



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

PASIVNÍ BEZPEČNOST LEHKÝCH LETADEL

LIGHT AIRCRAFT CRASHWORTHINESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL STŘECHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK LÖFFELMANN, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Daniel Střecha**
Studijní program: Základy strojího inženýrství
Studijní obor: Základy strojího inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. František Löffelmann, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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

Pasivní bezpečnost lehkých letadel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V automobilním průmyslu je patrný důraz na pasivní bezpečnost ať už z hlediska návrhu a testování, ale také jako významný faktor při nákupu vozidel. V automobilní dopravě jsou nehody poměrně časté, ale energie nárazu je v mnoha případech pohlcena konstrukcí tak, že u cestujících nedojde k vážným poraněním. Naproti tomu v letectví jsou požadavky na bezpečnost vysoké, ale např. v předpisech pro lehká letadla je samotným havarijním přistáním věnována menší pozornost. Otázkou je, do jaké míry mohou větší odolnost konstrukce vůči nárazu a doplňující prvky přispět k celkové bezpečnosti (jak často se vyskytují nehody, kdy konstrukce ještě reálně může osoby na palubě ochránit), jak náročné by byly odpovídající konstrukční změny a zda existuje takový požadavek ze strany trhu.

Cíle bakalářské práce:

- Shrnutí požadavků na pasivní bezpečnost dle různých předpisů
- Přehled konstrukčních a jiných prvků zvyšujících pasivní bezpečnost
- Posouzení nákladů a přínosů při zvyšování pasivní bezpečnosti letadel
- Průzkum vnímání pasivní bezpečnosti ve společnosti (cestující, piloti a provozovatelé/kupující letadel)

Seznam doporučené literatury:

Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23. Amendment 4. Europea Aviation Safety Agency, 2015.

HURLEY, Todd R. a Jill M. VANDENBURG, ed. Small Airplane Crashworthiness Design Guide [online]. Simula Technologies, 2002. Dostupné

z: <https://agate.niar.wichita.edu/Crashworthiness/WP3.4-034043-036.pdf>

UL2 - Část I. Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky[online].
B.m.: Letecká amatérská asociace ČR. 2019. Dostupné
z: https://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Pasivní bezpečnost v odvětví všeobecného letectví je na rozdíl od automobilového průmyslu stále oblastí s velkými nedostatky. Ať už jsou zmíněny bezpečnostní pásy, airbasy anebo lepší materiály pohlcující energii nárazu. Ve všech těchto aspektech je automobilový průmysl o několik let před tím leteckým. Tato bakalářská práce slouží jako ucelený přehled o pasivní bezpečnosti u lehkých letadel. Jsou zde představeny hlavní faktory ovlivňující toleranci lidského těla a kritéria, která se používají v leteckých stavebních předpisech. Jeden z hlavních cílů této práce bylo udělat přehled o bezpečnostních prvcích, které je možné do lehkých letadel implementovat i po uvedení konkrétního letadla do provozu. Vybrány byly bezpečnostní pásy, airbasy, protipožární systémy, balistický záchranný padák a systém nouzového vysílání (ELT). Každý z těchto prvků disponuje jinou vahou a hlavně cenou. Mezi ty dražší a hlavně hmotnostně vyšší systémy patří balistický záchranný padák, který disponuje velkou výhodou v podobě bezpečného přistání při selhání hlavních řídicích složek letadla, ale je to kompenzováno velkými náklady na pořízení a na údržbu. Výsledkem této práce je také dotazník, který byl distribuován mezi několik pilotů a provozovatelů lehkých letadel. Po vyhodnocení se ukázalo, že mezi oblíbené prvky pasivní bezpečnosti u pilotů patří systém ELT, čtyřbodové bezpečnostní pásy a balistický záchranný padák. Kromě toho dotazník odhalil, že při výběru letadla by piloti upřednostnili letové výkony a vlastnosti před pasivní bezpečností. Do budoucna je tedy důležité zaměřit se na širší povědomí o pasivní bezpečnosti již při výcviku pilotů.

Klíčová slova

pasivní bezpečnost, lehká letadla, tolerance nárazu, stavební předpisy, bezpečnostní prvky

Summary

Passive safety in general aviation is still an area with significant shortcomings compared to the automotive industry. Whether it's seat belts, airbags, or better materials that absorb impact energy, the automotive industry is years ahead. This bachelor thesis serves as a comprehensive overview of passive safety in light aircraft. It presents the main factors affecting human body tolerance and the criteria used in aviation construction regulations. One of the main objectives of this work was to provide an overview of safety features that can be implemented in light aircraft even after the aircraft has been put into operation. Selected features include seat belts, airbags, fire protection systems, ballistic parachute, and emergency locator transmitter (ELT). Each of these elements has different weights and costs. Among the more expensive and heavier systems is the ballistic parachute, which offers the significant advantage of safe landing in case of failure of the main control components of the aircraft but is offset by high acquisition and maintenance costs. The result of this work is also a questionnaire distributed among several pilots and operators of light aircraft. The evaluation showed that the favorite passive safety features among pilots include the ELT system, four-point seat belts, and ballistic parachute. Furthermore, the survey revealed that when choosing an aircraft, pilots would prioritize flight performance and characteristics over passive safety. In the future, it is essential to focus on raising awareness of passive safety during pilot training.

Keywords

passive safety, light aircraft, impact tolerance, construction regulations, safety features

Bibliografická citace

Střecha, Daniel. *Pasivní bezpečnost lehkých letadel* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158224>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce František Löffelmann.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing.Františka Löffelmanna, Ph.D. a s použitím zdrojů uvedených v seznamu.

Daniel Střecha

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing.Františkovi Löffelmannovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich podporu během celého studia. Dále pak děkuji všem respondentům mého dotazníku, kteří si našli čas na jeho vyplnění.

Daniel Střecha

Obsah

Úvod	12
1 Vhled do pasivní bezpečnosti v letectví	13
1.1 Podstata pasivní bezpečnosti	14
1.2 Historie pasivní bezpečnosti	15
1.3 Fyzika v kontextu pasivní bezpečnosti	17
1.3.1 Kinematický popis	17
1.3.2 Práce a kinetická energie	20
2 Tolerance lidského těla vůči vzniku zranění	22
2.1 Faktory ovlivňující lidskou toleranci	22
2.1.1 Biologická různorodost	22
2.1.2 Typy zádržných zařízení	23
2.1.3 Podmínky nárazu	24
2.2 Antropomorfní testovací zařízení	25
2.2.1 Rozdělení ATD	26
2.3 Tolerance nárazu hlavy	29
2.3.1 Kontaktní mechanismy poranění hlavy	29
2.3.2 Bezkontaktní mechanismy poranění hlavy	30
2.3.3 Kritérium poranění hlavy (HIC)	30
2.4 Tolerance zranění páteře	32
2.4.1 Tolerance zranění páteře	34
3 Srovnání pasivní bezpečnosti u jednotlivých stavebních předpisů letadel	35
3.1 Stavební předpisy	35
3.1.1 CS-LSA	36
3.1.2 CS-VLA	39
3.1.3 CS-22	41
3.1.4 CS-23	44
3.2 Srovnání stavebních předpisů	48
4 Zhodnocení přínosů a nákladů pasivní bezpečnosti	49
4.1 Bezpečnostní pásy	49
4.1.1 Tříbodové pásy	49
4.1.2 Čtyřbodové pásy	50
4.1.3 Pěti/šesti bodové pásy	50
4.2 Airbagy v pilotní kabině	51
4.3 Protipožární systémy	52
4.4 Balistický záchranný padák	53
4.5 Systém nouzového vysílání ELT	54
4.6 Pohled na prvky pasivní bezpečnosti ze strany pilotů	56
4.6.1 Zhodnocení výsledků dotazníku	60
Závěr	61

Úvod

Za necelých sto let se letectví stalo nedílnou součástí moderní dopravy a cestování. S rostoucím počtem letů a neustálým vývojem nových technologií se zvyšují nároky na bezpečnost všech aspektů letecké dopravy. Zvláštní pozornost je věnována nejen aktivním bezpečnostním systémům, které zahrnují technologie a postupy zaměřené na prevenci nehod, ale i pasivním bezpečnostním prvkům, které snižují následky nehod a chrání lidské životy v případě kolize. Pasivní bezpečnost lze tedy popsat jako soubor opatření zaměřených na minimalizaci rizika vážných či až fatálních zranění při nehodě letounu.

V porovnání s automobilovým průmyslem je letectví v oblasti pasivní bezpečnosti pozadu. Tato skutečnost je způsobena specifickými technickými a ekonomickými výzvami, kterým letecký průmysl čelí, avšak důležitost zlepšení pasivní bezpečnosti je nezpochybnitelná.

Pasivní bezpečnost v letectví je nesmírně důležitá. Vzhledem k tomu, že lehká letadla často létají v různorodých podmínkách a jsou vystavena širokému spektru rizik, je implementace pasivních bezpečnostních opatření klíčová pro ochranu lidských životů. Kromě toho, zvýšená úroveň pasivní bezpečnosti může vést k větší důvěře veřejnosti v leteckou dopravu, což může pozitivně ovlivnit rozvoj tohoto sektoru.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku pasivní bezpečnosti lehkých letadel. Hlavním cílem práce je poskytnout komplexní přehled o pasivní bezpečnosti:

- Shrnutí požadavků na pasivní bezpečnost dle evropských stavebních předpisů.
- Přehled prvků zvyšujících pasivní bezpečnost.
- Posouzení nákladů a přínosů těchto bezpečnostních prvků.
- Průzkum vnímání pasivní bezpečnosti mezi piloty.

Teoretická část této práce bude rozdělena do dvou kapitol. První kapitola bude věnována obecnému vhledu do pasivní bezpečnosti v letectví, kde bude popsána podstata pasivní bezpečnosti, její historie a fyzikální podstata. Druhá kapitola se bude zaměřovat na toleranci lidského těla vůči zranění. Budou zde zahrnuty faktory ovlivňující lidskou toleranci, použití antropomorfních testovacích zařízení, a analýza nárazu hlavy a poranění páteře.

Praktická část práce bude zaměřena na charakterizování hlavních evropských předpisů týkajících se pasivní bezpečnosti lehkých letadel, jako jsou CS-LSA, CS-VLA, CS-22 a CS-23. Dále bude provedeno zhodnocení přínosů a nákladů některých bezpečnostních prvků a pohled na tyto prvky z perspektivy pilotů. Výsledky průzkumu budou zhodnoceny a analyzovány s cílem poskytnout ucelený přehled o aktuálním stavu pasivní bezpečnosti lehkých letadel.

1 Vhled do pasivní bezpečnosti v letectví

V minulosti ukázaly průzkumy trhu, že pro piloty i pasažéry sektoru tzv. všeobecného letectví¹ je bezpečnost prostředku, ve kterém se rozhodli cestovat, velmi důležitým faktorem. V případě, že letadlo nedisponovalo některými bezpečnostními prvky, vznikala obava nejen ze strany pilotů, ale hlavně pasažérů. Proto se s postupem času začala bezpečnosti v tomto odvětví věnovat větší pozornost.

Tabulka 1: Nehody, úmrtí a míra nehodovosti pro rok 2021, Letectví v USA, upraveno dle [2]

	Nehody		Smrtelné úrazy		Letová činnost		Nehody na 100 000 letových hodin	
	Vše	Smrtelné	Celkem	Na pa-lubě	Letové hodiny	Odlety	Vše	Smrtelné
Američtí letečtí dopravci provozující leteckou dopravu podle 14 CFR 121								
Plánované	21	0	0	0	15 066 239	7 594 811	0,139	0
Neplánované	3	0	0	0	865 507	234 981	0,347	0
Američtí letečtí dopravci provozující leteckou dopravu podle 14 CFR 135								
Příměstský	11	1	2	2	401 608	536 329	2,739	0,249
Na vyžádání	32	8	25	24	4 474 791		0,715	0,179
USA všeobecné letectví	1 157	210	344	341	21 965 783		5,258	0,951
USA civilní letectví	1 225	220	376	372				

¹Všeobecné letectví neboli General Aviation (zkráceně GA) představuje segment leteckého průmyslu, který se zabývá malými soukromými letadly, která nejsou součástí pravidelných linek. Podle předpisu 14 část 23 [1] od FAA je maximální vzletová hmotnost stanovena na 8 618 kg (19 000 liber). Podle tohoto předpisu jsou také stanoveny čtyři úrovně certifikací letadel na:

- Konfigurace sedadel pro 0–1 cestujících.
- Konfigurace sedadel pro 2–6 cestujících.
- Konfigurace sedadel pro 7–9 cestujících.
- Konfigurace sedadel pro 10–19 cestujících.

V tab. 1 můžeme například porovnat míru nehodovosti všeobecného letectví s mírou nehodovosti u plánovaných letů leteckých společností. U všeobecného letectví je podíl nehod na 100 000 letových hodin téměř 38krát větší než u plánovaných odletů. I když celková nehodovost stále klesá, oblast všeobecného letectví je stále nejvíce zatížena nehodami, a to i smrtelnými. Z uvedeného důvodu je třeba zvážit, jestli není nutné usilovat o zvýšení bezpečnosti v tomto sektoru letectví.

Podle Vandenburga a spol. [3] může být bezpečnost rozdělena do dvou oblastí:

1. Kontrola a minimalizace faktorů, které způsobují nehody a prevence před vznikem nehod.
2. Kontrola a minimalizace faktorů, které způsobují zranění, jakmile dojde k nehodě a snahy o zmírnění vážnosti zranění.

V případě pasivní bezpečnosti se budeme řídit druhou zmíněnou oblastí.

Stejně jako v automobilovém průmyslu, očekávají zákazníci i u leteckých dopravních prostředků pasivně bezpečnostní prvky. Z automobilového průmyslu víme, že i přes dokonalejší ovládací prvky vozidla, bezpečnější výstavbu infrastruktury, různým výcvikům a školením dochází k nehodám, a proto tomu nemůže být jinak ani u letadel [3].

V automobilovém průmyslu byly tyto skutečnosti zváženy a bylo rozhodnuto o použití prvků pasivní bezpečnosti v automobilech, které dnes zachraňují mnoho životů. Oblast všeobecného letectví projevila po automobilovém průmyslu podobné snahy s implementací těchto prvků i do lehkých letadel viz 1.2.

1.1 Podstata pasivní bezpečnosti

Jedná se o prvky, popřípadě konstrukční vlastnosti, které chrání cestující v průběhu nehody. Zahrnuje nástroje pro přežití posádky a také by díky nim mělo docházet k minimalizaci škod na letadle. Snahou konstruktérů by tedy měla být eliminace vážných a smrtelných zranění během nárazu, minimalizace zranění a smrtelných úrazů při vážných haváriích a minimalizace poškození letadla v případě nárazu [3].

Podle Vandenburga a spol. lze základní principy pasivní bezpečnosti rozdělit:

- Konstrukce trupu letadla
- Zádržné zařízení
- Prvky absorbující energii
- Prostředí kabiny
- Faktory po nehodě

Konstrukce trupu je jednou z nejzásadnějších věcí k správné funkci celého systému pasivní bezpečnosti. Je nutné, aby konstrukce byla dostatečně odolná, schopná zajistit dostatečný prostor k přežití všech pasažérů a aby byly zachovány všechny funkce ostatních součástí systému pasivní bezpečnosti.

Další důležitou součástí jsou zádržná zařízení (bezpečnostní pásy). Jejich hlavním cílem je bezpečnostní omezení pohybu cestujících. Tato zařízení by měla být schopna

přenášet zatížení přes kostru cestujících a vyhnout se tak měkkým tkáním a životně důležitým orgánům. Také je důležité si uvědomit, že správným návrhem zádržných zařízení musí být zajištěna správná funkce i sekundárních zádržných systémů, jako jsou například airbasy. Tyto systémy se musí vzájemně doplňovat a nesmí se omezovat, aby byla zajištěna maximální bezpečnost cestujících.

K dosažení maximálního zpomalení a maximálního pohlcení sil od nárazu slouží zařízení pro absorpci energie. Funkci těchto zařízení plní konstrukce trupu, podvozek, sedadla a zádržné zařízení.

Interiér kabiny je vhodné navrhovat tak, aby se zde nacházelo co nejméně objektů, se kterými by pasažéři mohli přijít do kontaktu během nárazu. Nutné je si uvědomit a pochopit různé typy zranění k nimž může dojít, omezení velikosti prostoru, v němž se cestující během nárazu pohybuje a odstranění předmětů, které by mohly cestujícím během nehody způsobit další zranění.

Minimalizace nebezpečí vzniklých po nehodě a zajištění bezpečného úniku cestujících je také jedním z klíčových bodů pasivní bezpečnosti. Mezi hlavní požadavky lze řadit protipožární ochranu, již lze dosáhnout vhodně navrženým palivovým systémem, který by měl zabránit úniku hořlavých kapalin do prostoru s cestujícími, nebo například vhodné navržení a izolování elektroinstalace. Východy z letadla by měly být jasně označeny a měly by být použitelné i v převráceném či deformovaném letadle.

Výše uvedené body obsahují hlavní strukturu, kterou by měl konstruktér letadla brát v potaz pro dosažení maximální bezpečnosti během nárazu. Záměrem konstruktérů je zajistit, aby všechny jednotlivé části systému pasivní bezpečnosti byly sjednocené a fungovaly společně. Snahou je se vyhnout případu, kdy by si jednotlivé prvky pasivní bezpečnosti bránily ve správném fungování. Celkovým cílem systému pasivní bezpečnosti je tedy maximální pohlcení energie způsobenou nárazem, zpomalení pohybu cestujících a dosažení minimálních zranění u cestujících. Konstruktérům by mělo také zůstat na paměti, že veškerá implementace prvků pasivní bezpečnosti je pevně spojená s celkovou konstrukcí letadla. Proto je zásadní začlenit všechny požadované prvky hned do návrhu konstrukce příslušného letadla.

1.2 Historie pasivní bezpečnosti

Počátky vzniku myšlenky o pasivní bezpečnosti sahají do roku 1917. Během provádění cvičných letů pro Kanadské královské letectvo došlo ke střetnutí dvou letounů. Nehodu přežil pouze Hugh DeHaven, který vyvázl s četnými zlomeninami, poškozenými játry a slinivkou břišní [3].

Po zotavení se DeHaven rozhodl vypátrat, co zapříčinilo jeho přežití a jak by bylo možné získat vyšší šance na přežití v případě dalších nehod. Zjistil, že za poškození jeho vnitřních orgánů byl zodpovědný bezpečnostní pás, který však podle získaných informací zajistil i záchranu jeho života. Zbytek svého působení v armádě strávil sběrem dat o nehodách a zraněních, zkoumal podrobnosti a navrhoval změny, které vedly ke zlepšení bezpečnosti v případě nárazu letounu.

Po válce si nechal DeHaven patentovat některé své vynálezy a v roce 1933 odešel do penze (bylo mu tehdy 38 let) [4]. Později však stál ještě u zrodu projektů CIR², který se

²Crash Injury Reserch

od roku 1942 věnoval vyšetřování leteckých nehod, nebo projektu ACIR³, založený v roce 1953 po tom, co DeHaven přežil automobilovou nehodu [4].

