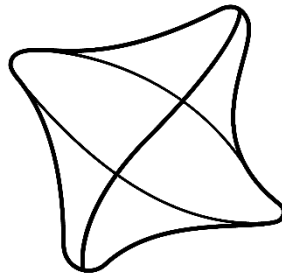


**PRÁCE A ŠTÚDIE**  
**STUDIES**

**KATEDRA LETECKEJ DOPRAVY**  
AIR TRANSPORT DEPARTMENT

**FAKULTA PREVÁDZKY A EKONOMIKY DOPRAVY A SPOJOV**  
FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS



**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**  
UNIVERSITY OF ŽILINA

**VYDANIE 13**  
VOLUME 13

**Žilina, 2023**

## REDAKČNÁ RADA

prof. Ing. <b>Antonín Kazda</b> , CSc.	doc. Ing. <b>Pavol Kurdel</b> , PhD.
Ing. <b>Michal Červínka</b> , PhD.	doc. Ing. Dr. <b>Tomasz Lusiak</b>
doc. Ing. <b>Branislav Kandra</b> , PhD.	assoc. prof. Dr. <b>Anna Stelmach</b>
doc. Ing. <b>Benedikt Badánik</b> , PhD.	assoc. prof. Dr. <b>Anna Rudavska</b>
Doc. Ing. <b>Jozef Čerňan</b> , PhD.	Doc. Ing. <b>Jakub Kraus</b> , Ph.D.
Mgr. <b>Miriam Jarošová</b> , PhD.	doc. Ing. <b>Peter Vittek</b> , Ph.D.
Ing. <b>Ján Rostáš</b> , PhD.	doc. Ing. <b>Vladimír Socha</b> , PhD.
doc. Ing. <b>Martin Bugaj</b> , PhD.	Ing. <b>Stanislav Pleninger</b> , Ph.D.
JUDr. doc. Ing. <b>Alena Novák Sedláčková</b> , PhD.	Ing. <b>Ján Zýka</b> , Ph.D.
prof. Ing. <b>Anna Tomová</b> , CSc.	doc. RNDr. <b>Vladimír Krajčík</b> , Ph.D.
Ing. <b>Filip Škultéty</b> , PhD.	prof. Ing. <b>Ján Piľa</b> , PhD.
Ing. <b>František Jůn</b> , CSc.	assoc. prof. <b>Doris Novak</b> , PhD.
Ing. <b>Peter Blaško</b> , CSc.	Ing. <b>Pavol Pecho</b> , PhD.
Ing. <b>Matúš Materna</b> , PhD.	Ing. <b>Michal Janovec</b> , PhD.

### **TLAČ / PRINTED BY**

EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity / EDIS – University of Žilina publisher

### **TECHNICKÝ REDAKTOR / TEXT DESIGNER**

Ing. Matúš Materna, PhD.

**Všetky publikované články boli recenzované dvomi nezávislými recenzentmi a prešli schvaľovacím procesom redakčnej rady.**

All of these papers have been reviewed by two independent reviewers and have been processed by editorial board.

## PREDHOVOR

Táto publikácia je výstupom vedeckej činnosti mladých vedeckých pracovníkov Katedry leteckej dopravy, Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline (ďalej len "KLD") vykonávanej pod dohľadom odborníkov, výskumníkov a vedeckých pracovníkov z praxe a univerzitného prostredia, ktorých úlohou bolo, aby svoje znalosti získané prevažne v rámci základného alebo aplikovaného výskumu priamo na KLD alebo v spolupráci s ňou odovzdávali "mladšej generácii". V súčasnosti prevažná časť výskumu KLD je riešená v spolupráci s Leteckým výcvikovým a vzdelávacím centrom Žilinskej univerzity v Žiline (ďalej len "LVVC") a zaoberá sa oblasťou výskumu a vývoja leteckej dopravy v previazanosti na ďalšie oblasti výskumu, možnosti využitia a aplikovania jedinečných technológií a vedeckých výstupov do praxe.

Cieľom publikácie je priblížiť vedecko výskumnú činnosť, ktorej sa venujú študenti, doktorandi, mladí vedeckí pracovníci a spolupracujúce organizácie predovšetkým v oblasti výskumu dopravy a dopravných služieb. Úlohou jednotlivých vedeckých statí a článkov bolo preukázať schopnosť analyzovať náročné teoretické úlohy, navrhovať ich technické riešenia ako aj zohľadňovať všetky ekonomické aspekty riešeného problému. Zároveň sa zameriavajú na riadenie dopravných podnikov, jednotlivé dopravné procesy a návrhy nových alebo inovovaných dopravných technológií, ktoré budú spĺňať požiadavky dnešnej praxe s dôrazom na kvalitu, bezpečnosť, minimalizáciu prevádzkových nákladov s ohľadom na potrebu trvalo udržateľného rozvoja spoločnosti a ochrany životného prostredia.

prof. Ing. **Andrej Novák**, PhD.  
*vedúci Katedry leteckej dopravy*

PRÁCE A ŠTÚDIE sú publikované v nadväznosti na projekt Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 040ŽU-4/2022** *Transfer progresívnych metód vzdelávania do študijného programu "Technológia údržby lietadiel" a "Letecká doprava"*.

## **OBSAH**

<b>AIRCRAFT AIRFOILS .....</b>	<b>5</b>
<b>MODIFICATION OF THE OF THE VIPER SD-4 BRAKING SYSTEM .....</b>	<b>12</b>
<b>WING PLATFORMS OF SUPERSONIC AIRCRAFT .....</b>	<b>17</b>
<b>DESIGN OF THE SYSTEM FOR THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE FUEL-AIR MIXTURE OF THE M60 ENGINE .....</b>	<b>22</b>
<b>ANALÝZA OPERAČNÉHO ODDELENIA LETECKEJ SPOLOČNOSTI.....</b>	<b>27</b>
<b>THE POSSIBILITY OF ICING DURING LIGHT PRECIPITATION AS A DANGEROUS PHENOMENOM FOR FLYING AT SLOVAK AIRPORTS.....</b>	<b>32</b>
<b>ANALYSIS OF SELECTED VITAL FUNCTIONS OF A PILOT DURING FLIGHT .....</b>	<b>38</b>
<b>CHANGES IN VISIBILITY CAUSED BY ATMOSPHERIC FRONTS.....</b>	<b>42</b>
<b>OPTIMIZATION OF GROUND HANDLING PROCESSES AT KSC AIRPORT .....</b>	<b>47</b>
<b>FUELS FOR CARBON NEUTRALITY IN AVIATION .....</b>	<b>52</b>
<b>NEW TRENDS IN UAV CONSTRUCTION .....</b>	<b>61</b>
<b>ANALYSIS OF ALTERNATIVE CONTROL OPTIONS FOT THE ROTAX 915 IS ENGINE.....</b>	<b>68</b>
<b>EVALUATION OF SLOVAK MANUFACTURED AIRCRAFT SUITABLE FOR PILOT TRAINING IN FLIGHT TRAINING ORGANIZATION .....</b>	<b>74</b>
<b>USE OF ADVANCED MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION .....</b>	<b>79</b>
<b>ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF INCREASING SAFETY AT THE SELECTED AIRPORT .....</b>	<b>85</b>
<b>WEATHER AND ITS IMPACT ON THE WORK OF RESCUE HELICOPTERS IN TERRAIN .....</b>	<b>91</b>
<b>OPTIMIZATION DESIGN OF FLIGHT TRAINING REGARDING COCKPIT EQUIPMENT .....</b>	<b>96</b>
<b>PUBLIC SUPPORT OF REGIONAL AIRPORTS IN EUROPEAN COUNTRIES .....</b>	<b>101</b>
<b>ANALYSIS OF TECHNICAL MODIFICATIONS TO ENABLE COMBUSTION OF GASEOUS FUEL IN A TURBOSHAFT ENGINE .....</b>	<b>107</b>
<b>FOREST MAPPING USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA .....</b>	<b>112</b>
<b>ACCURACY OF DIGITAL TERRAIN MODEL ON FOREST ROADS USING AIRBORNE LIDAR AND UAV POINT CLOUDS .....</b>	<b>117</b>
<b>EFFECT OF WING SURFACE CONTAMINATION ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS.....</b>	<b>122</b>



## AIRCRAFT AIRFOILS

**Kristína Haluzová**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Martin Bugaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Michal Hruz**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*This work deals with the airfoils of aircraft. First of all, it focuses on the general properties of wings. Furthermore, the work deals with the issue of various types of wing shape and compares individual shapes of airfoils, their properties and gradual development. Next, current wings of commercial aircraft are described, dealing with the materials used, types of winglets, mechanization of the wing and also different uses of the airfoils. The work also describes and compares wings of two famous commercial airliners – Boeing 737-800 and Airbus A320-200. In the end, the work also focuses on various concepts of the wings of the future, and how sustainability affects future development.*

### Keywords

*airfoils, wings, wing shape, wing mechanization*

### 1. Úvod

Od počiatku lietania až po súčasnosť tvoria krídla základ a neodmysliteľnú súčasť letúnov. Nosné plochy sú zdrojom potrebného vztlaku pre vzlet. Prostredníctvom riadiacich plôch umiestnených na krídlach, vieme ovplyvňovať vztlak a odpor pôsobiaci na krídlo, a tým riadiť let. Nosné plochy prešli desaťročiami obrovským vývojom. Prešlo sa od dvojplošníkovo na jednoplošníky. Od dreva potiahnutého látkou krídel bratov Wrightovcov sa prešlo k hliníkovým konštrukciám a k dnešným kompozitným materiálom. Asi najviac viditeľným vývojom si prešiel samotný tvar nosných plôch. Existuje niekoľko druhov, každý prinášajúci iné výhody, pre daný typ letúna. Dnešné komerčné dopravné lietadlá používajú ustálený tvar šípového krídla.

Vývoj nosných plôch je ale nekončiaci sa proces. Vývoj nových a dokonalejších krídel neustále pokračuje i naďalej. V dnešnej dobe sa pozornosť v letectve zameriava hlavne na problematiku ochrany životného prostredia a s tým spojenou úsporou paliva. Dôraz sa preto kladie hlavne na to, aby sa počas letu vytváral čo najmenší odpor. Tomu sa prispôsobuje vývoj lietadiel i samotných krídel.

### 2. Všeobecné vlastnosti krídel

Jednou z najdôležitejších vecí, ktoré letún potrebuje na to aby vôbec mohol vzlietnuť je vztlak. Na vytvorenie vztlaku slúžia práve krídla – nosné plochy letúna. Preto je dôležité, aby nosné plochy mali čo najpriaznivejšie vlastnosti pri ich obtekaní vzduchom počas letu v rôznych podmienkach. Existuje mnoho profilov a tvarov nosných plôch.

Profil krídla by sa mohol definovať ako krivka, ktorá vznikne pomocou rezu krídla rovinou, ktorá je kolmá na os krídla. Profil má rozhodujúcu úlohu nielen pri zabezpečovaní optimálneho obtekania nosných plôch vzduchom, ale aj pri dosahovaní

minimálneho odporu. Preto profil krídla prešiel rokmi veľkým vývojom a ďalším zdokonaľovaním. [1]

### 3. Pôdorné typy krídel a ich vývoj

Poznáme viacero typov tvaru krídel. Vznikali postupne, neustálym zdokonaľovaním aerodynamických vlastností nosných plôch

#### 3.1.1. Začiatky

Bratia Wrightovci navrhovali krídla pre svoje letúne na základe údajov z veterného tunela, ktorý si sami zostrojili. Z testov v tomto tuneli zistili dôležitosť vplyvu pomeru strán nosných plôch na pôsobenie síl vztlaku a odporu. Pomer strán je pomerom dĺžky krídla k jeho šírke. Ich krídla na letúnoch z rokov 1900 a 1901 mali nízky pomer strán, okolo 3,4. Avšak z údajov z aerodynamického tunela neskôr zistili, že krídla s vysokým pomerom strán vytvárajú vyšší vztlak a nižší odpor. Ich Wright Flyer mal pomer strán o hodnote 6,4. Zaujímavé je, že mnohé súčasné lietadlá dosahujú podobných hodnôt. Taktiež používali tenké profily krídel kvôli nižšiemu odporu. [2]

#### 3.1.2. Prvá svetová vojna

Koncepciu s tenkým profilom nasledovala i väčšina lietadiel prvej svetovej vojny. Neskôr sa ale zistilo, že výsledky z veterného tunela boli zavádzajúce, nakoľko modely tunelov boli malé a rýchlosť prúdenia v týchto tuneloch bola nízka. Pri skutočných podmienkach letu nastalo oddelenie prúdu na hornej strane tenkého profilu, čo malo za následok nižší vztlak a vyšší odpor. Na druhej strane hrubšie profily aj pri vyšších uhloch nábehu tieto problémy nemali. Z tohto dôvodu sa ku koncu prvej svetovej vojny použili hrubšie profily krídel, napríklad na lietadlách Fokker Triplane a Fokker D-7. Samotné krídla boli obdĺžnikového typu. Tento typ nosných plôch sa vyznačuje počiatočným odtrhnutím prúdu v strede vrchnej strany nosnej

plochy. Konce krídel a teda i krídelká nie sú zasiahnuté týmto odtrhnutím. [1][2]

### 3.1.3. Medzivojnové obdobie

Po prvej svetovej vojne nadišlo k rozvoju využitia letúnov i ku komerčným účelom. V tridsiatych rokoch minulého storočia vykazovali efektívne konštrukcie krídel veľké pomery strán a hrubé profily. Príkladom je Douglas DC-3 z roku 1936. Jeho krídlo malo vysoký pomer strán o hodnote 9,14, a vyznačovalo sa hrubým profilom. Hrubšie krídlo umožňovalo efektívne využitie ako úložný priestor pre palivové nádrže, rovnako i pre zaťahovací podvozok. Hrubý profil taktiež dovoľoval použitie väčšieho a silnejšieho nosníka pozdĺž vnútornej stany krídla. Vďaka tomuto už nosné plochy nepotrebovali vonkajšie podporné drôty a vzpery. Táto konštrukcia pomohla rozvoju modernej jednoplošnej konfigurácie namiesto staršej dvojplošnej. [2][3]

### 3.1.4. Druhá svetová vojna

Pôdorysné tvary krídel z rokov 1930 až 1945 vykazujú veľkú rozmanitosť, od rovných nábežných hrán a šikmých odtokových hrán (de Havilland Mosquito) až po opačný prípad (Douglas DC-3, North American T-6). Žiadne z lietadiel tej doby nebolo dostatočne rýchle na to, aby využívalo plne zahnuté krídla, ako ich poznáme dnes. Krídla, ktoré boli určené pre rýchle a vysoko namáhané letúne, ako napríklad stíhacie lietadlá, boli tenšie a ich pomer strán bol okolo 5 alebo 6. Naopak tie, ktoré slúžili k preprave nákladu, bombardéry, dopravné lietadlá, používali vyšší pomer strán. Niekedy aj viac ako 10. Ich profil bol taktiež hrubší. Hoci mnohé krídla dvojplošníkov mali jednoduchý obdĺžnikový tvar, krídla jednoplošníkov boli z konštrukčného dôvodu takmer vždy zúžené. Ku koncu druhej svetovej vojny boli veľké zúženia nosných plôch na ústupe. Prešlo sa na štandardné hodnoty, pri ktorých koncové tetivy tvoria tretinu alebo polovicu koreňových tetív.

V období druhej svetovej vojny sa pozornosť venovala i eliptickému tvaru krídla. Krídlo tohto typu má výhodu hlavne v tom, že znižuje hodnotu indukovaného odporu. Kvôli rovnomernému rozloženiu vztľaku má ale i najhoršie pádové vlastnosti. [1][4][5]

### 3.1.5. 50. roky – príchod prúdových lietadiel

S príchodom prúdových lietadiel v 50. rokoch minulého storočia, ktorých rýchlosti presahovali rýchlosť zvuku, tvary krídel a ich profilov podstúpili ďalšie zmeny. Tenšie nosné plochy umožnili podzvukovým lietadlám priblížiť sa k rýchlosti zvuku predtým, než sa na povrchu krídla vytvorili nepriaznivé rázové vlny, ktoré znížili vztlak a zvýšili odpor.

Väčšina vysokorýchlostných podzvukových a nadzvukových lietadiel má skôr šípové krídla než priame. To kvôli zníženiu sily rázových vln a odporu, ktorý spôsobujú. Pri tomto type nosných plôch sú špičky krídel odklonené od priečnej osi lietadla o viac ako 15 stupňov.

Šípové krídla s uhlom šípu viac ako 20 stupňov majú veľmi priaznivé aerodynamické charakteristiky v oblasti zvukových a mierne nadzvukových rýchlostí letu ( $M = 0,75 - 2,0$ ).

Šípové krídla delíme na krídla s kladným a záporným šípom. Krídlo s kladným šípom má horšie rozloženie vztľaku na povrchu krídla, pričom vztľakové sily sa delia na dve zložky – vztlak pred ťažiskom a za ním. Pri správnom vyvážení sú obe tieto zložky v rovnováhe a letún letí stabilne

Na druhej strane krídlo so záporným šípom má oveľa lepšie rozloženie vztľaku. Jeho najväčšou nevýhodou je ale to, že je oveľa náchylnejšie na aeroelastické javy. Takéto javy sú napríklad silné vibrácie a ohyb [2][6]

### 3.1.6. Delta krídlo

Trojuholníkové krídla sú tiež v podstate šípové krídla s kladným šípom. Používanie tohto krídla sa začalo na prelome 50. a 60. rokov minulého storočia. Ich konštrukcia sa vyznačuje malou štihlosťou i veľkou tuhosťou a pevnosťou. Veľká plocha krídla umožňuje lepšiu ovládateľnosť a znižuje zaťaženie krídla. Taktiež sú tieto krídla jednoduché na výrobu a údržbu. [6]

## 4. Súčasná krídla dopravných lietadiel

Výrobné procesy a použité materiály prešli značným vývojom. Nové technológie umožňujú dosiahnuť čo najväčšiu možnú efektívnosť, čo je prioritou dnešných leteckých spoločností. Dizajn a výroba dnešných krídel sa zameriava hlavne na zlepšenie aerodynamických vlastností nosných plôch, ako i na zníženie hmotnosti použitých komponentov. Zníženie hmotnosti je dôležité hlavne z hľadiska úspory paliva.

Vďaka zavedeniu pokročilých kompozitných materiálov sa umožnilo zníženie hmotnosti krídel lietadiel v porovnaní s prevažne hliníkovými konštrukciami, ktoré v priemysle prevládali od 60. rokov minulého storočia.

Ďalším významným pokrokom je využitie 3D tlače. Táto technológia sa využíva na pokročilé analytické výpočty, ktoré sú schopné vyhodnotiť efektívnosť prototypov z hľadiska úspory hmotnosti. Vďaka tomu je možné testovať a zdokonaľovať nové dizajny s minimálnymi nákladmi. [7]

### 4.1. Priestor pre umiestnenie paliva

Nosné plochy dopravných lietadiel ponúkajú efektívne priestory pre uskladnenie paliva. Umiestnenie hlavných palivových nádrží do krídel sa realizuje jednak kvôli hospodárnosti, ale i celkovej stabilite lietadla počas vzletu. Dnešné dvojmotorové lietadlá sú schopné prepraviť viac ako 140 000 litrov paliva. Ak by bola celá táto dodatočná hmotnosť uložená v trupe, znížil by sa tým dostupný nákladný priestor a zvýšilo by sa namáhanie konštrukcie lietadla. [8]

### 4.2. Mechanizácia krídla

K súčasným požiadavkám na nosné plochy dopravných lietadiel patrí bezpochyby aj ich kompletná mechanizácia. Schopnosť ovplyvniť veľkosť súčiniteľa vztľaku či odporu je kľúčová z hľadiska zmeny aerodynamických síl pôsobiacich na krídlo počas letu. Zvýšenie prípadne zníženie týchto dvoch súčiniteľov je dôležité hlavne pri fázach pristátia a vzletu.

#### 4.2.1. Prostriedky pre zvýšenie súčiniteľa vztľaku

Využívajú sa nielen pri vzlete ale aj vo fáze pristátia. Základným princípom vztľakových klapiek je to, že napomáhajú buď zväčšiť alebo zmenšiť povrchovú plochu krídla lietadla.

Klapky na odtokovej hrane krídla sú pohyblivé plochy, ktoré dokážu podľa potreby meniť zakrivenie alebo samotnú plochu krídla. Ich hlavným účelom je vytvárať väčší vztľak pri nízkych rýchlostiach, a tým umožňovať lietadlu používať minimálne rýchlosti pri štarte a pristáť

Najjednoduchším typom je odklápacia klapka. Nachádza sa na spodnej odtokovej časti krídla. Sklápa sa smerom nadol od prednej hrany klapky, zatiaľ čo horný povrch zostáva nepohyblivý.

Ďalším typom klapky nachádzajúcej sa na odtokovej hrane krídla je štrbinová klapka. Vysunutím tejto klapky vzniká, na rozdiel od predchádzajúceho typu, štrbina medzi klapkou a krídlom. Táto štrbina dovoľuje vzduchu prúdiť k hornej strane klapky, kde stabilizuje prúdenie a zabraňuje jeho odtrhnutiu. Princíp vytvorenia štrbiny využíva i Fowlerova klapka. Jedná sa o najefektívnejšiu klapku, ktorá sa používa na odtokovej hrane.

Na nábežnej hrane taktiež nájdeme zariadenia slúžiace k zvýšeniu vztľaku. Prvým takýmto zariadením je Kreugerova klapka. Túto klapku nájdeme na spodnej strane nábežnej hrany v oblasti koreňovej časti krídla. Keď sa táto klapka vysunie, zväčší sa prehnutie prednej časti profilu. V dôsledku toho sa odtrhnutie prúdu dostáva do väčších uhlov nábehu. Rovnako ako klapky na odtokovej hrane, i klapky na nábežnej hrane napomáhajú skracať potrebnú dĺžku pre pristátie.

Ďalšími zariadeniami pre zvýšenie vztľaku, ktoré môžeme nájsť v prednej časti krídla sú sloty. Po vysunutí slotu vznikne medzera medzi nábežnou hranou a slotom. Princíp je podobný ako u štrbinovej klapky.

#### 4.2.2. Prostriedky pre zvýšenie súčiniteľa odporu

Poznáme dve hlavné zariadenia slúžiace k zvýšeniu odporu – spojery a aerodynamické brzdy. Spojery sú plochy nachádzajúce sa na vrchnej časti krídla. Zvyšujú odpor a znižujú vztľak. Častokrát sa spojery používajú súčasne s krídelkami pri klonení. Na strane krídla kde sa krídelko vysunie hore, sa spolu s ním vysunie i spojler. Na druhej strane ostane spojler zasunutý. V dôsledku toho sa lietadlo nakloní a zatočí na stranu s vysunutým spojlerom. V niektorých prípadoch sa spojery vysúvajú súčasne na oboch stranách. V tomto prípade spĺňajú úlohu brzd a znižujú rýchlosť letu. Vysunutie spojlerov na zemi zvyšuje efektívnosť brzdzenia.

K zvýšeniu odporu lietadla sa používajú i aerodynamické brzdy. Aerodynamické brzdy sú umiestnené buď na krídle alebo na trupe lietadla. V prvom prípade zároveň rušia i vztľak.

#### 4.2.3. Odpor vznikajúci na koncoch krídel a použitie Wingletov

Winglety napomáhajú znižovať účinky víru vzduchu, ktorý vzniká za krídlom pri prechode vzduchom vysokou rýchlosťou.

Winglet smerujúci smerom nadol sa označuje aj ako nepravý winglet. Pri tejto konštrukcii sa predpokladá menšie ovplyvnenie tlakovým zaťažením. Väčšinou sú konštruované z kompozitných materiálov. Opačným prípadom je pravý winglet, označovaný aj

ako classic winglet. Jeho použitie znižuje hodnotu indukovaného odporu o 20 %.

Ďalej rozdeľujeme winglety je podľa toho, aký je prechod medzi wingletom a krídlom. Prvým typom je ostrý prechod, označovaný aj ako Wingtip Fence. Tento typ využívajú hlavne lietadlá typu Airbus. Koncové plochy v tomto prípade smerujú nahor i nadol. Druhý prípad je Blended Winglet. Toto riešenie plynulého prechodu ponúka najmenšie hodnoty interferenčného odporu. [1]

### 5. Porovnanie nosných plôch dopravných lietadiel typu BOEING 737 a AIRBUS A320

Medzi najrozšírenejšie dopravné lietadlá patria bezpochyby letúne typu Boeing 737 a Airbus A320. Tieto úzkotrupé prúdové lietadlá tvoria základ množstva flotíl po celom svete.

