https://doi.org/10.26552/ pas.Z.2025.1.33

UNIVERSITY OF ŽILINA

ANALÝZA VYBRANÝCH METÓD ZISŤOVANIA PRÍČIN NEHÔD V LETECKEJ DOPRAVE

Arijon Torozi
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Matúš Materna
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The bachelor thesis focuses on the analysis of selected methods for determining the causes of aircraft accidents with the aim of providing a comprehensive overview. The introduction emphasizes the importance of safety in aviation, defines key concepts and categorizes hazards. Subsequently, safety strategies and accident classifications are presented, highlighting significant historical events. The core of the work consists of an analysis of traditional (flight recorders analysis, wreckage analysis, witness testimonies) and analytical methods (qualitative, quantitative, semi-quantitative), with a particular focus on methods for detecting human failures (HFACS) and accident structure (Reason's and Shell model). The conclusion evaluates and compares the analyzed methods in terms of their strengths and weaknesses and their suitability for various accidents. The application of the methods is illustrated with selected historical accidents. The results confirm that a combination of different methods is necessary for effective investigation. The thesis highlights the importance of traditional methods for data acquisition and analytical methods for identifying deeper causes. The aim of the thesis is fulfilled by providing an overview and analysis of the methods, which contributes to a better understanding of aircraft accident investigation.

Keywords

Aviation safety, accidents, analysis of investigation methods, human factor, aircraft accident cause investigation

1. Úvod

Letecká doprava patrí dnes k základným pilierom globálnej mobility a hospodárskeho rozvoja. S rastúcim počtom letov a prepravovaných pasažierov sa prirodzene zvyšuje aj význam bezpečnosti v tomto odvetví. Napriek vysokým štandardom a prísnym reguláciám sa však letecké nehody stále vyskytujú a predstavujú závažné ekonomické i spoločenské dopady, najmä v prípade tragických strát na životoch. Každá takáto udalosť preto zdôrazňuje potrebu dôkladného vyšetrovania a analýzy, ktorá umožní predchádzať podobným incidentom v budúcnosti.

Zisťovanie príčin leteckých nehôd je komplexný proces, v ktorom sa uplatňuje široké spektrum metodologických prístupov. Tento článok sa venuje analýze vybraných tradičných a analytických metód, pričom osobitná pozornosť je venovaná technikám na identifikáciu ľudských zlyhaní a analýze štruktúry nehôd. Vzhľadom na zložitosť moderných leteckých systémov a dynamický rozvoj odvetvia je dôležité neustále zdokonaľovať vyšetrovanie nehôd a hľadať nové, účinnejšie prístupy.

Článok prináša prehľad tradičných postupov a predstavujú sa tiež analytické metódy ktoré umožňujú systematickejšiu a hlbšiu identifikáciu príčin. Vyhradená je kapitola venovaná systému HFACS, ktorý sa špecializuje na analýzu ľudských faktorov, a teoretickým modelom, ktoré pomáhajú lepšie pochopiť dynamiku nehôd.

Cieľom článku je poskytnúť komplexný pohľad na existujúce metodiky vyšetrovania, poukázať na ich silné a slabé stránky a priblížiť ich aplikáciu v praxi prostredníctvom historických prípadov. Výsledky potvrdzujú, že efektívne vyšetrovanie si vyžaduje kombináciu viacerých prístupov, ktoré spoločne prispievajú k budovaniu vyššej úrovne bezpečnosti v letectve.

2. Bezpečnosť v letectve

Letecká doprava je dnes neoddeliteľne spätá s pojmom bezpečnosť. Jej rozvoj by nebol možný bez prísnych pravidiel a medzinárodnej spolupráce, ktorú koordinuje organizácia ICAO. Bezpečnosť v letectve znamená minimalizovanie rizík na prijateľnú úroveň prostredníctvom riadenia nebezpečenstiev, hoci úplné odstránenie všetkých rizík nie je možné kvôli ľudským a technickým faktorom.

Presné vymedzenie základných pojmov, ako sú nebezpečenstvo, riziko a následok, je kľúčové pre správne fungovanie systému riadenia bezpečnosti v letectve. Nebezpečenstvo predstavuje potenciálny zdroj škôd, riziko vyjadruje pravdepodobnosť a závažnosť jeho dôsledkov a následok opisuje výsledok nebezpečnej udalosti. Efektívne riadenie bezpečnosti vyžaduje nielen správnu definíciu, ale aj dôkladnú identifikáciu hrozieb, zavedenie kontrolných opatrení a využívanie moderných softvérových nástrojov. Nesprávne nastavenie týchto procesov zvyšuje riziko vzniku nehôd.

2.1. Identifikácia a rozčlenenie nebezpečenstiev

V leteckej doprave je kľúčové včasné identifikovanie nebezpečenstiev na prevenciu incidentov a nehôd. Na tento účel sa používajú metódy ako analýza nebezpečenstiev, anonymné hlásenia, audity a monitoring prevádzkových dát. Nebezpečenstvá v letectve sa delia na štyri hlavné kategórie: environmentálne (počasie, geofyzikálne javy, zdravotné hrozby), technické (zlyhania komponentov lietadiel, infraštruktúry,

ergonomické problémy), organizačné (ekonomické tlaky, prevádzkové politiky, materiálne zabezpečenie) a ľudské (zdravotné problémy, stres, únava, kognitívne zlyhania). Efektívne riadenie týchto nebezpečenstiev je nevyhnutné pre zabezpečenie bezpečnej leteckej prevádzky.

2.2. Bezpečnosť z pohľadu organizačnej kultúry

Pre správne fungovanie systému riadenia bezpečnosti je mimoriadne dôležitá bezpečnostná kultúra, ktorá zahŕňa hodnoty, presvedčenia a postoje zamestnancov voči bezpečnosti. Tento faktor ovplyvňuje prístup k incidentom a ich hláseniu. Existujú dve hlavné kultúry v organizáciách: Blame Culture (kultúra obviňovania) a Just Culture (spravodlivá kultúra).

Blame Culture je charakterizovaná obviňovaním jednotlivcov za chyby, čo vedie k zatajovaniu incidentov, neefektívnej analýze príčin nehôd a pasivite zamestnancov, ktorí sa boja hlásiť problémy zo strachu pred trestami.