Během svého působení v projektech CIR a ACIR, stále shromažďoval data o různých leteckých či automobilových nehodách. Věnoval se však i lidem, kteří přežili pád z nějaké velké výšky, ať už to byly nehody nebo pokusy o sebevraždu [4]. Pro sběr dat využíval hlavně novinových článků. Mnozí autoři těchto článků však uváděli jen málo faktických dat (výška pádu, hmotnost osoby, druh povrchu dopadu), a proto si je DeHaven musel zjišťovat napřímo.

V 50. letech minulého století navrhl konstruktér Fred Weick zemědělské letadlo AG-1, u kterého vycházel z doporučení od DeHavena [3]. Toto letadlo bylo vybaveno například bezpečnostními pásy s ramenními popruhy (a to i přes fakt, že tehdy ještě nebyly povinné). Tyto pásy se automaticky dokázaly uzamknout při násobku zatížení 3 g. První let proběhl 1. prosince 1950 na letišti v Easterwood před stovkami diváků [5]. V průběhu let se ukázalo, že snahy o zvýšení bezpečnosti byly užitečné a zachránily mnoho životů pilotům. Dalšími zástupci v oblasti zemědělství, kteří se inspirovali Weickovým návrhem byli Piper PA-25 Pawnee, Gruman Ag Cat nebo například Ayres Thrush.



Obrázek 1: Letoun AG-1 a jeho představení v roce 1950, [5]

Dalším zástupcem byl například letoun Beechcraft Bonanza, který disponoval [3]:

- zesíleným kokpitem - pro zachování tvaru při nárazu
- vyztuženou podlahou - pro dostatečnou pevnost a hladkost pro klouzání letounu při pádu
- přizpůsobení křídel a sedadel

Z důvodů vyzdvihování bezpečnostních systémů v kombinaci se špatným marketingem došlo k poklesu zájmu o tento letoun ze strany zákazníků. Převládala domněnka, že když je letadlo vybaveno tolika bezpečnostními prvky, nebude ve výsledku moc spolehlivé.

V 70. a 80. letech došlo k výrazným změnám v leteckých předpisech FAA⁴. Od té doby je nutné při návrhu letounu implementovat i prvky pasivní bezpečnosti [3]:

³Automotive Crash Injury Research

⁴FAA je zkratka pro Federal Aviation Administration, neboli Federální letecká správa v USA.

- 1977 ramenní popruhy pro přední sedačky
- 1985 všechny sedačky musí být opatřeny ramenními popruhy, kromě sedadel pro posádku⁵
- 1988 povinné zkoušky na testování sedadel, měření zranění podle nově stanovených kritérií
- 1997 crash-testy malých kompozitních letounů ve výzkumném zařízení NASA, došlo k implementaci a vhodné kombinaci zádržných systémů a sedadel, navíc byla zesílena konstrukce kabiny a vylepšené konstrukce uchycení motoru

Na přelomu století dále docházelo ke zlepšování pasivní bezpečnosti u malých letounů. Inspirací byl automobilový průmysl. Snahou bylo a stále je začlenění prvků pasivní bezpečnosti do konstrukce letadla za minimální náklady, vydávání souborů s pokyny pro navrhování a certifikaci, a také vzdělávání konstruktérů a veřejnosti.

1.3 Fyzika v kontextu pasivní bezpečnosti

Tato podkapitola bude sloužit k seznámení s fyzikou nárazu. Bude zde uveden kinematický popis a také vztahy mezi prací a energií.

1.3.1 Kinematický popis

Pro kinematický popis jsou důležité čtyři veličiny, kterými jsou poloha (x), rychlost (v), zrychlení (a) a čas (t). Je tedy nutné si uvést základní vztahy mezi těmito veličinami, aby bylo možná proniknout do celkového kontextu této problematiky. Na obr. 2 jsou schematicky znázorněny všechny zmíněné veličiny při nárazu letadla do stěny.



Obrázek 2: Schématické znázornění nárazu letadla do stěny, upraveno dle [6]

Matematicky si tyto veličiny můžeme zapsat do následujících vztahů.

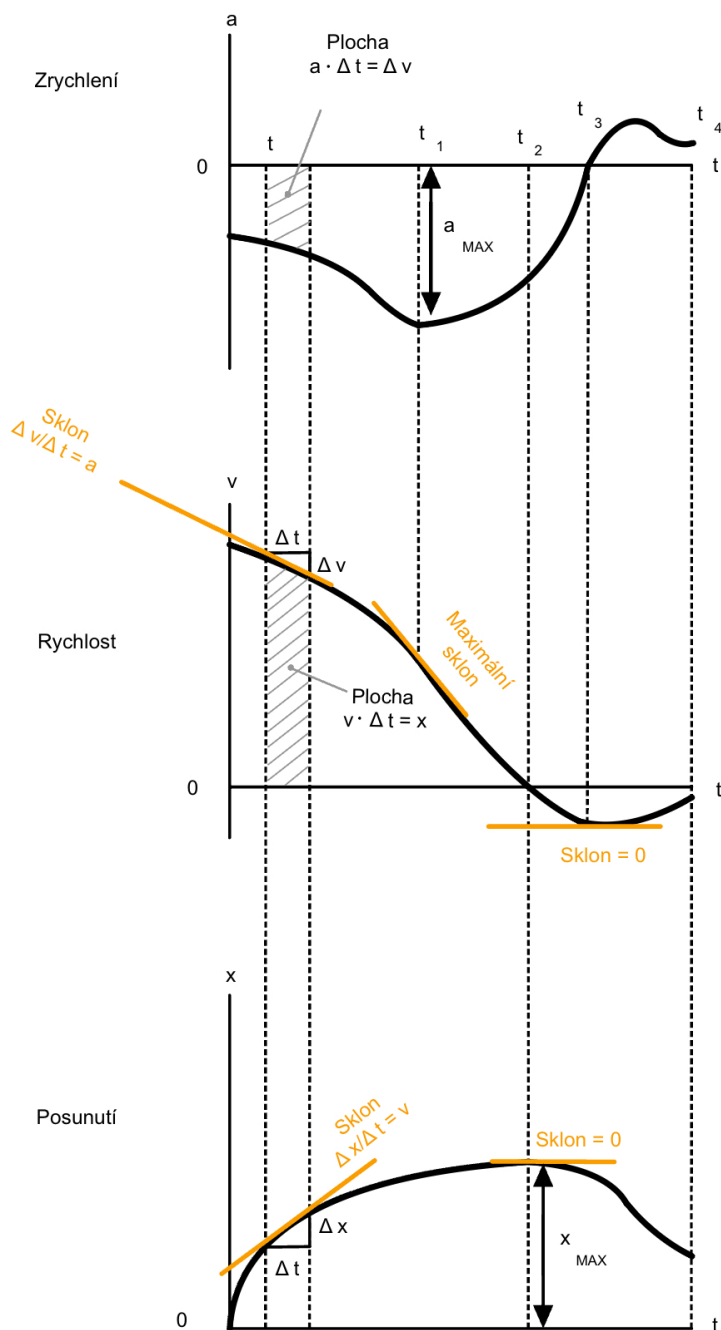
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.1)$$

⁵Platí pro letadla s méně než 9 místy k sezení.

Kde Δx je změna polohy, Δt je časová změna a v je rychlost. Podobně to je se vztahem pro zrychlení (a), kde je vztah definován jako změna rychlosti Δv za časovou změnu Δt .

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Pro lepší představu a pro uvedení souvislostí mezi těmito vztahy je vhodné uvést následující grafy.



Obrázek 3: Grafické znázornění vztahů pro kinematický popis, upraveno dle [6]

Platí, že výška křivky a - t je rovna sklonu křivky v - t , a výška křivky v - t je rovna sklonu křivky x - t . Neboli zrychlení a je směrnici křivky v - t a rychlost v je směrnici křivky x - t .

Dále pak plocha pod křivkou a-t, která je vyšrafovaná se rovná změně rychlosti v daném okamžiku. Při součtu všech takovýchto ploch v daném intervalu dostáváme vztah, který je odvozený z předchozí rovnice:

$$\sum \Delta v = \sum a \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

Stejně je tomu pak i pro plochy pod křivkou v-t, kde se součet všech těchto ploch bude rovnat součtu změn poloh v daném časovém intervalu.

$$\sum \Delta x = \sum v \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

Z obrázku je také nutné zmínit, že k největší změně rychlosti dochází při maximálním zrychlení (zpomalení) tedy v čase t_1 . Změna polohy dosáhne svého maxima v okamžiku, kdy se rychlost stane nulovou, tedy v čase t_2 .

Tyto rovnice se však dají nejlépe použít u rovnoměrně zrychleného pohybu, tedy když je zrychlení (a) konstantní. Při nekonstantním zrychlení se výpočty bez použití nějakého matematického softwaru provádějí velmi složitě. V praxi se však zavádějí zjednodušené tvary tzv. deceleračních pulzů. Dojde tedy k nahrazení složité časové funkce se zvládnutelným analytickým tvarem.

Rozlišují se základní čtyři pulzy:

1. Obdélníkový
2. Trojúhelníkový nesymetrický - s klesajícím zrychlením
3. Trojúhelníkový symetrický
4. Trojúhelníkový nesymetrický - s rostoucím zrychlením

Pro analytický zápis a pro srovnání jednotlivých pulzů se vyjadřuje vztah pro vzdálenost potřebnou pro zastavení a čas potřebný k zastavení.

- Obdélníkový pulz

$$\Delta x = \frac{v_0^2}{2a}$$

$$\Delta t = \frac{v_0}{a}$$

- Trojúhelníkový nesymetrický pulz - s klesajícím zrychlením

$$\Delta x = \frac{2v_0^2}{3a}$$

$$\Delta t = \frac{2v_0}{a}$$

- Trojúhelníkový symetrický pulz

$$\Delta x = \frac{v_0^2}{a}$$

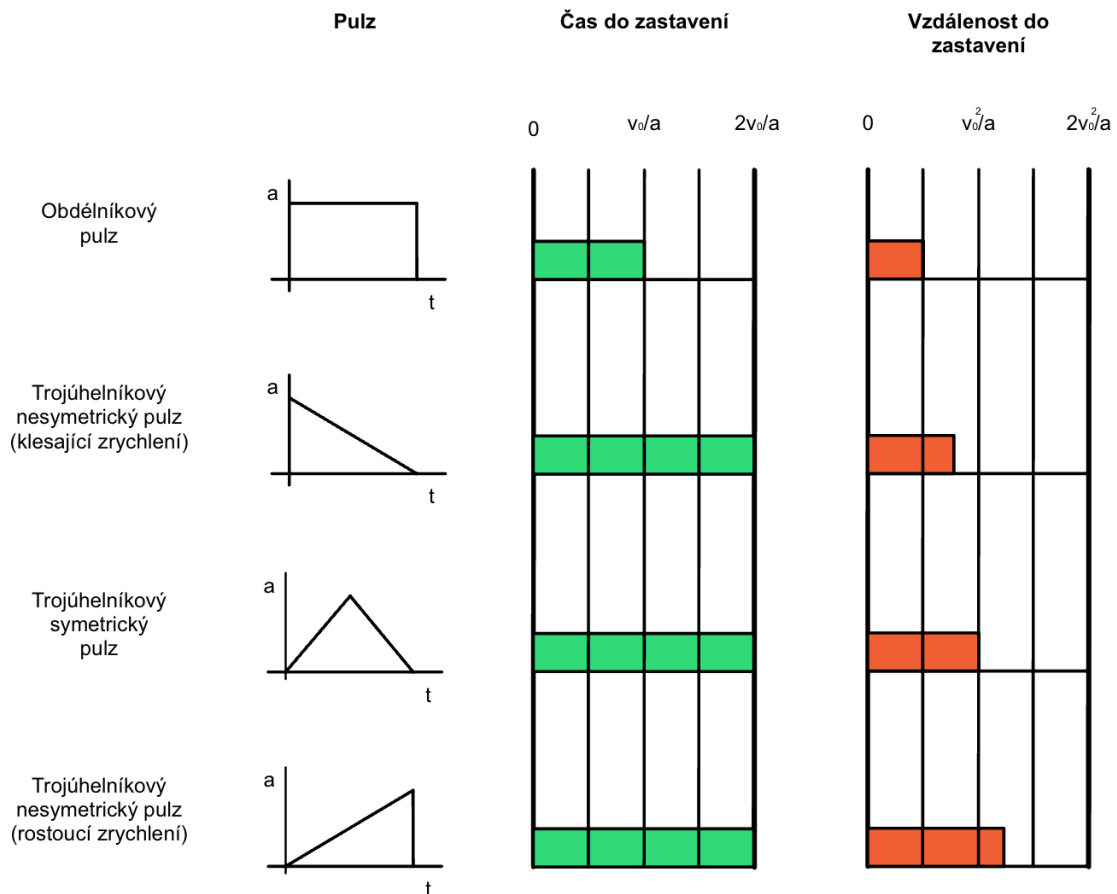
$$\Delta t = \frac{2v_0}{a}$$

- Trojúhelníkový nesymetrický pulz - s rostoucím zrychlením

$$\Delta x = \frac{4v_0^2}{3a}$$

$$\Delta t = \frac{2v_0}{a}$$

Pomocí analytických rovnic a z obr. 4 lze porovnat jednotlivé decelerační pulzy. Jako ideální příklad slouží obdélníkový pulz, jelikož má nejkratší čas a vzdálenost potřebnou pro zastavení. U všech tří trojúhelníkových pulzů je stejný čas potřebný k zastavení, avšak vzdálenost potřebná k zastavení tělesa je různá. Pro nejlepší analytický popis, jež nejvíce odpovídá skutečnému nárazu a který je klíčový pro návrh designu bezpečnostních systémů, se používá trojúhelníkový symetrický pulz.



Obrázek 4: Grafické znázornění časů a vzdáleností potřebných k zastavení u jednotlivých deceleračních pulzů, upraveno dle [6]

1.3.2 Práce a kinetická energie

K návrhu pasivně bezpečnostních systémů je důležité znát způsoby, jak nejlépe pohlcovat energii při nárazu k dosažení minimálního zrychlení, a tudíž minimálního dopadu na

posádku. Jak už bylo zmíněno v předchozí části této kapitoly, jedná se o návrh sedadel, zádržných systémů či samotné konstrukce letounu.

Pro popis celkové energie letadla před nárazem bude sloužit následující zjednodušená rovnice:

$$E_{celk} = E_k + E_p \quad (1.5)$$

Potenciální energie E_p lze vyjádřit podle vztahu:

$$E_p = mgh \quad (1.6)$$

V okamžiku nárazu je však výška h nulová proto je nulová i potenciální energie.

Jedinou složkou, která nám při nárazu hraje roli je tedy energie kinetická, která má následující vztah:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.7)$$

Pro přeměnu a pro stanovení změny kinetické energie pro celou konstrukci letounu se využívá vztah:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2) \quad (1.8)$$

Z rovnice 1.8 je patrné, že dochází k výměně energie mezi tělesem a jeho okolím, mění se tedy i silové působení na tělese a tyto síly konají práci. Podle [7] lze práci síly $F(x)$ při posunutí z počáteční polohy x_1 do koncové polohy x_2 definovat takto:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} ma_x dx \quad (1.9)$$

Použitím druhého Newtonova zákona za $F(x)$ dosadíme ma_x . Úpravou výrazu $ma_x dx$ dostáváme:

$$ma_x dx = m \frac{dv_x}{dt} dx \quad (1.10)$$

Pomocí dalších úprav získáme:

$$ma_x dx = mv_x \frac{dv_x}{dt} dt = mv_x dv_x \quad (1.11)$$

Dosadíme $ma_x dx = mv_x dv_x$ do rovnice 1.9, změníme meze integrálu a integrujeme:

$$W = \int_{v_{1x}}^{v_{2x}} mv_x dv = \frac{1}{2}mv_{2x}^2 - \frac{1}{2}mv_{1x}^2 = \Delta E_k \quad (1.12)$$

Z předchozích rovnic o kinetické energii a práci plyne, že při návrhu letadla s pasivně bezpečnostními prvky a jejich správné funkci, je nutné se zaměřit na následující parametry. Jedná se o hmotnost m , rychlost v , polohu x a sílu $F(x)$, která působí na letoun během nárazu. Díky těmto parametrům lze optimalizovat konfiguraci absorbéru energie, čímž se sníží zrychlení na úroveň, která je přijatelná pro přežití posádky.

2 Tolerance lidského těla vůči vzniku zranění

Při zkoumání vzniku zranění lidského těla je nutné brát v úvahu několik faktorů, které mohou ovlivnit jejich závažnost a charakter. Je nezbytně nutné si definovat akcelerační podmínky, směr nárazu, dobu trvání, rychlost a rozložení zatížení na cestujícího [8]. Pro snížení celkového rizika vzniku smrtelného zranění u cestujících je klíčové snížit účinky zrychlení a působícího zatížení na úroveň snesitelnou pro lidský organismus. Problematice vzniku zranění se věnovalo mnoho studií a výzkumů. Příkladem mohou být sepsané znalosti již dříve zmíněného DeHavena, který je považován za otce pasivní bezpečnosti. Dále pak například kniha Trauma Biomechanics od Smitta a spol. [9] či článek od Formana a spol. The tolerance of the human body to automobile collision impact [10]. Znalosti z těchto prací jsou seskupeny do požadavků FAR ¹ a jsou rozděleny na tolerance vůči vzniku zranění u hlavy, páteře a hrudníku. V této kapitole budou probrány faktory ovlivňující lidskou toleranci vůči vzniku zranění při leteckých nehodách. Následně zde bude uveden přehled figurín, které byly speciálně navrženy a vyvinuty pro měření a zkoumání vlivu nárazu na lidskou posádku. A nakonec bude věnována pozornost toleranci vůči zranění hlavy a páteře, které jsou pro posouzení zranitelnost v leteckých i automobilových nehodách zásadní.

2.1 Faktory ovlivňující lidskou toleranci

Jak už bylo v úvodu zmíněno, na toleranci člověka vůči nárazu má vliv několik faktorů. Ať už se jedná o směr zatížení, době trvání zatížení, rychlosti zatížení, typech zatěžovaných fyziologických struktur, rozložení zatížení atd. [8]. V praxi se používá celá řada těchto faktorů a jsou stanovena pevná kritéria, která se aplikují pro stanovení podmínek, ve kterých má lidský organismus vyšší šance na přežití. Tyto podmínky lze rozdělit do tří skupin:

- Biologická různorodost
- Typy zádržných zařízení
- Podmínky nárazu

2.1.1 Biologická různorodost

Pro stanovení hodnot, které rozdělují toleranci vůči nárazu u různých fyziologických typů, se používají experimenty s mrtvými těly, vzorky tkání apod., doplněné o analýzu pomocí výpočetních modelů. U jednotlivých typů osob se tolerance organismu vůči nárazu může značně lišit. Obecně se tyto hodnoty liší v závislosti na věku, pohlaví, výšce, váze a celkovému fyzickému stavu ².

¹FAR je zkratka pro Federal Aviation Regulations, neboli letecké předpisy, které jsou vydávány FAA (Federal Aviation Administration). Tyto předpisy upravují provoz civilního letectví v USA.

²Je třeba si uvědomit, že se tyto experimenty provádějí na tělech, která jsou starší a před smrtí byly v relativně špatném fyzickém stavu.

