE and S. PATEL. Head Injury Mechanisms And Injury Criteria. <http://www.eurailsafe.net/subsites/operas/HTML/Section3/Page3.3.1.htm>, 2001.
- [35] Z. AMBLER. *Základy neurologie*. 6. vydání. Praha, Galén, 2006.
- [36] W.J. CURNOW. The efficiency of bicycle helmets against brain injury. *Accidents Analysis and Prevention*, 35, 2003.

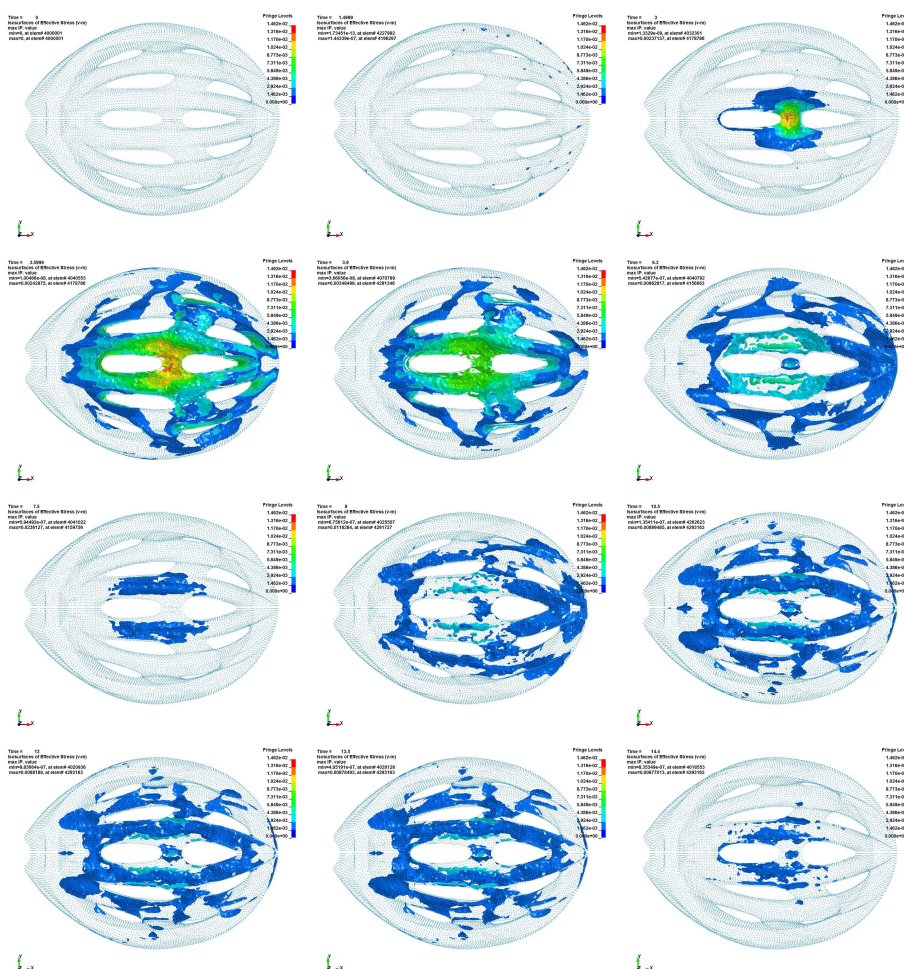
- [37] M. HENDDERSON. The effectiveness of bicycle helmets. *Motor Accidents Authority of New South Wales*, 1995.
- [38] MEANEY D.F. SMITH, D.H. Axonal damage in traumatic brain injury. *Neuroscientist*, 6, 2000.
- [39] A.D. WALDER, P.M. YEOMAN, and A. TURNBULL. The abbreviated injury scale as a predictor of outcome of severe head injury. Technical Report 21, 1995.
- [40] L.D.M. NOKES, A.M. ROBERTS, and B.H. KNIGHT. Use of the Gadd severity index in forensic medicine: a case study. *Forensic Science International*, 76:85–90, 1995.
- [41] D.R. NAMJOSHI, C. GOOD, W.H. CHENG, et al. Towards clinical management of traumatic brain injury: a review of models and mechanisms from a biomechanical perspective. *Disease Models & Mechanisms*, 6:1325–1338, 2013.
- [42] H.-W. HENN. Crash Tests and the Head Injury Criterion. *Teaching mathematics and its applications*, 17(4):162–170, 1998.
- [43] J. HUTCHINSON et al. The Head Injury Criterion (HIC) functional. *Applied Mathematics and Computation*, 96, 1998.
- [44] Probability of Injury Relative to HIC Scores. Dostupné z <http://www.capp-online.ca/pdf/articles/>.
- [45] P. KUCIAKOVÁ. Experimentální a výpočtová studie pádové zkoušky cyklistické přilby. Master's thesis, ČVUT Praha, Fakulta dopravní, Ústav mechaniky a materiálů, 2013.
- [46] D. ARJOUX et al. Head injury prediction capability of the HIC, HIP, SIMon and ULP criteria. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 2008.
- [47] B. J. MCHENRY. Head injury criterion and the ATB. 2004.
- [48] J. A. NEWMAN et al. A new biomechanical head injury assessment function: the maximum power index. 2000.
- [49] R. P. CHING et al. Damage to Bicycle Helmets Involved with Crashes. *Accid. Anal. and Prev.*, 29, 1997.
- [50] VXelements. Dostupné z <http://www.nosco.com.sg/vxelements>.
- [51] Geomegic Studio. Dostupné z <http://geomagic.com/en/products/studio/overview/>.
- [52] Fiji. Dostupné z <http://fiji.sc/Fiji>, 2015.
- [53] LS-PrePost. Dostupné z: <http://www.lstc.com/lsp/>.
- [54] LS-Dyna. Dostupné z <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>.
- [55] ANSA. Dostupné z: <http://www.beta-cae.gr/ansa.htm>, 2014.
- [56] Meta. Dostupné z: <http://www.beta-cae.gr/meta.htm>, 2014.
- [57] Pam–Crash. Dostupné z <https://www.esi-group.com/company/40th-anniversary/pam-crash>, 2014.