Just Culture podporuje otvorenú komunikáciu o chybách a rizikách, motivuje zamestnancov k nahlasovaniu incidentov bez obáv z negatívnych dôsledkov a zameriava sa na analýzu príčin nehôd s cieľom predchádzať ich vzniku a neustále zlepšovať bezpečnostné procesy.

Tieto kultúry sa líšia v prístupe k problémom, pričom spravodlivá kultúra je efektívnejšia v zvyšovaní bezpečnosti a motivovaní zamestnancov.

2.3. Bezpečnosť z technicko-prevadzkového pohľadu

Významný vývoj v bezpečnosti leteckej dopravy sa rozdelil do troch hlavných etáp: technická éra, ľudská éra a organizačná éra, pričom každá z nich sa zameriavala na iné aspekty bezpečnosti.

Technická éra (20. - 60. roky 20. storočia) sa sústredila na zabezpečenie spoľahlivosti lietadiel a ich systémov, čo viedlo k inžinierskym inováciám. Dôraz bol kladený na robustnejšie konštrukcie a účinnejšie motory, čo prispelo k zníženiu nehôd.

Ľudská éra (70. - 80. roky 20. storočia) sa začala sústrediť na interakciu človeka a stroja. Aj napriek technologickým pokrokom bol stále ľudský faktor hlavnou príčinou nehôd. Postupne sa začala venovať pozornosť aj faktorom ovplyvňujúcich správanie zamestnancov, čo viedlo k pokroku v tejto oblasti v deväťdesiatych rokoch.

Organizačná éra (od 90. rokov po súčasnosť) sa zameriavala na komplexnejšie skúmanie bezpečnosti, vrátane organizačnej kultúry. Zavedenie konceptu „organizačnej nehody“ a modernizácia vyšetrovania incidentov priniesli proaktívny prístup, ktorý zahŕňal zber a analýzu údajov, identifikáciu rizík a prevenciu, čo sa stalo základom moderného riadenia bezpečnosti.

2.4. Stratégie používané v bezpečnostnom manažmente

Stratégie riadenia rizík v leteckej doprave sú súčasťou bezpečnostného manažmentu a rozdeľujú sa do troch hlavných prístupov, ktoré sa zameriavajú na rôzne fázy bezpečnostného zlyhania: minulý, súčasný a budúci.

Reaktívna stratégia sa zameriava na riešenie incidentov po ich vzniku. Jej cieľom je minimalizovať škody, rýchlo reagovať na nežiadúce účinky a zlepšiť rozhodovacie procesy na základe zozbieraných údajov.

Proaktívna stratégia sa sústredí na prevenciu nehôd a incidentov. Vyžaduje analýzu bezpečnostných údajov, identifikáciu nebezpečenstiev pred ich výskytom a monitorovanie vstupných faktorov. Cieľom je predísť problémom ešte pred ich vznikom.

Prediktívna stratégia využíva historické a štatistické údaje na predpovedanie budúcich rizík. Pomáha identifikovať hrozby v hypotetických scenároch, predvídať potrebu nových bezpečnostných opatrení a predikovať potenciálne riziká, čím poskytuje rámec pre budúci vývoj bezpečnostných opatrení.

2.5. Klasifikácia nehôd a incidentov

Klasifikácia nehôd a incidentov v leteckej doprave je dôležitá pre zabezpečenie bezpečnosti a efektívne vyšetrovanie. Slovenská legislatíva, konkrétne Letecký zákon č. 143/1998 Z.z., stanovuje kritériá pre rozlíšenie pojmov ako nehoda, incident a vážny incident.

Letecká nehoda zahŕňa akúkoľvek udalosť súvisiacu s prevádzkou lietadla, ktorá vedie k zraneniu, úmrtiu alebo závažnému poškodeniu lietadla, ktoré ohrozuje jeho letovú spôsobilosť. Zohľadňuje sa aj situácia, keď je lietadlo úplne zničené alebo nenájdete jeho miesto.

Incident je udalosť súvisiaca s prevádzkou lietadla, ktorá nevedie k vážnym následkom, ale môže mať vplyv na bezpečnostnú prevádzku. Tieto udalosti môžu zahŕňať technické závady alebo neštandardné situácie počas letu a vyžadujú evidenciu a analýzu.

Vážny incident označuje situáciu, ktorá naznačuje vysokú pravdepodobnosť nehody, ako napríklad kritická porucha počas letu, ktorá bola úspešne zvládnutá, ale mohla viesť k tragédii za iných okolností. Hlavný rozdiel medzi vážnym incidentom a nehodou spočíva v závažnosti dôsledkov.

2.6. Výzvy v oblasti leteckej bezpečnosti a ich vplyv na regulácie

Rastúci objem leteckej dopravy a technologické inovácie prinášajú nové výzvy, ako preťaženie letového priestoru, ktoré zvyšuje riziko kolízií a oneskorení. Efektívna organizácia prevádzky letísk je nevyhnutná na zvládnutie väčšieho počtu letov. Kybernetické útoky sa stávajú významným rizikom, a zároveň je potrebné implementovať ekologické opatrenia na dodržiavanie emisných a hlukových noriem. Tieto výzvy si vyžadujú neustálu adaptáciu technológií a regulácií v letectve.

Bezpečnostné opatrenia a regulácie boli zásadne ovplyvnené tragickými nehodami v histórií civilného letectva. Hlavným cieľom po týchto udalostí bolo preskúmanie dôvodov vzniku nehody, prijatie nových štandardov a v neposlednom rade, implementovanie takých opatrení, ktoré dokážu čo najefektívnejšie predchádzať podobným incidentom v budúcnosti.

Dôkladné vyšetrovanie nehôd, často s využitím modelov analýzy ľudských faktorov, pomáha odhaliť nielen bezprostredné príčiny, ale aj hlbšie organizačné a systémové nedostatky, ktoré k nim prispeli. Tieto poznatky sú následne kľúčové pre prijímanie cielených opatrení na všetkých úrovniach leteckej prevádzky.