Tolerance vůči nárazu je také ovlivněna genetickými faktory. Některé genetické predispozice mohou u jedinců zvyšovat odolnost vůči nárazu tím, že disponují lepší strukturou a funkcí kostí, svalů a dalších tkání [8].

Biologická různorodost, která ovlivňuje toleranci vůči nárazu, zahrnuje také jaký měl daný jedinec životní styl, jaká byla jeho strava apod. S tím například souvisí to, že osoby s vyšší hmotností mohou mít vyšší šanci na přežití při nárazu, a to díky většímu množství tělesného tuku, který může působit jako ochranný polštář. Na druhé straně lidé s vyšší svalovou hmotou mohou mít nižší toleranci vůči nárazu, protože svalová tkáň je méně pružná než tuk, a tudíž nedokáže absorbovat tolik energie.

2.1.2 Typy zádržných zařízení

Různé typy zádržných zařízení ovlivňují, jakému zatížení bude cestující vystaven. V komerční přepravě se používají běžné dvoubodové pásy, tříbodové pásy jsou běžnou součástí výbavy automobilů a některých letounů z GA. Výjimkou jsou pásy čtyřbodové a pětibodové, které se používají převážně ve vojenských letadlech.

Dvoubodové pásy

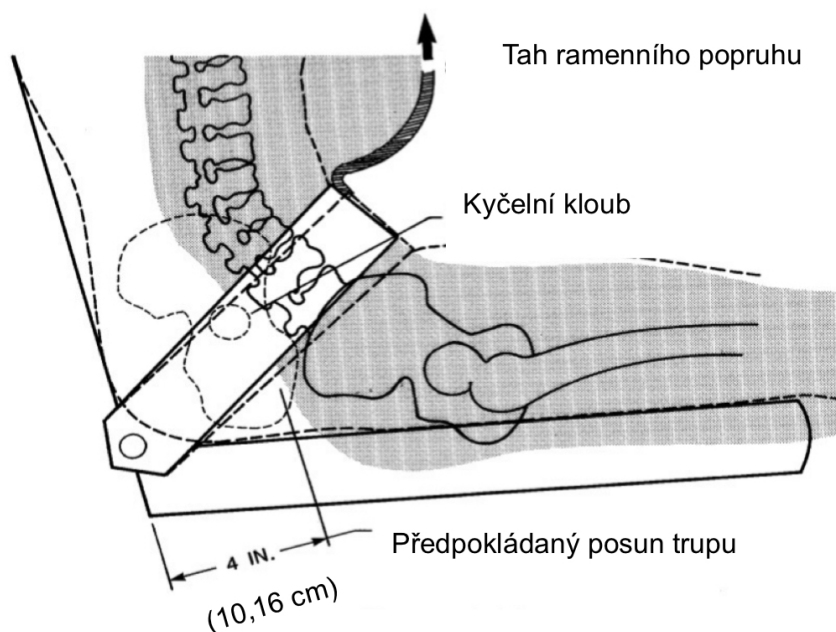
Při použití běžných dvoubodových pásů je tolerance lidského těla při prudkém zrychlení poměrně nízká. V práci prof. Laananena [11] je provedena analýza účinků dvoubodových pásů na člověka. Z dat, jichž získal z dynamických zkoušek s dobrovolnými lidskými subjekty při podmínkách nárazu dopravního letadla, stanovil minimální požadavky pro konstrukci sedadel dopravních letadel. Vzhledem k tomu, že všichni dobrovolníci z dynamických testů vyvázli bez větších zranění, jsou tyto tolerance považovány za minimální. Hodnoty hraničních tolerancí by mohly být podstatně vyšší [11].

Při použití dvoubodových pásů dochází velmi často k poraněním hlavy, které jsou způsobeny při nárazu do okolního prostředí. Je také velmi časté, že cestující má, při působení více složek sil z různých směrů, tendenci z pásů vypadnout. Pás se posune směrem nahoru přes břicho, horní část trupu se prohne přes působení pásu a celé zádržné zařízení je v tuto chvíli pro cestujícího nebezpečné [8].

Tříbodové a více bodové pásy

Přidáním ramenního popruhu se výrazně snižuje riziko zranění hlavy a hrudníku, dochází tedy k omezení kontaktu s okolním prostředím. Navíc tyto popruhy pomáhají udržet bezpečnou polohu páteře, a tudíž je menší pravděpodobnost vzniku nebezpečného zranění [11]. Tříbodové pásy však nemusí být optimální při nárazu s vertikálními i horizontálními složkami zatížení. Tlak horní části trupu na ramenní popruhy způsobuje, že tyto popruhy táhnou břišní pás nahoru do břicha a proti spodnímu okraji hrudního koše [8]. Tento pohyb pánevního pásu způsobuje posunutí pánve směrem dopředu, což vede k silnému prohnutí páteře, viz obr. 5.

V této poloze jsou bederní obratle velmi náchylné ke zlomenině, a pokud pánevní pás sklouzne z horní části pánevní kosti může dojít i k vážnému poškození vnitřních orgánů [11]. V pětibodovém zádržném zařízení existují tzv. vázací popruhy břišního pásu, které zabraňují nadzvednutí tohoto pásu ramenním pásem. Při použití tohoto typu pásového zařízení lze docílit téměř dvojnásobné tolerance vůči nárazu [11]. Pětibodové zádržné systémy se však používají především na sedadlech vojenských letadel. Skládají se z břišního



Obrázek 5: Znázornění posunu břichního pásu směrem nahoru do břicha a následné prohnutí páteře, upraveno dle [8]

pásu, dvou vázacích pásů na levé a pravé straně a ramenních pásů také na obou stranách. Všechny tyto pásy jsou spojeny do jedné uvolňovací spony, která slouží pro případné snadné uvolnění v případě potřeby [11].

Mezi hlavní parametry pro návrh zádržných zařízení patří velikost vůle a charakteristiky prodloužení, které mají zásadní vliv na schopnost člověka přežít při prudkém zrychlení [8]. Například zádržný pás bez vůle, ale s popruhy z materiálu s velkým prodloužením by měl tendenci přidršet cestujícího hlavně na začátku nárazu, ale více by se roztáhl, čímž by se zvýšila možnost vzniku sekundárních zranění (náraz do interiéru), během delší doby trvání nárazu [8]. Je potřeba hledat vhodný kompromis, volit zařízení s malými vůlemi a s menší schopností prodloužení a docílit tak maximálního bezpečí pro cestující.

2.1.3 Podmínky nárazu

Většina poznatků o toleranci člověka vůči zranění při nárazu vychází z experimentů, při nichž na cestujícího působí pouze jeden směr nebo jeden typ zatížení [8]. Tyto experimenty byly prováděny za účelem získání informací pro bezpečnostní systémy v dopravě. Experimentální hodnoty byly stanoveny hlavně na základě jednoosého zatížení, což je situace, kdy na tělo působí síla pouze ve směru jedné osy. Reálné nehody jsou však mnohem složitější. Při skutečných nehodách může docházet k víceosému zatížení, což znamená, že na cestujícího působí síly ve více směrech současně.

Kromě toho u skutečných nehod může docházet k více nárazům po sobě, což může následky nárazu na cestujících ještě více zkomplikovat. Po prvním nárazu může cestující utrpět určité typy zranění, tím se pak zvyšuje jeho náchylnost k dalším zraněním při jakýchkoli sekundárních nárazech. Účinnost zádržných systémů klesá, protože jsou navrženy na zmírnění účinku hlavně primárního nárazu.

Je tedy důležité brát v úvahu komplexní povahu podmínek nárazu. Bezpečnostní systémy by měly být testovány i na víceosé zatížení a měla by se u nich zohlednit možnost opakovaných nárazů. Pouze tak lze zvýšit stupeň ochrany cestujících při nehodě.

2.2 Antropomorfní testovací zařízení

Antropomorfní testovací zařízení (ATD³) jsou klíčovým nástrojem konstruktérů pro experimentální testování bezpečnostních systémů a pro simulaci reakce lidského těla při nárazových zkouškách. Jedná se o zkušební figuríny, které se používají k napodobení odezvy lidského těla při různých podmínkách zatížení a zrychlení. ATD jsou navrženy tak, aby reprezentovaly určitou velikost jedince a jeho procentuální zastoupení v populaci. Mohou tvořit pouze určitou část těla, kterou je třeba otestovat.

Přestože ATD poskytují cenné informace pro vývoj a testování bezpečnostních systémů, je důležité si uvědomit, že nejsou dokonalou replikou lidského těla. Mezi tyto nedokonalosti patří fakt, že na ATD zařízeních nejsou vytvořeny svaly a měkké tkáně, proto při testování nelze docílit maximální přesnosti s ohledem na skutečnou lidskou toleranci vůči nárazu [8].

Navzdory omezením jsou ATD nezbytné pro zlepšování bezpečnosti v mnoha oblastech lidské činnosti. Bez nich by bylo mnohem složitější a riskantnější testovat a vylepšovat bezpečnostní systémy, které každodenně chrání životy lidí po celém světě.

K sběru dat jsou ATD zařízení vybavena různými typy senzorů. Tato sesbíraná data se pak zpracovávají převážně digitálně. Analogové systémy se také používají, ale používají se spíše jako záložní systém sběru dat vedle digitálních zařízení.

Rozlišují se hlavní tři typy systémů sběru dat z ATD:

Testování mimo zkušební vozidlo Tento typ je nejčastěji používán, když není možné umístit laboratorní vybavení do zkušebního vozidla (například na sáně) kvůli jeho velikosti.

Testování ve zkušebním vozidle V tomto případě není potřeba připojovat propojovací kabely k měřicím systémům. Testovací zařízení je možné umístit přímo do vozu, protože nejsou příliš rozměrná. Veškeré úpravy signálů, filtrování, vyhlazování, digitalizace a ukládání dat probíhají přímo ve vozidle.

Systémy umístěné na ATD Tyto systémy jsou zabudovány přímo do figurín, čímž se eliminuje potřeba propojovacích kabelů mezi měřicími zařízeními a snímači na ATD. Tento systém zajišťuje úpravu, filtrování a vyhlazování signálu, škálování a ukládání dat.

Důležité je také zmínit, že při výrobě zařízení ATD je potřeba brát ohled i na to, aby tato zařízení byla schopna plnit svou funkci opakovaně [8]. To znamená, že u více nárazových zkoušek by měla tato zařízení vykazovat stále stejnou odezvu (výstup). Životnost a schopnost opakovatelnosti testovacích figurín (ATD) jsou ovlivněny různými faktory, jako je například teplota a vlhkost v testovacích prostředích, stáří ATD a míra poškození, které ATD utrpí během jednotlivých zkoušek [8].

Aby bylo možné zajistit opakovatelnost použití ATD při dynamických testech, musí konstruktéři dělat kompromisy mezi pevností těchto figurín a snahou co nejvěrněji simulovat lidské tělo. Příkladem tohoto kompromisu je použití oceli u kostry ATD. Ocel byla

³Zkratka pro anglické spojení Anthropomorphic Test Devices.

vybrána kvůli své vysoké pevnosti což umožňuje zvýšenou možnost opakování testovacích cyklů. Nicméně, ocel má také své nevýhody. Jednou z nich je, že nedokáže přesně nahradit vlastnosti lidské kosti. To může ovlivnit přesnost simulace lidské reakce na zatížení a zrychlení, což je jednou z klíčových složek pro testování a vývoj bezpečnostních systémů.

2.2.1 Rozdělení ATD

První vytvořenou figurínou pro dynamické zkoušky byl tzv. „Sierra Sam“ vytvořený v roce 1949 na zakázku pro letectvo Spojených států amerických (USAF⁴) [12]. Úkolem této figuríny bylo vyhodnocení bezpečného použití katapultovacích sedadel u letadel. Její konstrukce se bohužel ukázala jako nevhodná pro opakované použití, což vedlo k postupnému zničení.



Obrázek 6: Sierra Sam, první antropometrická figurína [12]

V osmdesátých letech byla vyvinuta společností Systems Research Laboratories (SRL) pokročilá antropomorfní figurína s názvem ADAM. ADAM byl navržen pro testování nárazových zkoušek u vystřelovacích sedadel CREST (Crew Escape Systems Technologies), při zkouškách různých padáků nebo například vrtulníkových sedadel [8].

V dopravním průmyslu se dnes používají převážně dvě kategorie figurín: pro čelní a boční náraz. Pro GA se pro hodnocení systémů a letadla jako celku používá převážně ATD Hybrid II a Hybrid III pro čelní náraz.

Hybrid II

V sedmdesátých letech 20. století vyvinula společnost General Motors figurínu ATD Hybrid II [14]. Tato figurína byla navržena za účelem hodnocení spolehlivosti zádržných sys-

⁴USAF je zkratka pro United States Air Force.



Obrázek 7: Hybrid II [13]

témů břišních a ramenních pásů při čelním nárazu automobilu. Tento krok byl motivován rostoucí potřebou zlepšovat bezpečnostní standardy v automobilovém průmyslu.

Použití figuríny ATD Hybrid II se později stalo povinným pro všechny nárazové zkoušky u všech vozidel vybavených pasivními zadržnými systémy. Toto rozhodnutí bylo založeno na úspěšnosti a efektivitě, kterou figurína prokázala při hodnocení bezpečnostních systémů.

Při konstrukci byly použity různé materiály, včetně oceli, hliníku, mosazi a různých kompozitních materiálů. Konkrétní materiály byly vybrány pro svou schopnost odolávat nárazům, které mohly nastat během testování. Vnější struktura figuríny byla tvořena potahem vyrobeným z umělého vinylu v kombinaci s pěnovými komponenty [13]. Potah byl navržen tak, aby co nejvíce napodoboval vnější vzhled a texturu lidského těla. Anatomicky věrná kopie lidského těla byla doplněna o dutiny pro akcelerometry, jež slouží k měření a zaznamenávání dat během nárazových zkoušek.

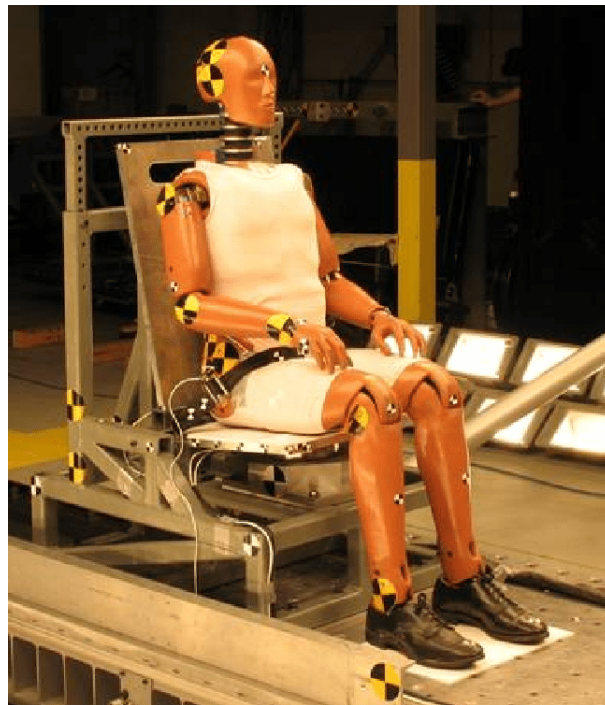
Přes všechna konstrukční řešení, volbu materiálů nebo například rozmístění senzorů, nebylo při nárazových zkouškách dosaženo přesných výsledků. Hlavním důvodem bylo, že většina použitých materiálů neměla schopnost simulovat biologickou realitu skutečného lidského těla. Materiály byly schopné vydržet opakované zkoušky, ale nebylo možné přesně napodobit odezvu lidského těla. Z tohoto důvodu bylo nutné brát zmiňovaná omezení v úvahu a posouvat vývoj těchto zařízení dál.

Hybrid III a FAA Hybrid III

Už v roce 1976 představila společnost General Motors nový typ zařízení ATD Hybrid III, který měl být oproti svému předchůdci odolnější, což mu umožňovalo provést větší počet dynamických zkoušek. Hybrid III byl vybavený pokročilou konstrukcí hlavy, krku a

trupu, které více odpovídala skutečné anatomické struktuře člověka [8]. Díky snímačům umístěným v oblasti krku a dolních končetin bylo možné měřit více typů zranění.

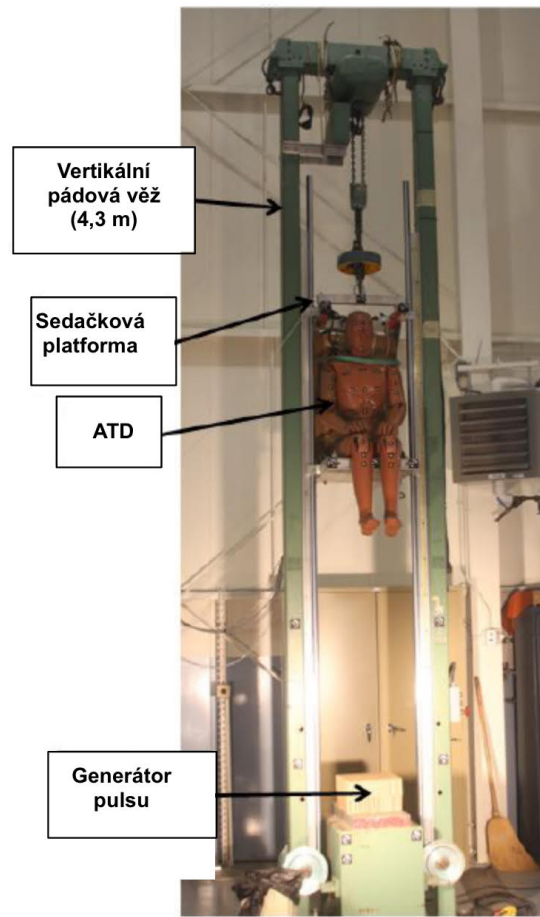
Jedním z klíčových rozdílů mezi zařízeními Hybrid II a Hybrid III je konstrukce bederní páteře. Zatímco Hybrid II disponoval rovnou bederní páteří, která umožňovala měření axiálního tlaku mezi bederní páteří a pánevní oblastí, Hybrid III byl vybavený zakřivenou bederní páteří, která sice nedovolovala přímé měření zatížení, nicméně lépe odpovídala typickému zakřivení u kostry člověka. Tento charakteristický rys však limitoval využití Hybrid III pro hodnocení zranění při leteckých nehodách. Při havárii letadla dochází k silnému vertikálnímu tlaku, který může způsobit vážná poranění bederní páteře. Zakřivená bederní páteř modelu Hybrid III neumožňovala přesné měření axiálního tlakového zatížení bederní páteře, což snižovalo jeho použitelnost pro tato hodnocení [8].



Obrázek 8: FAA Hybrid III, upravená verze Hybridu III s rovnou bederní páteří [13]

Pro dosažení efektivnějšího použití a přesnějšího měření byly provedeny různé modifikace zařízení Hybrid III. Jedním z přelomových kroků v modifikaci Hybrid III byl typ, který udržoval přímou – sedící pozici – což vedlo k přesnějšímu měření biomechanických sil působících mezi bederní částí páteře a pánevní oblastí [8]. Takto vytvořená figurína lépe reflektovala typické usazení pasažérů a posádky, což vedlo k věrohodnějším výsledkům při simulaci nárazů. Pomocí této modifikace, nazvané FAA Hybrid III, bylo možné lépe porozumět biomechanickým reakcím těla v podmínkách, které jsou pro letectví specifické.