Ich krídla sú si tvarom veľmi podobné. Zdieľajú rovnaký základný dizajn podobne ako väčšina dnešných komerčných lietadiel. Súvisí to s tým, že nosné plochy prešli v posledných desaťročiach dôkladným vývojom, aby sa dosiahol čo najoptimálnejší dizajn. Pôdorysný tvar väčšiny dopravných lietadiel je šípové krídlo s kladným šípom. To kvôli tomu, že tento tvar je z hľadiska odporu vhodný pre letúne dosahujúce vyšších rýchlostí a je dobre odolný voči aeroelastickým javom. Takže krídlo je počas letu odolné voči ohybom a iným zaťaženiam. Na druhej strane sa nosné plochy líšia plochou ich povrchu, rozpätím a sklonom. Boeing 737 má väčšiu plochu krídla než Airbus A320. Je to z toho dôvodu, že Boeing má o niečo vyššiu hmotnosť, a tak vyžaduje väčšiu plochu krídla pre vytvorenie potrebného vztľaku. Väčšia plocha si vyžaduje i väčšie rozpätie. Príslušné údaje znázorňuje tabuľka:

Tabuľka 1 – Porovnanie údajov.

	Boeing 737-800	Airbus A320-200
Rozpätie	35,8 m	34,1 m
MTOW	79 002 kg	78 000 kg
Plocha krídla	124,58 m <sup>2</sup>	122,6 m <sup>2</sup>
Uhol šípu krídla	25,02 °	25 °
Dihedrálly uhol	5,11 °	6 °

Ďalšia charakteristika, ktorú krídla týchto dopravných lietadiel zdieľajú, je ich umiestnenie. Nachádzajúca sa na spodnej časti trupu lietadla. Tento spôsob uloženia krídel prináša mnoho praktických výhod pre dopravné lietadlá. Pri prípadnom pristáťi bez podvozku absorbujú značnú časť vzniknutej sily. Ďalšou núdzovou situáciou môže byť pristátie na vode. V tomto prípade krídla napomáhajú udržať lietadlo s pasažiermi nad vodnou hladinou. Vďaka tomu, že sú krídla na spodnej časti trupu, môžu taktiež slúžiť ako jedna z možností pre núdzové opustenie lietadla. Ďalšia výhoda tohto umiestnenia krídel je, že motory nachádzajúce sa na ich spodnej strane sú bližšie k zemi. Ich údržba je o to jednoduchšia. Nosné plochy oboch lietadiel sú taktiež dihedrálne, pre dosiahnutie väčšej stability.

Boeing 737 a Airbus A320 používajú dve rôzne zakončenia krídel. Boeing na modeli 737-800 využíva svoj vlastný typ zakončenia krídla nazývaný Blended winglet.

Tento typ wingletov z uhlíkových vlákien pomáha na 737 znížovať emisie CO<sub>2</sub> o 4 %. Rovnako pomáhajú znížovať spotrebu paliva. Toto bolo obzvlášť podstatné, nakoľko boli na Boeing nasadené práve v čase stúpajúcej ceny ropy.

Práve rastúce ceny paliva a potreba konkurencieschopnosti, podnietili Airbus k vývoju efektívnejšieho letúna typu A320. Spoločnosť vyvinula zakončenia nosných plôch špeciálne pre rad A320. Tieto zakončenia sa nazývajú tzn. Sharklety. Majú špicatý koniec, ktorý na hornej strane smeruje dozadu. Sharklety poskytujú úsporu paliva o približne 3,5 %. [9][10]

### 5.1. Palivové systémy

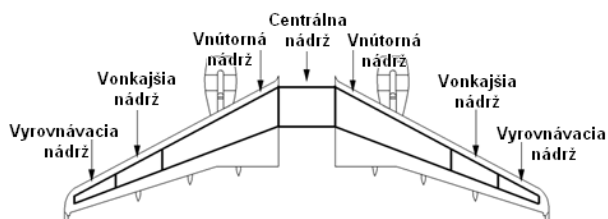
Boeing 737-800 má v krídlach niekoľko nádrží. Centrálna palivová nádrž má kapacitu 13 000 kg (16 560 l), čo predstavuje značné zväčšenie oproti predošlým typom s kapacitou 7 000 kg (8 917 l). Centrálna nádrž sa nenachádza len v oblasti trupu, ale zasahuje i do koreňových častí nosných plôch.



Obrázok 1 – Palivové nádrže.

Obe krajné vyrovnávacie palivové nádrže majú kapacitu 108 kg (229 l). Slúžia k zberu paliva, ktoré pretečie z hlavných nádrží. Pri vodorovnom lete, pretečie palivo naspäť do hlavných palivových nádrží. V prípade, že sa v nádrži nahromadí príliš veľké množstvo paliva, časť z neho sa vypustí von cez ventily umiestnené pri koncoch krídel. Po celej dĺžke krídla sa nachádzajú oválne panely, ktoré umožňujú prístup k všetkým palivovým nádržiam. Hlavné palivové nádrže majú kapacitu okolo 3 900 kg (4 968 l). Celková kapacita je teda 26 496 l. [11]

Systém palivových nádrží umiestnených v krídle je u A320 podobný ako u lietadla Boeing 737. Centrálna nádrž v tomto prípade ale nezasahuje do koreňových častí krídla. Vyrovnávacie palivové nádrže sa rovnako nachádzajú na okrajoch krídel. Spĺňajú podobnú funkciu ako tie, ktoré boli spomínané pri 737.



Obrázok 2 – Palivové nádrže.

Každá z vonkajších palivových nádrží má kapacitu 691 kg (880 l). Obe vnútorné palivové nádrže majú kapacitu 5435 kg (6924 l). Centrálna palivová nádrž disponuje kapacitou 6476 kg (8250 l). Celková kapacita spolu s centrálnou nádržou je 23 858 l.

Na oboch stranách krídla sa nachádzajú dva ventily, umožňujúce prechodu paliva z vonkajšej do vnútornej nádrže. [12]

### 5.2. Použité materiály, mechanizácia krídel a systémy

#### 5.2.1. Boeing 737-800

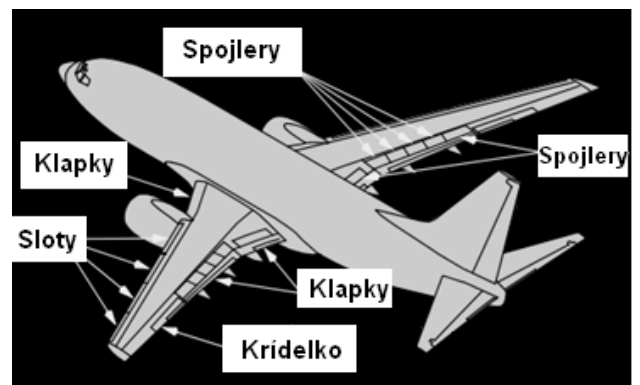
Na každej nábežnej hrane sa nachádzajú 2 Kreugerove klapky. Majú dve pozície, sú zasunuté alebo vysunuté. Klapky na nábežnej hrane nemajú systém prevencie proti námraze. Každá z týchto klapiek je ovládaná prostredníctvom hydraulického systému. Keď je klapka zatiahnutá, je uložená v dutine nábežnej hrany. Medzeru medzi klapkami a motorom vypĺňajú tesniace dvere. Otvoria sa v prípade reverzácie ťahu, aby umožnili obracaču ťahu pohyb smerom dozadu.

Na nábežnej hrane sa nachádzajú i 4 sloty. Majú 3 pozície – zatiahnuté, vysunuté pri vzlete a plne vysunuté pri pristávaní. Keď sú klapky v pozícii pre vzlet, vysunutie slotov napomáha znížovať odpor. Pri 737-800 musia byť funkčné aspoň dva páry indikátorov slotov. Sloty sú taktiež poháňané hydraulikou.

Klapky na odtokovej hrane sú 2 a sú to Fowlerove klapky. Ovládanie je hydraulické. B737-800 má oproti predošlým modelom zjednodušený dizajn na odtokovej hrane v tom, že medzi vnútornou a vonkajšou klapkou je vynechaný priestor. Vďaka tomu nič nezasahuje do prúdu výfukových plynov od motora. Medzi klapkami a trupom lietadla sa nachádzajú gumové tesnenia.

Boeing 737-800 využíva systém FSEU – flap/slats electronics unit. Monitoruje činnosť klapiek na odtokovej hrane a rovnako aj zariadení na nábežnej hrane. Indikuje napríklad polohu, pohyb a asymetriu klapiek.

Na každom krídle sa nachádza šesť spojlerov. Z nich dva, nachádzajúce sa na okrajoch, slúžia výlučne pre použitie na zemi. Spojlery sa používajú asymetricky alebo symetricky spolu s krídelkami, ktoré sa na lietadle nachádzajú dve. Krídelká spolu so spojlermi rovnako ovláda hydraulický systém. Pri znížení rýchlosti sa spojlery vysúvajú postupne, od vnútorného po vonkajší, kvôli zníženiu ohybového momentu pôsobiaceho na krídlo.



Obrázok 3 – Mechanizácia krídla Boeing 737-800.



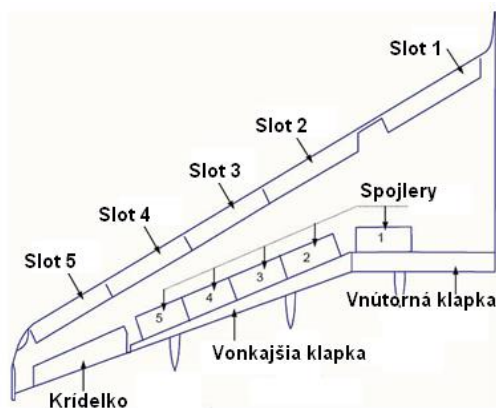
Samotné nosné plochy sú vyrobené zo zliatin hliníka:

Rebrá krídel - zliatina hliníka a zinku, pre odolnosť voči korózii a prasklinám.

Vrchný a spodný plášť krídla a nosníky – zliatina hliníka, zinku, horčíka a medi, pre dobrý pomer pevnosti a hmotnosti. [13][14]

### 5.2.2. Airbus A320-200

Na nábežnej hrane A320 je 5 slotov. Na odtokovej hrane sú 2 Fowlerove klapky – vnútorná a vonkajšia. Sloty a klapky sú poháňané hydraulikou a riadia ich dva počítače SFCC (Slot/Flap Control Computer). Tieto počítače kontrolujú ich polohu, rýchlosť a monitorujú akýkoľvek ich neriadený pohyb.



Obrázok 4 – Mechanizácia krídla Airbus A320.

Každé krídlo má 5 spojlerov. Stredné 3 (2,3 a 4) plnia funkciu brzd, teda slúžia výlučne len na zvýšenie odporu. Systém automaticky zatahne tieto brzdy v prípade vysokého uhla nábehu, v prípade plne vysunutých klapiek a ak dôjde k poruche počítača.

Lietadlo A320 používa systém fly-by-wire pre ovládanie riadiacich plôch lietadla elektricky. To ponúka nielen úsporu hmotnosti, ale aj zabraňuje prípadným manévrom, ktoré by ohrozovali bezpečnosť letu.

Čo sa týka materiálu, väčšina lietadla je vyrobená z kompozitných materiálov, prevažne z uhlíkových vlákien. Takmer všetka mechanizácia pozostáva z týchto materiálov, čo tiež významne prispieva k úspore hmotnosti. [15][16][17]

### 5.2.3. Zhrnutie

Obe spomínané lietadlá – Boeing 737-800 a Airbus A320-200, sú si na prvý pohľad z dôvodu ich obdobného dizajnu veľmi podobné. Zdieľajú rovnaký tvar nosných plôch – šípové krídlo, ktorého uhol pri oboch dosahuje približne 25°. Ich nosné plochy majú však i niekoľko odlišných vlastností.

Prvou je, že krídlo 737 disponuje o niečo väčšími rozmermi, kvôli väčšej hmotnosti lietadla. Boeing ako prvý začal používať efektívnejší typ zakončenia krídla – Blended winglet, pre zníženie odporu a úsporu paliva. Práve tento typ wingletu sa stal inšpiráciou pre Airbus, k vytvoreniu podobného konceptu, ktorý by bol obdobne efektívny. Niekoľkoročným vývojom po zavedení Blended wingletov vznikli Sharklety, navrhnuté

spoločnosťou Airbus pre model A320. Tieto typy zakončenia krídel sú si dizajnom veľmi podobné.

V oboch prípadoch plnia nosné plochy významnú úlohu i v podobe umiestnenia palivových nádrží a distribúciu paliva k motorom, ktoré majú obe lietadlá pripevnené na spodnej strane krídla.

Rozdelenie palivových nádrží sa u oboch typov mierne líši. Prvým rozdielom je, že centrálna palivová nádrž 737 nie je obmedzená len na priestor trupu, ale zasahuje i do časti krídel. Vďaka tomu disponuje oveľa väčšou kapacitou, než centrálna nádrž A320. V oblasti krídel má Boeing jednu hlavnú nádrž na každej strane. Airbus má túto nádrž ešte rozdelenú na vnútornú a vonkajšiu. Táto vnútorná a vonkajšia palivová nádrž majú spolu kapacitu 7 804 l. Je to o skoro 3000 l viac, než kapacita jednej hlavnej palivovej nádrže Boeingu 737, napriek tomu, že jeho nosné plochy disponujú väčšou plochou. Celkovú kapacitu paliva má ale väčšiu Boeing, a to vďaka práve už spomínanej rozmernej centrálnej nádrži.

Čo sa týka mechanizácie krídel, tá sa tiež úplne v týchto dvoch typov nezhoduje. Spoločnú a rozdielnu mechanizáciu znázorňuje tabuľka:

Tabuľka 2 – Porovnanie mechanizácie.

	Boeing 737-800	Airbus A320-200
Nábežná hrana	2 Kreugerove klapky + 4 sloty na každej strane	5 slotov na každej strane
Odtoková hrana	2 Fowlerove klapky na každej strane	2 Fowlerove klapky na každej strane
Celkový počet spojlerov	12	10
Celkový počet krídelok	2	2

Je teda zrejme, že mechanizácia na nábežnej hrane sa u týchto dvoch lietadiel líši. Boeing má celkovo až 6 zariadení (2 klapky + 4 sloty), Airbus má na svojej nábežnej hrane 5 zariadení na zvýšenie vztlaku. Čo sa týka mechanizácie odtokovej hrany, tam sú v oboch prípadoch využité Fowlerove klapky. Boeing má i väčší počet spojlerov, na každej strane krídla má o jeden viac, než A320. Komplexnejšia mechanizácia krídla Boeingu 737 sa dá vysvetliť jeho väčšími rozmermi a rozpätím.

S mechanizáciou má úzky súvis aj ďalší významný rozdiel týchto dvoch lietadiel – akým spôsobom sú tieto systémy ovládané. Boeing využíva konvenčné manuálne riadenie lietadla. Na druhej strane Airbus využíva elektronický systém ovládania riadiacich plôch fly-by-wire, ktorý výrazným spôsobom prispieva k úspore hmotnosti.

Hmotnosť krídel Airbus pri A320 znižuje i ďalším spôsobom – využitím prevažne kompozitných materiálov. Nosné plochy Boeingu 737-800 sú prevažne tvorené zliatinami hliníka.

## 6. Konceptie krídel budúcich období

Letecká doprava, lietadlá a ich časti prechádzajú neustálím zdokonaľovaním. Dôraz sa kladie na to, aby boli nosné plochy pevné, odolné a z ľahkého materiálu.

Najnovším prírastkom Boeingu je širokotrupé lietadlo 777-9 z radu 777X. Jeho krídla sú približne o 7 metrov dlhšie než u staršieho modelu 777-300ER. Toto viedli k sklopným koncom krídel. [18]

Spoločnosti NASA a Boeing spolupracujú na projekte s cieľom vytvoriť lietadlo, ktoré je úspornejšie a má menší vplyv na životné prostredie. Lietadlo bude mať dlhé a tenké krídla. Nachádzať sa budú na hornej časti trupu. Budú podopreté špeciálnymi nosníkmi upevnenými na spodnej časti trupu lietadla. Okrem toho tieto nosníky dokážu vytvárať i vztlak, podobne ako to bolo v prípade pôvodných dvojplôšnikov. Toto lietadlo by malo dosiahnuť zníženie spotreby paliva až o 30 %. Koncept takéhoto krídla sa označuje ako TTBW – Transonic Truss-Braced Wing.[19]

### 6.1. Konceptia Blended Wing Body

Tomuto dizajnu sa hovorí i zmiešané krídlo, pretože spolu s trupom tvoria jednu konštrukciu. Tým je vztlak vytváraný celým lietadlom. Preto sa mu hovorí i lietajúce krídlo. Namiesto konvenčnej zostavy chvosta má lietadlo niekoľko ovládacích plôch na odtokovej hrane.

Airbus uvažuje nad možnosťou zmiešaného krídla aj v rámci jeho projektu ZEROe. V rámci neho chce skonštruovať prvé komerčné lietadlo s nulovými emisiami. Ako palivo plánuje použiť skvapalnený vodík. Zmiešané krídlo by poskytovalo viac možností pre jeho uskladnenie a distribúciu vďaka jeho rozsiahlemu trupu. [20][21]

### 6.2. Lietadlo s uzavretými krídlami

Projekt Parsifal je zameraný na zníženie emisii zavedením lietadla s názvom PrandtlPlane

Dizajn tvorí jedno krídlo, ktoré sa uzatvára do seba a vytvára akýsi „box“ okolo lietadla. Z tohto dôvodu nemá konce krídel. Tým je znížený odpor a spotreba paliva. [22]

## 7. Záver

Táto práca sa venuje základným vlastnostiam nosných plôch dopravných lietadiel. V úvode sa zaoberá postupným vývojom tvarov a profilov krídel naprieč historickými obdobiami. Postupne prechádza k súčasným nosným plochám a ich vlastnostiam. Veľkú časť práce tvorí opis a vzájomné porovnanie nosných plôch komerčných dopravných lietadiel typu Boeing 737-800 a Airbus A320-200. V tejto časti sú spomenuté nielen spoločné vlastnosti krídel týchto dvoch typov lietadiel, ale pozornosť sa venuje i poukázaniu na ich rozdielne vlastnosti a ich odôvodneniu. V závere práca ponúka i pohľad na budúci vývoj krídel.

## Referencie

- [1] BUGAJ, M. 2015. AEROMECHANIKA I. Základy aerodynamiky. Bratislava: DOLIS, 2015. 208s. ISBN 978-80-970419-3-9
- [2] ANDERSON, J. 2011. WINGS: From the Wright Brothers to the Present. In: National air and space museum [online]. 2011 [cit. 2022-12-27] Dostupné na: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/wings-wright-brothers-present>
- [3] HAYWARD, J. – AHLGREN, L. 2022. The Evolution Of The Airplane. In: Simple Flying [online]. 2022 [cit. 2022-12-27] Dostupné na: <https://simpleflying.com/the-evolution-of-the-airplane/>
- [4] GARRISON, P. 2019. The Perfect Airplane Wing. In: Smithsonian Magazine [online]. 2019 [cit. 2022-12-28] Dostupné na: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/wings-wright-brothers-present>
- [5] ASHRAF, S. 2022. Types of aircraft wings. In: Aviation for Aviators [online]. 2022 [cit. 2022-12-28] Dostupné na: <https://aviationforaviators.com/2022/06/11/types-of-aircrafts-wings/>
- [6] HLAVÁČEK, P. 2016. Konstrukční řešení letadel díl 3. In: Czech Airlines [online]. 2016 [cit. 2022-12-29] Dostupné na: <https://www.czechairliners.net/index.php/archiv-clanku-1/1116-konstrukcni-reseni-letadel-dill-3.html>
- [7] The evolution of the aircraft wing. In: The Engineer [online]. 2017 [cit. 2022-12-30] Dostupné na: <https://www.theengineer.co.uk/content/in-depth/the-evolution-of-the-aircraft-wing/>
- [8] HENDRY, J. 2022. Why Do Aircraft Store Fuel In The Wings?. In: Simple Flying [online]. 2022 [cit. 2023-01-08] Dostupné na: <https://simpleflying.com/why-do-aircraft-store-fuel-in-the-wings/>
- [9] FREITAG, W – SCHULZE, E. 2009. Blended Winglets Improve Performance. In: Boeing Commercial Aeromagazine [online]. 2009 [cit. 2023-01-08] Dostupné na: [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_03\\_09/article\\_03\\_1.html](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_03_09/article_03_1.html)
- [10] Winglets and Sharklets. In: The Flying Engineer [online]. [cit. 2023-01-08] Dostupné na: <https://theflyingengineer.com/flightdeck/winglets-and-sharklets/>
- [11] BRADY, C. 2021. Boeing 737 Fuel. In: The Boeing 737 Technical Site [online]. 2021 [cit. 2023-03-16] Dostupné na: <http://www.b737.org.uk/fuel.htm#Pumps>
- [12] A320 Fuel. In: A 320 Simulator Flight Crew Operating Manual [online]. [cit. 2023-03-16] Dostupné na: <https://www.smartcockpit.com/docs/A320-Fuel.pdf>
- [13] BRADY, C. 2021. Flight Controls. In: The Boeing 737 Technical Site [online]. 2021 [cit. 2023-03-09] Dostupné na: <http://www.b737.org.uk/flightcontrols.htm>

- [14] BRADY, C. Production. In: The Boeing 737 Technical Site [online]. [cit. 2023-03-09] Dostupné na: <http://www.b737.org.uk/production.htm>
- [15] The Airbus A320's Slat and Flap System: Part 1-Technical Background. In: The A320 Insider [online]. 2022 [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://blog.thea320insider.com/2022/01/30/ready-to-finally-understand-the-airbus-a320s-flap-and-slat-system/>
- [16] Airbus A320 Specs – What is behind one of the most popular short-haul airliners? In: Modern Airlines [online]. [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://modernairliners.com/airbus-a320-introduction/airbus-a320-specs/>
- [17] Airbus A320: narrow-body passenger aircraft. "Airbus A320": description, interior layout, best seats, photo Airbus A320 dimensions [online]. [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://rozavetrovsibir.ru/en/passport/airbus-a320-uzkofyuzelyazhnyi-passazhirkii-samol-t-aerobus-a320-opisanie-shema/>
- [18] KINGSLEY-JONES, M. 2020. Key changes introduced on new wing for 777X. In: FlightGlobal [online]. 2020 [cit. 2023-02-22] Dostupné na: <https://www.flightglobal.com/airframers/key-changes-introduced-on-new-wing-for-777x/136461.article>
- [19] VERGER, R. 2023. This 'airliner of the future' has a radical new wing design. In: Popular Science [online]. 2023 [cit. 2023-02-22] Dostupné na: <https://www.popsci.com/technology/nasa-boeing-announce-sustainable-flight-demonstrator/>
- [20] HAYWARD, J. – AHLGREN, L. 2022. Blended Wing Design: The Plane Type Of The Future? In: Simple Flying [online]. 2022 [cit. 2023-02-22] Dostupné na: <https://simpleflying.com/blended-wing-design/>
- [21] ZEROe Towards the world's first zero-emission commercial aircraft In: Airbus [online]. [cit. 2023-02-22] Dostupné na: <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>
- [22] COLLINS, C. 2018. Radical closed-wing aircraft design could see greener skies take flight. In: Horizon, The EU Research and Innovation Magazine [online]. 2018 [cit. 2023-02-22] Dostupné na: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/radical-closed-wing-aircraft-design-could-see-greener-skies-take-flight>



## MODIFICATION OF THE OF THE VIPER SD-4 BRAKING SYSTEM

**Kateryna Antoniuk**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Filip Škultéty**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*The Viper SD-4 is an excellent example of a Light Sport Aircraft (LSA) category of training aeroplanes. It is produced in Slovakia and used in several European countries and also in the United States of America. It is a very high-quality made aircraft, but some of the pilots say that it has one not very convenient component, which is the operation of the brake system. In this article researched how the brake system can be modified based on data from other brake systems used for the LSA category. The result of this research is the possible variants of the anticipated modifications and the analysis of the relevance of such changes.*

### Keywords

*braking system, brakes, Viper SD-4, LSA, aircraft, modification, master cylinder*

### 1. Úvod

Viper SD-4 je nádherné lietadlo a vynikajúci príklad letúna v kategórii LSA. Je vyrábané na Slovensku spoločnosťou Tomark ale obľúbené pilotmi po celom svete. Používajú ho na rôzne vyhlídkové lety ale aj na výcvik pilotov (obyčajných aj vojenských). Výcvikové centrum pri Katedre leteckej dopravy v Žilinskej univerzite v Žiline má vo svoje flotile Viper SD-4. Je to jeden z dôvodov zvolenia tejto témy. V tomto článku je spravený výskum o brzdových systémoch lietadiel kategórie LSA a navrhnutá najvhodnejšia modifikácia na osnove porovnávania a analýzy existujúcich variantov brzdových systémov.