- [58] NI Labview SignalExpress. Dostupné z <http://www.ni.com/labview/signalexpress/>.
- [59] NI DIAdem. Dostupné z <http://www.ni.com/diadem/>.
- [60] K. GALANULIS. Optical measuring technologies in sheet metal processing. Technical report, GOM Gessellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7, 38106 Braunschweig, Germany, 2007.
- [61] Kontaktní skener. Dostupné z <http://www.nvision3d.com/>.
- [62] Kontaktní skener. Dostupné z <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>.
- [63] VIU Scan ruční skener. Dostupné z <http://www.creaform3d.com/blog/2010/04/>.
- [64] GIRO Skyline. Dostupné z <http://clec-cycles.co.uk/esite/P15702/product>.
- [65] Počítačová tomografie. Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/>.
- [66] Počítačový tomograf. Dostupné z <http://www.nemtru.cz/vybaveni-iktoveho-centra-v-trutnovske-nemocnici-je-dokonceno-895>.
- [67] J. Popl. Numerická studie chování motocyklové přilby při pádové zkoušce. Master's thesis, FD ČVUT v Praze, 2014.
- [68] Dicom. Dostupné z <http://en.wikipedia.org/wiki/DICOM>, 2015.
- [69] Theseus fe. finite elements [online]. Dostupné z http://www.theseus-fe.com/images/product/feat_solv_3.jpg.
- [70] Jíra J. Jírová J. Micka, M. Modelování pádové zkoušky helmy v ansys a ls-dyna. *ANSYS konference*, 2010.