Ve studii od Polanca a Littella [15] bylo provedeno srovnání zátěže bederní páteře mezi Hybrid III a FAA Hybrid III při vertikálním pádu. Výsledky ukázaly, že Hybrid III s rovnou bederní páteří překročil limit zátěže 1 500 lb (stanovený předpisy FAR), zatímco typ FAA Hybrid III se zakřivenou páteří limitu nedosáhl. Tato skutečnost tedy zdůrazňuje rozdílnost použití jednotlivých typů ATD a nutnost pečlivého výběru ke konkrétnímu typu měření.



Obrázek 9: Konfigurace testovacích zařízení pro simulaci vertikálního pádu, upraveno dle [15]

2.3 Tolerance nárazu hlavy

Při konstrukci letadel GA je jedním z nejvýznamnějších problémů, pokud jde o prevenci zranění cestujících, ochrana hlavy cestujícího při nárazu. V dynamickém prostředí nárazu se mechanismy poranění hlavy dělí do dvou různých kategorií [8]:

- Kontaktní mechanismy poranění
- Bezkontaktní mechanismy poranění

2.3.1 Kontaktní mechanismy poranění hlavy

Kontaktní poranění hlavy vzniká deformací lebky v důsledku přímého úderu do hlavy. Nejsou však důsledkem pohybu hlavy po nárazu. Při kontaktním poranění hlavy a lebky s pevným objektem mohou nastat:

- Lokální poranění v místě nárazu (fraktury lebky, krvácení).
- Pronikající poranění, které nastává při průniku ostrého objektu do hlavy, což může vést k poškození lebky či mozku.

- Vzdálená zranění, která jsou způsobena energií z rázové vlny. Objevují se mimo místo kontaktu s objektem a mohou vést ke zlomeninám lebečních kostí nebo například ke krvácení do mozku.

2.3.2 Bezkontaktní mechanismy poranění hlavy

Bezkontaktní poranění hlavy jsou definována jako poranění mozku, k nimž dochází v důsledku deformace nebo deformace tkáně způsobené setrvačnou reakcí hlavy na zrychlení. Bezkontaktní poranění jsou obvykle důsledkem znehybnění trupu cestujícího, které je doprovázeno extrémním pohybem hlavy směrem dopředu nebo šlehavým pohybem hlavy. Rotační zrychlení hlavy může přinutit mozek k nárazu do vnitřních stěn lebky, čímž v mozku vzniknou dva různé typy deformace [8]:

- Povrchová deformace
- Vnitřní deformace

Povrchové deformace mohou způsobit subdurální hematom, který vzniká akumulací krve z poškozených cév [8]. Vnitřní deformace mohou vyvolat otřes mozku (pohyb mozku uvnitř lebky) nebo například difuzní axonální poranění (mechanické narušení mnoha neuronů neboli mozkových buněk). Bezkontaktní poranění mohou být velmi závažná, nedochází k nim však tak často jako ke kontaktním poraněním [9]. Bezkontaktní poranění jsou obvykle důsledkem extrémních podmínek nárazu a intenzivního rotačního zrychlení hlavy.

2.3.3 Kritérium poranění hlavy (HIC)

V současné době se potenciální riziko poranění hlavy cestujících při dynamických nárazech předpovídá pomocí kritéria poranění hlavy (HIC⁵). Kritérium HIC je klíčovou složkou v bezpečnostních testech a je součástí předpisů Federálního úřadu pro letectví (FAA), konkrétně 14 CFR část 25.562 či podle Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA), konkrétně CS-23. Oba tyto předpisy se zabývají ochranou posádky a cestujícím při nouzovém přistání [1] [16].

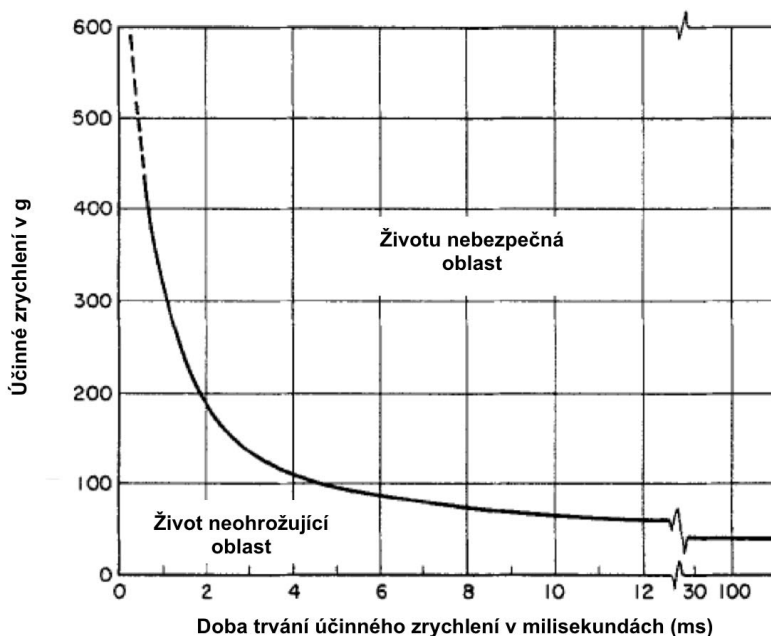
Vývoj HIC začal již v roce 1960, kdy Lissner a kol. na univerzitě Wayne State (WSU) v Detroitu vytvořili Wayne State Tolerance Curve (WSTC) [9]. Jednalo se o časový průběh zrychlení, který byl vytvořen ve snaze definovat hranici tolerance pro otřes mozku. Na obr. 10 lze vidět, že křivka tvořená ze zjištěných dat rozděluje graf na dvě oblasti. Na životu nebezpečnou a život neohrožující.

Lissner dále zjistil, že kontaktní poranění hlavy jsou obvykle způsobena krátkodobým zrychlením o velké velikosti. Zatímco bezkontaktní poranění hlavy jsou častěji způsobena dlouhodobým zrychlením o malé velikosti. Je důležité si uvědomit, že nejjasněji definovaná část křivky WSTC byla vytvořena pomocí údajů o kontaktních zraněních. Tato oblast křivky obsahuje větší počet datových bodů a sahá přibližně do 15 ms. V důsledku toho vědci tradičně s větší jistotou používají počáteční část časového průběhu zrychlení jako ukazatel fraktury lebky.

Za účelem porovnání závažnosti nárazů hlavy použil Gadd WSTC k vytvoření váženého impulzního kritéria nazvaného index závažnosti (SI⁶). Jak je znázorněno na obr. 11,

⁵HIC je zkratka pro anglický výraz Head Injury Criterion.

⁶SI je zkratka pro Severity Index neboli index závažnosti.



Obrázek 10: Křivka WSTC znázorňující hranici pro vznik otřesu mozku, upraveno dle [8]

Gadd vytvořil lineární aproximaci WSTC vynesem křivku na logaritmickou stupnici. Vzniklou křivku Gadd proložil přímkou o definovaných souřadnicích ($t = 1$ ms; $a = 15,85$ g). Výsledkem byla rovnice ve tvaru:

$$TA^{2,5} = 1000 \quad (2.1)$$

Kde T je čas [s] a A je zrychlení [g].

Finálním tvarem pro Gaddův index závažnosti SI byl následující vztah:

$$SI = \int_0^t a^{2,5} dt < 1000 \quad (2.2)$$

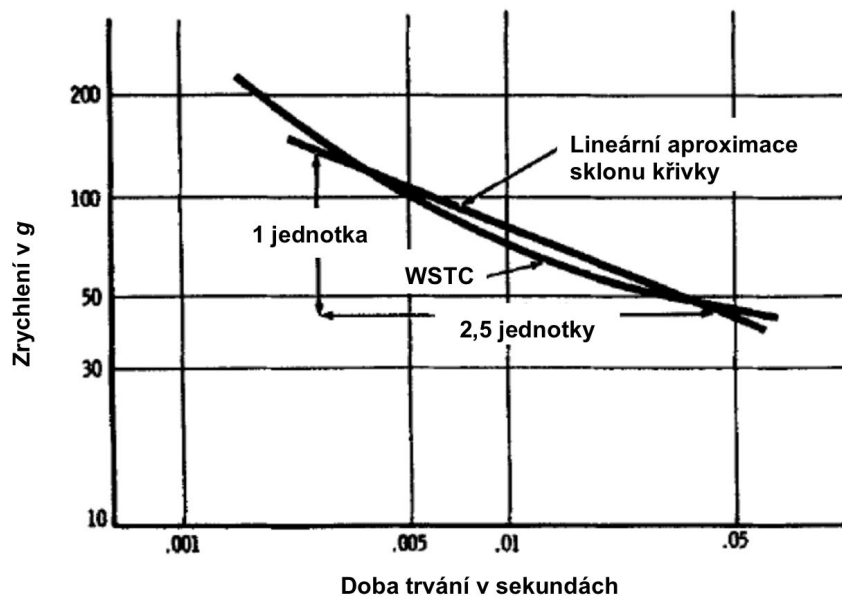
Kde a je okamžité zrychlení [g], $2,5$ (někdy označované obecně jako n) je váhový faktor a t je čas [s].

Podle Gaddova indexu závažnosti znamenaly hodnoty vyšší než 1 000 vysokou pravděpodobnost vzniku poranění hlavy.

V roce 1971 bylo zahrnuto Gaddovo kritérium do zákona pro bezpečnost silniční dopravy v USA (NHTSA) [8]. V průběhu let však docházelo k častým nesrovnalostem v SI. Tyto nesrovnalosti přiměly mnoho výzkumníků k pochybnostem o jeho platnosti. SI neposkytovala odpovídající shodu s WSTC při velmi krátkém a ani při velmi dlouhém trvání zrychlení.

Versace, kvůli těmto pochybám proto zformuloval dodnes používaný způsob hodnocení závažnosti zranění HIC, který je definován jako [17]:

$$HIC = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}_{\max} \quad (2.3)$$



Obrázek 11: Gaddova lineární aproximace WSTC křivky, upraveno dle [8]

Kde

- $a(t)$ [g] je výsledné zrychlení působící v těžišti hlavy během časového intervalu t_2 a t_1 .
- $t_2 - t_1$ [ms] je doba, během které dosáhne zrychlení $a(t)$ maximální hodnoty.

Na základě Versaceho práce NHTSA v roce 1972 zrušila SI a přijala HIC [8]. Bylo vyžadováno, aby se HIC počítal pro kontaktní i bezkontaktní případy, a to po celou dobu trvání nehody. Hodnota kritéria byla pak stanovena jako maximální hodnota, ze všech časových intervalů větších než 1ms. Hranice vyhovění kritériu zůstala stanovena na 1000 jednotek (jak tomu bylo u Gaddovy přímkové aproximace WSTC).

Roku 1986 automobilový průmysl revidoval výpočet HIC omezením časového intervalu HIC ($t_2 - t_1$) na maximální dobu 36ms. Časový interval 36 ms odpovídá maximální hodnotě HIC 1000 při konstantním zrychlení hlavy 60 g [9]. Hranice zrychlení 60 g byla definována tvůrci WSTC jako přiměřená prahová hodnota pro poranění hlavy.

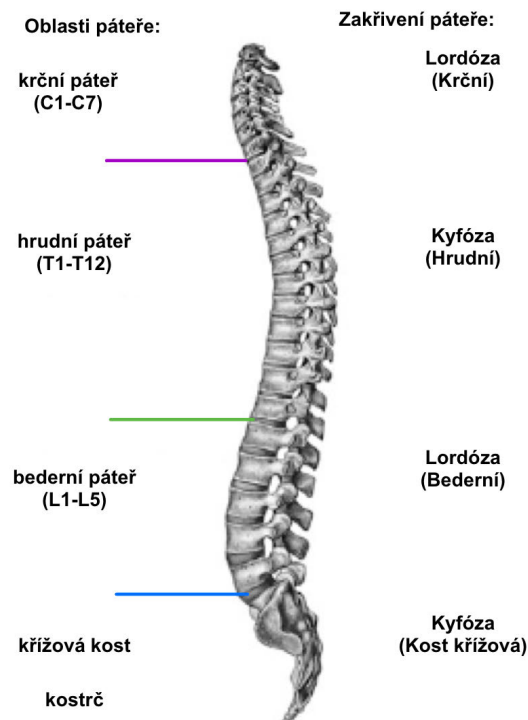
Po zavedení a přijetí HIC další výzkum odhalil, že WSTC, SI a HIC mají stále řadu omezení. Žádné z těchto kritérií například nedokáže rozlišit mezi frakturou lebky a poraněním mozku. Kromě toho tato tři kritéria nezohledňují místo a směr působení sil při nárazu do hlavy.

2.4 Tolerance zranění páteře

Páteř plní v lidském těle řadu funkcí. Je zodpovědná za ochranu míchy, poskytuje oporu a strukturu těla a umožňuje pohyb hlavy, krku a trupu. Lidská páteř se skládá z 24 jednotlivých obratlů a ze dvou skupin srostlých obratlů viz obr. 12. Těchto 24 obratlů tvoří ohebnou část páteře, která se dělí na 3 sekce:

- krční obratle (7 obratlů; C1 až C7)
 - C1 je nejvyšší obratel, který je spojen přes týlní kondyly s lebkou
- hrudní obratle (12 obratlů; T1 až T12)
- bederní obratle (5 obratlů; L1 až L5)

Obratle jsou spojeny několika různými typy měkkých tkání, včetně vazů, kosterních svalů a meziobratlových plotének. Dvě srostlé skupiny, křížová kost a kostrč, se nacházejí pod bederními obratli a tvoří zadní stěnu pánevního pletence. Obratlové struktury, které tvoří křížovou kost a kostrč, nemají stejné vlastnosti jako jednotlivé obratle.

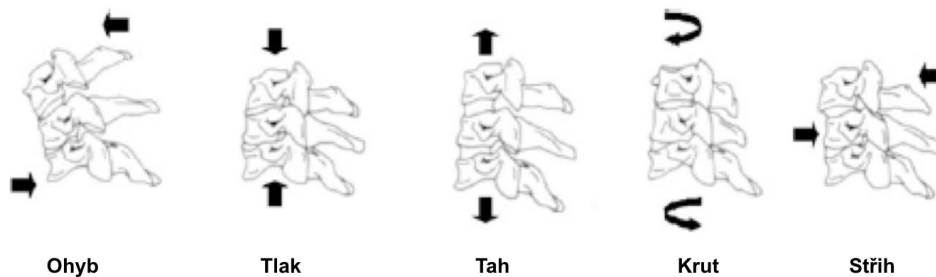


Obrázek 12: Popis lidské páteře, upraveno dle [9]

Při čelním pohledu je páteř zdravého jedince rovná. Při bočním pohledu na celou páteř jsou patrné hlavní zakřivení páteře [9]:

- Krční lordóza
- Hrudní kyfóza
- Bederní lordóza
- Kyfóza kosti křížové

Zranění páteře se dělí podle primárního směru zatížení. Mezi pět základních technických popisů zatížení páteře řadíme ohyb, tlak, tah, krut a smyk viz obr. 13.



Obrázek 13: Jednotlivé způsoby zatížení páteře, upraveno dle [9]

Pro hodnocení tolerance člověka vůči zranění páteře se provádějí studie, které měří a analyzují vliv různých mechanismů zatížení na páteř. Zatížení potřebné k vyvolání poranění se výrazně liší v závislosti na okrajových podmínkách definovaných pro experiment, včetně typu použitého zkušební vzorku, počáteční polohy vzorku a stupně fixace [8]. Například změna polohy páteře při ohnutí a natažení může mít velký vliv na způsobené zranění, a to i když se poloha liší v řádech několika stupňů.

2.4.1 Tolerance zranění páteře

Mechanické vlastnosti lidské páteře byly podrobeny mnoha testům na dobrovolnících, mrtvolách, zvířatech a figurínách. Například pro bederní páteř byly prahy zlomenin stanoveny různými experimenty s využitím funkčních jednotek páteře. Kompresní zlomeniny byly pozorovány při zatížení v rozmezí přibližně 2-6 kN [9]. Předpisy v oblasti bezpečnosti v letectví vyžadují, aby maximální stlačení bederní páteře nepřekročilo 6 672 N (= 1 500 lb) viz CS 23.562 [16].

Množství hlášených údajů o toleranci poranění páteře je velmi omezené. Páteř není poraněna tak často jako jiné oblasti těla, a proto nebyla studována ve stejném rozsahu jako například poranění hlavy. Kromě toho existuje několik omezení jak v automobilovém, tak v leteckém výzkumu, která ztěžují přesné vymezení kritérií tolerance zranění [8]:

- Zatížení páteře jedním druhem zatížení je méně pravděpodobné, zranění jsou obvykle důsledkem kombinace více zatížení.
- Celková konfigurace páteře hraje velkou roli při určování způsobu poranění.
- Je obtížné vypracovat jednoznačná kritéria zranění páteře, protože selhání páteřních komponent zahrnuje jak tvrdé, tak měkké tkáně.
- Zatížení krku je silně ovlivněno setrvačným chováním hlavy.
- Pozorované pohyby a síly hlavy nemusí nutně odrážet pohyby nebo skutečný mechanismus zranění krční páteře.

V současné době se údaje o toleranci zranění shromažďují od instrumentovaných lidských dobrovolníků, izolovaných hlavových a krčních páteří, izolovaných pohybových segmentů krční páteře, zvířat a ATD. Co se týče ATD, je třeba si uvědomit, zda je páteř rovná či zakřivená, jak již bylo zmíněno v podkapitole o Hybrid III a FAA Hybrid III viz kapitola 2.2.1.

3 Srovnání pasivní bezpečnosti u jednotlivých stavebních předpisů letadel

Pasivní bezpečnost je nedílnou součástí celkové konstrukce letadel. V předchozích kapitolách byly zmíněny klíčové aspekty při návrhu konstrukce letadel. Kladení důrazu na konstrukci trupu letadla, výběr vhodných materiálů, které by byly odlehčené a zároveň odolávaly extrémním nárazům. Zmíněna byla i vhodná konstrukce interiéru kabiny, u které by mělo být zásadní, aby při incidentu nedocházelo k sekundárnímu kontaktu s prvky v kabině.

Na pasivní bezpečnost v letectví je v dnešní době nahlíženo spíše okrajově, zatímco zájem pilotů přechází na technologie, které usnadňují pilotáž anebo orientaci ve vzdušném prostoru. Příkladem takových technologií by mohly být systémy pro automatické řízení letu, satelitní navigace a různé aplikace, které poskytují informace o vzdušných prostorech (jestli jsou například aktivní a je možné se v těchto prostorech pohybovat). Dopravní letadla jsou také vybavena palubním protisrážkovým systémem TCAS¹, který umožňuje komunikaci mezi letadly nezávisle na řízení letového provozu a varuje piloty před blížícími se kolizemi. Lze tedy říci, že aktivní bezpečnosti je dáována větší pozornost.