### 2. VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA

#### 2.1. Kategória CS-LSA

Light Sport Aircraft (LSA) alebo Ľahké Športové Lietadlo je definované ako lietadlo, ktoré spĺňa nasledovné požiadavky:

- Nepretlakovaná kabína;
- Maximálny počet miest vrátane s pilotom dva;
- Maximálna vzletová hmotnosť 600 kg pre obyčajne letúne a 650 kg pre lietadla určené na prevádzku vo vode;
- Maximálna pádová rýchlosť nie vyššia ako 83 km/h (45 uzlov);
- Maximálna vzdušná rýchlosť nie väčšia ako 120 uzlov;
- Pevná alebo na zemi nastaviteľná vrtuľa;
- Pevný podvozok;
- Samostatný piestový motor alebo elektrická pohonná jednotka vybavená vrtulou[1].

Pod kategóriu CS-LSA sú zoradené: lietadla, klzáky, motorové padáky, lietadla s riadením hmotnosti a lietadla ľahšie ako vzduch (balóny a vzducholode)[2].

Okrem toho každé lietadlo musí prejsť certifikáciou a na to musí byť zaregistrované na Dopravnom úrade, správne označene, prejsť kontrolou, letová príručka a všetky ostatné súvisle dokumenty musia byť aktualizované a pri potrebe môže byť podrobené letovej skúške.

#### 2.2. Výrobca

Ako už bolo povedané v úvode lietadlo Viper SD-4 je vyrábané spoločnosťou Tomark. Vznikla v roku 1995 v Prešove kde doteraz má sídlisko. Pôvodne spoločnosť sa zaoberala výrobou súčiastok pre strojárstvo primárne v odvetí automobilovej výroby a potom neskôr vznikla divízia TomarkAero, ktorá má na starosti už nie auta ale lietadla[3].

V roku 2006 vzlietol prvý Viper SD-4, ktorý bol zároveň aj prvým návrhom spoločnosti. Od roku 2010 lietadlo bolo schválené americkou Federálnou Leteckou Správou (Federal Aviation Regulations) ako také, čo spĺňa požiadavky na kategóriu LSA.

Postupne spoločnosť sa rozvíja a v tomto momente je držiteľom až 67 technických listov a certifikátov[4].

### 3. VIPER SD-4

Je to dvojmiestne, dolnoplošnikové lietadlo určené na športové, rekreačné, výcvikové lety a napríklad občas je používané aj na vlákание vetroňov.

#### 3.1. Existuje niekoľko variant Vipa:

1. RTC – verzia certifikovaná agentúrou EASA. Bolo jedno z prvých v Európe, ktoré splnilo požiadavky predpisu CS-LSA AMDT.1. Dostalo certifikát, kvôli tomu že splna podmienku schopnosti dostať sa z vývrtky do 3 sekúnd. Certifikát oprávňuje vlastníkov RTC verzie využívať letún na výcvik pilotov[5].
2. AFT (Air Force Trainer) – verzia určená na výcvik vojenských pilotov. Má dobré letové vlastnosti, nízke prevádzkové náklady a moderné avionické vybavenie. Toto lietadlo je

dobré na nácvik letov podľa prístrojov, autopilota, núdzové postupy a presné priblíženie a pristátie podľa ILS a VOR[6].

3. NIGHT VFR – už z názvu je jasné že tato verzia existuje hlavne na nočné lety, podobné ako verzia RTC je držiteľom certifikátu SC-OLSA-div-01 od EASA , ktorý oprávňuje vykonávať lety VFR NOC [7].
4. Attack – tato verzia je špeciálna svojou zvýšenou bezpečnosťou a je používaná hlavne na rekreačné lety[8].

### 3.2. Konštrukcia

Ako skoro každé lietadlo aj Viper sa skladá zo základných častí ako trup, nosné plochy, chvostové plochy (zvislé a vodorovné), kabínu a podvozok .

Trup je tvorený škrupinovou konštrukciou a oceľovou protipožiarnou stenou, ktorá oddeľuje motorový priestor od priestoru pre posádku[9].

Krídlo má obdĺžnikový tvar, tvorené hlavným a pomocným nosníkom. Vybavené palivovou nádržou, krídelkami, výklopnými vztlakovými klapkami. Na koncoch krídiel sú kompozitové tvarové ukončenia určené na ochranu[9].

Vodorovná chvostová plocha tvorená výškovým kormidlom a zvislá vodorovná plocha je tvorená smerovým kormidlom a kýlovou plochou. Ovládané sú elektrický[9].

V kabíne sú dva sedadla vedľa seba. Kryt sa odklápa smerom hore a dozadu a má dvojbodové ovládanie uzatvárania prostredníctvom dvoch kľúčoch na vnútornej strane umiestnenej oproti seba. V kabíne sú dva vetracie okienka a dva vetracie otvory, prietok pudiaceho vzduchu sa nedá regulovať[9].

Najdôležitejšia časť pre zvolenú tému je podvozok. Je trojkolesový: jedno predné koleso a dva hlavné. Hlavný podvozok je tvorený kompozitovými pružinami, kolesa sú brzdené hydraulickými kotúčovými brzdami, ktorí sú ovládané pákou, ktorá je umiestnená na stredovom paneli medzi pilotnými sedadlami. Predný podvozok je odpružený gumovým povrazcom, koleso je s možnosťou riadenia. Na všetkých kolesách sú aerodynamické kryty. Brzdené sú kolesa hlavného podvozku súčasne bez možnosti samostatného brzdenia každého kolesa. Páka ovládania hydraulických brzd je umiestnená na stredovom ovládacom paneli medzi pilotnými sedadlami pod pákou príjmu motora. Ak potlačíme na páku smerom dole vyvoláme samostatné brzdenie. Existuje možnosť zaistenia v zabrzdenej polohe tlačidlom na ľavej strane konzoly brzdového valca[9].

### 3.3. Charakteristika podvozkú podľa technických údajov

Odpruženie hlavného podvozku uskutočňuje sa prostredníctvom pneumatického systému a pomocou pružnosti nôh podvozku. Predné koleso je odpružené pomocou gumového lana[9].

Predné koleso nie je brzdené ale kolesa hlavného podvozku sú brzdené hydraulickými kotúčovými brzdami .

Čo sa týka rozmerov[9]:

- Rozchod podvozku– 2190 mm;

- Rázvor podvozku– 1270 mm;
- Rozmer kolesa predného podvozku– 5.00-5;
- Rozmer kolies hlavného podvozku– 4.00-6;

### 3.4. Brzdová sústava Viper SD-4

Viper SD4 má hydraulický brzdový systém, ktorý pozostáva z dvoch nezávislých okruhov. Každý okruh obsahuje brzdový valec, hadicu, kotúč a strmene[9].

Ako už bolo povedané, brzdy sú ovládané pákou. Keď potlačíme na páku vyvoláme hydraulický tlak, ktorý z brzdového valca prenáša sa do kotúča cez brzdovú hadicu a následne brzdové strmenia sa uzatvárajú a brzdia kotúč[9].

Okrem toho brzdový systém Viper SD4 je vybavený antiblokovacím systémom (ABS), ktorý by mal zabráňovať uzamknutie kolies počas brzdenia na kĺzavej ploche. Pracuje na princípe snímania a monitorovania rýchlosti kolies pomocou snímačov a reguluje hydraulický tlak tak aby nedošlo k uzamknutiu[9].

Ďalšou výbavou brzdového systému je parkovacia brzda, ktorá sa ovláda tlačidlom. Je mechanická, umiestnená na kolesách. Zabráňuje pohybu lietadla, keď je na zemi a hlavný brzdový systém sa nevyužíva[9].

Diely pre brzdový systém sú vyrábané českou spoločnosťou Kašpar s.r.o.

Systém riadenia brzd je spravený takým spôsobom že obidva piloti môžu kontrolovať proces brzdenia. Každý z pilotov má dva pedáli, ktorými je schopný riadiť pohyb lietadla na zemi a tak isto aj silu brzdenia. Špeciálnym vedením ľavé pedále (tak isto aj pravé) sú mechanicky spojené medzi sebou a vedú k parkovacej brzde kde sa spájajú. A následne z nej ide ďalšia vetva a ta je priamo spojená s kolesami a príslušnou časťou kotúča.

Hlavný valec, používaný pre Viper SD-4, je K-226A-000L-47 vyrobený spoločnosťou Kašpar s.r.o. Disk s brzdou, duša a pneumatika hlavného podvozku je od toho istého výrobcu.

## 4. BRZDOVÉ SYSTÉMY PRE KATEGÓRIU LSA

Brzdový systém slúži na to aby spomalil alebo zastavil lietadlo. V klasickom brzdovom systéme ovládanie brzd sa uskutočňuje pomocou mechanického a/alebo hydraulického spojenia s pedálmi kormidla. Základná činnosť brzd spočíva v premene kinetickej energie pohybu na tepelnú energiu vytváraním trenia. Vytvorí sa veľké množstvo tepla a sily pôsobiace na komponenty brzdového systému sú náročné. Správne nastavenie, kontrola a údržba brzd je nevyhnutná pre efektívnu prevádzku.

Najpoužívanejšie typy brzd:

- Rôzne varianty kotúčových brzd;
- Viakotúčové brzdy;
- Segmentové rotorové brzdy (pre veľké lietadla);
- Bubnové brzdy s (staršie veľké lietadla);
- Karbónové brzdy (ešte v štádiu rozvoja);

#### 4.1. Kotúčové brzdy

Kotúčové brzdy sú najpoužívanejší typ brzd v súčasnom letectve. Skladajú sa z kotúča, ktorý sa otáča s kolesom, a zo stacionárneho strmenia, ktoré pôsobí priamo na kotúč a vytvára brzdnu silu.

Strmeň sa skladá z brzdovej doštičky a piestikov. Tieto dve časti sústavy sú spojené medzi sebou a piestik je ovládaný pomocou hydraulického tlaku, privádzaného buď prostredníctvom nožnej brzdy alebo brzdovej páky v kabíne[10],[11].

##### 4.1.1. Jednoduché kotúčové brzdy:

Najčastejšie sa používajú pre mále ľahké lietadla. Umožňujú dosiahnuť vysokoúčinné brzdenie najjednoduchším spôsobom. Jeden kotúč je buď pripevnený alebo priskrutkovaný ku každému kolesu. Disk sa otáča spolu s kolesom. Pri stlačení pedálu hlavný valec pripojený priamo k pedálu tlačí hydraulickú kvapalinu hadicami a pevnými vedeniami do krytu brzdovej jednotky pripevnenej k vzperu podvozku. Piest v puzdre reaguje na tlak zatlačením na obloženie, ktoré potom tlačí na brzdový kotúč, ktorý zase tlačí na nehybné obloženie[10],[12].

##### 4.1.2. Plávajúce kotúčové brzdy

Strmeň je obkročný na kotúči. Má tri valce vyvrátené cez kryt, počet valcov môže sa líšiť pre rôzne lietadla. Každý valec prijíma zostavu ovládacieho piestu. Takáto zostava sa skladá z piestu, vratnej pružiny a automatického nastavovacieho čapu. Každá brzdová zostava má šesť brzdových obložení. Tri sú umiestnené na koncoch piestov na vonkajšej strane strmeňa. Sú navrhnuté tak, aby sa pohybovali dovnútra a von pomocou piestov a vyvíjali tlak na vonkajšiu stranu disku. Oproti týmto pukom na vnútornej strane strmeňa sú umiestnené ďalšie tri obloženia. Tieto obklady sú stacionárne[10].

Brzdový kotúč je prichytený ku kolesu. V štrbinách pre kľúče sa dá voľne pohybovať do strán. Toto je známe ako plávajúci disk. Pri použití brzd sa piesty vysunú z vonkajších valcov a ich puky sa dotknú kotúča. Disk sa mierne posúva v štrbinách pre kľúče, až kým sa s diskom nedotknú aj vnútorné nepohyblivé obloženia. Výsledkom je pomerne rovnomerné trenie aplikované na každú stranu kotúča, čím sa spomalí rotačný pohyb[11].

Samonastavovacia funkcia brzdy udržuje rovnakú vôľu bez ohľadu na mieru opotrebovania brzdových obložení. Nastavovací kolík na zadnej strane každého piestu sa pohybuje spolu s piestom prostredníctvom trecieho čapu.

##### 4.1.3. Pevné kotúčové brzdy

Tento typ bežne sa používa pre ľahké lietadla.

Na obe strany brzdového kotúča sa musí vyvinúť rovnomerný tlak, aby sa vytvorilo požadované trenie a aby sa dosiahli konzistentné vlastnosti opotrebovania brzdových obložení. Konštrukcia s pevným kotúčom a plávajúcim strmeňom umožňuje nastavenie polohy brzdového strmeňa a obloženia vzhľadom na kotúč. Výstelky sú prinitované k prítlačnej doske a zadnej doske. Dve kotviace skrutky, ktoré prechádzajú cez prítlačnú dosku, sú pripevnené k zostave valca. Zostava valca je priskrutkovaná k zadnej doske na upevnenie zostavy okolo disku. Pri pôsobení tlaku sa strmeň a obloženia vycentrujú na

kotúč prostredníctvom kĺzavého pôsobenia kotevných skrutiek v puzdrách dosky. To vyvolá rovnaký tlak na obe strany disku, a následne rotácia disku sa začne spomaľovať[10],[11].

#### 4.2. Iné typy brzd

Jednoduché kotúčové brzdy sú veľmi dobré vymyslené ale s väčšími rozmermi lietadiel začínajú strácať svoju účinnosť. Kvôli tomu vymysleli ďalšie typy brzd [10]:

- dvojkotúčové– používajú sa vo väčších lietadlách, kde jeden kotúč na každom kolese neposkytuje dostatočné brzdne trenie. Fungujú na podobnom princípe ako jednoduché brzdy ale skladajú sa z viacerých častí;
- viackotúčové– používajú sa pre veľké ťažké lietadla;
- segmentové kotúčové brzdy– typ navrhnutý pre veľké lietadla u ktorých proces brzdenia vyvoláva veľké množstvo tepla s ktorým vyššie opísané typy brzd nevedeli by správne a hlavne užitočne fungovať;
- karbónové brzdy– jeden z najnovších typov, dostal svoj názov kvôli materiálu z ktorého je vyrábaný. Fungujú na veľmi podobnom princípe ako predchádzajúce ale hlavnou ich výhodou je váha, sú o 40% ľahšie ako bežné brzdy a zároveň sú schopné odolávať teploty o 50% vyššie ako obyčajne oceľové brzdy. Okrem toho výhodou je aj dvakrát dlhšia životnosť ale na druhej strane sú vysoké výrobné náklady;
- bubnové brzdy– v súčasnosti sa nepoužíva kvôli viacerým nevýhodám ako napríklad ustúpenie pri prechladnutí a vťahnutie sa do bubna pri zahrievaní. Navrhnuté ako nízkotlakové ľahké brzdy používané pre rôzne typy lietadiel.

#### 4.3. Systémy aktivácie brzd

Rôzne brzdové zostavy využívajú na prevádzku hydraulickú silu. V tejto časti sú popísané rôzne spôsoby dodávania požadovaného tlaku hydraulickej kvapaliny do brzdových zostáv.

Existujú tri základné ovládacie systémy: nezávislý, pomocný a silový brzdový systém.

1. Nezávislé hlavné valce– najčastejšie dá sa nájsť tento typ ovládania brzd v ľahkých lietadlách alebo v takých, ktoré nemajú hydraulický systém. Nezávislý brzdový systém nemá nič spoločné s hydraulickým systémom lietadla. Viac sa podobá brzdovému systému automobilu a funguje na princípe vytvorenia hydraulického tlaku prostredníctvom hlavných valcov. Hlavný valec pre každú brzdu je mechanicky spojený s príslušným pedálom kormidla. Keď je pedál stlačený, piest v utesnenej komore naplnenej kvapalinou v hlavnom valci tlačí hydraulickú kvapalinu cez vedenie k piestom v zostave brzdy. Brzdový piest tlačí brzdové obloženia proti brzdovému rotoru, aby sa vytvorilo trenie, ktoré spomaľuje rotáciu kolesa. Valec je vždy naplnený hydraulickou kvapalinou bez obsahu vzduchu a nečistôt, rovnako ako nádrž a vedenie, ktoré ich spája. Hydraulická kvapalina môže sa expandovať s rastúcou teplotou. Zohriata kvapalina môže spôsobiť ťah brzdy proti rotoru a tiež môžu vzniknúť netesnosti. Keď brzdy nie sú používané, kvapalina musí mať možnosť

bezpečne expandovať bez spôsobenia hocijakých problémov. Na uľahčenie eliminácie problémov spôsobených expandovaním kvapaliny vo väčšine hlavných valcov sú kompenzačné otvory[10],[13],[14].

2. Posilnené brzdy- zvyšujú silu vyvinutú pilotom o tlak v hydraulickom systéme. Zosilnenie je len pri prudkom brzdení. Posilnené brzdy sa používajú na stredných a väčších lietadlách, ktoré nevyžadujú systém ovládania brzd s plným výkonom[10].
3. Silové brzdy- používajú sa vo veľkých výkonných lietadlách. Systémy pohonu brzd využívajú hydraulický systém lietadla ako zdroj energie na aktiváciu brzd[10].

Systémy v rôznych lietadlách sa líšia, ale všeobecná prevádzka je podobná.

## 5. VARIANTY BRZDOVÝCH SYSTÉMOV LSA

V tretej časti svojej bakalárskej práce chcela by som povedať o niektorých výrobcov súčiastok pre brzdové systémy LSA a popísať detailnejšie systémy ktoré sú používané v iných lietadlách, ako Viper SD-4.

Pri hľadaní výrobcov dielov pre brzdové systémy objavila sa taká zaujímavosť že veľká časť z nich sídli v Spojených Štátoch Amerických. Napríklad americké výrobcovia sú: Beringer Aero, Cleveland, McCauley, GOLDfren, Bendix, RAPCO, McFarane, Grove, Parker Aerospace a MATCO. Okrem amerických spoločností bola aj jedna Španielska- Cojai a už vyššie spomenutý český Kašpar.

### 5.1. Riešenie pre STOL CH od Zenith

V danom prípade ľavé padali sú spojené s brzdovými valcami (brake actuators), od ktorých vedenia idú k hlavným valcom pod pravými pádlami. Pedále sú paralelné spojene takým spôsobom že pri stlačení hocijakého z dvoch pedálov spojených jedným hlavným valcom brzda bude aktivovaná a odpovedajúci kotúč začne brzdiaci proces kolesa s ktorým je spojený[15].

Vedenia od hlavných valcov prechádzajú parkovacou brzdou a od nej idú priamo ku kolesám a časti brzdového systému spojenému s nimi[15].

V tomto riešení model hlavného valca je MATCO MCMC-4.

### 5.2. Riešenie pre PS-28 Sportcruiser

Ešte jeden podobný príklad riešenia brzd ako v predchádzajúcom lietadle: brzdové valce sú na ľavých pedáloch a hlavné valce sú pod pravými, ktoré sú spojene vedeniami a od hlavných valcov vedú vedenia k parkovacej brzde. Okrem toho od každého valca zvlášť ide ešte jedno vedenie a to spája valce zodpovedajúce pedálom pilota s jednou pákou určenou na parkovanie a tak isto hlavé valce spája s pákou druhého pilota[16].

Hlavné valce pre brzdové systémy podobného typu často používajú od výrobcu MATCO a sú dvoch typov: MC-4 a MC-5. Častejšie sú používané valce MC-4. Aj keď majú viacej časti ako MC-5 a sú zložitejšie ale zároveň aj lepšie plnia svoju funkciu[16].

### 5.3. Riešenie pre WT9 Dynamic

V prípade s letúnom WT9 Dynamic môžeme vidieť variantu ručného brzdového systému.

Obe kolesá na hlavnom podvozku sú vybavené hydraulickými kotúčovými brzdami. Hydraulické brzdové valce sú ovládané tlakom hydraulickej kvapaliny. Zdrojom tlaku je hlavný brzdový hydraulický čelný piest, ktorý je umiestnený pod sedadlom pilota- štandardné alebo v stredovom tuneli (brzdy Beringer). Hlavný hydraulický valec brzdy je ovládaný pomocou rukoväte sedadiel pilota. Pohyb páky sa prenáša na hlavný brzdový valec. Tlaková kvapalina je distribuovaná cez hadice. Táto rukoväť aktivuje aj parkovaciu brzdu[17].

### 5.4. SHARK UL

Je použitý štandardný brzdový systém BERINGER, ktorý pozostáva z dvoch hlavných brzdových valcov, namontovaných na predných vodiacich pedáloch, spojených nerezovými opletenými hadicami s brzdovými valcami strmeňa ľavého a pravého kolesa[18].

Brzdový systém pozostáva z nádržky brzdovej kvapaliny, hlavného valca a dvoch zostáv kotúčových brzd. Záchytný ventil aktivuje parkovaciu brzdu. Brzdenie sa vykonáva pomocou páky umiestnenej na tuneli kabíny medzi sedadlami. Záchytný ventil hydraulického okruhu je tiež umiestnený medzi sedadlami a po zatvorení zatiahnutou pákou udržuje okruh pod tlakom a ručnú brzdu lietadla zatiahnutú [18].

## 6. ZÁVER

Po analyzovaní všetkých popísaných informácií o rôznych riešeniach brzdovej sústavy dá sa povedať že častejšie sa používa riešenie v ktorom pod pedálmi pilota sú rozmiestnené hlavné valce, a k nim sú paralelné pripojené brzdové valce pod pedálmi druhého pilota. Také riešenie by bolo vhodné použiť ako modifikáciu brzdového systému Viper SD-4. Okrem toho dobré riešenie ma lietadlo SHARK s klasickými brzdami od Beringeru, hlavné čo sa týka riešenia parkovacej brzdy. V tom prípade vedenie od tlačidla parkovacej brzdy by viedlo rovno k brzde ktorá by bola spojená s hlavnými valcami, tlačidlo by bolo umiestnené tak isto ako pred tým. To je dobré z pohľadu pilotov, ktoré boli zvyknuté na také riešenie parkovania a nedošlo by k problému pri pristáť kvôli zmene jeho polohy. Najväčšia zmena by prebiehala s valcami a spojením pedálov medzi sebou.

### PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 024ŽU-4/2023** s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu *Letecká doprava*".

### Referencie

- [1] EASA, Nov 2018, Easy Access Rules for Light Sport Aeroplanes (CS-LSA)(Amendment1).
- [2] FAA Aircraft Certification. (n.d.). Light Sport Category Aircraft Airworthiness Certification. Cit. 24 Januar 2023 z <http://www.faa-aircraft-certification.com/light-sport-category-aircraft-airworthiness-certification.html>

- [3] Tomark Aero. (n.d.). About Us. Cit. [23 Januar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/about-us/>
- [4] Tomark Aero. (n.d.). Certificates. Cit. [23 Januar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/certificates/>
- [5] [Tomark Aero. (n.d.). Viper SD4 RTC. Cit. [1 Februar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/viper-sd4-rtc-en/>
- [6] Tomark Aero. (n.d.). Viper SD4 AFT. Cit. [1 Februar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/viper-sd4-aft-en/>
- [7] Tomark Aero. (n.d.). Viper SD4 Night VFR. Cit. [1 Februar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/viper-sd4-night-vfr-en/>
- [8] Tomark Aero. (n.d.). Viper SD4 Attack. Cit. [1 Februar 2023] z <https://www.tomarkaero.com/en/viper-sd4-attack-en/>
- [9] Letová príručka lietadla, č.j. 8485/224/2008 [30. Jún 2008] [http://www.airportlucenec.sk/dokumenty/studijum/viper\\_prirucka.pdf](http://www.airportlucenec.sk/dokumenty/studijum/viper_prirucka.pdf)
- [10] Aircraft Systems Tech. (n.d.). Aircraft Brakes. Cit.[ 5 Februar 2023] z [https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes\\_9081.html](https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html)
- [11] AeroToolbox, Andrew Wood, [17 Maj 2020], Aircraft Braking Systems <https://aerotoolbox.com/brake-system/>
- [12] Aircraft Systems Tech. (n.d.). Aircraft Brakes. Cit. [14 Marec 2023] z [https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes\\_9081.html](https://www.aircraftsystemstech.com/p/aircraft-brakes_9081.html)
- [13] MechTech. (2014, October 3). Master Cylinder, Cit. [14 Marec 2023] <http://4mechtech.blogspot.com/2014/10/master-cylinder.html>
- [14] Experimental Aircraft Association (EAA). (n.d.). Your Brake Installation, Cit. Marec 2023 z <https://www.eaa.org/eaaircraft-building/builderresources/while-youre-building/building-articles/landing-gear-wheels-and-brakes/your-brake-installation>
- [15] Andersen, [Video], YouTube, MAJESTO TEACHING, [18 August 2021], BRAKE MASTER CYLINDER - TYPES - SINGLE CIRCUIT MASTER CYLINDER | WORKING AND APPLICATION OF CYLINDER <https://www.youtube.com/watch?v=Fo2H69jEN5M>
- [16] Cruiser Aviation. (n.d.). PS-28 Cruiser Maintenance Manual.,No. AP332,[13 April 2018] <https://cruiseraviation.ro/assets/docs/PS-28%20Cruiser%20MAINTENANCE%20MANUAL.pdf>
- [17] Dynamic, č. AS-AMM-01-000, [22.5.2017], AIRCRAFT MAINTENANCE MANUAL [https://www.aerospool.sk/downloads/RTC/AS-AMM-01-000\\_I1\\_R6\\_20210428.pdf](https://www.aerospool.sk/downloads/RTC/AS-AMM-01-000_I1_R6_20210428.pdf)
- [18] SharkAero, (n.d.), SHARK UL AIRCRAFT MAINTENANCE MANUAL





## WING PLATFORMS OF SUPERSONIC AIRCRAFT

**Richard Tabernaus**

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

**Martin Bugaj**

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

**Michal Hrúz**

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

### Abstract

Goal of the paper is to describe various wing designs used in supersonic aircraft and their impact on lift, drag and stability with emphasis on high speed civil transport. Paper describes transonic and supersonic region, where formation of shockwaves is prevalent, and air behaves differently from subsonic region. The paper then describes different wing configurations and planforms affect the formation of lift and drag with emphasis on straight wing, swept wing and delta wing planforms. It also provides insight into the history and the present research of supersonic flight with emphasis on civil transport.