Tragická zrážka dvoch Boeingov 747 v Tenerife v roku 1977 ukázala, ako vyšetrovanie nehody formuje bezpečnosť letectva. Zistilo sa, že primárnou príčinou bola nejednoznačná komunikácia medzi pilotom KLM a riadiacou vežou, ku ktorej prispeli aj hmla a preťaženosť letiska. Táto katastrofa viedla k zavedeniu štandardizovaných fráz v rádiovej komunikácii a k posilneniu výcviku posádok v Crew Resource Managemente (CRM), zameraného na lepšiu komunikáciu a tímovú prácu v kokpite. Prípad Tenerife je príkladom toho, ako analýza príčin nehody vedie k dôležitým bezpečnostným zmenám s globálnym dosahom.

Tabuľka 1 Sumarizovaný popis nehody z roku 1977 na základe štyroch kategórií

Kategórie	Stručný popis
Hlavná príčina	Nesprávna interpretácia rádiového povolenia kapitánom KLM
Vedľajšie faktory	Hustá hmla a preťaženie letiska po bombovom útoku na inom letisku
Priebeh udalosti	KLM začalo vzlet keď bolo Pan Am ešte na dráhe, následne došlo k zrážke
Dôsledky	Zavedenie štandardizovanej komunikácie a výcviku CRM pre posádky

Zdroj: Vlastné spracovanie

Podobne aj nehoda letu TWA 800 v roku 1996 poukázala na kritické zraniteľnosti. Vyšetrovanie odhalilo, že explóziu palivovej nádrže pravdepodobne spôsobil elektrický skrat. Táto tragédia viedla k sprísneniu predpisov na ochranu palivových nádrží pred výbuchom a k zlepšeniu bezpečnosti elektrických systémov v lietadlách, vrátane opatrení na inertizáciu nádrží a lepšiu izoláciu káblov. Nehoda letu TWA 800 demonštruje, ako analýza technických príčin vedie k dôležitým konštrukčným a regulačným zmenám pre vyššiu bezpečnosť.

Tabuľka 2 Sumarizovaný popis nehody z roku 1996 na základe štyroch kategórií

Kategórie	Stručný popis
Hlavná príčina	Výbuch palivovej nádrže v dôsledku elektrického skratu
Vedľajšie faktory	Iskrenie v systéme vedenia paliva a prítomnosť horľavej výbušnej zmesi
Priebeh udalosti	Skrat zapálil výpary v palivovej nádrži a nasledovala deštruktívna explózia
Dôsledky	Modernizácia palivových a elektrických systémov, prísnejšie predpisy a zlepšenie výcviku personálu

Zdroj: Vlastné spracovanie

Napokon, tragédia letu Air France 447 v roku 2009 nad Atlantickým oceánom bola zapríčinená dočasným zlyhaním Pitotových trubíc vplyvom námrazy. Táto porucha senzorov viedla k strate presných údajov o rýchlosti, čo následne spôsobilo dezorientáciu pilotov a ich nesprávne riadiace zásahy, ktoré vyústili do pádu lietadla. Výsledkom bolo vylepšenie konštrukcie a vyhrievania Pitotových trubíc, intenzívnejšie školenia pilotov zamerané na manuálne riadenie lietadla pri strate letových údajov a na efektívnu tímovú prácu v krízových situáciách. Táto nehoda opätovne potvrdila, aké kritické je zabezpečiť spoľahlivosť kľúčových prístrojov a neustále zlepšovať pripravenosť posádok na zvládanie nepredvídateľných udalostí.

Tabuľka 3 Sumarizovaný popis nehody z roku 2009 na základe štyroch kategórií

Kategórie	Stručný popis
Hlavná príčina	Zlyhanie Pitotovej trubice spôsobilo zobrazenie chybného údaja o rýchlosti
Vedľajšie faktory	Námraza, nedostatok údajov a nevhodné reakcie posádky
Priebeh udalosti	Po zlyhaní Pitotovej trubice nastala dezorientácia posádky, čo viedlo k chybám pri riadení letu
Dôsledky	Modernizácia senzorov, zlepšenie výcviku, pokročilé monitorovanie letu a komunikácie

Zdroj: Vlastné spracovanie

3. Metodika a metódy skúmania

Metodika spracovania sa opierala o tri navzájom prepojené fázy. V úvodnej časti boli zhromažďované odborné články, správy z vyšetrovania leteckých nehôd a relevantná literatúra. Tieto informácie pochádzali z internetových aj knižných zdrojov a tvorili základ pre vytvorenie komplexného prehľadu problematiky.

V druhej fáze sa postupne plnili čiastkové ciele vedúce k naplneniu hlavného cieľa práce. Kľúčovým krokom bolo definovanie základných pojmov, ktoré umožnili presné uchopenie témy. Pri analýze rôznych vyšetrovacích metód sa uplatňovala predovšetkým metóda analýzy, kde jednotlivé prístupy boli systematicky rozdelené do skupín podľa ich využitia v rôznych fázach vyšetrovania nehody.

Záverečná fáza metodiky sa sústredila na syntézu získaných poznatkov. Spracované informácie boli sumarizované a vzájomne prepojené s cieľom poskytnúť ucelený pohľad na rôzne metodické prístupy pri zisťovaní príčin leteckých nehôd.

4. Analýza vybraných metód zisťovania príčin nehôd

Letecké nehody a ich vyšetrovanie predstavujú komplexný proces, pri ktorom sú využívané rôzne metódy a postupy na identifikáciu príčin a faktorov vedúcich k incidentom. Vyšetrovanie neslúži len na určenie viny, ale predovšetkým je využívané ako nástroj prevencie podobných alebo rovnakých udalostí v budúcnosti. Využívaná je široká škála vyšetrovacích metód, od tradičných prístupov, ako je fyzická analýza trosiek

lietadiel a analýza čiernych skriniek, až po moderné analytické postupy zahŕňajúce analýzu ľudských faktorov, umelú inteligenciu a počítačové simulácie. Z uvedených dôvodov bolo pristúpené k vytvoreniu vlastného rozdelenia vyšetrovacích metód, k ich systematickému usporiadaniu do podkapitol a k ich podrobnému spracovaniu .