Přesto by neměla být opomíjena důležitost pasivní bezpečnosti, díky které nabývá letadlo na užitné hodnotě a může disponovat značným marketingovým potenciálem, jak tomu je v automobilovém průmyslu. Výrobci automobilů často využívají pasivní bezpečnosti jako argumentu ke koupi jejich vozidel. Podobně by mohli i výrobci letadel těžit z prezentace pasivně bezpečnostních technologií jako atributu, který nejen zvyšuje atraktivitu jejich strojů, ale také posiluje důvěru uživatelů.

V této kapitole bude provedena analýza čtyř důležitých stavebních předpisů letadel, zmíněny budou různé požadavky k jednotlivým předpisům a konkrétní příklady letadel, které implementují různé prvky pasivní bezpečnosti.

3.1 Stavební předpisy

V této kapitole budou popsány jednotlivé stavební předpisy, které jsou vydány Evropskou agenturou pro bezpečnost v letectví (EASA), nebo jsou převzaté od Úřadu pro civilní letectví. Pro účely této práce bude nutné se zaměřit na bezpečnostní požadavky kladené na letouny všeobecného letectví (GA). Tato kategorie je velice rozsáhlá a zahrnuje několik certifikačních specifikací, které definují různé třídy letounů. Mezi tyto předpisy patří norma CS-LSA pro lehké sportovní letouny, CS-VLA pro velmi lehké letouny, CS-22 pro kluzáky a motorové kluzáky a již dříve zmiňovaná CS-23 pro malé letouny. Výše zmíněné normy zajišťují, že letouny zmíněných kategorií odpovídají všem bezpečnostním požadavkům, které jsou na ně kladené.

¹TCAS je zkratka z anglického Traffic Collision Avoidance System.

3.1.1 CS-LSA

Letouny této kategorie jsou omezeny maximální vzletovou hmotností 600 kg pro letouny neoperující na vodě a 650 kg pro letouny určené pro operace na vodě [18]. Pádová rychlost v přistávací konfiguraci (V_{S0}) nesmí přesáhnout 83 km/h (45 uzlů) CAS² při maximální certifikované vzletové hmotnosti a nejkritičtější poloze těžiště [18]. Konstrukčně jsou povolena pouze dvě sedadla pro cestující včetně pilota. Letoun musí být dále vybaven nepřetlakovou kabinou a jedním nepřepřehňovaným motorem nebo elektrickým pohonem.

Bezpečnostní požadavky na letouny této kategorie zahrnují aspekty týkající se například sedadel a pásů, které musí být navrženy tak, aby zajistily bezpečnost cestujících a byly schopné absorbovat síly během nehody.

Část CS-LSA.15 dodatek 5.10.2 [18] je věnován požadavku, aby každý letoun se zatahovacím podvozkem snášel zatížení směrem dolů o velikosti 3 g a disponovala součinitelem tření 0,5. A to i v konfiguraci se zataženým podvozkem.

Dále se tento stavební předpis zaměřuje na bezpečnost při řízení na zemi a ve vodě, aby se dalo předcházet nebezpečným situacím, jako je například kymácení na vodě. Při přistání na zemi musí být letadla s vysouvacím podvozkem schopna nouzového vysunutí podvozku. Zároveň je nutné, aby došlo k maximální ochraně cestujících při přistání i se zasunutým podvozkem.

Prostor kolem motoru musí být konstruován tak, aby nemohlo dojít k akumulaci vlhkosti a hořlavých kapalin. Všechna palivová a olejová vedení musí být navíc odolná proti vysokým teplotám anebo chráněná protipožárním krytem. Pokud maximální rychlost letadla přesahuje 200 km/h je nutné provést test vibrací motoru viz CS-LSA.15 dodatek 4.6.1 [18]. Tento test zajišťuje, že letoun není vystaven riziku kmitání, což by mohlo vést k poškození anebo v horším případě k selhání motoru během letu.

Letouny této kategorii mohou k navýšení pasivní bezpečnosti být navíc vybaveny záchrannými padáky pro celou letadlovou konstrukci. Záchranné padáky pro účely použití v letadlové konstrukci musí splňovat normy ASTM F2316-12, které stanovují požadavky na záchranné padáky, včetně jejich upevnění a spolehlivosti v nouzových situacích. Norma ASTM F2316-12 stanovuje požadavky vhodných materiálů a konstrukci nouzových padáků pro lehká sportovní letadla. Obsahuje specifikace pro odolnost materiálů vůči vlhkosti a teplotě, kritéria pro instalaci padáku včetně váhy, vyvážení a způsobu instalace k letounu [19]. Zabývá se také testy k ověření pevnosti padáku, stanovuje násobky zatížení, rychlosti sestupu, postupné rozvinutí a odolnost proti vlivům prostředí.

Kromě předpisu CS-22 lze v České republice využít podrobnější předpis UL2 [20], který poskytuje komplexnější přístup k certifikaci a provozu ultralehkých letadel. Tento předpis detailně specifikuje, jakým zatížením mohou být vystaveny osoby na palubě letounu, což je klíčové pro zajištění bezpečnosti pasažérů. Konkrétně, UL2 [20] § 561 stanovuje následující limity zatížení:

- nahoru 4,5 g
- dolů 4,5 g

²CAS (anglicky Calibrated Airspeed) je kalibrovaná rychlost, která je upravena o chybu přístrojů a polohovou chybu (není ale upraveno o vliv hustoty vzduchu). Tato chyba je největší při nízkých rychlostech. Proto je důležité znát CAS konkrétního letounu hlavně při nízkých rychlostech (přistání, vzlet). V porovnání s TAS (pravá vzdušná rychlost), tedy rychlost letadla k nerozrušenému vzdušnému prostředí (s uvažováním vlivu hustoty vzduchu), je CAS rovna TAS ve standardní atmosféře na hladině moře.

- dopředu 9,0 g
- do strany 3,0 g

TL-Ultralight Stream

Jako příkladový letoun pro stavební předpis CS-LSA může sloužit letoun Stream od české firmy TL-Ultralight se sídlem v Hradci Králové. Jedná se o dolnoplošník s tříkolovým zatahovacím podvozkem s říditelnou přední podvozkovou nohou. Podvozek je možné zatahovat pomocí hydraulické soustavy, která je vybavená nouzovou pumpou. Primárně je tento letoun určen pro VFR³ lety za denního světla a není uzpůsoben pro provádění akrobatických manévrů.



Obrázek 14: Letoun TL-Ultralight Stream [21]

Nepřekročitelná rychlost 342 km/h (185 uzlů) IAS⁴, pádová rychlost (bez klapek) je 110 km/h (59 uzlů) IAS a pádová rychlost (s klapkami) je 85 km/h (46 uzlů) IAS [22].

Letoun je konstruován z moderních kompozitních materiálů, včetně kevlarových a uhlíkových vláken, což zajišťuje vysokou pevnost draku a zároveň nízkou hmotnost letounu. Trup letounu je konstruován jako monolitická sendvičová skořepina posílená vnitřními přepážkami [21]. Vnitřní část trupu letounu je tvořena kevlarovou skořepinou, která zaručuje vysokou pevnost a zásadně přispívá k bezpečnosti posádky.

³VFR je zkratka z anglického Visual Flight Rules, což lze přeložit jako pravidla letu za vidu. Tato pravidla stanovují, při jakých podmínkách je umožněno pilotům létat. Je nutné, aby piloti byli schopni vidět zem, díky čemuž jsou schopni se orientovat.

⁴IAS (Indicated airspeed), neboli indikovaná vzdušná rychlost, je rychlost kterou ukazuje rychloměr v kabině letadla. Tato hodnota je nejčastěji uváděna v uzlech (kt). IAS je pro pilota klíčová, protože umožňuje určit optimální konfiguraci letadla pro různé fáze letu. V příručkách se rychlosti často rozdělují:

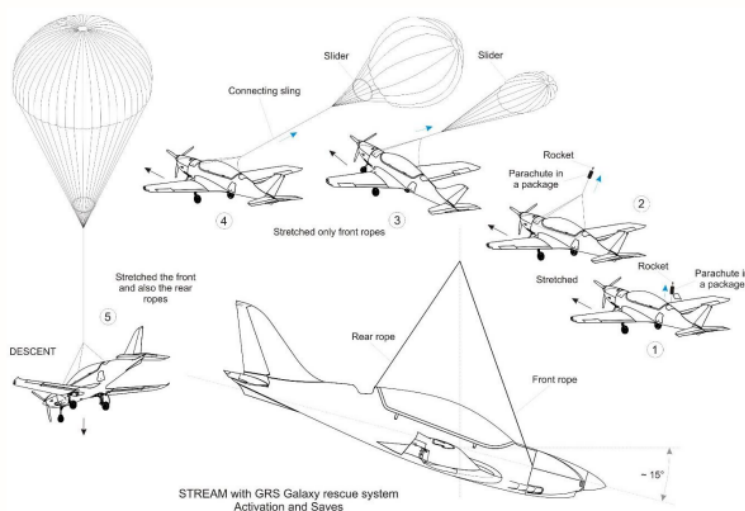
- V_{S0} je označení pádové rychlosti (podvozek a klapky jsou vysunuté, bez výkonu motoru).
- V_{S1} je pádová rychlost v tzv. čisté konfiguraci (podvozek a klapky jsou zasunuté, bez výkonu motoru).
- V_{FE} je maximální rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami.
- V_{NO} je maximální cestovní rychlost rychlost za klidného větru a bez neočekávaných změn.
- V_{NE} je maximální nepřekročitelná rychlost pro všechny operace.



Obrázek 15: TL-Ultralight Stream CAD model [21]

V přední části trupu se nachází prostor pro motor⁵, za ním je kabina s tandemovým uspořádáním dvou sedadel a za prostorem kabiny je prostor pro zavazadla spolu se záchranným padákovým systémem.

Letoun STREAM je standardně vybaven záchranným padákovým systémem, který přispívá k zvýšení šance na přežití posádky v kritických situacích. Aktivační rukojeti systému jsou instalovány pod přístrojovými deskami v předním pilotním prostoru nalevo a v zadním pilotním prostoru napravo [22]. Záchranný padákový systém slouží jako kritický záchranný prostředek v případě, že pilot ztratí kontrolu nad letounem. Při aktivaci tohoto systému je třeba počítat se značným poškozením letounu. Důležitým bezpečnostním aspektem je dodržení maximální vzletové hmotnosti 600 kg, jelikož její překročení může vést k nesprávné funkci padákového systému [22]. V případě vzniku požáru na palubě během letu je doporučeno neaktivovat padákový systém ihned, pokud je letoun ve vysoké nadmořské výšce. Místo toho, pokud to okolnosti umožňují, je vhodnější snížit letovou výšku před aktivací systému, aby se minimalizovalo riziko šíření ohně do kabiny.

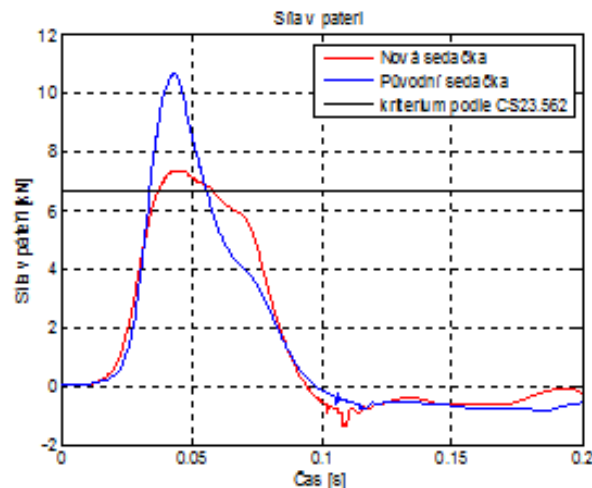


Obrázek 16: Schéma padákového systému TL-Ultralight [22]

⁵Pohonnou jednotku letounu Stream tvoří motor Rotax 912 ULS. Jedná se o čtyřválcový motor s dvěma karburátory s konstantním tlakem v difuzoru [21].

Podle webu Airoweb.cz [23] je cena nového modelu letounu TL Stream v základní výbavě 189 600 euro (přibližně 4 750 000 Kč).

V souvislosti s vývojem letounu Stream je potřeba také zmínit práci Zahálky a Mališe [24], která se věnovala vývoji nových pilotních sedaček s voštinovým blokem. Testy sedaček probíhaly na zkušebně silničních vozidel ve společnosti Dekre CZ a.s. a bylo postupováno podle normy CS-23.562(b)(1) [16] viz kapitola 3.1.4. Nové sedačky vykazovaly nižší hodnoty zatížení do páteře cestujícího oproti sedačkám původním viz obr. 17.



Obrázek 17: Porovnání sil působících do páteře pro původní na nově navrženou sedačku letounu TL-Stream [24]

3.1.2 CS-VLA

Velmi lehké letouny (VLA⁶) je kategorie letounů určená primárně pro neakrobatické lety. Pohonnou jednotku smí tvořit pouze jeden motor. Každý letoun této kategorie musí mít maximálně dvě sedadla a musí splňovat maximální certifikovanou vzletovou hmotnost do 750 kg [25]. Pádová rychlost v přistávací konfiguraci nesmí překročit 83 km/h (45 uzlů) CAS. Dalšími podmínkami pro pádovou rychlost jsou například motor ve volnoběhu, vrtule ve vzletové poloze, letoun musí být testován na pádovou rychlost při maximální certifikované vzletové hmotnosti a nejkritičtější poloze těžiště viz CS-VLA 201 [25].

Certifikační specifikace pro letouny kategorie CS-VLA klade také důraz na systémy varování před pádem. Tyto systémy musí být schopny poskytovat jasné a zřetelné upozornění v kritických situacích, kdy hrozí riziko pádu letounu. Varování musí být aktivní při jakékoliv běžné konfiguraci letounu, což zahrnuje různé polohy vztlačových klapek a podvozku. Tato zařízení nesmí vyžadovat přílišnou pozornost pilotů, kvůli možnému ovlivnění schopností jejich schopností mít kontrolu nad letounem v kritické situaci. Specifikace stanovuje, že systém varování před ztrátou rychlost by měl být aktivován při překročení pádové rychlosti minimálně o 9,3 km/h (5 uzlů) a maximálně o 18,5 km/h (10 uzlů) viz CS-VLA 207 [25]. Tento systém musí pokračovat v upozorňování až do okamžiku, kdy by mohlo dojít k pádu letounu.

Sedadla a jejich nosné konstrukce musí být dimenzovány pro osobu o minimální hmotnosti 86 kg, přičemž musí vydržet hodnoty maximálních zatížení specifikovaných v pod-

⁶VLA je zkratka pro anglický výraz Very Light Aircraft.

mínkách o nouzovém přistání CS-VLA 561 viz níže. Bezpečnostní pásy musí být vybaveny spolehlivým kovovou sponou, kterou v případě nouze nebude složité uvolnit. Dále musí být pásy a bezpečnostní postroje navrženy tak, aby umožňovaly pilotovi vykonávat všechny potřebné funkce během letu.

V blízkosti sedadel nesmí být žádné ostré hrany, výčnělky, tvrdé povrchy ani jiné potenciálně nebezpečné objekty, které by mohly v případě nárazu způsobit posádce zranění viz kapitola 1.1. Konstrukce musí být schopna absorbovat energii vzniklou nárazem a chránit osoby před vážnými zraněními způsobenými setrvačnými silami. Prostředí kabiny letounu by mělo také minimalizovat riziko nadměrného vertikálního zrychlení, které by mohlo nastat při přistání [25].

Mezi nejzásadnější prvky pasivní bezpečnosti patří systémy omezující otáčky motoru a vrtule, který chrání před nadměrným zatížením těchto částí v nouzových situacích a udržuje letoun v bezpečných operačních hodnotách. Tzv. systémy FADEC⁷, které se dnes implementují i do letounů s pístovými motory, umožňují regulaci otáček v závislosti na aktuálním výkonu motoru a zajišťují, že otáčky motoru a vrtule zůstávají v bezpečných mezích i během kritických fází letu [25]. V případě instalace jiných bezpečnostních zařízení je nezbytné, aby tato zařízení byla snadno přístupná a umístěna ve vhodně navržených, bezpečných prostorech, které budou odolávat poškozením způsobeným vlivem setrvačných zatížení uvedených níže.

Ve specifikacích CS-VLA jsou uvedeny na rozdíl od předchozího zmíněného dokumentu CS-LSA i podmínky nouzového přistání (CS-VLA 561). V těchto podmínkách je stanoveno, že k zajištění maximální ochrany posádky je nutné splnění dvou podmínek [25]:

- Všechny osoby na palubě musí mít řádně zapnuté a zajištěné bezpečnostní pásy.
- Konstrukce musí být schopná pohlcovat limitní setrvačné síly působící na posádku:
 - Směr nahoru: 3,0 g
 - Horizontální směr vpřed: 9,0 g
 - Horizontální směr do stran: 1,5 g

Veškeré objekty v letounu, které by mohly během nouzového přistání ohrozit cestující, musí být umístěny tak, aby odolaly zmiňovaným setrvačným zatížením. Jedinou výjimkou je konstrukce motorového lože u koncepce za anebo nad kabinou posádky, která musí vydržet zrychlení až 15 g směrem dopředu [25].

Konstrukce letounu musí být také schopná zajistit ochranu cestujících i v případě úplného převrácení letounu. Přičemž se předpokládá, že mezní setrvačná síla působící směrem nahoru je 3,0 g a součinitel tření na zemi je 0,5 viz CS-VLA 561 (d) [25].

Letouny s možností zatažení podvozku musí být navrženy tak, aby i v případě přistání s nevysunutým podvozkem byla zachována ochrana osob na palubě. Předpokládá se, že při klesání s nezataženým podvozkem bude menší klesací rychlost přistání, mezní setrvačná síla 3,0 g bude působit směrem dolů a součinitel tření na zemi bude 0,5.

⁷Zkratka FADEC znamená Full Authority Digital Engine Control, což by se do češtiny dalo volně přeložit jako Úplná digitální kontrola nad motorem. Tento systém je navržený k automatickému řízení, je schopný optimalizovat výkon motoru s ohledem na různé fáze letu a hodnoty provozních parametrů motoru. Primárně byly určeny tyto systémy do velkých dopravních letounů, ale dnes pronikají i do oblastí GA.

Aquila A211

Německá Aquila A211 je tréninkový a rekreační letoun, který je primárně určen pro VFR lety ve dne i v noci. Výrobci tohoto letounu si zakládají na snadné pilotáži a dobrých letových vlastnostech, díky kterým se tento letoun hodí pro výcvikové lety. Nastavitelná sedadla umístěná vedle sebe mají integrované opěrky hlavy a spolehlivý zádržný systém. Prostorný kokpit s panoramatickým krytem kabiny zajišťují výbornou viditelnost během letu. Pohonnou jednotku tohoto letounu nejčastěji tvoří čtyřválcový motor Rotax 912 S, jenž vyniká efektivitou a spolehlivostí [26].

Nepřekročitelná rychlost letounu činí 165 uzlů IAS (přibližně 306 km/h). Pádová rychlost bez klapek je 49 uzlů IAS (přibližně 91 km/h) a s klapkami 39 uzlů IAS (přibližně 72 km/h) [27].