### Keywords

supersonic flight, wing planforms, shockwaves, aerodynamics, comparison

### 1. Úvod

S vývinom leteckých motorov sa možnosti dosahovania vyšších rýchlostí stále zväčšovali. V roku 1941 sa ale objavil kritický problém pri prechode okolozvukovou oblasťou, keď americký pilot Ralph Virden so svojim stíhacím letúnom P-38 Lightning zahynul pri strmhlavom lete, ktorý nebol schopný zrovnať. Letún sa z dôvodu nadzvukového obtekania krídla stal neovládateľný a neovládateľné lietadlo následne narazilo do obytného domu. Nasledujúce roky viedli k rozsiahlym výskumom v oblasti okolozvukovej a nadzvukovej aerodynamiky kde ako vrchol pre nadzvukovú civilnú dopravu možme považovať britsko-francúzsky Concorde. Nadzvukové lietadlo musí mať nielen dostatočne veľký výkon aby prekonalo okolozvukovú oblasť a odpor s ňou spojený, ale aj dostatočne rafinovaný tvar a profil krídla pre ustálený nadzvukový let. Tento článok sa zaoberá možnosťami využitia rôznych tvarov krídla a vlastnosťami krídel nadzvukových letúnov.

### 2. HISTÓRIA

Prvé lietadlo ktoré prelomilo zvukovú bariéru bolo americké experimentálne Bell X-1 s pilotom Charlesom Yeagerom. Odtedy výskum nadzvukových lietadiel napredoval veľmi rýchlo, až napokon vyvrcholil do slávneho Aérospatiale – BAC Concorde a Tupoleva Tu-144. Tieto lietadlá boli síce technologicky veľmi vyspelé, ale súhra zlých udalostí ako problém so sonickými treskami, vysoké prevádzkové náklady a nehody Air France 4590 ich prinútila odísť zo služby. [1]

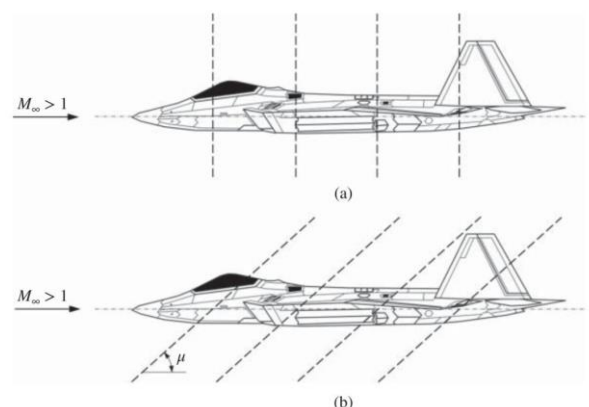
V súčasnosti sa na trhu pomaly objavujú nové koncepty nadzvukových lietadiel a riešení problémov ich predchodcov. Projekt X-59 QueSST sa zameriava na zníženie hlučnosti sonických treskov o takmer polovicu, pričom prvý let je plánovaný na rok 2023. V prípade nadzvukového bussinse jetu je vyvíjaný Spike S-512 firmou Spike Aerospace. A miesto nástupcu Concorde si nárokuje Boom Technology Overture ktorý si už objednalo niekoľko spoločností. Hlavnými prekážkami pre tieto letúne budú hlavne ich spotreba a legislatíva zakazujúca prelomenie zvukovej bariéry nad obývanými

oblasťami. Ak bude tento zákaz vplyvom úspešného ukončenia projektu X-59 upravený a dopyt po takýchto lietadlách dostatočne vysoký, je možné že začne nová éra pre leteckú dopravu. [2] [3] [4].

### 3. POŽIADAVKY NA TVAR NADZVUKOVÉHO KRÍDLA

#### 3.1. Nadzvukové pravidlo plôch

Podobne ako pri okolozvukovej oblasti, aj v nadzvukovej oblasti platí Whitcombovo pravidlo plôch pre redukciju vlnového odporu. Narozdiel od okolozvukovej oblasti, kde sa sledovala jemnosť priebehu krivky prierezových plôch kolmých na pozdĺžnu os lietadla sa sleduje jemnosť krivky prierezových plôch kolmých na os, ktorá prechádza rázovou vlnou machového kužela letúna. Práve z tohto dôvodu je teda predmetné umiestňovať nosné plochy viac dozadu, ako to býva pri podzvukových lietadiel. [5]

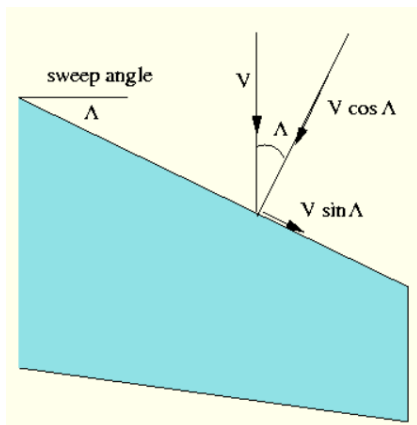


Obrázok 1 – Nadzvukové pravidlo plôch [5].

### 3.2. Šípovitost' krídla

Azda najdôležitejšou vlastnosťou krídla, okrem tvaru krídla je práve šípovitost'. Šípovitost' krídla je uhol medzi priečnou osou lietadla a osou prechádzajúcou bodmi, ktoré sa nachádzajú v 25% tetivy profilu. Šípovitost' krídla pomáha lietadlu aj pri prechode okolozvukovou oblasťou a zabezpečuje nižší odpor pri lete v nadzvukovom prostredí. [6]

Hlavným dôsledkom zväčšenia uhlu šípu je rozloženie vektora nabiehajúceho prúdu vzduchu na tangenciálnu zložku, ktorej vektor je v smere nábežnej hrany krídla a normálovú zložku, ktorá je kolmá na tangenciálnu. Vznik vztlaku a práve aj rázovej vlny závisia práve na normálovej zložke rýchlosti. Táto rýchlosť bude vždy menšia ako rýchlosť nabiehajúceho prúdu vzduchu, z čoho je možné usúdiť, že so zvyšovaním uhlu šípu sa bude Machovo kritické číslo zvyšovať. [6]

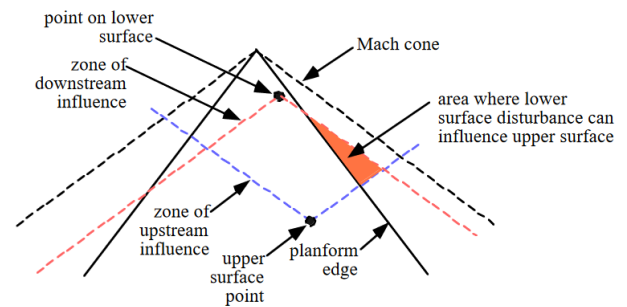


Obrázok 2 – Rozloženie vektora rýchlosti pri kladnom uhle šípu [7]

Normálová zložka rýchlosti sa dá vypočítať ako rýchlosť nabiehajúceho prúdu vzduchu  $V$  vynásobená kosínusom uhla  $\Delta$ , kde uhol  $\Delta$  označuje uhol šípu daného krídla. Tangenciálna zložka sa vypočíta zas ako rýchlosť nabiehajúceho prúdu vzduchu  $V$  vynásobená sínusom uhla  $\Delta$ . [6]

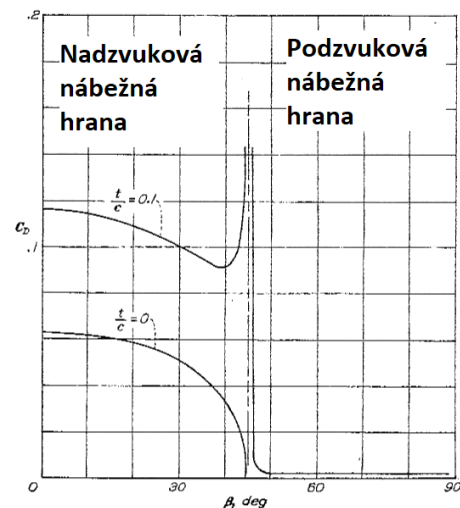
Ďalšou výhodou je zníženie vlnového odporu letúna. Vlnový odpor závisí od pomeru hrúbky profilu k tetive profilu. Nakoľko normálová zložka prúdu má dlhšiu vzdialenosť medzi nábežnou a odtokovou hranou, krídlo bude mať dlhšiu efektívnu tetivu a koeficient odporu bude omnoho nižší, ako pri priamom krídle. [8] [9]

Šípovitost' krídla je veľmi dôležitá vlastnosť krídla nielen pri okolozvukovom režíme ale aj pri nadzvukovom lete. Pre zníženie odporu sa snažíme krídlo umiestniť do machového kužeľa lietadla a do jeho vlastného machového kužeľa. Ak sa krídlo nachádza vo vnútri vlastného machového kužeľa, hovoríme, že má podzvukovú nábežnú hranu. Celková rýchlosť obtekajúca krídlo je vyššia ako rýchlosť zvuku, ale charakter obtekania a prenosu informácií tlakovými impulzami v smere obtekania podzvukový, lebo normálová zložka rýchlosti kolmá na nábežnú hranu je podzvuková. V tomto prípade je interakcia medzi hornou a spodnou nábežnou hranou zachovaná a je možné počítať s nasávaním vzduchu smerom nahor pre zvýšenie vztlaku. [8] [9]



Obrázok 3 – Podzvuková nábežná hrana [ 8]

Toto umožňuje používať pri nadzvukových rýchlostiach aj profily, ktoré sú podobné podzvukovým. Ak krídlo nie je umiestnené v machovom kuželi, vzniká na jeho nábežnej hrane silná rázová vlna, ktorá bude produkovať obrovský odpor, ktorý je mimoriadne citlivý na pomer hrúbky a tetivy profilu, štiplosti krídla, uhlu nábehu a uhlu šípu. Krídlo, ktoré má väčší uhol šípu bude pri takejto nadzvukovej nábežnej hrane produkovať viac odporu, ako krídlo ktoré je priame. Z tohto dôvodu je výhodnejšie pri veľmi vysokej rýchlosti mať tenké štíhle a priame krídlo. [9]



Graf 1 – Závislosť koeficientu odporu od uhla šípivosti pri nadzvukovej a podzvukovej nábežnej hrane [9]

Nevýhodou vysokého uhlu šípu sú zhoršené aerodynamické charakteristiky pri nízkych rýchlostiach, kde krídlo neumožní také veľké zrýchlenie prúdu ako priame krídlo, čo spôsobí zvýšenie pristávacej rýchlosti, pádovej rýchlosti a zhorší celkovú manévrovateľnosť lietadla. Krídlo bude potrebovať vyššie uhly nábehu ako priame krídla. Tangenciálna zložka navyše spôsobí hrubnutie medznej vrstvy na konci krídla, čo spôsobí odtrhnutie medznej vrstvy pri páde najskôr na konci krídla. V tomto prípade sú ako prvé zasiahnuté krídelká a letún stráca schopnosť priečnej riaditeľnosti. [10]

Tento problém sa dá vyriešiť záporným uhlom šípu do smeru letu. V tomto prípade tangenciálna zložka spôsobí hrubnutie medznej vrstvy pri koreni krídla a následne jej odtrhnutie od koreňa. Krídelká sú zasiahnuté pri páde ako posledné a priečna riaditeľnosť je zachovaná. Nevýhodou takejto koncepcie sú ale vysoké aeroelastické momenty, ktoré zvyšujú nároky na konštrukciu. Materiály krídla musia byť dostatočne pevné, čo by

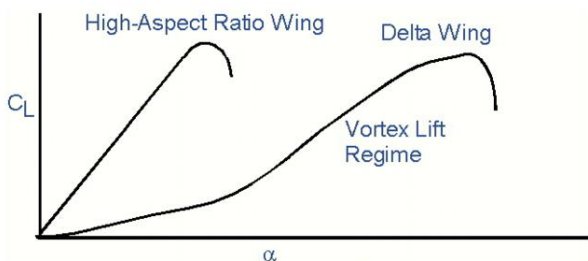
buď zvýšilo hmotnosť krídla a tak znegovalo výhodu tohto krídla alebo sú príliš drahé. Letún je avšak stále mimoriadne smerovo nestabilný a bez pomoci počítačov neriaditeľný a citlivý na fenomén nazývaný holandský krok. [10]

### 3.3. Delta krídla

Šípovitost krídla je teda pri nadzvukových lietadlách takmer nevyhnutná. Štrukturálne ale sú ale krídla s vysokou šípovitostou dosť slabé. Z tohto dôvodu sa využívajú práve delta krídla. [9]

Čisté delta krídla vznikajú tak, že sa odtokové hrany obidvoch krídel spoja a vytvoria trojuholníkový tvar. Takéto krídlo má následne dlhšiu tetivu a tým pádom aj nižší vlnový odpor pri zachovaní tej istej hrúbky. V prípade, že je potrebné urobiť krídlo hrubšie, pomer hrúbky k tetive je porovnateľný s šikmým krídlom. Takéto krídlo je nielen pevnostne ideálnejšie, ale môže uskladniť väčší objem paliva alebo mechanizáciu. Spomínaná pevnosť umožní použitie ešte väčšieho uhlu šípu. Ďalšia výhoda takéhoto krídla je vyššia hodnota vztlaku pri rovnakej šípovitosti z dôvodu väčšieho obsahu. Krídlo má navyše menšiu štiňlosť, ako šikmé krídlo. [9]

Nevýhodou delta krídel je ich vysoký indukovaný odpor pri nízkych rýchlostiach z dôvodu nízkej štiňlosti krídla a vyšší profilový odpor, nakoľko obsah krídla sa zväčší. [11]

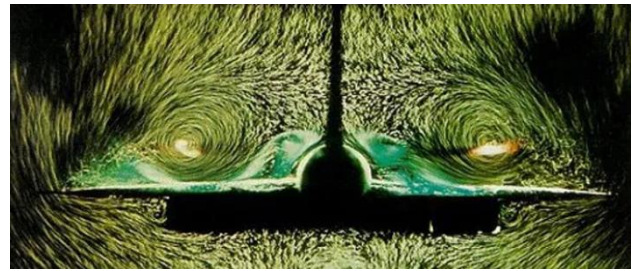


Obrázok 4 – Vztlková čiara delta krídla [Zdroj: 12]

Ďalšou nevýhodou je vysoká pristávací a vzletová rýchlosť. Krídlo potrebuje vyššiu rýchlosť a väčší uhol nábehu na generovanie dostatočne veľkého vztlaku, čo sa prejaví aj na menšom sklone vztlakovej čiary. Z tohto dôvodu sa využíva pri pristávaní fenomén vytvárania vztlaku pomocou dvoch kónických vírov, ktoré vznikajú na hornej strane krídla a fungujú ako dve rozsiahle oblasti nízkeho tlaku vzduchu. [13] [14]

### 3.4. Zložené krídla

Zložené krídlo je špeciálny druh najčastejšie delta krídla skladajúci sa z dvoch alebo viacerých pôdorysov. Má niekoľko výhod. Jednou z výhod je jednoduchšie vytváranie vztlakových vírov. Tieto víry potrebujú uhol často veľký nábehu. Pri takomto naklonení lietadla sa za ostrou nábežnou hranou odtrhne medzná vrstva a vytvorí veľký vír, ktorý rotuje vysokou rýchlosťou a pôsobí ako rozsiahla tlaková depresia. Takýto vír sa následne pri zvyšovaní uhlu nábehu bude rozširovať od nábežnej hrany až na celú plochu hornej časti krídla. Tlakový diferenciál sa prejaví na strmom náraste súčiniteľa vztlaku. Pri prekročení kritického uhlu nábehu sa vír rozpadne a letún prudko stratí vztlak úplne. [13] [14]



Obrázok 5 - Vírový vztlak na lietadle Concorde [14]

Ďalšou požiadavkou pre vznik vztlakových vírov je dostatočne veľká šípovitost. Nakoľko príliš veľká šípovitost bude negatívne ovplyvňovať generáciu vztlaku, používajú sa predĺžené nábežné hrany s vysokou šípovitostou, kačacie plochy alebo práve zložené krídlo. Takéto krídlo bude mať najskôr od koreňa vysokú šípovitost a následne sa uhol šípu zmenší a zachová sa tak zároveň aj dostatočne vysoký vztlak pri vodorovnom lete. [13] [14]

Výhodou zloženého krídla je aj redukcia posunu aerodynamického streda pri prechode okolozvukovou oblasťou. Čistá delta konfigurácia bude mať aerodynamický stred vždy viac vzadu v porovnaní so zloženým krídlom. Funguje to na princípe toho, že vnútorná časť krídla s väčším uhlom šípu a nižšou štiňlosťou bude mať miernejší sklon vztlakovej čiary v porovnaní s vonkajšou časťou krídla. [15]

Zložené krídlo môže mať veľa tvarov. Najlepší tvar pre redukciu vlnového odporu je gotický lomený oblúk alebo aj nazývaný von Kármánova ogíva. Takéto krídlo bolo použité aj na britsko-francúzsky Concorde. Vnútorná časť krídla má vysoký uhol šípovitosti na generovanie vírového vztlaku pri vysokom uhle nábehu pri pristávaní, následne sa šípovitost zmenší a krídlo je zakončené formou orezanej delty. [15]

## 4. Porovnanie koncepcií nadzvukových krídel

### 4.1. Porovnanie priameho, šikmého a delta krídla

Koncepcie krídel nadzvukových lietadiel sú naozaj rôznorodé. Je dôležité, aby lietadlo fungovalo správne v podzvukovom, okolozvukovom ale aj nadzvukovom režime.

Pre podzvukové režimy sú priame krídla účinnejšie ako šikmé alebo delta krídla, nakoľko tangenciálna zložka rýchlosti je nulová a teda aj strata vztlaku spôsobená uhlom šípu je nulová. Delta krídla navyše majú problém s vysokým indukovaným odporom z dôvodu nízkej štiňlosti. Toto zase kompenzuje výhoda vytvárania vírového vztlaku pri lete vysokým uhlom nábehu čo značne znižuje ich pristávaciu rýchlosť. Ďalšou výhodou delta krídel je ich konštrukčná pevnosť a väčší objem krídla pre uskladnenie paliva a lepšie rozloženie zaťaženia. [6] [11]

Pre okolozvukové režimy sa výhody priamych krídel obrátia na nevýhody. Kritické machovo číslo sa zvyšuje so zväčšujúcim sa uhlom šípu a strmosť nárastu vlnového odporu sa znižuje so zväčšujúcim sa uhlom šípu. Rázová vlna, ktorá sa vytvára na profile priameho krídla je taká veľká a silná, že energetický nárok na lietadlo sú výrazne neekonomické. To je možno ešte zredukovať zmenšením pomeru hrúbky ku dĺžke tetivy profilu, čo však spôsobí že lietadlo má tenké krídla ktoré nemôžu

uskladniť veľa paliva a nie sú konštrukčne pevné. Avšak ani v tomto prípade sa nepoužívajú priame krídla, ale skôr lichobežníkové nosné plochy. Výhodou takých krídel je ale pozícia aerodynamického stredy, kde lichobežníkové krídlo má v oblasti okolo 0.4 dĺžky tetivy a delta krídlo okolo 2/3 dĺžky tetivy. Ak je aerodynamický stred príliš vzadu, Mach tuck spôsobuje príliš silný moment na hlavu, ktorý musí byť vyrovnaný príslušnou výchylkou horizontálneho stabilizátora alebo elevonov, čo ďalej znižuje hodnotu celkového vztlaku a zvyšuje hodnotu odporu. [16]

Pre nadzvukové režimy sa javí delta krídlo ako najlepšie riešenie z hľadiska možnosti využitia vysokého uhlu šípú, nízkeho pomeru hrúbky profilu k tetive profilu a možnosti upravenia ich tvaru do von Kármánovej krivky. Akonáhle ale požiadavky na šípovitost' s pribúdajúcou rýchlosťou stúpajú a podzvuková nábežná hrana nie je ďalej udržateľná, tak priame krídlo má menšiu hodnotu odporu pri nadzvukovej nábežnej hrane ako delta krídlo. Takéto krídlo by ale muselo byť veľmi štíhle a tenké pre prechod okolozvukovou oblasťou, čo je pre leteckú dopravu ekonomicky nerealizovateľné. [15]

#### 4.2. Porovnanie delta krídel

Delta krídla môžu byť prevedené v rôznych koncepciách. V rade rozdeľujeme delta krídla na bezchvostové a delty s klasickým horizontálnym stabilizátorom. Bezchvostové delty sú také, pri ktorých funkciu horizontálneho stabilizátora plnia funkciu elevony ktoré združujú funkciu krídeliek a výškového kormidla a vyklápajú sa buď na rovnakú stranu pre klopenie alebo na opačnú stranu pre klonenie. Taktiež je možné využiť kačacie plochy pred nosnou plochou krídla. Výhodou takejto koncepcie je menší odpor a hmotnosť a nevýhodou práve horeuvedené konvenčné riešenie pozdĺžnej stability. Klapky sú v takomto prevedení len veľmi ťažko implementovateľné, lebo klapky menia prehnutie tetivy profilu a destabilizujú tak krídlo. Akonáhle nemáme horizontálnu stabilizačnú plochu, lietadlo sa dostáva do strmhlavého letu. Z týchto dôvodov je vhodné aj upraviť profil lietadla, nakoľko klasický asymetrický profil s kladným prehnutím tetivy profilu v prednej časti spôsobí moment na chvost, ktorý má tendenciu destabilizovať bezchvostové lietadlo. Používa sa preto reflexný profil. Je to taký profil, kde sa stredná krivka profilu zakrivuje v blízkosti odtokovej hrany dohora. Toto následne vytvorí kompenzačný moment na hlavu, ktorý sa bude pôsobiť proti momentu na chvost a bude sa snažiť lietadlo vrátiť do horizontálneho letu. Nevýhodou použitia takéhoto profilu je ale znížená efektívnosť pri vytváraní vztlaku z dôvodu straty odklonenia prúdu vzduchu krídlom na odtokovej hrane. [16] [17]

Koncepcia delta krídla s horizontálnym stabilizátorom za nosnou plochou je riešenie, pri ktorom nie je potrebné riešiť problémy so stabilitou. Delta krídlo má avšak z dôvodu rozloženia vztlakovej sily aerodynamický stred viac vzadu, ako to je u priameho a šikmého krídla, takže aj horizontálny stabilizátor musí byť umiestnený viac vzadu. [17]

Ďalšia možnosť je orezať koncové časti krídel a vytvoriť tak orezanú deltu. Takéto zakončenie krídla zmierňuje zhrubnutie medznej vrstvy na konci krídel. Orezaná delta je navyše konštrukčne pevnejšia a jednoduchšia na výrobu ako špicatý koniec konvenčnej delty. Krídla majú navyše menšie rozpätie a je ich jednoduchšie umiestniť do machového kužeľa lietadla. Výhodou je aj oddialenie rozpadnutia víru nad krídlom pri

vysokom uhle nábehu pre produkciu vírového vztlaku a tiež aerodynamický stred orezanej delty leží viac vpred. [17]

Koncepcia v podobe zalomeného šípú má tiež svoje opodstatnenie. Oproti klasickej delte má vyšší koeficient vztlaku a nižší koeficient odporu ako aj pri podzvukovej tak aj pri nadzvukovej rýchlosti. [18]

Zložená delta alebo niekedy nazývaná aj dvojité delta je delta krídlo, ktoré sa skladá z minimálne dvoch rôznych pôdorysov krídel a združuje takto dokopy vlastnosti viacerých delta krídel. Vyznačuje sa nízkym vlnovým odporom, vytvára ideálne podmienky na tvorbu vírového vztlaku pri zachovaní dostatočne vysokého súčiniteľa vztlaku a taktiež posúva aerodynamický stred smerom dopredu. Čím je navyše šípovitost' vnútorného krídla väčšia, tým je vír nad krídlom stabilnejší a rozpadá sa pod väčším uhlom nábehu. Predo sa v moderných koncepciách najčastejšie využíva zložená delta s orezanými okrajmi, prípadne so zalomením odtokovej hrany tak, ako to je pri koncepcii zalomeného šípú, čím sa dosahuje kompromis medzi všetkými konfiguráciami delta krídel. [17]

#### 5. ZÁVER

Koncepcie krídel lietadiel určených pre nadzvukovú prevádzku sa výrazne líšia od krídel v podzvukovom režime. Najlepšie krídlo pre civilnú leteckú nadzvukovú dopravu zostáva stále delta krídlo pre svoje konštrukčné aj odporové výhody. Možnosti upravovania tvaru takéhoto krídla sú rozmanité. Šikmé krídlo je tiež veľmi dobrá voľba, avšak šípovitost' je obmedzená a nie je pri takomto krídle možné vytvárať vírový vztlak. Takéto krídlo by avšak pre nízke nadzvukové rýchlosti malých lietadiel vyhovovalo. Priame krídlo je v nadzvukovej civilnej doprave nepoužiteľné. Takéto krídlo je avšak v lichobežníkovej verzii využiteľné pre veľmi rýchle nadzvukové bojové letúne. Pre ďalšiu optimalizáciu koncepcií krídel je potrebný praktický výskum pomocou počítačových simulácií ale aj ofukovaním v nadzvukovom veternom tunely.

#### Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 040ŽU-4/2022** Transfer progresívnych metód vzdelávania do študijného programu "*Technológia údržby lietadiel*" a "*Letecká doprava*".

#### Referencie

- [1] Real Engineering, 2022. *The Insane Engineering of the Concorde* [online]. Dostupné na: <https://www.youtube.com/watch?v=hnrpXxbVhME>
- [2] *Boom Overture* [online]. Dostupné na: <https://boomsupersonic.com/>
- [3] *Spike Aerospace* [online]. Dostupné na: <https://www.spikeaerospace.com/>
- [4] *Quesst Quiet Supersonic Flight* [online]. Dostupné na: <https://www.nasa.gov/specials/Quesst/>
- [5] CORDA, S. *Intorduction to engineering with a Flight Test perspective*, Chichester: John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 9781118953365

- [6] NASA, *Wings and Configurations for High-Speed Flight*, [Online]. Dostupné na: <https://history.nasa.gov/SP-468/ch10-4.htm>
- [7] FILIPPONE, A. *HIGH-SPEED Aerodynamics* [online]. Dostupné na: <https://aerodyn.org/sweepback/>
- [8] JONES, R.T. 1945. *Wing plan forms for high-speed flight* [online]. Dostupné na: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc60163/m2/1/high\\_res\\_d/19930091936.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc60163/m2/1/high_res_d/19930091936.pdf)
- [9] COWLES, G. 2015. *Supersonic flight* [online]. Dostupné na: <https://www.youtube.com/watch?v=4VLx9RCAs48>
- [10] Real Engineering, 2019. *Why Do Backwards Wings Exist?* [online]. Dostupné na: <https://www.youtube.com/watch?v=RN6vGxyMcVU>
- [11] NASA, *Supersonic flow* [online]. Dostupné na: <https://history.nasa.gov/SP-367/chapt6.htm>
- [12] ALMOSNINO, D. 2016. *Cart3D/Adjoint Assessment of 65° Transonic Delta Wing* [online]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/318969914\\_Cart3DAdjoint\\_Assessment\\_of\\_a\\_65\\_Transonic\\_Delta\\_Wing](https://www.researchgate.net/publication/318969914_Cart3DAdjoint_Assessment_of_a_65_Transonic_Delta_Wing)
- [13] LUCKRING, J.M. 2019. *The discovery and prediction of vortex flow aerodynamics*. In: *The Aeronautical Journal* [online]. 2019, č. 123, s. 729-804. Dostupné na: [https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/DE576518A55429F30FC2D32FE057EC90/S0001924019000435a.pdf/discovery\\_and\\_prediction\\_of\\_vortex\\_flow\\_aerodynamics.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/DE576518A55429F30FC2D32FE057EC90/S0001924019000435a.pdf/discovery_and_prediction_of_vortex_flow_aerodynamics.pdf)
- [14] GAURAV, G. a kol. 2021. *Aerodynamic Characteristics of Compound Delta Wings at Sea Level* [online]. Dostupné na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1149/1/012027/pdf>
- [15] MASON, W.H. 2019. *Supersonic aerodynamics* [online]. Dostupné na: [https://archive.aoe.vt.edu/mason/Mason\\_f/ConfigAeroSupersonicNotes.pdf](https://archive.aoe.vt.edu/mason/Mason_f/ConfigAeroSupersonicNotes.pdf)
- [16] SHREEPAL, A.M. KUMAR, S.H.V. 2019. *A Study on Flight Mechanics of Tailless Aircraft* [online]. Dostupné na: <https://wcc.ep.liu.se/index.php/TMAL02/article/view/559>
- [17] DIMITRIADIS, G. 2018. *Fighter aircraft design* [online]. Dostupné na: <http://www.ltas-cm3.ulg.ac.be/AERO0023-1/ConceptionAeroFighter.pdf>
- [18] DRAZ, A.M. a kol. 2020. *Investigation of Air Flow Over Delta and Cranked Arrow Delta Wings*. In: *Mansoura Engineering Journal* [online]. 2020, č.45, s. 1-19. Dostupné na: [https://bfemu.journals.ekb.eg/article\\_112323\\_8b49967764d76546416ccab7aafcbc8b.pdf](https://bfemu.journals.ekb.eg/article_112323_8b49967764d76546416ccab7aafcbc8b.pdf)



## DESIGN OF THE SYSTEM FOR THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE FUEL-AIR MIXTURE OF THE M60 ENGINE

**Dávid Koša**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Jozef Čerňan**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

The aim of article is to design a system for maintaining the optimal composition of the fuel-air mixture in an internal combustion engine, to describe in more detail the principle of mixture preparation with the help of carburation, and in connection with this to explain the issue of exhaust gas temperature. In the first part, the work deals with the function, then the construction, individual types of carburetor, direct and indirect fuel injection. In the second part, attention is paid to the mixture as such, its composition and especially the appropriate ratio of air and fuel. Subsequently, he deals with the issue of the temperature of the cylinder heads and the temperature of the exhaust gases, where he explains how exhaust gases are formed, what they are composed of and what effect they have on the independent operation of the engine. The last part is dedicated to the description of the experimental engine M60, in which the given parameters, construction and partially described development procedure of this experimental type of engine are briefly characterized, but also contains a proposal of a technical solution that will allow control of the composition of the mixture based on the analysis of exhaust gases.

### Keywords

carburation, stoichiometric mixture, rich and poor mixture, exhaust gas temperature

## 1. ÚVOD

Piestové motory sa používajú, už od nepamäti a preto je dôležité ich neustále zdokonaľovať. V tomto článku sa pokúsime vysvetliť princíp tvorby zmesi a tiež to, akým spôsobom zloženie zmesi ovplyvňuje teplotu výfukových plynov a teplotu hláv valcov.

Dôležitá súčasť práce motora je ukazovateľ teplôt, či už teploty hláv valcov, alebo teploty výfukových plynov. Ak teploty presahujú povolené hodnoty je potrebné vykonať také opatrenia, vďaka ktorým bude chod motora bezpečný a pracujúci v správnom cykle. Toto vieme zabezpečiť za pomoci optimálneho nastavenia palivo-vzduchovej zmesi, na základe ochudobnenia alebo obohatenia. Za pomoci týchto atribútov sa pokúsime navrhnuť systém, ktorý bude upravovať pomer zmesi v určitých intervaloch a udržiavať teplotu v tolerančných medziach, aby nedošlo k jej zvýšeniu a nespôsobilu to nežiadúce prehriatie, alebo závažnejšie poškodenie motora.

V tomto článku si dodatočne vysvetlíme aj princíp práce lambda sondy. Na základe tohto zariadenia sa pokúsime navrhnuť systém, ktorý bude udržiavať hodnoty emisií v tolerancii a zamedzí nadmernému vylučovaniu škodlivých častíc z výfukového potrubia.

## 2. PRINCÍP PRÍPRAVY ZMESI

Na to, aby sme pochopili prácu výfukových plynov a mohli navrhnuť nami požadovaný druh zariadenia na udržiavanie správnych teplôt, je potrebné v prvom rade vysvetliť princíp prípravy zmesi. V tomto článku sa budeme venovať trom konkrétnym typom, a to za pomoci karburácie, priameho a nepriameho vstrekovania.

### 2.1. Karburácia

Princíp práce plavákového karburátora: Úlohou karburátora je predovšetkým zabezpečiť potrebné množstvo zmesi pre prácu motora. V karburátore sa nachádza plaváková komora v ktorej je uskladnené palivo. V prípade, že hladina s plavákom poklesne, ihlový ventil sa otvorí a dopustí dostatočné množstvo paliva na späť do komory. Karburátor pracuje na základe difúzora v tvare Venturiho trubice so škrtiacou klapkou. Palivová dýza je umiestnená v najužšej časti, vďaka čomu sa zvýši rýchlosť vzduchu a nastane pokles statického tlaku. Na základe rozdielu tlakov je palivo z dýzy doslova vysávané a tým, že sa zmieša so vzduchom vytvára zmes. Ak chce pilot zvýšiť výkon motora, musí škrtiacu klapku úplne otvoriť, aby sa zabezpečilo zvýšenie prietoku vzduchu a pokles statického tlaku, čo zapríčini vysatie väčšieho množstva paliva z palivovej dýzy. [1].

### 2.2. Nepriame a priame vstrekovanie

V jednoduchosti sme si opísali prácu karburátora, teraz sa pozrieme na priame a nepriame vstrekovanie.

Nepriame vstrekovanie u benzínových piestových motorov pracuje na takom princípe, že palivo je rozprašované v priestore sacieho potrubia pred sacím ventilom, kde sa zmiešava so vzduchom. U dieselových motorov sa nafta rozprašuje v takzvanej predkomôrke, ktorá vyúsťuje priamo do valca. [9]

Nepriame vstrekovanie sa delí na jednobodové a viacbodové. [19]

Pri jednobodovom vstrekaní je palivo vstrekané za pomoci jednej palivovej dýzy ešte pred škrtiacu klapku, kde sa zmiešava so vzduchom. Následne je zmes za pomoci sacích potrubí rozdelená k jednotlivým valcom. Nevýhoda takéhoto typu



vstrekovania je predovšetkým nerovnomernosť rozdelenia zmesi. [19]

Čo sa týka viacbodového vstrekovania, tak v tomto prípade je palivo vstrekované ku každému valcu zvlášť. To znamená, že pre každý jeden valec máme pridelenú jednu palivovú dýzu. Palivo je vstrekované do sacieho potrubia pred sacím ventilom, kde sa zmiešava so vzduchom a teda vzniká potrebná zmes pre spaľovanie. [19]

Priame vstrekovanie sa od nepriameho vyznačuje tým, že palivo a vzduch sú privádzané osobitne do každého jedného valca. Priamo vo valci sa palivo zmiešava so vzduchom a za pomoci elektrickej iskry dochádza k zapáleniu zmesi. Veľká výhoda takéhoto typu vstrekovania je, že palivo sa vo valci rozpráši rovnomerne, teda dôjde k lepšiemu zapáleniu a následnému prehoreniu zmesi. [4]

### 3. ZLOŽENIE ZMESI

Princíp tvorby zmesi sme si vysvetlili, teraz sa pozrieme na samotnú zmes. Zmes sa väčšinou skladá z minimálne z dvoch pracovných substancií, a to zo vzduchu a z výparov benzínu. Hlavnými prvkami, ktoré sa nachádzajú v uhľovodíkovom palive je 85 % uhlíka a 15 % vodíka, a čo sa týka vzduchu vyskytuje sa v ňom cca 23% kyslíka. Aby sa uhlík kompletne spálil v palive, kde z neho vznikne oxid uhličitý a z vodíka vznikne voda, toto sa deje v procese tzv. stechiometrickom zložení zmesi, pri adekvátnych hodnotách a to pri cca 15 kg vzduchu na 1 kg paliva. Pri procese sa môže nachádzať buď viac vzduchu, vtedy sa jedná o tzv. chudobnú zmes, prípadne vzniká aj opačná verzia, že je vzduchu menej, vtedy sa hovorí, že zmes je bohatá. Prebytok vzduchu = 1 znamená, že sa nachádza toľko vzduchu, koľko ho má byť. Všetky tzv. bohaté zmesi, čo znamená, že majú menšie množstvo vzduchu, čo je nižšia hodnota ako 1. Na prebytku vzduchu záleží aj rýchlosť spaľovania. Poznáme teda základné časti zmesi a to bohatú, kedy je pomer vzduchu a paliva 8:1, chudobnú s pomerom 20:1 a stechiometrickú s optimálnym zložením 15:1. [1]

#### 3.1. Problémy s chudobnou zmesou

Problém s chudobnou zmesou nastáva vtedy, keď sa do spaľovacieho priestoru dostáva viacej vzduchu, čím sa zníži teplota po spaľovaní, teda dochádza k zníženiu výkonu ale aj zníženiu mernej spotreby paliva. Ak chceme dosiahnuť úsporný chod motora musíme nastaviť pomer zmesi približne 18:1, vďaka čomu zabezpečíme zvýšenie predzápalu a znížime potrebu paliva. Príliš veľké ochudobnenie by mohlo zapríčiniť horenie, už v momente otvorenia výfukového ventilu, čo môže mať vážny dopad na poškodenie piestov, ako aj samotného motora. V prípade, že by sa horúce spaliny vyskytovali v pracovnom mieste v dobe otvorenia sacieho ventilu, môže nastať stav, že na základe vysokej teploty sa zmes zapáli priamo v sacom rozvode. Takýto neželaný stav sa nazýva striefanie do nasávania (anglicky – popping back), môže spôsobiť vážne poškodenie sacieho rozvodu.

#### 3.2. Zloženie zmesi pri jednotlivých režimoch činnosti letúna

Ideálne zloženie zmesi ovplyvňuje hlavné režimy motora a to voľnobeh, spúšťanie, vzletový výkon, stúpací výkon a cestovný výkon. Pri spúšťaní je potrebné zabezpečiť bohatú zmes pretože motor je ešte studený a palivo sa neodparuje v dostatočnom

množstve ako v bežnej činnosti, ale iba v malých čiastkach, ktoré sa odparujú pri nižších teplotách. Pri vzletovom výkone je potrebné zabezpečiť, aby hodnota zmesi bola nastavená na plne bohatú, z dôvodu kompletného spálenia paliva a zabezpečenia chladenia motora. Pre docielenie veľkého výkonu motora je potrebné zabezpečiť veľký plniaci tlak, aby do pracovného valca prúdil väčší objem vzduchu. Na základe toho, že zvyšok odpareného paliva neodchádza z valca, vzniká tvorba oxidu uhoľnatého a oxidu uhličitého z kyslíka, ktorý sa nachádza v dodávanom vzduchu. Čo sa týka stúpacieho výkonu je potrebné zväčšiť strednú účinnosť tlaku vo valci, zvýšiť otáčky a teda opäť zabezpečiť bohatšiu zmes v pomere približne 11:1. Nárastom tlaku a otáčok vzniká nárast teploty, čo môže vyvolať explóziu alebo detonácie a tomu je potrebné zabrániť. V cestovnom výkone sa snažíme doceliť zníženie spotreby paliva na základe toho, že zmes ochudobníme a zabezpečíme nižšiu potrebu paliva pre vykonanie letu. [1]

### 4. CHT A EGT

Pomocou nastavenia bohatosti zmesi vieme ovplyvniť aj teplotu výstupných plynov a teplotu hláv valcov. Pre nastavenie správneho fungovania riadiacej jednotky je potrebné zabezpečiť optimálne hodnoty teploty hláv valcov (CHT) a teploty výfukových plynov (EGT). Teplota hláv valcov vyjadruje, čo sa deje vo valci počas Ottovho obehu, pred otvorením výfukového ventilu, zatiaľ čo teplota výfukových plynov naznačuje, čo sa deje vo valci počas otvorenia výfukového ventilu. Údaj o CHT vyhodnocuje nevhodnosť tepelnej energie pri činnosti, na základe čoho je valec mimoriadne zaťažovaný veľkými hodnotami tlaku a teplotami. V prípade EGT sa vyhodnocuje nevhodnosť tepelnej energie pri činnosti výfukového zdvíhu a toto vzniká iba v prípade, že valec je minimálne zaťažovaný, a nepôsobí na neho žiadna sila. [6]

#### 4.1. Čo ovplyvňuje CHT ?

V prípade, že chceme doceliť zvýšenie CHT, je potrebné zvýšiť výkon motora alebo znížiť prietok prúdenia chladiacej zmesi. Zväčšenie CHT neovplyvňujú iba tieto atribúty, ktoré sme už spomenuli. Za pomoci pootočenia kľukového hriadeľa, pri hodnote 15° až 20° dosiahneme najvyšší bod úvrate a teda dokážeme zmeniť hodnotu CHT. Aby sme CHT znížili musí sa piest pri otáčaní hriadeľa objaviť neskoršie, teda ďalej od hornej úvrati. Naopak ak chceme hodnotu CHT zvýšiť, musí sa objaviť skôr teda bližšie k hornej úvrati. [6]

#### 4.2. Termočlánok na meranie EGT

Na meranie teploty výfukových plynov sa používa termočlánková sonda (termočlánok), ktorá sa nachádza vo výfukových rozvodoch pracujúcich valcov alebo priamo vo výfuku valca, ktorý je zväčša najhoršie chladený. Okolo termočlánku vzniká termoelektrické napätie, ktoré je primerane zodpovedajúce jeho teplote, ale táto závislosť nemusí byť lineárna. Meranie elektrické napätia sa zisťuje a vyhodnocuje zariadením, ktoré je pravidelne kalibrované a priamo na ňom je zobrazovaná teplota. [1]

#### 4.3. Čo ovplyvňuje EGT ?

Hlavný vplyv na EGT má aj zloženie zmesi, či už hovoríme o chudobnej alebo bohatej štruktúre zmesi. Znižovanie EGT môže

ovplyvniť chudobnejšia zmes, kedy menej paliva zapríčini menej energie. Taktiež v prípade obohatenia zmesi môže dôjsť k zníženiu EGT a to na základe toho, že pri zvýšení paliva sa pohlcuje tepelná energia pri odparovaní. [6]

#### 4.4. Škodliviny nachádzajúce sa vo výfuku

Najčastejšie prvky škodlivín, ktoré sa nachádzajú vo výfukových plynch sú oxidy dusíka, uhľovodíky, oxid uhoľnatý a rôznorodé zmesi. Aby sme sa vyvarovali, takýmto nežiadúcim časticiam je dôležité, aby funkcia práce spaľovania bola správna a palivo bolo dostatočne čisté. Samozrejme palivá, ako nafta a benzín obsahujú z chemického aspektu zmes rôznorodých uhľovodíkov  $C_n H_n$  (označujú sa všeobecne skratkou CH), tieto rôznorodé uhľovodíky sa v procese spaľovania vo valcoch zlúčia s kyslíkom z nasatého vzduchu. Pri tomto plynulom procese sa uhľovodíky CH pretransformujú zlúčením kyslíka na oxid uhličitý  $CO_2$  a vodnú paru  $H_2O$ . Vieme, že podmienky spaľovania palív vo valcoch motorov, z rôznych dôvodov nie sú úplne perfektné. Taktiež ani palivá, ktoré sa používajú nie sú dôkladne chemicky čisté a teda obsahujú rôzne prídavné látky. V tomto prípade výfukové plyny pri hlavných výrobkoch zo spaľovania oxidu uhličitého  $CO_2$  a vodnej pary  $H_2O$ , obsahujú aj rôzne iné odpadové látky. V dôsledku odpadových látok, ktoré prvky obsahujú môže dôjsť k vážnemu ohrozeniu zdravia ľudí a zvierat. [2]

#### 4.5. Lambda Sonda

Ďalšie zariadenie, ktoré je potrebné v tomto odbornom článku spomenúť je lambda sonda.

Jedná sa o zariadenie nachádzajúce sa vo výfukovej sústave, ktoré pracuje na základe porovnávania rozdielu kyslíka v motore s kyslíkom vo vonkajšej atmosfére. Ak je rozdiel veľký, tak za pomoci chemickej reakcie vzniká elektrický signál a ten je odosielaný priamo do riadiacej jednotky na vyhodnotenie, dôsledku čoho dôjde k úprave zmesi. [11]

Toto zariadenie nám umožňuje udržiavať hodnotu škodlivých častíc v tolerančných hodnotách a teda zamedzovať nadmernej tvorbe emisií z výfukového potrubia do okolitej atmosféry. [11]

Poznáme tri druhy lambda sondy: jednoduchá, vyhrievaná a planárna.

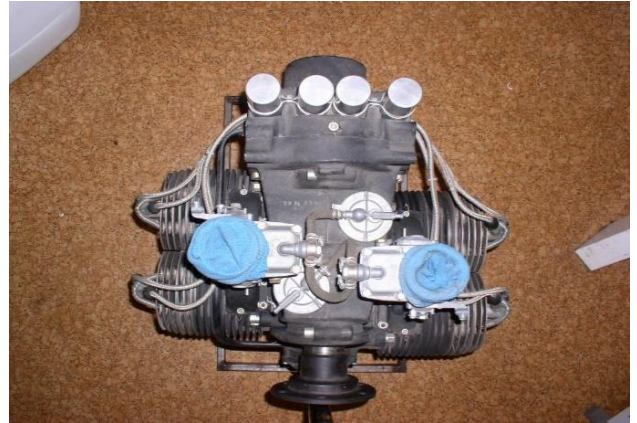
Jednoduchá sonda má najdlhší proces výroby. Tento typ je potrebné dostatočne zahrievať za pomoci teploty výfukových plynov, aby sme ju dostali čo najskôr do činnosti.

Čo sa týka vyhrievanej sondy, ako už z názvu vyplýva má vytvorené elektrické vyhrievanie pre dosiahnutie rýchlejšej prevádzkovej teploty.

Ako posledný typ je uvádzaná planárna sonda, ktorá sa skladá z keramickej fólie, ktorá má v sebe zapustený vyhrievací systém. Tento typ sondy sa veľmi rýchlo dokáže dostať do prevádzky za pomoci vyhrievania. [11]

### 5. MOTOR M60

Tento motor vznikol v roku 1991 a podieľali sa na ňom dva veľké podniky Aeron Brno a Aeromot Brno. Hlavným cieľom bolo vyvinúť motor s výkonom 58 kw. [5]



Obrázok 1 – Motor M60 v navrhovanom stave.