Přílohy

Příloha A

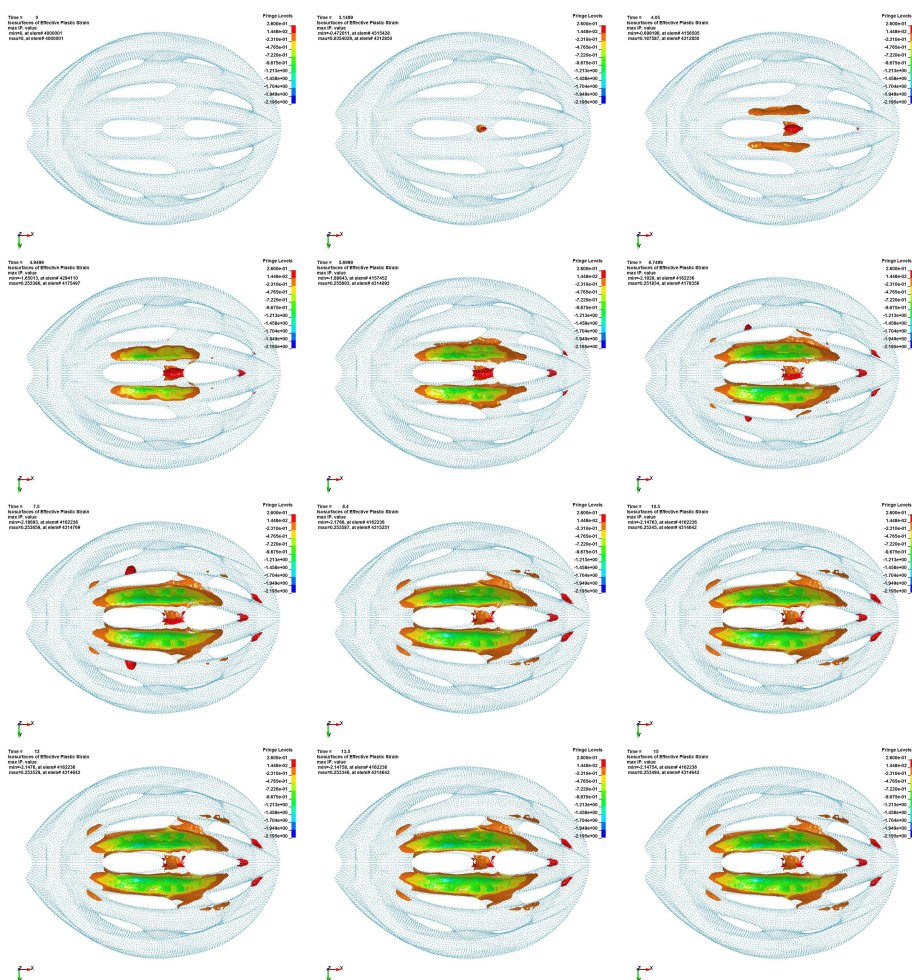
Výsledky



Obrázek A.1: Sekvence snímků pole von Mises napětí v intervalu 0–15 ms

Příloha B

Výsledky



Obrázek B.1: Sekvence snímků pole poměrné deformace v intervalu 0–15 ms

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Definice
3D	3dimensional - trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile butadien styren - materiál
acc	akcelerometr
AIS	Abbreviated Injury Scale - redukována škála zranění
ANSI	American National Standards Institute - Americký národní normalizační institut
ASTM	American Society for Testing and Materials - Americká společnost pro testování a materiály
CPSC	Consumer Product Safety Commission - Komise pro ochranu spotřebitele
ČR	Česká republika
EPP	Expanded polypropylene - materiál
EPS	Expanded polystyrene - materiál
FD	Fakulta dopravní
EPU	Expanded polyurethane - materiál
GSI	Gadd severity index - Gaddův index zranění
HIC	Head injury criterion - kritérium poranění hlavy
MIPS	Multi Directional Impact Protection System
MKP	Metoda konečných prvků
MSR	Mountain Safety Research - výzkumné centrum
např.	například
N/A	not available - nedostupný
NI	National Instruments - softwarové aplikace a měřicí technika
EPU	Expanded polyurethane - materiál
PET	Polyethylene terephthalate - materiál
SGS	Studentská grantová soutěž
STL	Stereolithography - datový formát
USA	United States of America - Spojené státy americké
WABA	Washington Bicyclists Association - Asociace washingtonských cyklistů