Aquila A211 je konstruována s využitím moderních kompozitních materiálů, jejichž vlastnosti přinášejí do konstrukce letounu značné výhody, které se týkají pevnosti, nižší hmotnosti a aerodynamických vlastností. Kvůli vysoké odolnosti vůči korozi a únavě materiálu přispívají kompozity k vyšší trvanlivosti letounu a zvyšují jeho integritu při různých operačních zatíženích.

Kompozitní materiály hrají obecně významnou roli v kontextu leteckého průmyslu, kde je stále kladen velký důraz na snížení celkové hmotnosti letadel za účelem snížení spotřeby paliva a tím i snížení emisí. Snahou konstruktérů je tedy získání maximálního výkonu bez kompromisů v oblasti bezpečnosti.



Obrázek 18: Letoun Aquila A211 [26]

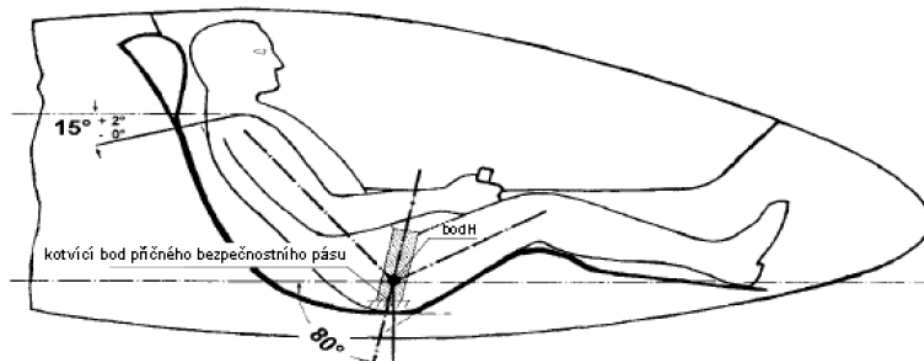
Na trhu jsou k dispozici tři varianty vybavení. Klasická Aquila A211 s převážně analogovými přístroji, poté verze Aquila A211G s dotykovým displejem GARMIN G500 TXi a verze Aquila A211GX ve které je kromě dotykového displeje GARMIN systém monitorování motoru MVP-50P [26].

3.1.3 CS-22

Předpis CS-22 se zabývá konstrukcí, designem a provozem kluzáků a motorových kluzáků konstruovaných maximálně pro dva členy posádky. Dále je dělí do dvou kategorií, a to Utility (U) neboli cvičné a Aerobatic (A) neboli akrobatické. Pro kluzáky je stanovena maximální hmotnost 750 kg a pro motorové kluzáky je toto omezení 850 kg [28]. Maximální pádová rychlost v přistávací konfiguraci může být dle CS-22.49 [28]:

- 80 km/h
 - se zasunutými aerodynamickými brzdami a při
 - maximální hmotnosti s prázdnými nádržemi na vodní zátěži
- 90 km/hod
 - se zasunutými aerodynamickými brzdami a při
 - maximální hmotnosti s vodní zátěží
- 95 km/h
 - s plně vysunutými aerodynamickými brzdami a při
 - maximální hmotnosti s vodní zátěží

Bezpečnostní pásy by měly být navrženy tak, aby minimalizovaly riziko vyklouznutí nebo vysmeknutí pasažérů. V úvahu musí být brány setrvačné zatížení směrem dopředu a bočně. Kotvící body břišního pásu by měly být umístěny nízko za kyčelním kloubem (viz 19 bod H). Úhel kotvení tohoto bodu by měl být 80 ± 10 stupňů vzhledem k podélné ose kluzáku [28]. Kotvící body ramenních pásů by měly být umístěny pod a za rameny pasažérů pod úhlem přibližně 15° vzhledem k podélné ose kluzáku. Vzdálenost mezi nimi by neměla být více než 200 mm [28]. Ramenní pásy musí zajistit bezpečnost posádky během dopředného zrychlení a pravděpodobné boční deformaci trupu.



Obrázek 19: Schéma konstrukce zádržných systémů v kluzácích

Návrh konstrukce kluzáků musí zajišťovat únikový východ⁸ i v případech, kdy by byl kluzák v převrácené poloze. Při konstrukci je možné navrhovat speciální nouzové východy, které by měly uzpůsobeny nestandardním polohám letounu. Kromě toho může být na palubě umístěno únikové vybavení, které by posádce umožnilo rychlé opuštění pomocí proražení trupu. V kabině dále musí být umístěna pevné opěry a madla, umožňující podporu při úniku. Tyto části musí být schopné ustát zatížení alespoň 2000 N ve směru působení síly [28].

Podobně jako u stavebního předpisu CS-VLA jsou i zde stanoveny podmínky nouzového přistání. Tyto podmínky stanovují, že každý kluzák musí být konstruován tak, aby i při potenciálním poškození během nouzového přistání byla zajištěna bezpečnost osob

⁸Únikový východ u všech kluzáků musí být navrženy tak, aby umožnil rychlý únik osobám s padákem.

na palubě. Pro dosažení maximální ochrany cestujících je klíčové správné použití bezpečnostních pasů. Je požadováno, aby pásy byly navrženy tak, aby maximálně chránily osoby na palubě před zrychlením [28]:

- 7,5 g směrem nahoru,
- 9 g směrem dolů,
- 15 g směrem dopředu,
- a 6 g bočně.

Veškeré vnitřní opěrné konstrukce musí být schopné odolat zmíněným zatížením, aby nedošlo k uvolnění těch částí, které by mohly zranit posádku. U kluzáků se zatažitelným podvozkem musí být konstrukce schopna odolat zrychlení 3 g směrem dolů s koeficientem tření 0,5 na zemi stejně jako u předpisu CS-VLA.

Let L23 Super Blaník



Obrázek 20: Let L23 Super Blaník

Mezi nejznámější zástupce kategorie CS-22 v českém a slovenském prostředí patří bezpochyby kluzáky Blaník. Konkrétně model L23, patřící do kategorie U (Utility) neboli cvičné kluzáky, je dvoumístný (s tandemovým uspořádáním) celokovový hornoplošník vhodný pro pilotní výcvik. Jeho maximální vzletová hmotnost činí 530 kg a dokáže dosáhnout rychlosti až 135 uzlů (250 km/h) při klidném vzduchu [29].

Z prvků pasivní bezpečnosti je u tohoto letounu dobré zmínit pevnou ocelovou trupovou konstrukci, která chrání posádku před vnějšími nárazy a případným proniknutím objektů do kabiny. Dalším důležitým aspektem je použití padáků. Ty však nejsou součástí konstrukce letounu, ale každý člen posádky musí být vybavený individuálním padákem, který je nezbytný pro zajištění bezpečnosti v případě nutnosti opuštění letounu ve vzduchu. Tyto padáky musí být vybrány tak, aby neomezovali pohyb členů posádky během běžného provozu, ale zároveň aby byly snadno a rychle použitelné v případě nutnosti.

3.1.4 CS-23

Letouny předpisu CS-23, které jsem částečně popisoval už v první kapitole této práce 1, jsou omezeny maximální vzletovou hmotností obvykle do 19 000 lb (přibližně 8 618 kg). Pádová rychlost nesmí překročit 113 km/h (61 uzlů) pro jednomotorové a dvumotorové letouny s maximální hmotností 2 722 kg nebo nižší, viz CS23.49 [16]. Kromě počtu a konfigurace sedadel (viz kapitola 1) můžeme letouny konstruované podle CS-23 rozdělit do čtyř kategorií [16]:

- Normální kategorie (Normal) jsou všechny letouny, které jsou omezeny na neakrobatické lety tzn. zatáčky s náklonem do 60°.
- Cvičná kategorie (Utility) jsou ty letouny, které mohou provádět všechny operace zahrnuté v normální kategorii, a navíc jsou schváleny pro provádění mírně náročnějších manévru, jako jsou vývrtky, zatáčky s náklonem větším než 60°, ale menším než 90°.
- Akrobatická kategorie (Aerobatic) jsou letouny které nejsou omezeny žádnými specifickými omezeními kromě těch, které vyplývají z letových zkoušek. Jsou tedy určeny k provádění celé řady akrobatických prvků.
- Kategorie pro sběrnou dopravu (Commuter) je část letounů, u které se dají provádět manévry spojené s normálním létáním (zatáčky do 60°). U letounu této kategorie je kladen důraz na přepravu osob a jejich bezpečnost.

Tyto kategorie pomáhají výrobcům určit, který typ letounu je pro daného zákazníka nejvíce vhodný a zdali s ním bude moci provádět operace, které potřebuje.

Letouny kategorie CS-23 jsou navrženy pro široké spektrum využití (výcvik nových pilotů, rekreace, cestování, akrobacie, zemědělské aplikace). Tato mnohotvárnost činí z letounů zkonstruovaných podle předpisu CS-23 jedny z nejuniverzálnějších strojů na trhu, u kterých je široká možnost adaptace pro konkrétní využití.

Oproti předchozím předpisům uvedeným výše je v CS-23 zahrnuta konfigurace více-motorové pohonné jednotky.

Z podmínek pro nouzové přistání je dobré zmínit, že každé sedadlo a zádržný systém musí být narženy pro osobu vážící nejméně 77 kg, na kterou působí zatížení setrvačnými silami odpovídající početním násobkům statického zatížení [16].

Osoby na palubě musí být schopny vydržet statické setrvačné síly při nouzových situacích, které odpovídají násobkům pro různé směry [16]:

- 3 g nahoru (pro normální, cvičné a sběrné letouny) a 4,5 g pro akrobatické letouny
- 9 g dopředu
- 1,5 g bočně
- 6 g dolů

Navíc je potřeba, aby všechny předměty v kabině, které by potenciálně mohly způsobit zranění, byly odolné vůči násobkům [16]:

- 3 g nahoru

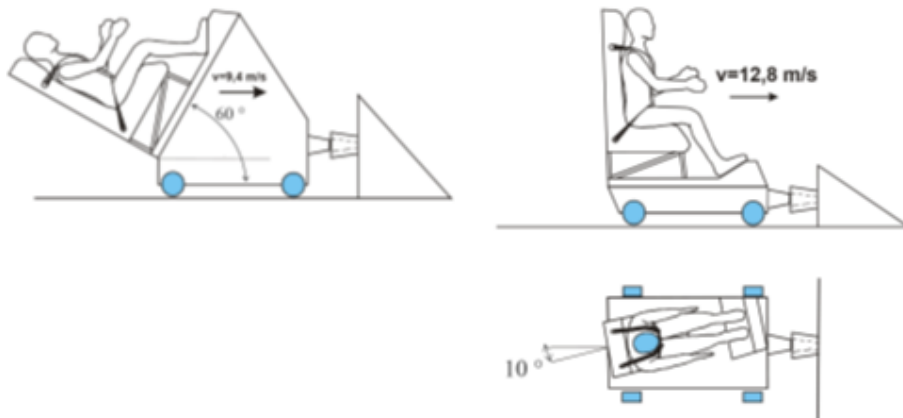
- 18 g dopředu
- 4,5 g bočně

Předměty v kabině musí zůstat (při těchto zatíženích) na stejném místě, aby nezpůsobovaly další zranění posádky během nouzové situace.

Kromě statických podmínek pro nouzové přistání (uvedených jak v předpisu CS-VLA, tak i v CS-22), jsou v CS-23 uvedeny i dynamické podmínky pro nouzové přistání. To zahrnuje provádění dynamických zkoušek, při kterých jsou použity metody a prostředky (viz 2).

Sedadla i zádržné systémy musí být testovány pro různé scénáře nárazu. Pro zobecnění jsou v předpisu CS23.562 uvedeny dva typy zkoušek [16]:

- Při prvním typu musí sedadla i zádržné systémy vydržet změnu rychlosti nejméně 9,4 m/s. Tento typ zkoušky se provádí pod úhlem letounu 60° vůči horizontální rovině.
 - Pro sedadla v první řadě se požaduje, aby zrychlení dosáhlo násobku alespoň 19 g během 0,05 sekundy po nárazu. U ostatních sedadel je tato hodnota 15 g během 0,06 sekundy po nárazu.
- - Při druhé zkoušce nesmí být změna rychlosti nižší než 12,8 m/s. Sedadla a zádržné systémy musí být opět v původní pozici. Letoun je během tohoto testu vybočený o 10° , k simulaci nejkritičtějších podmínek pro ramenní pásy.
 - Pro sedadla v první řadě je požadováno špičkové záporné zrychlení 26 g během 0,05 sekund. Ostatní sedadla musí být 21 g během 0,06 sekund.



Obrázek 21: Schéma typů dynamických testů sedaček první typ CS23.562(b)(1) (vlevo) a druhý typ CS23.562(b)(1) (vpravo) [24]

V předpisu je dále kladen důraz na ochranu hlavy. Proto musí být dosaženo hodnoty HIC (viz 2.3.3) méně než 1000, aby byla zajištěna ochrana proti vážným poraněním hlavy. Musí se zamezit kontaktu hlavy se sousedními předměty (palubní deska, sedačka či konstrukční prvky). Aby bylo možné dosáhnout požadované hodnoty HIC, musí být provedeno ověření měřením ve dvou zmíněných dynamických zkouškách.

Cessna 172 Skyhawk

Letoun Cessna 172 Skyhawk je jedním z nejznámějších na celém světě. Má širokou škálu využití od rekreačních letů, přes cestovní využití až po výcvikový letoun. Oblibu si získal hlavně díky své spolehlivosti a snadné pilotáži. Primárně je tento letoun určen pro lety VFR ve dne i v noci. Konstrukce letounu je tvořena z kovových materiálů, díky čemuž je více odolná vůči vnějším vlivům. Pohonnou jednotku tvoří většinou 4válcový motor typu boxer (písty se pohybují v horizontální rovině proti sobě) o výkonu 160 a v některých novějších verzích i 180 koní. Maximální vzletová hmotnost Cessny 172 Skyhawk se pohybuje okolo 1 157 kg (2 550 lb) a cestovní rychlost dosahuje hodnoty 124 uzlů (přibližně 230 km/h) [30].



Obrázek 22: Cessna 172S Skyhawk [31]

Model 172 je vybaven čtyřmi sedadly s vícebodovým zádržným systémem v základní výbavě. Některé modely 172 nabízejí integrované airbagy do bezpečnostních pásů či záchranným padákovým systémem podobně jako letoun TL-Ultralight Stream. Instalací padákových systémů na modely Cessna 172 a 182 se zabývá americká společnost BRS Aerospace [32]. Záchranný padákový systém je výhodný hlavně v situacích kdy u letounu selže motor a jsou ztíženy podmínky pro nouzové přistání⁹. Je však nutné si uvědomit, že instalace takového systému nepatří k těm nejlevnějším¹⁰ a také dochází k ovlivnění letových vlastností kvůli přidané hmotnosti od tzv. balistického odpalovacího zařízení viz obr. 23. Hmotnost takového zařízení činí u Cessny 172 dalších 79 lb (přibližně 36 kg) váhy navíc, která musí být brána v úvahu při výpočtech na vyvážení letounu. Instalaci tohoto záchranného systému poté provádí společnost BRS Aerospace na Cessnách 172, které byly vyrobeny po roce 1966 [33].

⁹Například může dojít k poruše řízení, či hraje roli nezkušenost pilota.

¹⁰Cena padákového systému vycházela na Cessnu 172 v roce 2017 okolo 15 tisíc dolarů + náklady na instalaci [33].



Obrázek 23: Cessna 172 Skyhawk s padákovým systémem od společnosti BRS Aerospace [32]



Obrázek 24: Balistické odpalovací zařízení umístěné na palubě letounu [32]

3.2 Srovnání stavebních předpisů

Tabulka 2: Srovnání maximálních zatížení osob na palubě dle různých evropských předpisů během nouzových situací

	nahoru	dolů	do předu	do stran
UL2	4,5 g	4,5 g	9,0 g	3,0 g
CS-VLA	3,0 g	-	9,0 g	1,5 g
CS-22	7,5 g	9,5 g	15,0 g	6,0 g
CS-23	3,0 g	6,0 g	9,0 g	1,5 g

Jako jedny z důležitých parametrů pro srovnání zmíněných stavebních předpisů jsou hodnoty maximálních zatížení na osoby na palubě letadla. Tyto hodnoty jsou zásadní pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti letadel, zejména v krizových situacích. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty těchto zatížení mezi jednotlivými stavebními předpisy, což umožňuje podrobné porovnání. Z tabulky je patrné, že nejvyšších hodnot dosahuje předpis CS-22. Vysoké hodnoty zatížení u tohoto předpisu jsou navrženy s ohledem na extrémní podmínky, které mohou nastat v kluzácích během letu, například při prudkých manévrech nebo při nouzovém přistání.

Kromě parametrů zatížení, hmotností a pádovými rychlostmi se stavební předpisy liší také v požadavcích na nouzové přistání. Až na CS-LSA disponují všechny zmíněné předpisy podmínkami pro statické zatěžování (viz tabulka 2). Avšak pouze předpis CS-23 obsahuje podmínky pro dynamické zkoušky, jak je uvedeno v kapitole 3.1.4.

4 Zhodnocení přínosů a nákladů pasivní bezpečnosti

V této kapitole jsou popsány některé z hlavních prvků pasivní bezpečnosti, které je možné instalovat do lehkých letadel. Cílem je jednotlivé prvky popsat, analyzovat jejich vliv na hmotnost letadla a zhodnotit náklady na jejich implementaci. Pozornost bude věnována bezpečnostním pásům, systému airbagů v kabině, protipožárním systémům, balistickým záchranným padákům a systému nouzového vysílání (ELT). Následně budou prezentovány výsledky dotazníkového šetření mezi piloty lehkých letadel ohledně využití a důležitosti prvků pasivní bezpečnosti. Dotazník nabízí přehled preferencí a zkušeností pilotů. Jejich odpovědi mohou přispět k lepšímu porozumění různých aspektů integrace pasivní bezpečnosti v letectví.

4.1 Bezpečnostní pásy

Starší letadla byla dříve vybavena pouze tzv. břišními pásy, které sice do určité míry přispívají ke zlepšení pasivní bezpečnosti, avšak při vážnějších nehodách často nejsou dostatečně účinné¹. Pro pokročilejší vybavení v podobě zádržných systémů mají majitelé lehkých letadel možnost instalovat do svých strojů nejen modernizované systémy bezpečnostních pásů, ale také například ramenní či hlavové opěrky nebo dokonce airbagy přímo v pilotní kabině. Podle údajů FAA je správné použití ramenních pásů u nehod letadel všeobecného letectví (GA) spojeno až s 88% snížením pravděpodobnosti vzniku zranění a až s 20% snížením pravděpodobnosti vzniku smrtelných nehod [35]. Se správným použitím zádržných zařízení je také nezbytné seznámit celou posádku, aby každý cestující byl schopen popruhy bezpečně zapnout, dostatečně utáhnout a zároveň rychle uvolnit v případě potřeby rychlého opuštění kokpitu.

Pokud byl zádržný systém vystaven rychlému zastavení s připoutaným cestujícím, například při letecké nehodě, měl by být tento systém buď demontován a zkontrolován výrobcem, nebo zcela nahrazen. Není totiž zcela zaručeno, že by mohl být při další podobné události plně funkční. Kromě toho, je také od výrobců většinou dáváno doporučení o životnosti popruhů, které je přibližně 10 let. Materiály pásů časem stárnou, a tento proces urychlují okolní vlivy, jako je například účinek UV paprsků.