Tento motor bol navrhnutý ako štvorvalcový experimentálny typ motora, ktorý pracuje v dvoch taktach. Hovoríme teda o piestovom spaľovacom motore, ktorý pracuje na základe nestacionárneho prúdenia to znamená, že kinetická energia sa s pohybom chronologicky mení. Pracovný cyklus sa odohráva počas jednej otáčky kľukového hriadeľa. Počas prvej doby vznikne nasatie pracovnej zmesi, následne kompresia a počas druhej doby dôjde k expanzii a výfuku. Pri dvojtaktnom motore nie sú k dispozícii sací a výfukový ventil, teda motor obsahuje dva kanály a tie sa otvárajú a zatvárajú na základe zmeny otáčania piesta. Motor je chladený vzduchom za pomoci rebrovania, vďaka čomu dokážeme znásobiť plochu pre odvod tepla do okolia. Za pomoci deflektorov vhodne usmerníme vzduch pre požadované chladenie jednotlivých valcov. Výfuková sústava pozostáva zo štyroch hlavných častí: difúzor, koleso, kužel a výstupné potrubie. Účelom tejto sústavy je odvod spalín do vonkajšej atmosféry, čiastočné zníženie hluku a optimalizovanie procesu tlakových vln. [7]

Princíp rezonančnej výfukovej sústavy vzniká pri horení v spaľovacej komore, kedy dochádza k tvorbe výfukových plynov. V spaľovacej sústave sa zvyšuje tlak a naopak vo výfukovom potrubí sa zasa zníži, na základe čoho, by malo dôjsť k zvýšeniu rýchlosti molekúl až na úroveň zvuku, čo zapríčini vznik rázovej vlny. [7]

#### 5.1. Parametre motora

1. Maximálny výkon pri vzlietaní letúna 58kw/2250min-1
2. Maximálny výkon stály 45kw/2100min-1
3. Maximálny výkon stanovený, cestovný 40kw/2000min-1
4. Maximálna výška cestovná 2500 MSA
5. Spotreba pri maximálnom vzletovom výkone 450g/kWh ( max )
6. Spotreba pri maximálnom elektrickom, predpísanom cestovnom výkone 400g/kWh ( max )
7. Voľnobežné otáčky motora: 700 min-1/ vrtuľa [5]



## 5.2. Požiadavky na hmotnosť

- Hlavné požiadavky na hmotnosť vrátane elektrického štartéra, alternátora, palivového čerpadla, obsahu oleja a zapaľovacej sústavy: 65kg
- Stanovená tolerancia výrobcom:  $\pm 5\%$  [5]

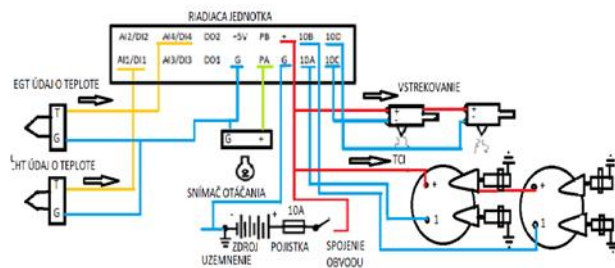
## 5.3. Potrebné palivo a mazací olej výrobcom

8. Automobilový benzín BA 96 SUPER

9. Mazací olej M2T

Pomer mazací stanovený výrobcom 1:40 [5].

## 5.4. Návrh systému pre určovanie optimálneho zloženia zmesi



Obrázok 2 - Schéma zapojenia pre meranie EGT a CHT. [Autor]

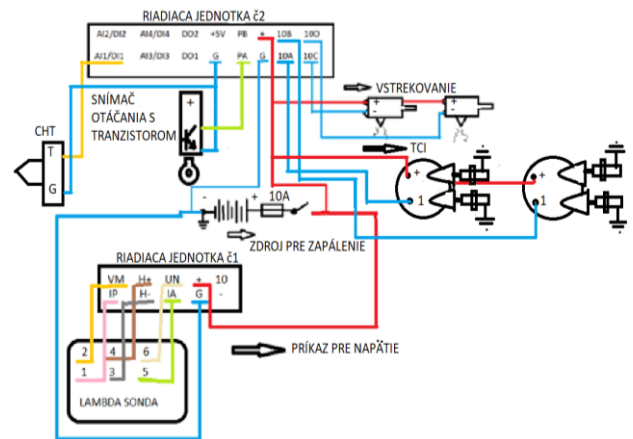
Naším cieľom je navrhnuť zariadenie, ktoré na základe CHT a EGT určí teplotné pomery v motore a z dôvodu bezpečnosti pred prehriatím vydá opatrenia, vďaka ktorým dôjde k úprave samotnej zmesi.

Systém obsahuje termočlánok na meranie teploty hláv valcov a teploty výfukových plynov. Termočlánok udáva informácie o teplote, ktoré sú vedené priamo do riadiacej jednotky na spracovanie a vyhodnotenie. Ak teplota prekračuje povolené hodnoty v systéme automaticky dochádza k spojeniu obvodu, dôsledku čoho je prúd vedený zo zdroja napätia až do samotného zapaľovacieho systému. V zapaľovacom systéme dôjde k zmene načasovania prešľahnutia elektrickej iskry v zapaľovacej sviečke a následnému zapáleniu upraveného množstva zmesi. Princíp práce takéhoto zariadenia spočíva v tom, že ak dôjde k náhlemu zvýšeniu teploty počas práce, systém automaticky upraví pomer paliva a vzduchu. Vďaka čomu vieme udržiavať chod nášho motora v správnej činnosti.

## 5.5. Systém pre znižovanie emisií (lambda sonda)

Cieľom takéhoto systému je dosiahnuť najnižší možný výskyt emisií z výfukového potrubia a teda znížiť hodnotu škodlivých častíc. Systém pracuje na podobnom princípe ako predošlá sústava.

Z teórie vieme, že ak dôjde k rozdielu hodnôt kyslíka v motore a kyslíka vo vonkajšom ovzduší zapríčini to činnosť práce lambda sondy. To znamená, že riadiaca jednotka prijíma informáciu o zmene obsahu kyslíka, automaticky dôjde k spojeniu obvodu, na základe čoho je upravený pomer paliva vzduchu a tiež doba prešľahnutia elektrickej iskry pre požadované zapálenie.



Obrázok 3 - Schéma zapojenia (Lambda sonda). [Autor]

## 6. ZÁVER

Na základe tohto článku sme si ozrejmili funkciu prípravy zmesi, či už za pomoci karburácie, alebo priameho a nepriameho vstrekovania. V súvislosti s prípravou a zložením sme si vysvetlili, ako pomer paliva a vzduchu ovplyvňuje hodnotu EGT a CHT.

Naším prvotným cieľom bolo navrhnuť zariadenie, ktoré bude udržiavať teplotu EGT a CHT v tolerantných medziach, za pomoci upravenia pomeru zmesi. V prvom systéme, ktorý sme navrhli v jednoduchosti popisuje prácu riadiacej jednotky, ktorá prijíma informácie o teplote z termočlánku, na základe vyhodnotenia parametrov posudzuje, či je potrebné zmes v daných intervaloch upravovať alebo nie. V druhom systéme sme navrhli zariadenie, vďaka ktorému môžeme znižovať hodnotu škodlivých častíc z výfukových plynov a teda viac chrániť naše životné prostredie pred týmito nežiadúcimi časticami.

Myslíme si, že návrhy systémov, ktoré sú spomenuté v tomto odbornom článku by mohli do budúcnosti priniesť nový impulz pri konštruovaní spaľovacích motorov a taktiež skvalitniť vplyv na životné prostredie, ktoré si musíme patrične chrániť.

## Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 024ŽU-4/2023** s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu *Letecká doprava*".

## Referencie

- [1] KRÍŽ, J. 2008. Pohonná jednotka. Žilina : ŽU EDIS, 2008. s. 285. ISBN 978-80-8070-872-6.
- [2] VIRÁG, F. 2000. Úvod do elektroniky automobilových motorov. Žilina : ŽU EDIS, 2000. s. 155. ISBN 80-7100-695-5.
- [3] WILD T, - KROES M. 2013. Aircraft powerplants. USA : Quad-Graphics, 2013. s. 786. ISBN 978-0-07-179913-3.
- [4] MAKSAJ A, - POLANSKIJ H. 1957. Teorie leteckých pístových motoru. Praha : Naše vojsko, 1957. s. 288.

- [5] JAROŠ, K. 1992. Vývoj spaľovacích motoru. Technická správa. Brno, ČR : Aeromot Brno, 27. 2 1992.
- [6] BUSCH, M. Understanding CHT and EGT. [Online] 12. 3. 2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://resources.savvyaviation.com/understanding-cht-and-egt-2/>.
- [7] LAPINOVÁ, B. Innovation options for selected systems of M60 engine: exhaust system and engine cooling. [Online] 5. 1 2022. [cit. 17. 3. 2023.] [https://drepo.uniza.sk/bitstream/handle/hdluniza/748/2/022\\_Bc\\_v2-26-32.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://drepo.uniza.sk/bitstream/handle/hdluniza/748/2/022_Bc_v2-26-32.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [8] Peter Hrčka. Ochudobňovanie a obohacovanie leteckého piestového motora. [Online] 14. 3. 2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.aeroweb.cz/clanky/826-ochudobovanie-obohacovanie-leteckeho-piestoveho-motora-vliv-na-egt>.
- [9] AVTOTATCHKI. Priame a nepriame vstrekovanie. [Online] 13.3.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://avtotachki.com/sk/raznica-mezhdu-pryamym-i-nepryamym-vpryskom-posledstviya-perf-zagryaznenie/>.
- [10] DONAIRE, D. Nepriame a priame vstrekovanie. [Online] 17.12.2021 [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.actualidadmotor.com/sk/nepriame-vstrekovanie-a-priame-vstrekovanie/>.
- [11] AUTORIDE. Lambda sonda. [Online] 11.3.2023 [cit. 17. 3. 2023.] <https://autoride.sk/co-lambda-sonda-co-sluzi>.
- [12] JETAGE. Nestacionárne prúdenie. [Online] 12.12.2023. [cit. 17. 3 2023.] <https://jetage.sk/sk/pre-pilotov/letecky-slovník/nestacionarne-prudenie>.
- [13] MECHANICALFUNDA. TCI vs CDI. [Online] 20.3.2023 [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.mechanicalfunda.com/2017/05/tci-vs-cdi-ignition.html#:~:text=Difference%20between%20TCI%20and%20CDI%20%3A&text=CDI%20ignition%20makes%20the%20spark,the%20current%20is%20cut%20suddenly..>
- [14] OPONEO. Lambda sonda. [Online] 10.3.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.oponeo.sk/blog/lambda-sonda>.
- [15] MICROCHIP. Microchip. [Online] 10.3.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/00002095B.pdf>.
- [16] JANCO, M. Na čo slúži lambda sonda. [Online] 25.1.2011. [cit. 17. 3. 2023.] <http://www.autorubik.sk/clanky/ako-funguje-a-na-co-sluzi-lambda-sonda/>.
- [17] GRIFFITH, J. What do can bus signals? [Online] 4.6.2015. [cit. 17. 3. 2023.] [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/industrial\\_strength/posts/what-do-can-bus-signals-look-like#:~:text=As%20stated%20in%20my%20first,low%20\(CANL\)%20bus%20wires..](https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/what-do-can-bus-signals-look-like#:~:text=As%20stated%20in%20my%20first,low%20(CANL)%20bus%20wires..)
- [18] PICOTECHNOLOGY. Automotive guided tests. [Online] 25.2.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.picoauto.com/library/automotive-guided-tests/can-l->
- <h/#:~:text=The%20CAN%2DL%20and%20CAN,without%20Significant%20noise%20or%20distortion.%3E>
- [19] AUTORIDE. Nepriame vstrekovanie paliva. [Online] 20.2.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://autoride.sk/nepriame-vstrekovanie-paliva-o-aky-typ-vstrekovania-ide>.
- [20] IMF SOFT. 2016. ECU MASTER CDI - TCI. 2016. s. 20.
- [21] IMFSOFT. MasterScheme en. [Online] 27. 5 2016. [cit. 17. 3. 2023.] [https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterCDI\\_TCI\\_V8\\_43\\_EN.pdf](https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterCDI_TCI_V8_43_EN.pdf).
- [22] SAJDL, J. MPI - Multi point injection. [Online] 23.3.2023. [cit. 17. 3. 2023.] <https://www.autolexicon.net/sk/articles/mpi-multi-point-injection/>.



## ANALÝZA OPERAČNÉHO ODDELENIA LETECKEJ SPOLOČNOSTI

**Tomáš Chalás**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Michal Durkáč**  
Operations Control Center  
Air Explore  
Bratislava, Slovakia

### Abstract

Článok analyzuje činnosti a každodenné fungovanie operačného oddelenia leteckej spoločnosti. Zaoberá sa ďalej povolaním dispečera letovej prevádzky, jeho náplňou práce a zodpovednosťou, ktorú v rámci svojho zamestnania má. Pri jej tvorbe boli využité rôzne internetové zdroje, interné dokumenty leteckej spoločnosti, knižničné zdroje, ale aj poznanie autora z vlastného pozorovania dennej prevádzky strediska OCC slovenskej leteckej spoločnosti AirExplore. V článku je popísaná aj potrebná kvalifikácia a požiadavky na znalosti pre osobu, ktorá by sa chcela na podobnej pozícii raz zamestnať. Pri skúmaní tejto oblasti boli použité poznatky z platnej legislatívy. V závere práce sú popísané, a navrhnuté zmeny učebného plánu, ktoré by mohli uľahčiť študentom odboru letecká doprava na Žilinskej Univerzite a leteckej spoločnosti výcvik na danú pozíciu.

### Keywords

letecká doprava, dispečer letovej prevádzky, operačné oddelenie, príprava letu, monitorovanie letu, výcvik letového dispečera

### 1. ÚVOD

Operačné oddelenie leteckej spoločnosti, často známe ako OCC, je právom označované ako mozog každej leteckej spoločnosti. Pracuje vždy nezávisle od ostatných oddelení leteckej spoločnosti a jeho vedúci, spadá priamo pod predsedu predstavenstva. V tomto oddelení sa odohrávajú vždy tie najdôležitejšie rozhodnutia, ktoré ovplyvňujú dennodenný chod leteckej spoločnosti. Jeho hlavným cieľom je postarať sa o napĺňanie a uskutočnenie letových poriadkov a plánov, dbať na čo maximálnu dochvilnosť všetkých letov, pre maximálnu spokojnosť cestujúcich pri čo najnižších nákladoch leteckej spoločnosti na ich prepravu [3].

Veľkosť a potrebnosť zriadenia takéhoto strediska vždy závisí od veľkosti leteckej spoločnosti. U pravidelných leteckých dopravcov, sú tieto oddelenia v nasadení 24 hodín denne, 7 dní v týždni. Vždy, keď je lietadlo tejto spoločnosti v prevádzke. Úlohy vykonávané v takomto stredisku sa rozdelia medzi jednotlivých zamestnancov. Pri nepravidelných dopravcoch môže funkciu OCC zabezpečovať v podstate jeden človek. Veľkosť tohto oddelenia teda vždy závisí od veľkosti danej spoločnosti a charakteru jej prevádzky.

V prostredí nami skúmanej leteckej spoločnosti je prevádzka zabezpečená dvomi dvanásť hodinovými smenami a jeho operačné oddelenie zodpovedá za tieto úlohy:

- Príprava letu
- Začiatok celého letu
- Monitorovanie a vykonávanie dohľadu nad letom
- Zrušenie alebo odklonenie letu a úkony s tým spojené
- Dohľad nad prevádzkou, pokiaľ je lietadlo na zemi

#### 1.1. Popis základných úloh OCC

Operačné oddelenie leteckej spoločnosti má tri najdôležitejšie, základné úlohy:

- Príprava letu
- Riadenie prevádzky
- Monitorovanie letu

##### 1.1.1. Príprava letu

V rámci prípravy letu, má za úlohu stredisko OCC, byť podporou, informovať a asistovať riadiacemu pilotovi pri príprave letu. Povinnosťou OCC je v tomto prípade zbierať, poskytovať a využívať všetky dáta relevantné pre všetky prevádzkové zložky. Následne tieto dáta poskytne toto stredisko letiacej posádke. Potom je schopné operačné stredisko OCC vypracovať prevádzkový letový plán (Operational Flight Plan – OFP). Pri výpočtoch letovej trate v praxi, využíva OCC už dávnejšie vypracované trate, alebo databázu Eurocontrolu, v rámci prevádzky v jeho členských krajinách. Pri týchto výpočtoch, táto databáza poskytuje celú históriu všetkých podobných letov na danej trase. Po vypracovaní letového plánu, zašle dispečer tento letový plán všetkým relevantným zložkám riadenia letovej prevádzky. V prípade výskytu rôznych nezrovnalostí, ich rieši v spolupráci s posádkou. [1],[2]

##### 1.1.2. Riadenie prevádzky

Riadenie prevádzky, dohľad a rozhodovanie nad letom môže byť vykonávané dvomi spôsobmi. Zdieľaným a nezdieľaným.

V prípade zdieľanej kontroly nad letom, je táto právomoc zdieľaná medzi letovým dispečerom a letiacim pilotom. Vtedy môže dispečer leteckej spoločnosti, zodpovedný pilot alebo aj iná, oprávnená osoba z jej manažmentu rozhodnúť o odklone, pozdržaní alebo zrušení letu ak lietadlo vyhodnotí ako bezpečne

nespôsobilé. Vtedy sa posádka lietadla spojí s operačným oddelením leteckej spoločnosti a spoločne navrhnu vhodné riešenie. Takýto systém riadenia je hlavne zaužívaný v leteckých spoločnostiach v USA a v Kanade.

V podmienkach európskych leteckých spoločností, je zaužívaný systém nezdieleanej kontroly nad letom. To v praxi znamená to, že pilot letiaci (PIC), má finálne rozhodnutie a zodpovednosť za bezpečnú prevádzku lietadla počas celého letu a doby jeho uskutočnenia. Tú zahŕňa bezpečnosť cestujúcich a nákladu na palube lietadla. Pilot robí finálne rozhodnutie o odklone letu, jeho pozdržaní alebo o zrušení letu. Dispečer je v tomto prípade len informovaný o tom, že let bol odklonený.

Letový dispečer v operačnom oddelení leteckej spoločnosti môže a je zodpovedný navrhnúť a rozhodnúť tak, aby bola zabezpečená bezpečnosť, pravidelnosť a efektívnosť celého procesu počas pozemných operácií.

Všetky potrebné odporúčania a rozhodnutia by však mali byť navrhnuté všetkými oddeleniami spoločnosti. V prípade nepravidielnosti trvajúcej viac ako 2 hodiny, musí OCC informovať kompetentného nadriadeného, koordinovať a navrhnúť ďalšie kroky. [1],[2],[3]

### 1.1.3. Monitorovanie letu

Zamestnanci OCC udržiavajú neustály dohľad nad všetkými pohybmi a stavom lietadiel. Sledujú vývoj počasia na trati, stav a prevádzku navigačných zariadení a stav pristávaco-vzletových dráh.[1],[2],[3]

## 2. METODIKA PRÁCE:

Pri vypracovávaní tejto práce, sme vychádzali z pozorovania procesov v operačnom oddelení leteckej spoločnosti AirExplore. Naším zdrojom boli najmä rozhovory so zamestnancami spoločnosti, interné dokumenty leteckej spoločnosti ako sú operačné manuály, organizačná norma operačného oddelenia leteckej spoločnosti a výcvikový plán pre dispečera letovej prevádzky. Jednotlivé informácie boli porovnávané s informáciami dostupnými na internete, platnými predpismi, postupmi a požiadavkami Dopravného úradu pri udelení licencie dispečera letovej prevádzky. Po hĺbkovej analýze, sme tieto informácie porovnali s platnými učebnými listami predmetov študijného programu letecká doprava pre bakalársky a inžiniersky stupeň štúdia.

## 3. ÚLOHY A ZODPOVEDNOSŤ DISPEČERA LETOVEJ PREVÁDZKY

Hlavnou zložkou a zamestnancom operačného oddelenia je dispečer letovej prevádzky. Je to hlavná styčná osoba, ktorá plánuje let, monitoruje ho a je podporou pre pilota v kokpíte lietadla.

### 3.1. Príprava letu dispečerom letovej prevádzky

Samotná príprava letu sa skladá z niekoľkých, veľmi dôležitých krokov, ktoré letový dispečer musí dodržať. Jeho hlavná náplň práce je pripraviť a podať kompletnú dokumentáciu k letu a vytvoriť prevádzkový plán letu (OFP – Operation Flight Plan). Medzi ďalšie dokumenty, ktoré musí letový dispečer pripraviť, sú predpovede počasia, ATC flight plan, PIB, Tripsheet,

Metreport a General Declaration (dokument potrebný pre prechod cez hranice, ICAO Annex IX – Appendix I.). [2]

### 3.2. Schvaľovanie a hodnotenie letísk

Po obdržaní objednávky na let, musí dispečer v prvom rade schváliť a zhodnotiť jednotlivé letiská, ktorých sa let týka. Od letiska odletu, alternatívnych letísk po trase, letiska priletu a alternatívneho letiska priletu. Táto činnosť prebieha v spolupráci s oddelením letového prevádzkového inžinieringu, ktoré vytvára analýzy pristávania a vzletu pre jednotlivé typy lietadiel. Následne dodá dispečerom zoznam letísk potrebný na schválenie. Ide o formu kontrolného zoznamu, v rámci ktorého dispečer porovná minimálne požiadavky leteckej flotily a lietadiel požiadavky leteckej spoločnosti s aktuálnymi informáciami o letiskách v platenej databáze leteckých informácií. Táto zahŕňa mapy letiska a potrebné prevádzkové charakteristiky. Dispečer kontroluje potrebné vybavenie letiska z hľadiska záchranných zložiek (Fire category), čas prevádzky (kedy je letisko otvorené), dĺžka dráh, navigačného vybavenia letiska a iné. Ak ich dané letisko spĺňa, vtedy je letisko zaradené do zoznamu schválených letísk a môže s nimi po dobu jedného roka dispečer pracovať. [1]

### 3.3. Príprava prevádzkového plánu letu

Pri požiadavke na let, musí dispečer overiť, či letiská odletu a priletu sú v zozname schválených letísk a je možné z technického hľadiska daný let vykonať. Potom skontroluje predpovede počasia pre tieto dve letiská. Následne začne v softvéri na plánovanie letov tvoriť trať a pripravovať OFP (Operational Flight Plan). Cez tento program si zadá základné informácie o lete (registračná značka lietadla, dátum, čas a miesto odletu a miesto priletu, počet pasažierov, množstvo nákladu, konfigurácia posádky a cateringového vybavenia). Systém na základe toho navrhne trasu, ktorú dané lietadlo má letieť aj s výpočtami spotreby paliva. Následne na zvolenej trase hľadá vhodné alternatívne letiská tak, aby v prípade núdze, (napr. poruchy motoru) vedelo bez certifikácie ETOPS pristáť do 60 minút na náhradné letisko. Pri ich výbere prechádza zoznamom schválených letísk a kontroluje ich prevádzkové informácie, aktuálny stav počasia a predpoveď počasia na danej trati a alternatívnych letiskách. Ak sú podmienky vyhovujúce, pridá takéto letisko dispečer na trasu a let je možné uskutočniť.

Ku koncu si dispečer letovej prevádzky cez plánovací softvér vygeneruje OFP, údaje v ňom si skontroluje a cez aplikáciu od výrobcu lietadiel si prepočíta výkonnosť lietadla (Performance). Ak výpočty sedia, pripraví dispečer pre posádku správy o počasí, NOTAMy a ostatné potrebné dokumenty. Následne posieľa dispečer OFP posádke a podáva ATC Flight Plan, ak sa daná trasa letu už nebude meniť.

### 3.4. Príprava a zaslanie ATC FPL

Ak je OFP dobre pripravený a plán letu sa už nebude meniť, podá dispečer ATC FPL. Takýto letový plán dokáže dispečer podať priamo cez systém plánovania letov. Letový plán posieľa dispečer najskôr 5 dní pred predpokladaným časom rolovania, najmenej však 60 minút. Vzhľadom na obmedzenia CFMU a preťaženie vzdušného priestoru sa podáva spravidla 2-3 hodiny pred odletom. Po jeho podaní si letový plán dispečer skontroluje (ak ide o let v rámci CFMU) v systéme Eurocontrolu, a pozrie

jeho platnosť. Zároveň v systéme dispečer vidí, koľko času potrebuje pilot na roľovanie po pojazdných dráhach a kedy musí naštartovať lietadlo motory (Offblock time). [4]

Ak ide o pravidelný letový plán - RPL (minimálne 1 let 1 krát za týždeň), podáva sa takýto plán do Eurocontrolu 14 dní, pred prvým letom na danej linke. Tento plán schvaľujú riadiaci letovej prevádzky. Proces schvaľovania a prípravy takéhoto plánu sa líšia vzhľadom na to, či je let vykonaný v štátoch Eurocontrolu alebo nie. [4]

Ak ide o let v rámci štátov Eurocontrolu, je takýto letový plán vypracovaný a podaný cez Integrated Initial Flight Plan System (IFPS). Pri tvorbe letového plánu cez toto rozhranie, vie dispečer zanalyzovať situáciu, ktorá je spojená s personálnym obsadením každého strediska riadenia letovej prevádzky. (Či na danom stredisku zamestnanci štrajkujú, alebo nemajú kapacitu na odbavenie letov). Dispečer má ďalej možnosť využiť pri plánovaní svojho letu už podané letové plány aj iných dopravcov, ktoré podobnú trasu leteli v poslednom období. Po zvolení daného letového plánu, vidí dispečer, či je možné let odbaviť riadiacimi letovej prevádzky na základe ich priepustnosti a udelenie slotov. Následne vidí, či daný let je potrebné pozdržať na letisku odletu, alebo hľadať alternatívnu trasu. Takto podaný letový plán sa po kontrole systémom automaticky rozposiela do relevantných centier riadenia letovej prevádzky členských krajín Eurocontrol, ktorými let prechádza a týka sa ich. [5]

Pri príprave letu, ktorý začína alebo končí mimo členských štátov Eurocontrolu, sa využíva už bežná trasa, ktorá bola raz už naplánovaná vzhľadom na podmienky, ktoré musí trasa spĺňať. Preveria sa len okolnosti, ktoré na danej trase sa vyskytujú – nepriaznivé poveternostné podmienky a pod.