Seznam obrázků

2.1	Vývoj počtu usmrcených cyklistů	3
2.2	Poměr usmrcených cyklistů k celkově usmrceným osobám při dopravních nehodách	4
2.3	Počet usmrcených cyklistů na množství ujetých kilometrů[4]	4
2.4	Správné usazení přilby na hlavě [5]	5
3.1	Skládací přilba Morpher [10]	8
3.2	Numerické analýza bez a se systémem MIPS [11]	9
3.3	Vícesměrový systém ochrany proti nárazu [11]	9
3.4	Historický vývoj cyklistické přilby [6] [7]	10
3.5	Typy cyklistických přileb	12
4.1	Geometrická definice makety hlavy [27]	18
4.2	Zkušební zařízení pro zkoušku odolnosti proti nárazu (schopnost tlumení nárazu) [28]	19
5.1	Linie zlomenin obličejových kostí Le Fort I, II, III [32]	24
5.2	Křivka WSTC [41]	26
5.3	Pravděpodobnost zranění vzhledem k hodnotě HIC [45]	28
5.4	Pravděpodobnosti poranění hlavy na poškození přilby [49]	30
5.5	Pravděpodobnosti poranění mozku na poškození přilby [49]	30
7.1	Kontaktní skenery [61],[62]	35
7.2	Bezkontaktní ruční 3D skener [63]	36
7.3	Cyklistická přilba Giro Skyline [64]	36
7.4	Přelakovaná a pozičními terčíky polepená přilba	37
7.5	*.stl model získaný z 3D skeneru z vnější a vnitřní strany	38
7.6	Vyhlazený *.stl model z vnější a vnitřní strany	39
7.7	Ručně definované kontury a plochy na vyhlazeném modelu přilby	40
7.8	Počítačový tomograf [66] a princip jeho fungování [65]	40
7.9	Rámová podložka pro podporu přilby během CT snímání	42
7.10	Snímky z CT - neupravené	42
7.11	Snímky z CT - upravené	43
7.12	Výsledný model získaný CT snímkováním.	43
8.1	FEM model cyklistické přilby	45
8.2	Typy použitých elementů: plošný QUAD4 (vlevo), objemový TET4 (vpravo) [69] . .	45

8.3	Pracovní křivky EPS: tahová (vlevo) a tlaková (vpravo)	46
8.4	FEM model cyklistické přilby - ABS skořepina (vlevo) a EPS skelet (vpravo)	46
8.5	Sestava FEM – pohledy: boční (vlevo),zpředu a zhora (vpravo)	47
9.1	Jednokolejnicové zařízení (vlevo), rámová zařízení	50
9.2	Maketa hlavy a její osazení 3-osým akcelerometrem	51
9.3	Umístění reflexních terčů na konstrukci pojezdu	52
10.1	Maximální pole von Mises napětí v LS-PrePost	56
10.2	Maximální pole von Mises napětí v Meta	57
10.3	Maximální pole poměrné deformace	58
10.4	Naměřené průběhy zrychlení 18 vzorků cyklistických přileb	59
10.5	Průběh průměrné křivky a obalové křivky	60
10.6	Trhliny na cyklistické přilbě	60
10.7	Porovnání získaných křivek zrychlení	61
A.1	Sekvence snímků pole von Mises napětí v intervalu 0–15 ms	68
B.1	Sekvence snímků pole poměrné deformace v intervalu 0–15 ms	69

Seznam tabulek

2.1	Nehody bez spoluzavinění [1]	2
4.1	Parametry testovacích maket hlavy [27]	17
4.2	Porovnání nejčastěji používaných standardů [29]	21
4.3	Porovnání nejčastěji používaných standardů [30]	22
5.1	Pravděpodobnost zranění vzhledem k hodnotě HIC [44]	28
5.2	Stupeň vědomí ve vztahu k hodnotě HIC a AIS [34]	28
8.1	Základní materiálové vlastnosti sestavy – Pamcrash	47
8.2	Základní materiálové vlastnosti sestavy – LS-DYNA	48
8.3	Definice vazeb/kontaktů v Pamcrash a LS-DYNA	48
10.1	Maximální hodnoty zrychlení a hodnoty kritéria poranění hlavy HIC	57