4.1.1 Tříbodové pásy

Tříbodové pásy jsou velmi podobné těm, které se používají v automobilovém průmyslu. Kromě břišního pásu je použit také popruh přes hrudník, který zajišťuje lepší ochranu hlavy a trupu pasažéra. Na rozdíl od automobilového průmyslu je třeba vzít v úvahu skutečnost, že prostor v kokpitu letadla je ve srovnání s prostorem v automobilu značně omezený. Zádržný systém by měl minimalizovat pohyb cestujícího v kabině a zajistit, aby zůstal v bezpečné poloze na sedadle.

¹Do roku 1978 byly u letadel GA ramenní pásy pouze na vyžádání zákazníka. Tyto systémy však byly rozděleny na zádržný systém pro břišní a zvlášť na systém pro ramenní pásy, což není pro funkčnost zcela výhodné [34].

Výrobou a montáží tříbodových systémů se zabývají společnosti jako Aero Fabricators, Alpha Aviation, BAS nebo například Hooker Harness. Ceny těchto systémů pro jedno sedadlo se pohybují v rozmezí od 500 až 1 300 USD² (přibližně 11 500 až 30 000 Kč).

Výrobci obvykle neuvádějí váhové rozmezí pásových systémů, což by však mohlo být užitečné pro posouzení jejich vlivu na těžiště letounu. Tento vliv se pravděpodobně liší v závislosti na konkrétním typu letounu, do kterého je sada implementována a na použité technologii montáže.

4.1.2 Čtyřbodové pásy

Možnost montáže čtyřbodových pásů do letadel všeobecného letectví (GA) je sice méně běžná, avšak realizovatelná na základě zájmu zákazníka. Čtyřbodový pásový systém se skládá ze dvou ramenních pásů a rozděleného břišního pásu, což zaručuje vyšší stabilitu cestujícího během nouzových situací ve srovnání s tříbodovými pásy.

Nabídku těchto systémů tvoří podobní výrobci jako u tříbodových pásů. Cena se pohybuje v obdobném rozmezí, přibližně od 550 až 1 500 USD (12 500 až 34 000 Kč). Společnost BAS například nabízí čtyřbodové pásy pro různé modely letounů Cessna, a to i v různých barevných variantách. Navíc, za příplatek 910 USD, nabízí možnost použití kulaté spony, kterou lze snadněji zapnout a uvolnit [36].



Obrázek 25: Čtyřbodový pásový systém s kulatou sponou od firmy BAS [36]

Na stránkách firmy BAS se také dají dočíst někdy i dost děsivé příběhy klientů, kteří byli přímými účastníky letecké nehody a přežili.

4.1.3 Pěti/šesti bodové pásy

Pěti a šesti bodové pásy jsou převážně využívány u akrobatických letounů. Kromě dvou ramenních a dvou břišních popruhů obsahují tyto systémy pátý popruh, který je umístěn mezi nohama pasažéra. Tento popruh je v případě šestibodových pásů rozdělen na dva. Popruhy mezi nohama zajišťují lepší uchycení pánve cestujícího a zabraňují jeho sklouznutí pod bezpečnostní pás během nárazu.

²Zkratka pro měnu americký dolar.

Cena systému pětibodového pásu od společnosti Aircraft Spruce & Specialty Co. pro letoun Cessna Caravan 208 činí 2 800 USD (přibližně 63 600 Kč) za systém pro jedno sedadlo.



Obrázek 26: Pětibodový pás od společnosti Aircraft Spruce & Specialty Co. [37]

4.2 Airbagy v pilotní kabině

Společnost Aircraft Spruce & Specialty Co. kromě bezpečnostních pásů nabízí také možnost instalace systému airbagů. Tento systém je navržen tak, aby poskytoval ochranu před vážnými poraněními hlavy a trupu v případě nárazu.



Obrázek 27: Systém airbagů pro pilotní kabinu od společnosti Aircraft Spruce & Specialty Co. [38]

Ke správné funkci systému slouží tzv. elektronický modul (EMA), který detekuje náraz a vysílá signál k aktivaci airbagu. Modul EMA je navržen tak, aby rozlišoval mezi skutečným nárazem a turbulencí či tvrdým přistáním. Snahou je zamezit náhodné aktivaci airbagů.

Sestava airbagů může být kromě pásů nainstalována na různých místech po kabině letadla, jako jsou například boční stěny, nebo v opěradlech sedadel. Umístění musí umožňovat bezpečnou a efektivní aktivaci airbagů.

Cena tohoto systému činí 4 464 USD (přibližně 101 500 Kč) za jeden kus.

4.3 Protipožární systémy

Ačkoli požáry představují menší podíl nehod v oblasti všeobecného letectví, je důležité si uvědomit, že podle dokumentu NTSB o požárech vzniklých po nehodě [39] bylo v sedmdesátých letech 20. století v USA přibližně 59 % nehod s následným požárem fatálních, zatímco u nehod bez následného požáru bylo zaznamenáno pouze 13,3 % smrtelných. Tento rozdíl podtrhuje závažnost a nebezpečí, které požáry po nehodách představují, a zdůrazňuje potřebu účinných protipožárních systémů v letadlech všeobecného letectví.

Protipožární systémy jsou navrženy k detekci požáru, prevenci jeho šíření a minimalizaci škod. Letadla jsou vystavena různým rizikům vzniku požáru, která lze kategorizovat následovně:

Hořlavé kapaliny: Letecké palivo, skladované v nádržích (obvykle umístěných v křídlech), může při úniku a kontaktu s horkými částmi motoru způsobit požár.

Požár elektroniky: Tento typ požáru může vzniknout v důsledku špatné izolace nebo poškozeného vedení.

Požár motoru: Letadlové motory pracují za vysokých teplot a tlaků. Požár může vzniknout mechanickými poruchami nebo únikem paliva na horké části motoru.

Nebezpečné materiály na palubě: Požár může způsobit také vybavení na palubě, například různé typy baterií v elektronických zařízeních.

Příkladem protipožárního systému jsou produkty firmy FirePro. Tato společnost vyrábí generátory uvolňující účinnou aerosol, která je uvolněna při vzniku požáru. Aerosol se rozšíří po dané oblasti (ve které je instalován generátor) a chemickou reakcí uhasí požár. Systém je účinný proti různým typům požárů, včetně požáru pevných materiálů, hořlavých kapalin a elektroniky.

Konkrétním produktem použitým v kabině letadla by mohl být generátor FirePro FP-20. Jedná se o jeden z nejmenších generátorů, která společnost FirePro vyrábí. Může být aktivován buď elektricky nebo tepelně. Je vhodný k umístění například do kabiny letadla v blízkosti elektrických zařízení nebo například v motorovém prostoru. Váží 310 g a jeho cena se pohybuje okolo 200 EUR (přibližně 5 000 Kč)

Kromě těchto systémů jsou letadla všeobecného letectví (GA) většinou vybavena alespoň jedním hasicím přístrojem, který by měl být umístěn v dosahu posádky [41]. Nejvíce doporučované jsou hasicí přístroje plněné halonem, který lze jako univerzální hasicí látku použít na široké spektrum požárů. Nevýhodou těchto hasicích přístrojů je, že halon škodí lidskému organismu, a proto je nutné zajistit dobré větrání prostoru při hašení, což v podmínkách kabiny letadla není vždy jednoduché.



Obrázek 28: Malý generátor na hašení požárů FP-20 od společnosti FirePro [40]

Pro cenové a hmotnostní srovnání je zde uveden hasicí přístroj A344T (Halon 1211), který váží přibližně 2,3 libry (cca 1 kg). Cena A344T se pohybuje okolo 350 USD (cca 8 700 Kč). Tento typ přístroje je efektivní při hašení a jeho kompaktní rozměry jsou výhodné pro použití v omezeném prostoru letadla. Přesto se musí zvážit použití i alternativních hasicích prostředků, které by mohly mít nižší dopad na zdraví posádky.

4.4 Balistický záchranný padák

V předchozí kapitole (viz 3.1.4) bylo zmíněno použití balistického nouzového padáku u letadla Cessna 172 Skyhawk. Podle článku od Tulise [33] má balistický padák od společnosti BRS hmotnost 79 liber (přibližně 36 kg) a jeho cena je přibližně 15 000 USD (341 000 Kč), cena za instalaci není uvedena. Padák je instalován v zavazadlovém prostoru a kevlarové postroje jsou připevněny k vnější straně draku letadla, přičemž jsou skryty pod laminátovými kryty.

Společnost BRS Aerospace uvádí, že k roku 2019 bylo nainstalováno přes 30 000 systémů záchranných padáků na různých typech letadel včetně experimentálních, sportovních anebo vojenských [42]. Za bezmála čtyřicet let prý balistické záchranné padáky od BRS zachránili přes 400 životů [42].

Známé jsou také případy selhání padákového systému společnosti BRS. U ultralehkého letounu Cessna Skycatcher se při nasazení balistického záchranného padáku přetrhla lana, která měla padák otevřít. Tato situace nastala v důsledku nesprávného úhlu nasazení během rotace letounu, což vedlo k mechanickému poškození systému [43]. Chyba byla způsobena pozdním nasazením padáku, až v momentě, kdy letoun vstoupil do rotace, což mělo za následek neúspěšné otevření padáku. Tento problém se však společnosti BRS podařilo vyřešit a byl vypracován nový návrh konstrukce, který byl proti tomuto selhání odolný. Konstrukce byla později úspěšně testována na prototypu při výkřutu.

Hlavní nevýhodou tohoto systému je nejen jeho vysoká cena, ale také nutnost pravidelné údržby a kontrol po deseti letech, které podle Tulisova článku [33] stojí pro Cessnu 172 přibližně 5 880 USD (134 000 Kč).



Obrázek 29: Ukázka systému CAPS u letounu Cirrus [44]

Průkopníkem padákových systémů jsou letouny Cirrus se svým systémem CAPS³. Podle článku od Wynbrandta [45] bylo prokázáno, že nasazení systému CAPS snižuje pravděpodobnost úmrtí až 13krát. Data od NTSB⁴ shromážděná z let 2001 až 2016, která zahrnovala 288 nehod letadel Cirrus zaznamenala 57 nasazení padákových systémů [45].

Výrobce neuvádí cenu samotného padákového systému, neboť se stal standardním vybavením všech modelů Cirrus. Článek od Schapira [46] však uvádí, že náklady na údržbu padáku, která musí být provedena minimálně jednou za deset let, se pohybují okolo 15 000 až 18 000 USD (341 000 až 410 000 Kč) v závislosti na stáří letadla. U starších modelů je totiž potřeba rozebrat část konstrukce a následně znovu zacelit a utěsnit sklolaminát. Novější generace mají k prvkům systému CAPS přístupový panel, což usnadňuje údržbu a snižuje celkovou cenu za servis.

Kromě vysoké ceny představuje další významnou nevýhodu padákového systému skutečnost, že někteří piloti se díky tomuto systému odváží létat za podmínek, které by jinak neakceptovali [43]. Tento fenomén, známý jako „risk compensation“, může vést k tomu, že piloti se více spoléhají na bezpečnostní vybavení a méně na své letové schopnosti a rozhodování. Výsledkem je paradoxní situace, kdy přítomnost záchranného systému může zvýšit riziko nehod způsobených lidským faktorem. Otázce, zda piloti jsou ochotní více riskovat s lepším bezpečnostním vybavením, bude věnován prostor dále v kapitole 4.6.

4.5 Systém nouzového vysílání ELT

Systém ELT (Emergency Locator Transmitter) je nouzový vysílač, který v případě nouze vysílá lokalizační informace o letadle přímo záchranným složkám. Tento systém pracuje na frekvencích 406 MHz a 121,5 MHz a často obsahuje i systém GPS pro přesnější lokalizaci.

³CAPS je zkratka pro Cirrus Airframe Parachute System neboli Záchranný padákový systém Cirrus.

⁴Zkratka pro Národní úřad pro bezpečnost dopravy (National Transportation Safety Board), která vyšetřuje všechny letecké nehody v USA.

S použitím ELT systémů na palubách letadel se zabývá například § 91.207 předpisu FAR [47]. Z předpisu vyplývá, že kromě následujících výjimek:

- letadla při výcvikovém provozu prováděném výhradně v okruhu 50 námořních mil od letiště, z něhož tento místní letový provoz začal;
- nová letadla při letovém provozu souvisejícím s jejich výrobou, přípravou a dodávkou;
- letadla při provozu s chemickými a jinými látkami pro zemědělské účely;
- letadla certifikovaná správcem pro účely výzkumu a vývoje;

nesmí žádná osoba provozovat civilní letadlo registrované v USA bez systému nouzového vysílání.

Podle evropského předpisu EASA Air Operations části CAT.IDE.A.280 [41] musí být letouny s kapacitou více než 19 pasažérů vybaveny alespoň dvěma ELT systémy a letouny s kapacitou 19 a méně pasažérů musí být vybaveny alespoň jedním ELT systémem.

A například ICAO Annex 6 [48] obsahuje doporučení o použití systémů ELT pro všechny letouny provozované na delších letech nad vodou. Stejné doporučení se vztahuje i na některé vrtulníky.

Příkladem systému nouzového vysílání je model Artex ELT 345, který má cenu přibližně 23 000 Kč a váží 2 libry (přibližně 900 gramů). Aktivace systému může být provedena buď ručně pomocí dálkového spínače v kokpitu, nebo automaticky pomocí G-spínače, který se aktivuje při nárazu o velikosti zatížení 2,3 g nebo více.

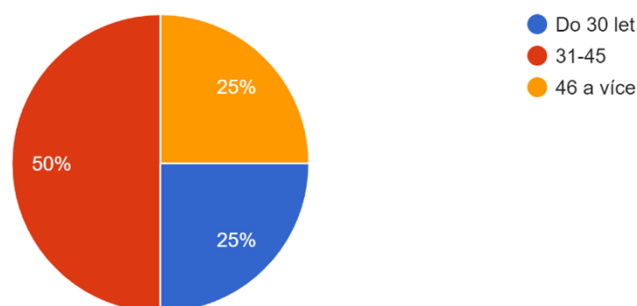


Obrázek 30: Systém nouzového vysílání Artex ELT 345 [49]

4.6 Pohled na prvky pasivní bezpečnosti ze strany pilotů

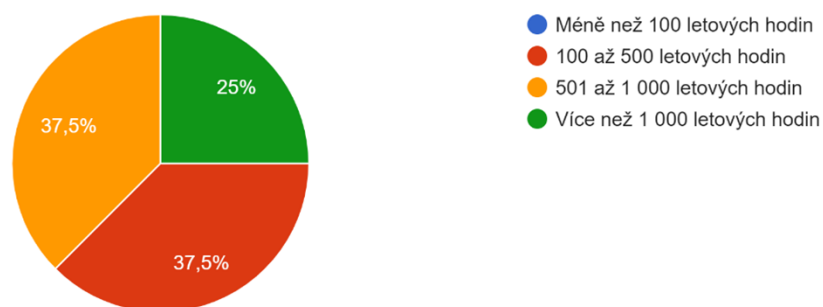
V této podkapitole budou shrnuty výsledky dotazníku zaměřeného na piloty lehkých letadel. Jeho cílem bylo zjistit preference, zkušenosti a názory na různé bezpečnostní prvky a jejich implementaci do lehkých letadel. Dotazník obsahoval deset otázek a odpovídalo na něj 8 respondentů.

1. Do jaké věkové kategorie patříte?



Obrázek 31: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Do jaké věkové kategorie patříte?

2. Kolik letových hodin jste celkem nalétal(a)?



Obrázek 32: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Kolik letových hodin jste celkem nalétal(a)?

3. Jaký typ lehkého letadla nejčastěji pilotujete?

Zde byly zmíněny různé typy lehkých letadel Cessna 172, Piper PA28, Robinson 22, Tecnam Echo, Zenair CH 601. Odpovídající piloti zaujímají široké spektrum lidí se zkušenostmi s různými typy letounů.

4. Jaké bezpečnostní prvky vaše běžně pilotované letadlo obsahuje?

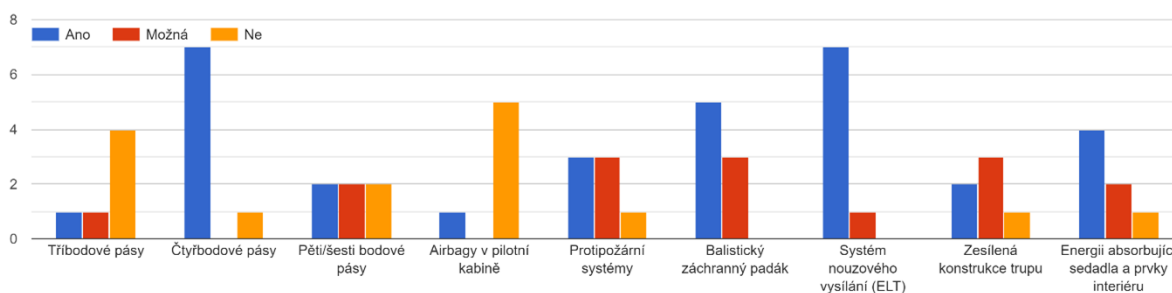
Výběr:

- Tříbodové pásy
- Čtyřbodové pásy
- Pěti/šesti bodové pásy
- Airbasy v pilotní kabině
- Protipožární systémy
- Balistický záchranný padák
- Systém nouzového vysílání (ELT)
- Zesílená konstrukce trupu
- Energii absorbující sedadla a prvky interiéru

Nejvíce pilotů má ve svých současných letounech použitý systém nouzového vysílání (ELT), přesněji 75 % z nich. 62,5 % z nich má čtyřbodové pásy a 50 % z dotazovaných má ve svém letounu balistický záchranný padák.

5. Využil(a) byste v případě nákupu letadla možnosti instalace bezpečnostních prvků zmíněných v otázce 4?

U této odpovědi znovu vévodil systém nouzového vysílání ELT, který by požadovalo 7 z 8 pilotů. Stejně na tom byly čtyřbodové bezpečnostní pásy. Jde tedy vidět, že piloti si svých současných systémů pasivní bezpečnosti vážící a požadovali by je i u nového stroje.



Obrázek 33: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Využil(a) byste v případě nákupu letadla možnosti instalace bezpečnostních prvků zmíněných v otázce 4?

5 z 8 dotazovaných pilotů by chtělo u svého letounu balistický záchranný padák. A naopak 5 z 8 pilotů by nestálo o instalaci airbagů v pilotní kabině.

6. Setkal(a) jste se během své pilotní kariéry s nějakým bezpečnostním incidentem, při kterém hrály prvky pasivní bezpečnosti klíčovou roli?

Pouze jediný respondent odpověděl, že se setkal s případem pádu letounu z přibližně 10 metrů, při kterém konstrukce zvládla absorbovat energii nárazu. Kokpit zůstal zachován a pilot s cestujícími vyvázli bez větších zranění. Respondent bohužel neuvedl typ letounu.