4.1. Tradičné metódy vyšetrovania

Analýza čiernych skriniek, konkrétne záznamníka letových (FDR) a zvukových údajov (CVR), je kľúčovou metódou pri vyšetrovaní leteckých nehôd. FDR zaznamenáva technické parametre letu, ako rýchlosť, výšku a stav letových systémov, pričom moderné zariadenia zaznamenávajú viac než 1000 parametrov. Tieto údaje sa používajú na rekonštrukciu letu a analýzu technických anomálií. CVR zaznamenáva zvuky v kokpite, vrátane komunikácie medzi posádkou a riadiacou vežou, ako aj okolité zvuky, ktoré môžu byť dôležité pri identifikácii problémov počas letu. Po nehode sú čierne skrinky lokalizované a prepravované do špecializovaných laboratórií, kde sa vykonáva dekódovanie a analýza údajov.

Fyzická analýza trosiek je ďalšou kľúčovou metódou vyšetrovania, ktorá zahŕňa dôkladné skúmanie vraku lietadla a jeho komponentov. Trosky sú lokalizované, zdokumentované a prevezené do laboratórií, kde sa analyzujú materiály a štrukturálne poškodenia. Pomocou technológií, ako metalografické a fraktografické analýzy, sa identifikujú príčiny poškodení a zlyhaní. Vyšetrovatelia skúmajú aj stopy po vonkajších faktoroch, ako výbuchy, zrážky s vtákmi alebo extrémne poveternostné podmienky, ktoré mohli prispieť k nehode.

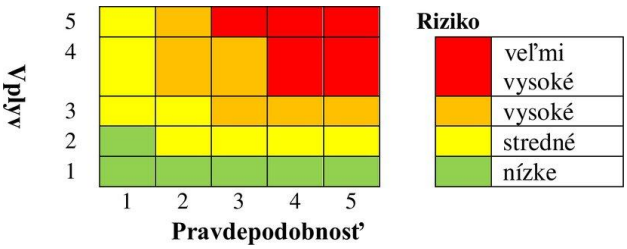
Výpovede posádky a svedkov sú neoceniteľné pri rekonštrukcii nehody. Svedectvá poskytujú informácie o priebehu udalosti, správaní posádky, technickom stave lietadla a vonkajších faktoroch. Pri získavaní výpovedí sa využívajú rôzne metódy, ako individuálne a skupinové rozhovory alebo analýza neverbálnej komunikácie. Výpovede svedkov dopĺňajú technické dôkazy a pomáhajú odhaliť detaily, ktoré iné metódy nemusia zachytiť, ako nezvyčajné vibrácie alebo zápach v kabíne.

4.2. Analytické metódy vyšetrovania

Kvalitatívne metódy sa zameriavajú na logické hodnotenie pozorovaných javov pri analýze leteckých nehôd, bez potreby presných numerických údajov. Umožňujú identifikovať technické, organizačné alebo ľudské nedostatky. Tieto metódy sú vhodné, keď nie sú k dispozícii dostatočné dáta alebo keď je potrebné analyzovať vplyv ľudského faktora. **Kontrolný zoznam** je systematický nástroj, ktorý zabezpečuje úplnosť informácií pri vyšetrovaní nehôd a minimalizuje riziko vynechania kľúčových faktov. Existujú dva typy: všeobecný, navrhnutý medzinárodnými organizáciami, a špecifický, vytvorený konkrétnym prevádzkovateľom. Pokrýva fázy pred, počas a po nehode.

Kvantitatívne metódy využívajú numerické údaje na vyhodnocovanie rizika, zlyhaní a systémových komponentov. Sú vhodné, keď sú k dispozícii presné dáta, ako napríklad záznamy letových zapisovačov. **Analýza stromu porúch** identifikuje kombinácie udalostí, ktoré vedú k nežiaducemu výsledku. Rozkladá hlavnú udalosť na menšie príčiny prepojené logickými bránami (AND, OR). Na základe pravdepodobností sa určuje celková pravdepodobnosť zlyhania.

Semi-kvantitatívne metódy kombinujú kvalitatívne a kvantitatívne prístupy, umožňujúc vyhodnotenie rizika bez potreby presných výpočtov. **Maticová metóda rizík** hodnotí riziko pomocou pravdepodobnosti výskytu a závažnosti dôsledkov, pričom výsledná úroveň rizika sa určuje pomocou matice. Výsledky sa následne vyhodnocujú ako tolerovateľné, netolerovateľné alebo akceptovateľné riziko. Nasledujúci obrázok reprezentuje päťstupňovú, symetrickú maticu rizík s farebným označením, ku ktorému je priradené hodnotenie závažnosti konkrétnej farby.

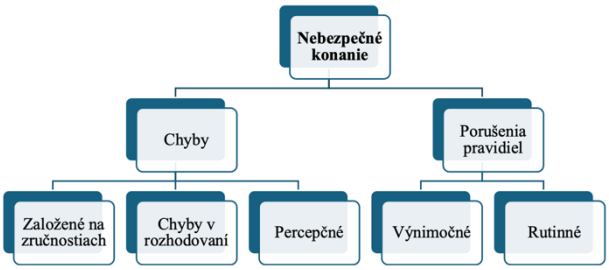


Obrázok 1 Symetrická matica rizík
Zdroj: [19]

4.3. Metódy zamerané na odhaľovanie ľudských zlyhaní

Ľudský faktor má v letectve kľúčovú úlohu, preto je dôležité venovať pozornosť metódam na odhaľovanie ľudských zlyhaní. Jednou z takýchto metód je HFACS (Human Factors Analysis and Classification System), vyvinutý Dr. Shappellom a Dr. Wiegmannom. Tento systém analyzuje základné príčiny nehôd a rozdeľuje ľudské chyby do štyroch úrovní.

Prvá úroveň zlyhania systému HFCAS sa zameriava na **nebezpečné konanie**, ktoré delíme na dve hlavné kategórie: chyby a porušenia pravidiel. Chyby sú neúmyselné konania, ktoré môžeme rozdeliť na tri druhy: chyby založené na zručnostiach (zlyhania pri rutinných úlohách), chyby v rozhodovaní (nesprávne alebo neefektívne rozhodnutia) a percepčné chyby (skreslené vyhodnotenie situácie). Porušenia pravidiel sa delia na rutinové, ktoré sú tolerované a pravidelne sa opakujú, a výnimočné, ktoré sú závažné, ojedinelé a v organizáciách netolerované. Pre lepšie pochopenie štruktúry nebezpečného konania, nasleduje Obrázok 2, ktorý vizuálne reprezentuje jeho kľúčové úrovne.