V prípade, že let ide mimo členských štátov Eurocontrolu, pošle dispečer ATC FPL na potrebné strediská riadenia letovej prevádzky, ktorých AFTN adresy doplní do systému pre plánovanie letov.

Pri príprave letu, zodpovedá dispečer letovej prevádzky aj za vybavenie všetkých prístavacích a preletových povolení. [1]

### **3.5. Riadenie prevádzky**

Zodpovednosťou dispečera letovej prevádzky je v prípade riadenia letovej prevádzky najmä spolupracovať so všetkými zložkami, ktoré umožňujú vykonanie letu. V prípade, že letecká spoločnosť má zaužívaný nezdieľaný systém riadenia prevádzky, celú zodpovednosť za let preberá pilot. Dispečer letovej prevádzky je jeho pozemnou podporou a nemôže rozhodnúť o odklone alebo zrušení letu samostatne, bez súhlasu a vedomia pilota. [1]

### **3.6. Sledovanie a monitorovanie letu**

Dispečer letovej prevádzky musí mať vždy dohľad a možnosť sledovať let a jeho úspešné začatie a uskutočnenie. Využíva hlavne na to systém od Eurocontrol Central Flow Management Unit a Network Operations Portal a správy o pohybe lietadla MVT. Správy MVT poskytujú dispečerovi letovej prevádzky informácie o tom, či daný let začal, má meškanie, alebo bol odklonený. Zvyčajne prichádzajú vo forme e-mailu na kontaktnú adresu OCC. Sú posielané hneď a automaticky pri zmene situácie. Pre dispečera je najdôležitejšie zistiť, či daný let bol úspešne ukončený – či bezpečne pristál na naplánovanom

letisku. Pokiaľ takúto informáciu priamo nedostane zo systému, pokúša sa skontaktovať s posádkou lietadla cez telefón, alebo cez jedného z partnerov leteckej spoločnosti pre odbavovanie lietadiel. V dnešnej dobe sa monitorujú lety v reálnom čase aj na základe schopnosti prijímať signál módu S cez zariadenie ADS-B. Na podobnom princípe funguje známy Flightradar24. [1],[2]

## **4. POŽIADAVKY NA ZNALOSTI A SKÚSENOSTI DISPEČERA**

Povolanie letového dispečera je popri pilotoch, riadiacich letovej prevádzky a palubnom personále, ktoré na Slovensku podlieha regulácii Dopravného úradu Slovenskej republiky. Podmienky, ktoré musí uchádzač splniť na to, aby sa stal dispečerom letovej prevádzky, sú definované v ICAO Annex 1 a v slovenskom predpise L1, ktorý z tohto predpisu vychádza.

Z tohto predpisu vyplýva, že uchádzač o licenciu dispečera letovej prevádzky musí mať vek minimálne 21 rokov a splniť požiadavky a vzdelanie a skúsenosti, potrebné na udelenie licencie. Z hľadiska zdravotnej spôsobilosti, nie je potrebné aby uchádzač prešiel zdravotnou prehliadkou. Na rozdiel od väčšiny štátov sveta, je tento preukaz na Slovensku vydávaný Dopravným úradom. Pretože nariadenie Európskej komisie č. 965/2012 (OPS regulations) nevyžaduje, aby personál operačného oddelenia leteckej spoločnosti bol držiteľom licencie, úrady CAA v niektorých štátoch skúšky neorganizujú. Na výcvik a preskúšavanie, sú licencované priamo, výcvikové centrá alebo samotný prevádzkovateľ. [6]

### **4.1. Teoretické požiadavky Dopravného úradu pre uchádzača o preukaz spôsobilosti dispečera letovej prevádzky**

Budúci letecký dispečer pre udelenie licencie musí absolvovať skúšky na Dopravnom úrade. Tieto skúšky sa konajú testovou a ústnou formou a pozostávajú z predmetov:

- **Letecké predpisy:** Uchádzač musí vedieť príslušné predpisy a postupy letových prevádzkových služieb
- **Všeobecné vedomosti o lietadle:** Test pozostáva z vedomostí uchádzača o princípoch činnosti lietadlových pohonných systémov a prístrojov, prevádzkových obmedzení lietadiel a ich motorov, a zoznamu minimálneho vybavenia a chýb, s ktorými je možné letieť
- **Letové prevádzkové výpočty a plánovacie postupy:** Budúci dispečer musí poznať účinky zaťaženia nákladom a jeho rozloženia na výkon a charakteristiky, vedieť vypočítať hmotnosť a vyváženie, operačné plánovanie letu, vypočítať spotrebu a dolet, poznať postupy výber náhradných letísk, riadenie po trati, vyplňať letové plány a poznať základné princípy plánovacích počítačových systémov
- **Ľudská výkonnosť:** Princípy ľudskej výkonnosti, manažmentu hrozieb a chýb
- **Meteorológia:** test preveruje znalosti z leteckej meteorológie, pohybu tlakových útvarov, frontov, význačných meteorologických javov, ich interpretáciu a znalosti správ METAR, TAF, SIGMET, meteorologické mapy, kódy a predpovede
- **Navigácia:** znalosti z princípov leteckej navigácie letu podľa prístrojov

- Prevádzkové postupy: Správne používanie leteckej dokumentácie, postupy prevádzky na prepravu nákladu a nebezpečného tovaru, postupy v prípade leteckej nehody alebo predpokladu nehody, núdzové postupy a postupy v prípade protizákonného zasahovania
- Princípy letu
- Rádiokomunikácia: Postupy na komunikáciu s príslušnou pozemnou stanicou

Na tieto skúšky sa potenciálny uchádzač hlási v riadnom skúškovom termíne, podaním žiadosti, ktorý je stanovený Dopravným úradom. [6]

#### 4.2. Požiadavky na skúsenosti dispečera letovej prevádzky

Na základe predpisu L1, musí žiadateľ o preukaz vedieť vykladať Dopravnému úradu pri vydávaní licencie jednu z pracovných skúseností:

- Musí mať v posledných troch rokoch, aspoň dvojročnú prax v letectve. V tomto období, uchádzač môže slúžiť ako člen letovej posádky v leteckej doprave, letecký meteorológ alebo riadiaci letovej prevádzky.
- musí v posledných dvoch rokoch pracovať aspoň rok ako asistent dispečera letovej prevádzky
- musí úspešne ukončiť schválený výcvikový kurz

Následne, musí slúžiť budúci dispečer aspoň 90 pracovných dní počas 6 mesiacov pod dohľadom dispečera letovej prevádzky s príslušnou kvalifikáciou.

Takéto potvrdenie vydá prevádzkovateľ, vo forme Confirmation Letter alebo podanú žiadosť na Dopravný úrad priamo potvrdí.[6]

### 5. VSTUPNÝ VÝCVIK DISPEČERA LETOVEJ PREVÁDZKY V LETECKEJ SPOLOČNOSTI

Vstupný výcvik dispečera v leteckej spoločnosti pozostáva z dvoch fáz, z teoretickej a praktickej fázy. Odlišuje sa od toho, či dispečer letovej prevádzky je už držiteľom licencie letového dispečera alebo nie je. Rozdiel je hlavne v dobe trvania takéhoto výcviku a vo forme preskúšania letového dispečera. Ak licenciu má, preskúšanie prebieha priamo v leteckej spoločnosti.

Teoretické preskúšanie v leteckej spoločnosti prebieha ústnou a písomnou formou a pozostáva zo 6 predmetov:

- Angličtina – ústna skúška
- Meteorológia – písomná a ústna skúška
- Letecká navigácia – písomná a ústna skúška
- Letecké predpisy – písomná a ústna skúška
- Komunikácia – písomná a ústna skúška
- Bezdrôtové technológie, elektronika – písomná a ústna skúška

Praktické preskúšanie pozostáva z týchto predmetov:

- Využitie prevádzky a letovej dokumentácie
- Príprava predletovej dokumentácie
- Meteorológia
- Plánovanie letu
- Využívanie rádiokomunikácie
- Riadenie prevádzky

Uchádzač potrebuje na úspešné absolvovanie skúšky v leteckej spoločnosti aspoň 80% všetkých správnych odpovedí. [6]

#### 5.1.1. Teoretický výcvik dispečera letovej prevádzky

Vstupný teoretický tréning v leteckej spoločnosti na pozíciu dispečera letovej prevádzky sa skladá z trinástich blokov, na základe skúšaných predmetov. Každý tento blok sa ďalej rozdeľuje na témy, ktorými si uchádzač musí prejsť. Každý blok má istú časovú náročnosť, ktorá sa líši od úrovne skúseností a predchádzajúcich znalostí uchádzača. Každá téma má aj priradenú číselnú hodnotu, ktorá zodpovedá požadovanej úrovni, ako ju musí uchádzač vedieť.

Budúci dispečer si prejde týmito výučbovými blokmi:

- Letecké právo a právne normy
- Základy letectva
- Hmotnosť lietadla a výkonnosť
- Navigácia
- Riadenie letovej prevádzky
- Meteorológia
- Hmotnosť a vyváženie
- Preprava nebezpečného tovaru
- Plánovanie letu
- Monitorovanie letu
- Rádiokomunikácia
- Ľudský faktor
- Ochrana pred činmi protiprávneho konania

Teoretický výcvik pre dispečera letovej prevádzky trvá od 126 do 285 hodín, na základe úrovne skúsenosti zamestnanca v letectve. [6]

#### 5.1.2. Praktický výcvik:

Praktický výcvik dispečera letovej prevádzky pozostáva:

- z priamej činnosti dispečera letovej prevádzky na pracovisku pod dohľadom inštruktora v trvaní 25 hodín
- z účasti na letu posádky priamo na lete alebo na simulátore, z pozície pozorovateľa v trvaní približne 4 hodiny

Následne pracuje nový dispečer letovej prevádzky 90 dní (25 týždňov) pod dohľadom skúsenejšieho kolegu.

Počas svojho ďalšieho pôsobenia, si dispečer prechádza každý rok školením z vybraných celkov kompletného výcviku dispečera letovej prevádzky. Kompletne všetky vedomosti si prejde v priebehu 3 rokov. [7]

### 5.1.3. Špeciálne školenia:

Súčasťou neustáleho vzdelávania dispečera letovej prevádzky sú aj špeciálne školenia. Medzi takéto školenia patrí:

- Crew Resource Management (každý rok)
- Zoznámenie sa s letovými trasami a špecifikami pre oblasť prevádzky
- Prevádzka v zníženej viditeľnosti
- Prevádzka nového typu lietadla
- Prevádzka leteckej spoločnosti v zimných mesiacoch
- Prevádzka v priestore severného Atlantiku
- ETOPS školenie
- Práca s novým vybavením leteckej spoločnosti
- Navigácia v priestore

Týmito školeniami si zamestnanci prechádzajú každé tri roky, ak nie je stanovené inak. [7]

## 6. ZÁVER

V našom článku sa nám podarilo priblížiť laickej verejnosti prácu operačného oddelenia leteckej spoločnosti, jeho prínos a skrytú prácu v dennej prevádzke. Pomocou rozhovorov so zamestnancami leteckej spoločnosti a analýze operačných manuálov sme zanalyzovali náplň práce dispečera leteckej dopravy v leteckej spoločnosti a odlíšili ho od povolania riadiaceho letovej prevádzky. Po zistení týchto skutočností sme zanalyzovali základné požiadavky slovenského regulačného orgánu – Dopravného úradu a leteckej spoločnosti na výcvik budúcich zamestnancov. Na základe toho dokážeme porovnať požiadavky a výcvik zamestnancov s bakalárskym a inžinierskym študijným programom letecká doprava na Žilinskej univerzite v Žiline.

Vieme konštatovať, že študijný program letecká doprava je veľmi dobre koncipovaný a zahŕňa väčšinu z potrebných znalostí budúceho dispečera letovej prevádzky. Študent tohto programu získa potrebné základy, ktoré mu uľahčia a urýchlia jeho výcvik. Náplne jednotlivých predmetov a blokov výučby sa zhodujú. Tvrdiť však, že teoretický výcvik bude časovo podobne náročný, ako už skúseneho dispečera by bolo veľmi odvážne.

Čas, ktorý uplynul od skúšky z predmetov v bakalárskom štúdiu až po prípadný nástup do zamestnania ľahko presiahne tri roky a nepostačí na uznanie niektorých predmetov ako plnohodnotnú skúšku na Dopravnom úrade. Na rozdiel od vysokoškolského štúdia, vstupný výcvik v leteckej spoločnosti prebieha intenzívne, zo všetkých predmetov v priebehu niekoľkých týždňov. Základné znalosti z daných predmetov však

uľahčia prípravu na toto povolanie a samotnú prípravu na skúšky. Preto zaučenie takéhoto človeka môže byť o poznanie rýchlejšie, ako uchádzača s iným typom vysokej školy, bez akejkoľvek minulosti v leteckej doprave. Zároveň, dispečer letovej prevádzky by mohol v budúcnosti, po úprave legislatívy, mať uznanú časť vstupného výcviku, na základe absolvovaných predmetov, a potvrdení o absolvovaní štúdia na vysokej škole a požiadať si o skrátenie učebnej osnovy vstupného tréningu.

Jedno z ďalších rizík pre absolventov tohto programu je aktuálna zmena akreditácie. Pri jej zmene, môže totiž prísť k tomu, že absolventi vysokoškolského štúdia môžu prísť o znalosti z predmetov ako je Ľudský faktor alebo Plánovanie a Monitorovanie letu. Tieto predmety boli totiž presunuté z inžinierskeho do bakalárskeho ročníka. Vzhľadom na dôležitosť povolania dispečerov v letectve, by som navrhol zaradiť do učebných plánov aj výberovú prednášku o dispečeroch letovej prevádzky, keďže ich činnosť je menej známa aj pre samotných, budúcich dopravných pilotov študujúcich leteckú dopravu na Žilinskej univerzite. [8]

## PodĎakovanie

Pri spracovaní tohto článku by som sa chcel poďakovať p. Ing. Michalovi Durkáčovi a spoločnosti AirExplore za možnosť spolupráce, návštevy operačného oddelenia leteckej spoločnosti pri jeho plnej prevádzke a k možnosti nahliadnuť do prevádzkových príručiek OM-A až OM-D. Taktiež by som sa chcel poďakovať aj Dopravnému úradu a oddeleniu licencovania leteckého personálu za pomoc pri výklade platnej legislatívy.

## Referencie

- [1] AirExplore 2022, AirExplore Corporate Manual, Internal Document 15.5.2022
- [2] AirExplore 2021, Operations Control Centre Organisation Norm, Issue 6, Internal Document, 26.04.2021
- [3] Merle V. Herzog and Dirk Stelling – Flight Operation Officer, German Aerospace Center. Aviation Psychology and Applied Human Factors (2021), 11(1), 48–53
- [4] LPS SR š.p., Aeronautical Information Publication, [online], 23.03.2023
- [5] KULČÁK a kol., 2002, Air Traffic Management, (str. 185 – 187), ISBN 80-7204-229-7
- [6] Predpis L1, štvrté vydanie, 2008
- [7] AirExplore 2020, AirExplore Operations Manual Part D3, Flight Operations Dispatcher Training Program, Internal Document
- [8] Žilinská univerzita v Žiline, Učebné plány pre akademický rok 2022/2023 pozreté dňa 25.3.2023



# THE POSSIBILITY OF ICING DURING LIGHT PRECIPITATION AS A DANGEROUS PHENOMENON FOR FLYING AT SLOVAK AIRPORTS

**Matej Ševčík**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Kristína Šajbanová**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

## Abstract

*In this article, we will focus on icing as a dangerous phenomenon for civil aviation. In the theoretical part, we will take a closer look at the conditions under which icing forms, where it forms on the plane and what types of icing we know. Furthermore, the article includes how we can prevent the formation of icing and how we can protect ourselves from it. In the practical part, we will analyze data using METAR reports from airports in Slovakia for the last 5 years. We will determine the conditions under which icing could form and then compare them together. The result of the work should be an analysis that determines how many times icing occurred at the airports of Slovakia, in what time of year icing forms the most.*

## Keywords

*icing in aviation, condition for icing, icing at airports in Slovakia, removing icing.*

## 1. ÚVOD

Námraza je jedným z najnebezpečnejších meteorologických javov a podieľa sa na veľa nehodách, aj cez moderné prostriedky boja s ňou. Je preto potrebné vedieť kde sa námraza vyskytuje a ako ovplyvňuje bezpečnosť letu. Pojem námraza začal byť v letectve vnímaný až v druhej polovici 20. storočia, kedy sa začala letecká doprava rozvíjať do takej miery, že začal nárast letov aj pri relatívne nepriaznivých meteorologických podmienkach. Toto viedlo k zavedeniu predpisov na prevenciu námrazy a vývinu prvotných systémov na boj proti námraze. Postupom času sa technológie na detekciu a prevenciu námrazy stále zdokonaľovali a dnes sú neoddeliteľnou súčasťou letectva. Tento článok sa bude venovať danej problematike a následnej analýzy námrazových javov na letiskách Slovenskej republiky.

## 2. TEORETICKÉ PODKLADY ČLÁNKU

V tejto sekcii sa si priblížime čo je to námraza ako vzniká, aké typy poznáme a čo ovplyvňuje vznik námrazových javov. Taktiež sa dozvieme akým spôsobom sa informuje letová posádka o možnosti vzniku námrazy a čo tieto informácie (správy) obsahujú.

### 2.1. Počasie pre letectvo

Potreba znalosti meteorológie pre letectvo je jeden z najdôležitejších predmetov, ktorý potrebuje pilot vedieť. Lietadlá sa pohybujú v atmosfére a prijímajú všetky jej prejavy ako sú turbulencie, námraza, búrky, vietor alebo zrážky. Zďaleka najviac sa počasie prejaví vo chvíľach, keď sa lietadlo pohybuje blízko zeme, napr. pri vzlete alebo pristáti, kedy je potencionálne riziko stretu s terénom pri veľkých rýchlostiach veľmi veľké. Rozhodovanie posádky o ďalšom postupe je do značnej miery závislé na počasí a jeho vývoji napr. pri vyčkávaní v priestore v blízkosti letiska, až kým skončí búrka a bude sa dať bezpečne pristáť, alebo až keď príde k zlepšeniu dohľadnosti na potrebné limity. Pretože počasie môže mať výrazný vplyv na

bezpečnosť a efektivitu letectva, piloti a dispečeri musia byť oboznámení s aktuálnymi podmienkami počasia a musia byť schopní prispôsobiť sa a plánovať lety na základe týchto informácií. Preto sú dôležité meteorologické správy, ktoré poskytujú informácie o aktuálnych podmienkach počasia a predpovede na nasledujúce hodiny a dni. [1]

#### 2.1.1. Správa METAR

Je to letecká meteorologická správa o stave počasia na letisku, vydávaná v pravidelných časových intervaloch každú hodinu resp. polhodinu. Ak je správa vydaná mimo pravidelný interval z dôvodu význačnej zmeny niektorého z javov ide o správu SPECI. V závere je správa doplnená prístávacou predpoveďou TREND. [2]

#### 2.1.2. Správa TAF

Letisková predpoveď v medzinárodnom meteorologickom kóde, vydávaná v pravidelných šesťhodinových intervaloch s platnosťou 30 alebo 24 hodín. Rozdeľujeme ich na tzv. krátky TAF, ktorý sa vydáva každé 3 hodiny s platnosťou na 9 hodín dopredu, a tzv. dlhý TAF, ktorý sa vydáva každých 6 hodín s platnosťou na 18(24) hodín dopredu. [2]

#### 2.1.3. Správa SIGMET

SIGMET (Significant Meteorological Information) je štandardizovaná forma správy, ktorá obsahuje informácie o výskytu signifikantného nebezpečného počasia, ako sú búrky, silný vietor, turbulencie, námraza a podobne. SIGMET sa vydáva v šifrovanej forme a zahŕňa informácie o polohe a rozsahu výskytu nebezpečného počasia, jeho intenzite a trvaní. Formát SIGMET správy sa riadi štandardmi Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo (ICAO). Správa začína hlavičkou, ktorá obsahuje identifikátor SIGMET (napr. WS CZ SIGMET 01), dátum a čas vydania, oblasť výskytu nebezpečného počasia a výškový rozsah, na ktorý sa SIGMET vzťahuje. Nasledujú podrobnejšie



informácie o nebezpečnom počasi, ktoré obsahujú napríklad charakteristiku a rozsah oblakov, rýchlosť a smer vetra, intenzitu turbulencií, námrazy a podobne. SIGMET správy sa pravidelne vydávajú podľa potreby v závislosti na vývoji počasia. Vydávajú ich národné meteorologické služby a sú dostupné pilotom a letovým dispečerom prostredníctvom rôznych kanálov, vrátane rádia komunikácie a internetu. [3]

## 2.2. Vznik námrazy

Námraza na lietadle vzniká, keď studený a vlhký vzduch zráža s teplým povrchom lietadla, ktorý je ochladený na teplotu pod bodom mrazu. Keď teplý vzduch s vodnou parou z okolitého prostredia narazí na povrch lietadla, dochádza k rýchlemu ochladeniu vzduchu a jeho vodná para sa mení na kvapky vody, ktoré sa potom môžu zmraziť. Tento proces sa nazýva kondenzácia a fáza prechodu vodnej pary na kvapku alebo na ľad sa nazýva nukleácia. Najčastejšie námraza vzniká v oblačnosti pri teplotách 0°C až -12°C, keď sa v oblakoch vyskytujú kvapky prechladenej vody. Kvapky malých priemerov zamrzajú oproti veľkým vodným objemom až pri teplotách pod -12°C niekedy sú však schopné udržať sa v kvapalnom stave až do teploty -42°C. Pri dotyku kvapky s povrchom lietadla zmrzne malá kvapka okamžite zatiaľ čo veľké kvapka sa najprv rozleje a potom takto vzniknutá vrstva zamrzne. Rýchlosť rastu námrazy závisí na vodnatosti oblaku, v oblakoch s veľkými kvapkami (Ns, As, Cb, Cu) je námraza veľmi intenzívna naopak v oblakoch s malými kvapkami (Sc, St) rastie námraza pomalšie. Čím je nižšia a teplejšia základňa oblačnosti, tým spravidla býva väčšia vodnatosť oblaku a tým je väčšia intenzita námrazy. Existujú rôzne faktory, ktoré ovplyvňujú tvorbu námrazy na lietadle. Patrí medzi ne teplota, vlhkosť vzduchu, rýchlosť a smer vetra, veľkosť a tvar povrchu lietadla, ako aj doba vystavenia lietadla vlhkému a studenému prostrediu. [1]

## 2.3. Námraza na zemi

Najčastejšie sa námraza na zemi vyskytuje ako výsledok zamrzajúcich zrážok ako je napríklad mrznúci dážď, mrznúce mrholenie alebo sneh. Napriek tomu sa námraza na zemi objavuje aj pri absencii viditeľných zrážok. Vlhkosť vo vzduchu či už v kvapalnej forme alebo plynnej forme sa dokáže premeniť na ľad alebo inovať pri kontakte s akýmkoľvek podchladeným povrchom lietadla. Nabaľovaním takejto námrazy by mohlo znížiť výkonnosť rozrušením prúdu vzduchu na kritických miestach, čím aj znižovať vztlak, zvyšovať odpor a zvyšovať rýchlosť pádu lietadla. Žiadne lietadlo nie je certifikované alebo schválené aby odletelo z letiska za prítomnosti námrazy na kritických plochách.

Základné poznatky pre jav námrazy na zemi môžu byť veľmi zložité. Nasledujúci opis faktorov ktoré sa nachádzajú v atmosfére by nám mal pomôcť sa s touto problematikou ďalej zblížiť:

Tlak vodnej pary v atmosfére: Vzduch je zmes dusíka, kyslíka, vodnej pary a iných plynov. Tlak vodnej pary je miera množstva vodnej pary vo vzduchu („vlhkosť vzduchu“). Zvyčajne býva menej ako 1% celkového tlaku vzduchu.

Saturácia: Existuje teoretický limit množstva vodnej pary vo vzduchu pri akejkoľvek danej teplote. Pri tejto hranici je vodná para nasýtená (surovaná). Hranice saturácie sa líšia podľa

toho, či sa uvažuje o prechode do tekutej vody alebo do pevného skupenstva (ľadu).

Kondenzácia: Keď je vzduch dostatočne nasýtený vodnou parou, vyskytne sa kondenzácia. Kondenzácia je premena plynnej vodnej pary na tekutú formu vodných kvapiek alebo na pevnú formu v podobe ľadových kryštálikov. Kondenzácia z vodnej pary priamo na ľad sa nazýva de-sublimácia a premena ľadu na vodnú paru sa nazýva sublimácia.