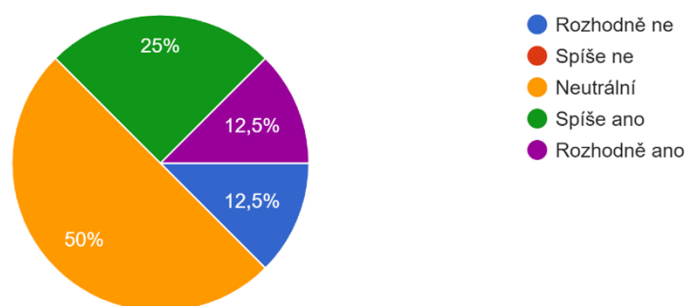
7. Jaké jsou podle Vás hlavní limity současných bezpečnostních technologií?

Z možností:

- Vysoké náklady na pokročilé bezpečnostní technologie.
- Omezený prostor pro instalaci dodatečných bezpečnostních prvků.
- Omezení v hmotnosti letadla, které může ovlivnit výkon, vyvážení a ve výsledku i bezpečnost.
- Regulační a certifikační procesy, které mohou zpomalovat inovace.
- Rozdíly v použití bezpečnostních prvků mezi výrobci

U této otázky se nejvíce shodovali všichni respondenti na prvních třech možnostech. Tedy na vysokých nákladech, omezeném prostoru pro instalaci a omezení v hmotnosti letadla.

8. Myslíte, že by měla být věnována větší pozornost pasivní bezpečnosti v pilotních výcvicích?



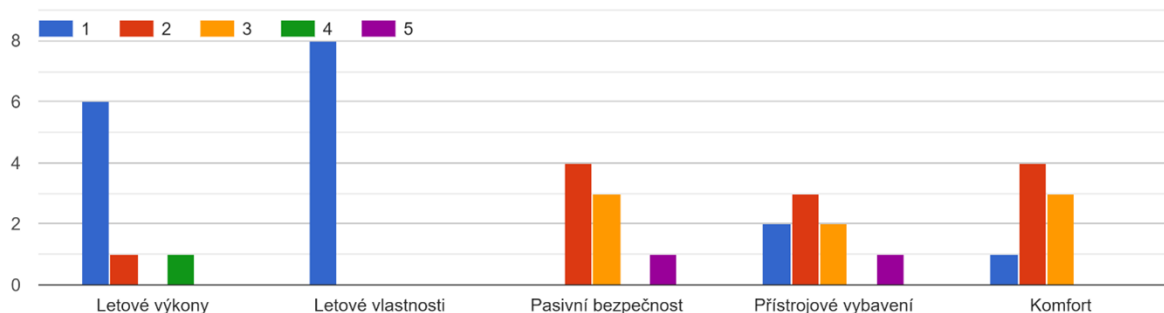
Obrázek 34: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Myslíte, že by měla být věnována větší pozornost pasivní bezpečnosti v pilotních výcvicích?

U této otázky panovalo celé spektrum odpovědí. Proto by možná stálo za úvahu, jestli není potřeba v tomto ohledu učinit nějaké změny v pilotních výcvicích, co se týká pasivní bezpečnosti.

9. Seřadte následující vlastnosti podle důležitosti, kterou byste přikládal(a) při výběru letadla.

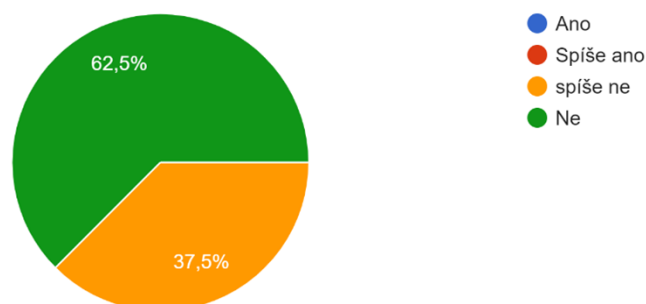
Číslo 1 označuje nejdůležitější vlastnost a číslo 5 označuje tu nejméně důležitou.

V odpovědích na tuto otázku se piloti shodli, že nejdůležitějšími parametry, při výběru letadla jsou letové vlastnosti a letové výkony daného typu letounu. Pasivní bezpečnost je spolu s například komfortem ve většině případů až na druhém místě, popřípadě někde níže na pomyslném žebříčku důležitých vlastností.



Obrázek 35: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Seřadte následující vlastnosti podle důležitosti, kterou byste přikládal(a) při výběru letadla.

10. Jak se ztotožňujete s tvrzením: „S letadlem vybaveným lepšími bezpečnostními prvky si dovolím více riskovat.“



Obrázek 36: Graf vytvořený z odpovědí na otázku: Jak se ztotožňujete s tvrzením: „S letadlem vybaveným lepšími bezpečnostními prvky si dovolím více riskovat.“

Na tuto otázku převládla jasná odpověď. Oslovení piloti by neriskovali, pokud by měli u svých letounů k dispozici lepší bezpečnostní prvky. Další podnět pro výzkum v oblasti riskování pilotů by mohlo představovat srovnání těchto odpovědí se skutečným chováním pilotů, kteří by měli k dispozici letouny vybavené například bezpečnostním padákem

(viz kapitola 4.4). Výzkum by se zaměřil na zjištění, zda se jejich chování liší ve srovnání s letem bez bezpečnostního padáku.

4.6.1 Zhodnocení výsledků dotazníku

Odpovědi pilotů lehkých letadel ukazují na různé preference a zkušenosti s bezpečnostními prvky. Čtyřbodové pásy a ELT systémy jsou mezi piloty oblíbené, zatímco airbagy a třibodové pásy patří mezi méně preferované.

Mezi hlavní limity komplikující zařazení lepších prvků pasivní bezpečnosti patří:

Omezení v hmotnosti letadla: Většina respondentů (75 %) uvedla, že hmotnostní omezení je klíčovou překážkou pro zařazení lepších prvků pasivní bezpečnosti do konstrukce letounu.

Omezený prostor pro instalaci: 62,5 % respondentů poukázalo na nedostatek prostoru v letadle.

Vysoké náklady: Stejný počet respondentů (62,5 %) uvedl náklady jako limitující faktor.

Výsledky dotazníku celkově naznačují, že i když jsou bezpečnostní prvky důležité, piloti lehkých letadel je často hodnotí jako méně prioritní oproti jiným aspektům letounu (výkony, vlastnosti, komfort). Další studie by se měly zaměřit na zkoumání integrace prvků pasivní bezpečnosti s menším negativním dopadem na ostatní aspekty letounu, jako jsou například ovlivnění hmotnosti či výše nákladů.

Zajímavé byly odpovědi na otázku o významu pasivní bezpečnosti ve výcviku pilotů. Zde se názory nejvíce lišily, což naznačuje potřebu hlubšího zkoumání a možná i revize současných výcvikových programů. Polovina respondentů měla neutrální postoj, zatímco někteří byli rozhodně proti nebo pro zvýšení důrazu na pasivní bezpečnost. Rozšíření výzkumu o pilotní výcvik by mohlo přinést nové poznatky o tom, jak zvýšit povědomí a význam pasivní bezpečnosti mezi piloty lehkých letadel a celkově by tato skutečnost mohla postupně vést ke zlepšení celkové pasivní bezpečnosti v letectví.

Závěr

Pasivní bezpečnost v letecké dopravě patří mezi klíčové faktory ovlivňující ochranu posádky a cestujících při nehodách. Tato bakalářská práce se zabývala popsáním konceptu pasivní bezpečnosti od tolerance lidského těla přes stavební předpisy až po vnímání pasivní bezpečnosti mezi piloty a provozovateli lehkých letadel.

V teoretické části byla podrobně rozebrána podstata pasivní bezpečnosti, její základní principy, historický vývoj a fyzikální aspekty nárazu. Byla věnována pozornost toleranci lidského těla vůči nárazu, včetně stanovení podmínek, za kterých lze předpokládat míru tolerance jednotlivce. Důležitou součástí této kapitoly bylo také zmínění významu antropomorfních testovacích zařízení (ATD), která jsou klíčová pro testování bezpečnostních prvků. Závěrem teoretické části byly analyzovány faktory ovlivňující poranění hlavy a páteře a stanovena konkrétní kritéria používaná v konstrukčních předpisech pro zajištění minimálních požadavků na bezpečnost nově vyráběných letadel.

Při srovnání jednotlivých předpisů byla věnována pozornost hlavním čtyřem evropským předpisům:

- CS-LSA
- CS-VLA
- CS-22
- CS-23

Zmíněné předpisy se od sebe odlišují hlavně maximální vzletovou hmotností a pádovými rychlostmi. Pro tuto práci však bylo důležité zmínit požadavky na nouzové situace a násobky zatížení, které jsou kladeny na osoby na palubě. K jednotlivým předpisům byl přidán také stručný popis konkrétního typu letounu a použití některých bezpečnostních prvků.

Praktická část této práce se věnovala konkrétním prvkům pasivní bezpečnosti, zhodnocení cen a přínosů k celkové bezpečnosti letadla. Pozornost byla věnována bezpečnostním pásům, airbagům v kabině, protipožárním systémům, balistickým záchranným padákům a systému nouzového vysílání ELT. Například použití balistického záchranného padáku, který má největší vliv na těžiště letounu, se ukázalo jako velmi přínosné, při ztrátě kontroly nad letadlem a následném bezpečném přistání. Avšak tyto systémy jsou pro provozovatele lehkých letounů nejvíce nákladné, jak z hlediska montáže, tak údržby. Výběr konkrétních bezpečnostních prvků nakonec závisí na typu operací, které s letadlem plánujeme provádět (akrobacie, vyhlídkové lety, výcvikové lety).

Pro zjištění, jaký je pohled pilotů na pasivní bezpečnost, bylo použito dotazníkové šetření. Z výsledků vyplynulo, že ze zmíněných prvků pasivní bezpečnosti piloti preferují čtyřbodové bezpečnostní pásy, systém nouzového vysílání (ELT) a balistický záchranný padák. Dotazník také ukázal, že pasivní bezpečnost je pro piloty méně důležitá ve srovnání s ostatními charakteristikami letadla. Významné rozdíly se objevily v odpovědích na otázku o významu pasivní bezpečnosti ve výcviku pilotů, což naznačuje potřebu dalšího zaměření na tento aspekt při školení začínajících pilotů.

Do budoucna je nezbytné pokračovat ve vývoji pasivní bezpečnosti v letectví, přičemž je třeba brát v úvahu i počet nehod, ke kterým došlo v roce 2024. Jen v České republice

došlo v nedávné době ke dvěma vážným nehodám lehkých letadel u Luk nad Jihlavou a na letišti v Milovicích.

Zvýšené úsilí by mělo být věnováno nejen informování konstruktérů a pilotů, ale také široké veřejnosti. Další výzkumy a inovace v této oblasti by mohly výrazně přispět k ochraně životů a zlepšení celkové bezpečnosti letecké dopravy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *14 CFR Part 23: AIRWORTHINESS STANDARDS: NORMAL CATEGORY*. 2016.
- [2] *Statistical Reviews* [online]. 2021. [cit. 2023-11-14]. Dostupné z: <https://www.nts.gov/safety/Pages/research.aspx>.
- [3] HURLEY, Todd R.; VANDENBURG, Jill M.; LABUN, Lance C. Introduction to Crashworthiness. In: *Crashworthiness Design Guide*. Třetí. Simula, 2002, s. 11–20. ISBN WP3.4-034043-036.
- [4] Safety in Accidents: Hugh DeHaven and the Development of Crash Injury Studies. *Technology and Culture* [online]. 2013, roč. 54, č. 1, s. 40–61 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/24468139>.
- [5] *The Ag-1* [online]. 1990. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://spotlight-pre.library.tamu.edu/spotlight/shifting-frontiers/feature/the-ag-1>.
- [6] LABUN, Lance C.; VANDENBURG, Jill M. Physics. In: *Crashworthiness Design Guide*. Třetí. Simula, 2002, s. 21–32. ISBN WP3.4-034043-036.
- [7] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fyzika1*. Druhá. VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [8] VANDENBURG, Jill M.; GRIERSON, Anita E. Biometrics. In: *Crashworthiness Design Guide*. Třetí. Simula, 2002, s. 45–126. ISBN WP3.4-034043-036.
- [9] SCHMITT, Kai-Uwe; NIEDERER, Peter F.; CRONIN, Duane S.; III, Barclay Morrison; MUSER, Markus H.; WALZ, Felix. *Trauma Biomechanics* [online]. Páté. Švýcarsko: Springer Nature Switzerland AG 2019, 2019 [cit. 2024-02-19]. ISBN 978-3-030-11659-0. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11659-0>.
- [10] FORMAN, Jason L.; LOPEZ-VALDES, Francisco J.; DUPREY, Sonia; BOSE, Dipan; POZO DE DIOS, Eduardo del; SUBIT, Damien; GILLISPIE, Tim; CRANDALL, Jeff R.; SEGUI-GOMEZ, Maria. The tolerance of the human body to automobile collision impact – a systematic review of injury biomechanics research, 1990–2009. *Accident analysis and prevention* [online]. 2015, roč. 80, č. 80, s. 7–17 [cit. 2024-02-19]. ISSN 0001-4575. Dostupné z DOI: [10.1016/j.aap.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.03.004).
- [11] LAANANEN, David H. Crashworthiness analysis of commuter aircraft seats and restraint systems. *Journal of Safety Research* [online]. 1991, roč. 22, č. 2, s. 83–95 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-4375\(91\)90016-0](https://doi.org/10.1016/0022-4375(91)90016-0).
- [12] JAŚKIEWICZ, Marek; FREJ, Damian; ŠARKAN, Branislav. Construction of the Knee Joint of the Dummy Designed for Crash Tests. *Transportation Research Procedia* [online]. 2020, roč. 44, č. 1, s. 121–128 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.018>.
- [13] OLIVARES, Gerardo. *Hybrid II and Federal Aviation Administration Hybrid III Anthropomorphic Test Dummy Dynamic Evaluation Test Series* [online]. První. National Institute for Aviation Research Wichita State University, 2013 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-II-50th-Percentile-Adult-Male-ATD_fig1_327285448.
- [14] *Humanetics* [online]. 2005. [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://www.humaneticsgroup.com/>.

- [15] POLANCO, Michael A.; LITTELL, Justin D. *Vertical Drop Testing and Simulation of Anthropomorphic Test Devices* [online]. Virginia Beach, VA, United States, 2011 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110011514>. Konferenční spis. NASA.
- [16] *CS-23: Easy Access Rules for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes (CS-23) (Initial issue)*. 2018.
- [17] HUTCHINSON, John; KAISER, Mark J.; LANKARANI, Hamid M. The Head Injury Criterion (HIC) functional. *Applied Mathematics and Computation* [online]. 1998, roč. 96, č. 1, s. 1–16 [cit. 2024-04-06]. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(97\)10106-0](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(97)10106-0).
- [18] *CS-LSA*. Třetí. 2018.
- [19] *Standard Specification for Airframe Emergency Parachutes*. Druhé. [B.r.].
- [20] *UL 2 – Část I. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. 2019.
- [21] *Stream* [online]. 1996. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.tl-ultralight.cz/cs/ultralehka-letadla/stream>.
- [22] TLUSTÝ, Jiří. *STREAM (UL600) LETOVÁ A PROVOZNÍ PŘÍRUČKA*. Třetí. 2021.
- [23] *TL Stream* [online]. 2005. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/ultralight/tl-stream>.
- [24] ZAHÁLKA, Martin; MALIŠ, Michal. *Aplikace nárazových zkoušek na lehkých letounech* [online]. 1996. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.tl-ultralight.cz/cs/tisk/aplikace-narazovych-zkousek-na-lehkych-letounech-11846>.
- [25] *CS-VLA*. Třetí. 2009.
- [26] QUAST, Oliver. *Aquila A211 Specifications & Performance* [online]. 2018. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://aquila-aviation.de/en/aircraft/aquila-a211-2/specifications-performance/>.
- [27] QUAST, Oliver. *AQUILA A211: PILOT'S OPERATING HANDBOOK and FAA APPROVED AIRPLANE FLIGHT MANUAL*. Šestá. 2018.
- [28] *CS-22*. Čtvrté. 2009.
- [29] *L-23 Super Blanik* [online]. 1994. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.southerneaglesssoaring.com/L-23.html>.
- [30] *Cessna Skyhawk* [online]. 2024. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-skyhawk>.
- [31] *Cessna 172S Skyhawk* [online]. 2023. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.astonfly.com/en/training-centres/cessna-172s-skyhawk/>.
- [32] *BRS Aerospace* [online]. 2024. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://brsaerospace.com/>.
- [33] TULIS, David. *BRS ANNOUNCES CESSNA PARACHUTE INSTALLATION NETWORK* [online]. 2017. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2017/october/04/brs-announces-cessna-parachute-installation-network>.

- [34] DURDEN, Rick. *Restraint Systems: Repairs and Upgrades* [online]. 1996. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.aviationconsumer.com/accessories/restraint-systems-repairs-and-upgrades/>.
- [35] TALLMAN, Jill W. *WHAT AM I? SEAT BELTS YOUR BEST SAFETY EQUIPMENT* [online]. 1997. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2021/august/flight-training-magazine/what-am-i-seat-belt>.
- [36] BLANCHER, Howard. *Cessna Inertia Reel 4 Point Shoulder Harness System* [online]. 2020. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://basinc-aeromod.com/cessna.php>.
- [37] *ABI STANDARD RESTRAINTS FOR CESSNA CARAVAN 208-208B* [online]. 1995. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.aircraftspruce.com/catalog/appages/abi_caravan.php.
- [38] *AMSAFE RESTRAINT SYSTEM (SOARS)* [online]. 1995. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.aircraftspruce.com/catalog/appages/amsafe_05-22028.php.
- [39] *General Aviation Accidents: Postcrash Fires and How to Prevent or Control Them: Produced by National Transportation Safety Board, Washington, D.C. 20594*. 1981. ISSN 0002-2667.
- [40] *FirePro* [online]. 2024. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.firepro.com/>.
- [41] *Easy Access Rules for Air Operations (Regulation (EU) No 965/2012)* [online]. 1998. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-air-operations-regulation-eu-no-9652012%5C#group-publications>.
- [42] *BRS Aerospace Whole Aircraft Parachute Rescue System Records 400 Saved Lives* [online]. 2024. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://brsaerospace.com/pressrelease_03-11-2019/.
- [43] VANWEST, Jeff. *Is BRS Always a Life Saver? Not Exactly* [online]. 1996. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.aviationconsumer.com/industry-news/is-brs-always-a-life-saver-not-exactly/>.
- [44] *Cirrus* [online]. 2024. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://cirrus.cz/>.
- [45] WYNBRANDT, James. *Those Parachutes for Small Airplanes Really Do Save Lives* [online]. 2018. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/those-parachutes-small-airplanes-really-do-work-180969057/>.
- [46] SCHAPIRO, Steve. *AIRCRAFT SPOTLIGHT: CIRRUS SR-20 COMBINES CURB APPEAL AND SAFETY FEATURES* [online]. 2017. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://youcanfly.aopa.org/flying-clubs/flying-club-newsletter/2021/may/16/aircraft-spotlight>.
- [47] *14 CFR 91.207* [online]. 2015. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91/subpart-C/section-91.207>.

- [48] *Emergency Locator Transmitter (ELT)* [online]. 2021. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/emergency-locator-transmitter-elt>.
- [49] *ARTEX ELT 345* [online]. 2022. [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.pacificcoastavionics.com/products/elt-345>.