Obrázok 2 Štruktúra nebezpečného konania systému HFCAS
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

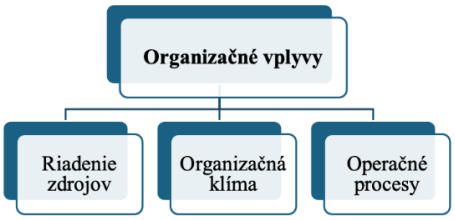
Druhá úroveň sa zameriava **na predpoklady, ktoré môžu viesť k nebezpečnému konaniu**. Tieto faktory môžu zahŕňať rôzne aspekty, ktoré ovplyvňujú schopnosť jednotlivca vykonávať úlohy bezpečne. Environmentálne podmienky, ako je fyzické a technologické prostredie, zohrávajú kľúčovú úlohu pri vytváraní podmienok pre bezpečnú prevádzku. Zlý stav pracovného prostredia, nedostatočne udržiavané technológie alebo nevhodné fyzické podmienky môžu zvyšovať riziko nehôd. Stav operátorov, ktorý zahŕňa duševný a fyziologický stav, tiež významne vplýva na ich schopnosť správne reagovať na vznikajúce situácie. Faktory ako únava, stres, fyzická vyčerpanosť alebo duševná nepohoda môžu spôsobiť, že operátor nezareaguje včas alebo správne. Personálne faktory, ako je riadenie a osobná pripravenosť, môžu tiež ovplyvniť rozhodovanie a vykonávanie úloh. Nedostatočné školenie, slabé riadenie alebo neadekvátna príprava na neštandardné situácie zvyšujú pravdepodobnosť, že sa operátor dopustí neúmyselnej chyby. Tieto predpoklady sa kombinujú a vytvárajú súbor rizík, ktoré treba identifikovať a eliminovať, aby sa znížilo nebezpečenstvo vzniku nehôd. Pre poskytnutie lepšieho prehľadu tejto štruktúry boli v nasledujúcom obrázku graficky spracované kľúčové faktory a predpoklady pre nebezpečné konanie.

Obrázok 3 Štruktúra predpokladov pre nebezpečné konanie systému HFCAS
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

Tretia úroveň sa zaoberá **nezabezpečením adekvátneho dohľadu**, ktorý je dôležitým faktorom pri prevencii nebezpečných situácií a nehôd. Nedostatočný dohľad pri vykonávaní úloh môže vzniknúť, ak sa operátori alebo pracovníci nemajú dostatočne pod kontrolou, čo zvyšuje pravdepodobnosť chýb alebo nepozornosti. Nesprávne plánovanie operácií môže viesť k nevhodnému rozdeleniu úloh, nedostatočným prípravám alebo nevhodným postupom, ktoré môžu spôsobiť problémy počas vykonávania činností. Neskoré riešenie problémov je ďalším rizikovým faktorom, keď sa nevenuje dostatočná pozornosť včasnej identifikácii a náprave vznikajúcich problémov, čo môže viesť k eskalácii situácie do kritického bodu. Porušenie predpisov zo strany vedenia, ako aj slabý dohľad nad dodržiavaním interných smerníc a bezpečnostných štandardov, môže byť rozhodujúcim faktorom, ktorý umožní vznik nebezpečného konania a následné nehody. Takýto nedostatočný dohľad a nesprávne riadenie môžu podmieniť vznik systémových zlyhaní a spôsobovať nepredvídané následky, ktoré ohrozujú bezpečnosť celého systému. Pre ilustráciu úrovní, na ktorých môže dôjsť k nezabezpečeniu dohľadu v rámci systému HFACS, nasleduje grafické znázornenie tejto štruktúry.

Obrázok 4 Štruktúra nezabezpečenia dohľadu systému HFCAS
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

Posledná úroveň sa zameriava na organizačné vplyvy, ktoré zahŕňajú riadenie zdrojov, organizačnú klímu a operačné procesy. Riadenie zdrojov sa týka efektívneho plánovania a rozdeľovania personálu a vybavenia. Organizačná klíma ovplyvňuje bezpečnostné normy a komunikáciu v rámci tímu. Operačné procesy sa týkajú správne navrhnutých procedúr, ktoré zabezpečujú bezpečnosť a efektívnosť. Tieto faktory sú kľúčové pre prevenciu zlyhaní. Nasledujúci obrázok organizačných vplyvov v systéme HFACS je použitý na zorientovanie sa, ako rôzne organizačné aspekty prispievajú k potenciálnym rizikám.



Obrázok 5 Štruktúra organizačných vplyvov systému HFCAS
Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Materna (2024)

HFACS je využívaný nielen v letectve, ale aj v iných odvetviach ako ťažobný priemysel, stavebníctvo alebo zdravotníctvo, kde pomáha identifikovať vzory zlyhaní a implementovať opatrenia na zlepšenie bezpečnosti a kultúry v organizáciách.

4.4. Vyšetrovacie metódy podľa typu príčin a ich štruktúry

Reasonov model predstavuje významný koncept na pochopenie faktorov vedúcich k ľudským zlyhaniam v letectve. Rozdeľuje zlyhania do štyroch úrovní, ktoré môžu viesť k incidentu alebo nehode. Model je často označovaný ako „švajčiarsky syr“, pretože „otvory“ v jednotlivých úrovniach môžu umožniť preniknutie chyby. Vrstvy zahŕňajú aktívne zlyhania, latentné zlyhania, nebezpečné konanie a organizačné faktory. Latentné zlyhania sú považované za nebezpečnejšie, pretože sa v systéme nachádzajú neprejavene a môžu byť prehliadnuté počas vyšetrovania. Model zdôrazňuje potrebu včasného odhalenia rizikových faktorov a prevencie nehôd.

Model SHELL predstavuje nástroj na analýzu vzťahov medzi leteckými systémami a ľudským faktorom. Skladá sa z piatich zložiek: **software (S)** – pravidlá, predpisy a operačné manuály, **hardware (H)** – fyzické zariadenia, **environment (E)** – prevádzkové prostredie, **liveware (L)** – ľudský faktor a jeho interakcia s ostatnými zložkami. V strede modelu sa nachádza človek, ktorý je najzraniteľnejší článok systému, no nevyhnutný pre jeho fungovanie. Dôležitá je správna koordinácia medzi jednotlivými zložkami systému, ako aj prispôsobenie

pracovného prostredia potrebám ľudí, aby sa znížila pravdepodobnosť chýb.

5. Výsledky

Cieľom bolo vytvoriť komplexný prehľad spôsobov zisťovania príčin leteckých nehôd. Článok sa delí na teoretickú a praktickú časť. Teoretická časť sa zaoberala bezpečnosťou v letectve, vývojom regulácií a rôznymi druhmi nebezpečenstiev. Praktická časť sa sústredila na analýzu vybraných metód zisťovania príčin nehôd, ako sú analýza čiernych skriniek, fyzická analýza trosiek, výpovede posádky, kontrolné zoznamy, analýza stromu porúch, maticová metóda rizík, Reasonov model, HFACS model a SHELL model. V samostatnej kapitole boli zhodnotené jednotlivé metódy, ich výhody, obmedzenia, efektivita a aplikačný potenciál.

Pre správne zhodnotenie výsledkov bola najprv stručne popísaná metodika fungovania a význam vyšetrovania leteckých nehôd. Na základe vykonaných analýz o vybraných metódach, použitých v procese vyšetrovania, možno skonštatovať, že jednotlivé prístupy sa navzájom dopĺňajú, pričom špecifickosť nehôd ovplyvňuje efektivitu jednotlivých metód. Z tohto dôvodu nie je možné využitie iba jednej univerzálnej metódy, ale je potrebné zohľadniť viacero kritérií v závislosti od informácií, ktoré sa majú získať počas vyšetrovania

5.1. Komparácia metód

FDR (Flight Data Recorder) a CVR (Cockpit Voice Recorder) sú najpresnejšie nástroje vyšetrovania, ktoré zaznamenávajú parametre letu ako rýchlosť, výšku, výkon motorov a komunikáciu v kokpite. Ich analýza umožňuje rekonštruovať priebeh nehody s vysokou presnosťou. **Hlavnou výhodou** je vysoká miera objektivity a presnosti, čo umožňuje detailnú rekonštrukciu posledných minút pred nehodou. **Nevýhodou** je, že v prípade poškodenia dát môže byť analýza neúplná. Okrem toho, tieto záznamníky nemôžu zaznamenávať emocionálny stav posádky alebo vonkajšie javy, ktoré nie sú prítomné v senzoroch lietadla.

Fyzická analýza trosiek lietadla pomáha identifikovať technické zlyhania, požiare, výbuchy a iné mechanické poškodenia pred nárazom. Kombinovaná s FDR a CVR poskytuje kľúčové informácie o príčine nehody. **Výhodou** tejto metódy je, že pomáha určiť miesto a spôsob zlyhania, ako aj detegovať možné sabotáže alebo nedostatky pri údržbe lietadla. Medzi **nevýhody** patrí vysoká časová a logistická náročnosť, ako aj náklady na analýzu. Interpretácia údajov môže byť navyše veľmi zložitá, najmä pri silne poškodených vrakoch lietadiel.

Výpovede posádky a svedkov prinášajú dôležité informácie o psychickom stave posádky a okolnostiach nehody, ktoré technické nástroje nezachytia. Tento prístup umožňuje získať subjektívne vnímanie situácie, čo pomáha identifikovať faktory ako stres, únava alebo chybné rozhodovanie. **Nevýhodou** je, že výpovede môžu byť nepresné alebo skreslené kvôli šoku alebo traume, čo znamená, že je potrebné postupovať citlivo a so skúseným vyšetrovateľom, aby sa minimalizovalo riziko skreslenia.

Kontrolný zoznam (Checklist) využíva vopred pripravený zoznam bodov, ktorý zabezpečuje logický a dôsledný priebeh vyšetrovania. Jednoduchá aplikácia checklistu pomáha zabezpečiť komplexné vyšetrovanie a znižuje riziko vynechania dôležitých faktorov počas vyšetrovania. **Nevýhodou** je, že účinnosť metódy závisí od kvality zoznamu a jeho schopnosti prispôsobiť sa špecifickým potrebám vyšetrovania.

Analýza stromu porúch pomáha vizualizovať príčiny nehody a kvantifikovať pravdepodobnosť zlyhania systémov lietadla. **Výhodou** je, že poskytuje systematickú vizualizáciu komplexných príčin a umožňuje kvantifikovať pravdepodobnosť zlyhania, čo môže byť kľúčové pri určovaní príčin nehody. **Nevýhodou** tejto metódy je, že vyžaduje presné údaje o spoľahlivosti systémov, a príprava a spracovanie dát sú veľmi časovo a odbornícky náročné.

Maticová metóda rizík slúži na hodnotenie systémových slabín a návrh preventívnych opatrení. Umožňuje rýchle vyhodnotenie rizika s vizuálnou prehľadnosťou. Medzi hlavné **výhody** patrí rýchlosť a jednoduchosť vyhodnotenia rizík, ako aj vizuálna prehľadnosť, ktorá podporuje efektívne rozhodovanie, aj pri obmedzených údajoch. **Nevýhodou** je, že hodnotenie pravdepodobnosti a závažnosti môže byť subjektívne, čo vedie k zjednodušeniu komplexných interakcií medzi rizikami.

HFACS model analyzuje ľudské a organizačné chyby, umožňuje identifikovať širšie systémové príčiny. Podporuje navrhovanie preventívnych opatrení a zlepšovanie výcviku. Tento model poskytuje veľmi detailné informácie o ľudských chybách a podporuje tvorbu účinných preventívnych opatrení. **Nevýhodou** je, že vyžaduje veľké množstvo kvalitných dát a interdisciplinárny prístup, ktorý môže byť náročný na implementáciu.

Reasonov model identifikuje hlbšie príčiny zlyhaní, pričom zohľadňuje aktívne aj latentné chyby. Hlavnou **výhodou** je schopnosť identifikovať hlbšie príčiny zlyhaní a podporovať zlepšenie organizačných procesov. **Nevýhodou** je, že aplikácia modelu môže byť zložitá kvôli nedostatku údajov a môže poskytnúť statický pohľad na dynamické situácie.

SHELL model poskytuje komplexný pohľad na interakcie medzi človekom, technológiou, softvérom a prostredím, čím identifikuje prevádzkové a interpersonálne chyby. Poskytuje komplexný pohľad na ľudské faktory a prevádzkové prostredie, čo je užitočné pri navrhovaní bezpečnostných opatrení. **Nevýhodou** je, že môže mať nepostačujúcu mieru konkrétnosti pri identifikácii technických chýb, pričom kvalita vstupných údajov môže ovplyvniť výsledky analýzy.

Po zhodnotení výsledkov sa pristúpilo k spracovaniu jednotlivých metód do tabuľky, aby bola dosiahnutá väčšia prehľadnosť. Do tabuľky boli vložené 3 základné kritériá, vďaka ktorým bude čitateľovi umožnené jednoducho pochopiť oblasť využitia metódy, silné a slabé stránky.

Tabuľka 5 Komparácia analyzovaných metód na základe stanovených kritérií

Metóda	Silné stránky	Slabé stránky	Hlavná oblasť využitia
Analýza čiernych skriniek	Objektivita a presnosť	Nezachytáva vonkajšie faktory	Technická rekonštrukcia letu
Fyzická analýza trosiek	Technické príčiny a štrukturálne poruchy	Nedostatočne zachované dôkazy	Mechanické a konštrukčné zlyhania
Výpovede svedkov	Ľudské faktory a zmyslové podnety	Subjektivita, pamäťové skreslenie	Psychologické a vnemové faktory
Kontrolný zoznam	Systematickosť a komplexnosť	Závislosť od kvality zoznamu	Evidencia postupov
Analýza stromu porúch	Detailná analýza technických zlyhaní	Vstupné údaje, obmedzenia pri ľudských faktoroch	Technické a systémové zlyhania
Maticová metóda rizík	Rýchla orientácia v rizikách	Subjektívne odhady, nižšia presnosť	Hodnotenie rizík
HFACS model	Presná klasifikácia ľudských chýb	Zložité triedenie a analýza	Analýza ľudských faktorov
Reasonov model	Systémové zlyhania a latentné chyby	Vyžaduje doplnkové dáta	Identifikácia nedostatkov
SHELL model	Komplexný pohľad na interakcie	Nízka kvantifikovateľnosť	Analýza interakcií v pracovnom prostredí

Zdroj: Vlastné spracovanie

5.2. Aplikácia metód na vybrané nehody

Aplikovaním týchto metód na konkrétne nehody sa chcelo poukázať na skutočnosť, ktorá bola už vyššie v tejto kapitole spomenutá, a to, že kombinácia viacerých metód je nevyhnutná pre dosiahnutie čo najdôveryhodnejšieho výsledku vyšetrovania. Pre určenie faktických príčin sú technické nástroje nenahraditeľným zdrojom informácií ale na druhej strane, pre porozumenie rozhodovacích procesov a systémových zlyhaní využívame modely ľudského faktora. V leteckých nehodách, ktoré sú popisované, budú identifikované použité vyšetrovacie metódy a následne, po vykonaní analýzy, na základe doposiaľ nadobudnutých teoretických poznatkov, bude vybraná jedna kľúčová metóda pre každú nehodu. Vyšetrovanie leteckých nehôd teda predstavuje dynamickú kombináciu analýzy dát, dôkazov, výpovedí a teoretických rámcov, ktorých cieľom je nielen nájsť príčinu nehody, ale aj predísť podobným incidentom v budúcnosti.

Nehoda na letisku v Tenerife, ktorá sa považuje za najznámejšiu a najtragickejšiu v histórii civilného letectva, vznikla v dôsledku zlej komunikácie medzi posádkou lietadla KLM, posádkou PanAm a riadením letovej prevádzky. Medzi použité vyšetrovacie metódy patrili výpovede svedkov a preživších, analýza FDR a CVR, Reasonov model zlyhania komunikačných kanálov a organizačného tlaku, HFCAS model na kategorizáciu chýb ľudského faktora a SHELL model, ktorý analyzoval interakciu pilotov s prostredím. Za kľúčovú metódu bola vybraná CVR analýza, ktorá v tomto prípade jednoznačne odhalila nedorozumenie medzi posádkami a letovou vežou.

Nehoda letu TWA 800, ktorá sa stala po explózii lietadla takmer okamžite po štarte, bola pôvodne považovaná za možný teroristický útok. Po vyšetrovaní sa však zistilo, že išlo o technickú poruchu, ktorá spôsobila výbuch palivovej nádrže v dôsledku iskry. Použité metódy pri vyšetrovaní zahŕňali fyzickú analýzu trosiek, FDR a CVR analýzu, laboratórne testovanie komponentov, analýzu stromu porúch a kontrolný zoznam na kontrolu správnosti údržby lietadla. Kľúčovou metódou bola fyzická analýza trosiek, ktorá umožnila odhaliť miesto a povahu explózie.

Nehoda letu Air France 447, ktorá sa stala pri zrútení lietadla do Atlantiku počas letu z Ria de Janeiro, bola spôsobená kombináciou ľudského pochybenia a technického zlyhania snímačov rýchlosti, konkrétne pitotových trubíc. Medzi použité vyšetrovacie metódy patrili FDR a CVR analýza (ktoré boli nájdené až po dlhodobom hľadaní na dne oceánu), Reasonov model, SHELL model a HFCAS model. V tomto prípade nebolo možné vybrať len jednu kľúčovú metódu, pretože na vyhodnotenie nedostatočnej reakcie posádky na neštandardnú situáciu bolo potrebné kombinovať Reasonov model s CVR analýzou.

Tieto prípady ukazujú, že pre úspešné vyšetrovanie je nevyhnutná kombinácia rôznych metód, ktoré pomáhajú nielen pri identifikácii príčin, ale aj pri prevencii podobných incidentov.

6. Záver

Záver predloženej práce potvrdzuje, že efektívne zisťovanie príčin leteckých nehôd vyžaduje komplexný prístup, ktorý integruje rôznorodé metodologické nástroje. Analýza ukázala, že žiadna jednotlivá metóda nepostačuje na odhalenie všetkých aspektov komplexných udalostí. Kým tradičné metódy zostávajú nenahraditeľné pri získavaní prvotných dát, analytické prístupy a modely, ako HFACS, Reasonov model a Shell model, poskytujú cenný rámec pre identifikáciu hlbších systémových príčin a vplyvu ľudského faktora.

Aplikácia analyzovaných metód na vybraných historických nehodách demonštrovala ich praktickú využiteľnosť pri rekonštrukcii priebehu udalostí a identifikácii kľúčových prispievajúcich faktorov. Výsledky práce zdôrazňujú potrebu kombinácie rôznych metód na získanie uceleného obrazu o príčinách nehôd.

Napriek rozsahu tejto analýzy existujú oblasti pre budúci výskum. Zvýšenú pozornosť by si zaslúžila hlbšia integrácia rôznych vyšetrovacích metód a vývoj komplexných metodologických rámcov, ktoré by zohľadňovali neustály technologický pokrok v letectve. Kľúčovou výzvou zostáva aj efektívne prepojenie výsledkov vyšetrovaní s implementáciou účinných preventívnych opatrení, ktoré sú nevyhnutné pre neustále zvyšovanie úrovne bezpečnosti leteckej dopravy. Táto práca tak prispieva k hlbšiemu pochopeniu zložitosti vyšetrovania leteckých nehôd a zdôrazňuje význam neustáleho vývoja a adaptácie metodologických prístupov v tejto kriticky dôležitej oblasti.

Poďakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: "Výskum a vývoj bezkontaktných metód pre získavanie geopriestorových údajov za účelom monitoringu lesa pre zefektívnenie manažmentu lesa a zvýšenie ochrany lesov", kód ITMS 313011V465, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

[1] EURÓPSKY PARLAMENT. *Riziká v oblasti bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci* [online]. 2013 [cit. 2025-04-15]. Dostupné na: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_techniques/2013/050610/04A_FT(2013)050610_SK.pdf

[2] MATERNA, M. a MATERNOVÁ, A. *Bezpečnosť v leteckej doprave*. Žilina: EDIS, 2024.

[3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *CICTT Hazard Taxonomy* [online]. 2014-03 [cit. 2025-03-08]. Dostupné na: https://www.icao.int/SAM/Documents/2017-SSP-BOL/CICTT%20Hazard%20Taxonomy.pdf

[4] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION a EUROCONTROL. *Just Culture*. Skybrary [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné na: https://skybrary.aero/articles/just-culture

[5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Safety Management Manual – 3rd ed.* [online]. 2012 [cit. 2024-03-08]. Dostupné na: https://www.icao.int/sam/documents/rst-smsssp-13/smm_3rd_ed_advance.pdf

[6] HOWELL, C. *Understand Reactive, Predictive and Proactive Risk Management in Aviation SMS*. Aviation Safety Blog [online]. 2023-04-05 [cit. 2024-03-11]. Dostupné na: https://aviationsafetyblog.asms-pro.com/blog/understand-reactive-predictive-and-proactive-risk-management-in-aviation-sms

[7] NÁRODNÁ RADA SLOVENSKEJ REPUBLIKY. *Zákon č. 143/1998 Z.z. o civilnom letectve* [online]. 1998-04-02 [cit. 2024-03-11]. Dostupné na: https://static.slov-lex.sk/static/SK/ZZ/1998/143/vyhlasene_znenie.html

[8] ZUSKA, A. *Tenerife – štyridsať rokov po*. Aeroweb [online]. 2017-03-27 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: https://www.aeroweb.cz/clanky/5356-tenerife-ctyricet-let-pote

[9] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *TWA800 In-Flight Breakup* [online]. 2011-01 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2011-01-09-twa800inflightbreakup.pdf

[10] SCHIAVO, M. F. a BRAUCHLE, J. R. *Air France Flight 447*. MotleyRice [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: https://www.motleyrice.com/aviation-lawsuit/air-france-flight-447

[11] EURÓPSKY PARLAMENT. *Bezpečnostné predpisy v letectve* [online]. 2021-10-18 [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/?uri=LEGISSUM:tr0046

[12] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. *CVR/FDR Overview*. NTSB [online]. [cit. 2025-03-15]. Dostupné na: https://www.ntsb.gov/news/Pages/cvr_fdr.aspx

[13] PACKER, K. F. a MORIN, C. R. *The Role of the NTSB in Aviation Safety*. SMU Scholar [online]. 1974 [cit. 2025-03-19]. Dostupné na: https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2050&context=jalc

[14] FRATCZAK, D. a KONIECZKA, R. *The Model of Reporting System in Civil Aviation*. ICI Journals Master List [online]. 2018 [cit. 2025-03-19]. Dostupné na: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1291719.pdf

[15] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Quantitative Safety Analysis*. Skybrary [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3708.pdf

[16] SAFETY, S. A. *Quantitative Safety Levels*. Skybrary [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: https://skybrary.aero/articles/quantitative-safety-levels

[17] BAZANT, M. *FTA – Fault Tree Analysis*. Bazant Wordpress [online]. 2011-06-02 [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: https://bazant.wordpress.com/2011/02/06/fta-fault-tree-analysis-strom-porch/

[18] CENTRALEYES. *Semi-Quantitative Risk Assessment*. Centraleyes [online]. [cit. 2025-04-10]. Dostupné na: https://www.centraleyes.com/glossary/semi-quantitative-risk-assessment/

[19] EURÓPSKA ÚNIA. *Smernica o bezpečnostnom manažmente v letectve* [online]. 2019-12-02 [cit. 2025-04-12]. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019XC1220%2801%29

[20] SAFETY, S. A. *HFACS – Human Factors Analysis and Classification System*. Skybrary [online]. [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: https://skybrary.aero/articles/human-factors-analysis-and-classification-system-hfacs

[21] DURGUT, M. *Swiss Cheese Model*. Aviationfile [online]. 2020-09-13 [cit. 2025-03-02]. Dostupné na: https://www.aviationfile.com/swiss-cheese-model/

[22] KNUDSEN, A. *SHELL Model in Aviation*. Naviminds [online]. [cit. 2025-04-12]. Dostupné na: https://naviminds.com/shell-model-aviation/