Nukleácia: Ku kondenzácii bežne dochádza na povrchoch predmetov alebo okolo mikroskopických prachových častíc vo vzduchu. Tieto neplynné povrchy, nazývané nukleačné miesta, poskytujú molekulám vody potrebnú molekulárnu štruktúru na organizáciu do kvapiek kvapaliny alebo ľadových kryštálov.

Rosný bod: Hranica nasýtenia je nižšia pri nižších teplotách. Ak sa vzduch obsahujúci nedostatočne nasýtenú vodnú paru ochladzuje pri konštantnom tlaku a dostatočnom množstve, vodná para sa nasýti a dôjde ku kondenzácii, buď ako mrholenie alebo ako rosa na povrchoch. Teplota, pri ktorej dochádza k nasýteniu, je rosný bod. Pri vysokej relatívnej vlhkosti sa vodná para blíži k hranici nasýtenia, preto je teplota vzduchu blízka rosnému bodu.

Latentné teplo: Kondenzáciou alebo zamrzaním kvapôčok vody sa uvoľňuje tepelná energia do okolitého vzduchu, známa ako latentné teplo. Táto energia môže ovplyvniť rýchlosť zamrznania. Hoci môže spomaliť počiatočné usadzovanie námrazy ale nemôže tomu zabrániť.

Bod mrazu: Podobne ako pri rosnom bode, ochladzovaný vzduch s nedostatočne nasýtenou vodnou parou môže dosiahnuť limit nasýtenia vzhľadom na tvorbu ľadu. Ak sú podmienky vhodné na nukleáciu, vodná para bude kondenzovať na ľadové kryštáliky. Pri tejto teplote sa bude nachádzať bod mrazu, ktorý je vždy približne o 10% vyššia ako teplota rosného bodu. Napríklad ak máme vzduchovú hmotu s rosným bodom -10 °C tak bod mrazu má teplotu -8,9 °C.

Super podchladené kvapky vody: Super-chladienie je proces znižovania teploty kvapaliny alebo plynu pod bod mrazu bez toho, aby sa stal pevným (nezamrzne). Keď hovoríme o podchladenej kvapke vody, môžeme ju definovať ako akúkoľvek kvapku vody, ktorá má teplotu pod 0°C (pod bodom mrazu pre vodu). Normálne by voda pri dosiahnutí 0°C prešla do pevného skupenstva. Kvapky vody obsiahnuté v oblakoch sa však veľmi často nemenia na ľadové kryštály ani pri teplotách výrazne pod 0°C hovoríme o nich, že sú podchladené (ich skutočná teplota je výrazne pod 0°C až do -40°C) a sú stále v tekutom stave. Je to preto, že molekuly vody v čistej a nekontaminovanej „kvapke vody“ sú orientované tak, že pôsobia proti štruktúre potrebnej na vytvorenie ľadového kryštálu. Ak sa však objavia vo vzduchu častice prachu alebo akákoľvek iná vonkajšia sila (napr. lietadlo letiace cez oblak), ovplyvní to kvapku vody a tá môže zamrznúť takmer okamžite. Tieto super podchladené kvapky rozdeľujeme na veľké, ktoré nezamrzajú okamžite pri kontakte s povrchom lietadla a na malé, ktoré zamrznú okamžite. [5] [6]

## 2.4. Typy námrazy

Existujú rôzne druhy námrazy, ktoré ovplyvňujú bezpečnosť letu ale medzi hlavné námrazy v meteorologickej praxi patria tieto 4:

1. Inovať - je spravidla forma ľahkej námrazy, ktorá sa vytvára na lietadlách stojacích vonku pokiaľ je vysoká vlhkosť vzduchu a teplota pod bodom mrazu ku ktorej dochádza vplyvom radiačného ochladzovania. Má tvar malých ľadových kryštálikov. Môže sa tvoriť aj na lietadlách letiacich v oblačnosti typu Ci, Cc, Cs, a to tak že ľadové častice, z ktorých sú tieto oblaky tvorené, narážajú na povrch lietadla a energiou tohto nárazu sa na okamih zohrejú nad teplotu 0 °C a vzápätí primrznú k povrchu. Tento druh námrazy je však pre letectvo neškodný a nie je potreba ho odmrazovať. Uč pilota str.121
2. Zrnitá námraza – má drsný povrch, charakteristická je svojím mliečnym a nepriehľadným vzhľadom. Vytvára sa okamžitým zmrznutím malých kvapiek vody na povrchu lietadla. Mrznúce kvapky majú guľovitý tvar a pri ich zamŕzaní zostáva medzi nimi vzduch ktorý spôsobuje biele až mliečne zafarbenie ľadu. Zrnitá námraza sa často vyskytuje v oblačnosti pri teplotách 0°C až -40°C, najčastejšie však pri teplotách -10°C až -20°C a v oblačnosti teplých front v zimnej časti roku.
3. Ľadovka – má hladký a priesvitný tvar a tvorí sa namrznutím veľkých kvapiek na povrchu lietadla. Tým, že sa veľké kvapky pred zmrznutím najprv rozlejú po povrchu lietadla, tvoria kompaktnú vrstvu ľadu. S ľadovkou sa najčastejšie stretávame pri teplotách 0°C až -10°C.
4. Kombinovaná (zmiešaná) námraza – je kombináciou zrnitej námrazy a ľadovky. Vytvára sa pri relatívne teplejších teplotách (-5°C až -15°C) a má charakteristiky oboch typov námrazy.

### 2.5. Vplyv atmosferických front na vznik námrazy

Vo vzťahu k výskytu námrazy možno konštatovať, že asi 85% prípadov výskytu námrazových javov sa viaže na tieto objekty ovzdušia.

Teplé fronty sa vo všeobecnosti vyznačujú menej intenzívnou námrazou, avšak zóny výskytu námrazy, hlavne pokiaľ ide o horizontálny rozsah bývajú väčšie. Na teplom fronte, ako aj na oklúzii typu teplého frontu, sa námraza vyskytuje nad aj pod frontálnou plochou. Najnebezpečnejší druh námrazy ľadovka, sa viaže hlavne na priestor pod frontálnou plochou v miestach, kde už vodný obsah oblaku neznižuje vypadávajúcimi zrážkami. Oblasť výskytu ľadovky býva od 150 km do 350 km pred teplým frontom. Inak tento druh námrazy nie je typickým javom pre teplý front, ktorý sa vyznačuje malými výstupnými pohybmi a tým aj malými rozmermi elementov oblaku.

Studené fronty majú zasa zóny námrazy menšie, ale námraza býva podstatne intenzívnejšia ako v prípade frontov teplých. V priestoroch studenej fronty a jej oklúzie sa v oblačnosti najčastejšie vyskytuje ľadovka. Tento druh námrazy má najväčšiu častot hlavne na čele studeného frontu a ešte aj do vzdialenosti niekoľkých desiatok kilometrov za frontom.

### 2.6. Vplyv horského terénu

Oblaky tvorené orografickým zdvíhaním (núteným stúpaním vzduchu pozdĺž horskej prekážky) zvyčajne obsahujú väčší pomer podchladených kvapiek vody ako ľadových kryštálov pri

akejkoľvek danej teplote ako oblaky tvorené iným procesom nad plochým terénom. Je to spôsobené tým, že keď je vzduch nútený stúpať pozdĺž hory do vyšších úrovní, kondenzuje a tvoria sa kvapky vody. Vieme, že keď sa snažíme kvapôčky vody ochladiť, zvyčajne nezamrznú pri teplote 0°C, ale stanú sa podchladenými. Ak je rýchlosť znižovania teploty relatívne vysoká, kvapka vody môže dosiahnuť oveľa nižšie teploty, pričom si zachováva svoj tekutý stav.

### 2.7. Námraza ako nebezpečný jav pre lietanie

V tejto časti si vysvetlíme prečo je námraza taká nebezpečná a kde všade sa vyskytuje na lietadle. V prvom rade je treba zdôrazniť, že námraza sa výrazne podieľa na nehodovosti lietadiel pri nehodách spojených s počasím. Ovplyvňuje aerodynamické vlastnosti lietadla a tým aj zmenu účinkov letových vlastností a riaditeľností. Účinky spočívajú hlavne vo zväčšovaní profilov, hmotnosti lietadla a zmene tvaru obrysových profilov. Hlavnými následkami pôsobenia námrazy je zväčšenie čelného odporu a zmenšenie vztlaku, čo vedie k zmenšeniu rýchlosti stúpania lietadla, k zmenšeniu dostupu, rýchlosti letu a zvýšeniu rýchlostí pádu. Ďalej námraza a ľad ovplyvňuje výkony motorov, keďže má lietadlo väčšiu hmotnosť potrebuje aj väčšie výkony. Ľad dokonca vie aj poškodiť motor resp. jeho rotujúce časti alebo drak lietadla pri odlietavaní kusov ľadu pri odmrazovaní. Pôsobenie námrazy je špecifické aj podľa toho, na ktorých miestach, či častiach lietadla sa účinky prejavujú, ako aj v závislosti od ďalších okolností.

#### Výskyt námrazy na jednotlivých častiach lietadla

Námraza sa obvykle vytvára na všetkých vonkajších povrchoch lietadla, kde teplota povrchu klesne pod bod mrazu a vlhký vzduch je prítomný. Toto zahŕňa kryty motora, krídla a chvostové plochy. Ďalej námraza neovplyvňuje len nosné a radiace plochy, ale usadzuje sa aj v meracích prístrojoch, napr. na snímači statického a dynamického tlaku. Nesmieme zabudnúť aj na antény, čelné sklá kokpitu, listy vrtule a karburátory. Bližšie sa teraz zameriame na najdôležitejšie z nich:

- Námraza na nábežnej hrane mení aerodynamické vlastnosti krídla v smere zníženia jeho účinnosti, čo znamená zmenšenia vztlaku lietadla. Veľkosť negatívnych efektov závisí aj na rýchlosti letu pretože ľad má tendenciu sa formovať viac na rýchlejšie letiacich lietadlách, avšak keď sa dostaneme k prúdovým letúnom toto už ďalej neplatí kvôli kinetickému ohrevu. Tvar nosnej plochy tiež ovplyvňuje formáciu ľadu špeciálne na tvaroch, ktoré sú užšie (ostré profily) sa námraza tvorí viac ako na hrubších profiloch krídla.
- Námraza na vodorovných chvostových plochách nadobúda veľký význam pri pristávaní, keď sa lietadlo nachádza v pristávacej konfigurácii s vysunutými klapkami vytvára klopný moment ktorý pôsobí v smere skonu okolo bočnej osi (ťažký na hlavu). Tento účinok sa kompenzuje tzv. závesným momentom, vznikajúcim nastavením výškového kormidla na záporný uhol nábehu. Ak sa však námraza vytvára na stabilizátore môžu nastať dva prípady: 1. Prevažna námraza na hornej časti vodorovných plôch má za následok oslabenie účinnosti závesného momentu v dôsledku zmeny aerodynamických podmienok obtekania. 2. Prevažna námraza na dolnej časti stabilizátora a výškového kormidla spôsobuje zvýšenie účinkov závesného momentu.

- Námraza na listoch vrtule mení profil listov vrtule, znižuje ich účinnosť a vedie tak ku zníženiu rýchlosti letu. V extrémnych prípadoch hrozí pokles rýchlosti pod minimálnu.
- Námraza Pitotovej trubice a snímača uhlu nábehu môže viesť ku katastrofálnym následkom. Ide totiž o upchatie/zamrznutie dôležitých vonkajších snímačov častí prístrojov, ktoré vedú k nesprávnej indikácii dynamického tlaku prenášaného na rýchlo mer a nesprávnu indikáciu uhlu nábehu pri stúpaní prenášaného na merač uhla nábehu.

## 2.8. Ochrana voči námraze

V nadväznosti na opis podmienok vzniku, druhov a intenzity námrazových javov, ako aj ich predpoveď sa teraz zameriame na ochranu lietadiel voči tomuto nebezpečnému javu.

## 2.9. Systémy odmrazovania

Podľa princípu práce sa využívajú systémy:

1. Vyhrievanie horúcim vzduchom – lietadlá s piestovým motorom získavajú horúci vzduch vo výmenníkoch tepla vo výfukovom potrubí. Vzduch býva ohrievaný na teplotu okolo 160 °C. U lietadiel s turbínovými motormi sa odoberá horúci vzduch z niektorého stupňa kompresora, ktorí sa rovnako využíva pre prácu výškovej kabíny. V tomto prípade sa vzduch ohrieva na teplotu približne 200 °C. Teplý vzduch je následne rozvádzaný dutinou po celej dĺžke vyhrievanej časti. Spravidla sa tento systém využíva na odmrazovanie nábežných hrán krídel, chvostových plôch a vstupných ústrojenstiev motora. Ak zapneme spínač odmrazovania otvorí sa regulátor tlaku a umožní sa prívod teplého vzduchu. Moderné lietadlá používajú k ovládaniu leteckých systémov niekoľko palubných počítačov. Systém odmrazovania krídel je riadený počítačom, ktorý ovláda ventily dodávajú teplého vzduchu podľa zmeny teploty vzduchu odpusteného z kompresora a nadmorskej výšky. Ľavý a pravý ventil fungujú súčasne, aby sa rovnomerne ohrievali obe krídla. Pilot má na výber z troch možností selektora a to automatika, zapnúť, vypnúť.
2. Vyhrievanie elektickým prúdom – funguje pomocou odporového drôtu, ktorým prechádza elektrický prúd. V zariadeniach, ktoré používajú tepelnú elektrickú ochranu proti námraze, preteká prúd integrovaným vodivým odporovým prvkom, ktorý produkuje teplo. Odporový drôt, fólie alebo pásik je vložený medzi vrstvy poťahu, ktorý má chrániť danú konštrukčnú časť a mal by byť pre elektrický obvod izolátorom. Systém sa hlavne využíva pri nábežných hrán menších rozmerov napr. chvostové plochy a listy vrtúľ. Tento typ má ale veľkú nevýhodu a to v tom že má vysoký odber elektriny, preto sa využíva hlavne pre malé sondy vzduchových dát napr. Pitotová trubica, statické porty a snímače uhla nábehu. Pri veľkých dopravných lietadlách sa elektrický odmrazovací systém ďalej využíva k odmrazovaniu čelných skiel v kokpíte.
3. Mechanické odstraňovanie námrazy – je založený na mechanickom rozrušení vrstvy námrazy, ak už je námraza vytvorená. Rozpínaním pružného gumového pásu v nábežnej hrane sa láme vzniknutá vrstva ľadu a je prúdom vzduchu strhávaná z jej povrchu. Gumový pás často označovaný ako tzv. "gudrič" je tlakovaný pneumatikou

sústavou. Aby bol tento systém účinný musí pilot počkať až sa vytvorí tenká vrstva námrazy a následne až potom môže tento systém aktivovať. Aj tento systém má nevýhodu a to, že sa musí počkať kým sa pružný pás naspät' zmrští a následne až potom sa môže opätovne použiť.

4. Aplikácia chemických kvapalín – zakladá sa na predchádzaní vzniku námrazy rozstrekaním odmrazovacej kvapaliny na povrch, ktorý má byť chránený. Typický je pre použitie na odmrazovanie nábežných hrán vrtúľ, čelných skiel a neposlednom rade sa využíva na odmrazovanie nábežných hrán krídel a stabilizátorov. Nemrznúci roztok je čerpaný z nádrže a je rozstrekaný cez malé kanáliky do nábežných hrán krídel a stabilizátorov.

Tabuľka 1- Ochrana proti námraze na jednotlivých častiach lietadla

Výskyt námrazy na lietadle	Spôsob odmrazovania
Nábežné hrany krídel	Vyhrievanie horúcim vzduchom, vyhrievanie elektrickým prúdom, mechanické a chemické odmrazovanie
Nábežné hrany horizontálneho a vertikálneho stabilizátora	Vyhrievanie horúcim vzduchom, vyhrievanie elektrickým prúdom, mechanické odmrazovanie
Čelené sklá a okná	Vyhrievanie horúcim vzduchom, vyhrievanie elektrickým prúdom, chemické odmrazovanie
Vstupy vzduchu do motora	Vyhrievanie horúcim vzduchom a vyhrievanie elektrickým prúdom
Pitotové a statické snímače tlaku	Vyhrievanie elektrickým prúdom
Nábežné hrany listov vrtúľ	Vyhrievanie elektrickým prúdom a chemické odmrazovanie
Karburátor/y	Vyhrievanie horúcim vzduchom a chemické odmrazovanie
Záchodové odtoky a vodovodné potrubia	Vyhrievanie elektrickým prúdom

## 3. PRAKTICKÁ ČASŤ

Cieľom tohto článku bude pozorovanie námrazy pri slabých zrážkach na letiskách Slovenska. Analyzovať tieto dáta budeme pomocou správ METAR. Sústrediť sa budeme hlavne na námrazu pri slabých zrážkach. Najskôr si správy dekodujeme a určíme si vstupné podmienky podľa ktorých budeme vedieť ktoré dáta sú pre nás užitočné. Dáta sme dekovali ručne pozorovaním dát od dňa 1.1.2017 do 31.12.2021. Rozdelenie dát do jednotlivých ročných období nám umožní lepší prehľad o situácii na letiskách. Vstupné podmienky sme vyberali na základe poznatkov o tvorbe námrazy, to znamená že teplota na ktorú by sme mali prihliadať by nemala byť vyššia ako 5°C lebo vieme že námraza sa môže začať tvoriť aj pri kladných teplotách. Riziko však pri týchto teplotách je oveľa nižšie ako pri záporných. Poukázať musíme aj na zrážky, ktoré sa na letisku v daný čas vyskytovali s tým že budeme sledovať iba tie pri ktorých sa vyskytne znamienko („-“)

čo značí slabú intenzitu. Nesmieme tiež zabúdať na mrznúcu hmlu/ mrholenie. K najnebezpečnejším bude patriť FZRA (mrznúci dážď), PL (zmrznutý dážď), SG (snehové zrná) a FZFG a FZDZ ( mrznúca hmla, mrznúce mrholenie).

### 3.1. Analýza správ METAR na letisku v Bratislave

Z nasledujúcej tabuľky vieme odčítať, že námraza pri slabých zrážkach sa na letisku v Bratislave, sa za dané obdobie vyskytla celkom 265 dní, najviac v roku 2021. Priemerne sa vyskytovala najmä v zimnom období a na jeseň.

Tabuľka 2 – Výskyt námrazy na letisku v Bratislave

LZIB	2017	2018	2019	2020	2021	Priemer
Zima	23	32	41	36	44	35,2
Jar	1	1	3	1	9	3
Jeseň	9	15	9	17	24	14,8
<b>Celkový počet dní</b>	<b>33</b>	<b>48</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>77</b>	<b>53</b>

Ak to porovnáme s ostatnými letiskami námraza na tomto letisku sa vyskytovala najmenej. Môže to byť spôsobené mnohými faktormi, ale hlavne geografickou polohou a vyššími priemernými teplotami.

### 3.2. Analýza správ METAR na letisku v Žiline

Námraza sa na Žilinskom letisku objavila za toto špecifické obdobie celkom 382 dní a v priemere to bolo 76 dní za rok.

Tabuľka 3- Výskyt námrazy na letisku v Žiline

LZZI	2017	2018	2019	2020	2021	Priemer
Zima	30	42	54	45	57	45,6
Jar	8	6	6	7	11	7,6
Jeseň	29	16	15	19	37	23,2
<b>Celkový počet dní</b>	<b>67</b>	<b>64</b>	<b>75</b>	<b>71</b>	<b>105</b>	<b>76,4</b>

Na tomto letisku sme pozorovali najviac námrazy spojenou s nízkou dohľadnosťou, ktorú zapríčiňuje relatívne veľká vodná plocha v blízkosti letiska.

### 3.3. Analýza správ METAR na letisku Poprad-Tatry

Na tomto letisku sa námraza vyskytovala najčastejšie a to celkom 439 dní z celkových 1826 dní pozorovania.

Tabuľka 4- Výskyt námrazy na letisku Poprad-Tatry

LZTT	2017	2018	2019	2020	2021	Priemer
Zima	37	55	58	43	56	49,8
Jar	11	7	20	8	19	13
Jeseň	34	23	16	26	26	25
<b>Celkový počet</b>	<b>82</b>	<b>85</b>	<b>94</b>	<b>77</b>	<b>101</b>	<b>87,8</b>

Spôsobené to môže byť hlavne polohou letiska keďže sa nachádza v blízkosti nášho najväčšieho pohoria. Je preto najrizikovejším letiskom na území Slovenska, čo sa týka nepriaznivých meteorologických javov.

## 4. ZÁVER

Pomocou pozorovania správ METAR sme sa dozvedeli ako často sa námraza vyskytuje na letiskách Slovenskej Republiky, ako a

kde sa tvorí, ako účinne sa môžeme pred týmto nebezpečným javom chrániť a ako predpovedať možnosť vzniku. Zistili sme, že väčšinou tvorbu alebo možnú prítomnosť námrazy, spojenú so slabými zrážkami, ovplyvňovalo nejaké frontálne rozhranie. Najviac sa námraza vyskytovala na letisku v Poprade, kde námraza značne zapríčinila poloha medzi vysokými pohoriami. Na letisku v Žiline sa námraza vyskytovala o niečo menej. Ale fakt, že aj napriek tomu, že letisko nie je v blízkosti takých vysokých pohorí, výsledky v práci hovoria, že počet námrazových javov je tu pomerne vysoký. Keďže sa na tomto letisku nachádza výcvikové centrum pre pilotov zo Žilinskej univerzity, je v rámci bezpečnosti dôležité, aby sa lietadlá, ktoré na to nie sú prispôsobené, vyhli takýmto poveternostným podmienkam, pri ktorých sa námraza tvoriť môže. Ako posledné sa v počte námrazových javov umiestnilo naše najväčšie letisko M. R. Štefánika. Poloha tohto letiska výrazne vplýva na tvorbu námrazy. Nachádza sa v oveľa teplejšej časti nášho územia, čo prispievalo k oveľa menšiemu výskytu námrazy pri slabých zrážkach ako na ostatných letiskách. Napriek tomu sme zistili, že ak sú vhodné poveternostné podmienky, a to hlavne v zime, keď je teplota dostatočne nízka, tak aj toto letisko sa dokáže v rámci početnosti priblížiť k ostatným. A preto je treba tento nežiaduci meteorologický jav včas detegovať a urobiť prevenciu proti jeho vzniku.

## Referencie

- [1] KELLER, L. a kol. 2019. Učebnice pilota. 1. vyd. Cheb: Svět křidel, 2019. 404 s. ISBN 978-80-7573-049-7.
- [2] ZITKO, K.-VACÍK, M. 2014. Učebnice létání. 5.vyd. Praha: Vintage aviation, 2014. 130 s. ISBN 978-80-260-6640-8.
- [3] Letecká výstražná informácia SIGMET - SHMÚ. [online]. Copyright © 2023 Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 10.02.2023]. Dostupné z: [https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=meteo\\_lms\\_sigmet](https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=meteo_lms_sigmet)
- [4] GAMET - SHMÚ. [online]. Copyright © 2023 Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 17.03.2023]. Dostupné z: <https://www.shmu.sk/sk/?page=485>
- [5] Transportation Safety Board of Canada, 2021. Air Transportation Safety Investigation Report A17C0146. 1.vyd. 2021. 242 s. ISBN 978-0-660-45195-4
- [6] EASA exam preparation & question bank for pilots | Aviationexam [online]. [cit. 01.03.2023] Dostupné z: <https://www.aviationexam.com/UI/Pages/Members/Test.aspx>
- [7] BEŇO, L. 2022. Letadla. 2.vyd. Praha: Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2022. 436 s. ISBN 978-80-01-06959-2
- [8] NEDELKA, M. 1984. Prehľad leteckej meteorológie. 1. vyd. Bratislava: Alfa- vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1984. 222 s. ISBN 63-481-84-05.
- [9] LESTER, P. 2007. Aviation weather. 3.vyd. Kanada: Jeppesen, 2007. 327 s. ISBN 978-0-88487-446-1
- [10] Ground Icing: De-Icing Operations - Mechanical De-Icing. NASA Aircraft Icing Training [online]. Dostupné z: [https://aircrafticing.grc.nasa.gov/2\\_4\\_3\\_1.html](https://aircrafticing.grc.nasa.gov/2_4_3_1.html)

- [11] ScienceDirect [online]. Copyright © [cit. 09.03.2023].  
Dostupné:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042112000863>
- [12] How Does the Anti-icing System Work in Aircraft? - DTN.  
DTN° | prosper in a dynamic world [online]. Copyright ©  
2023 DTN, all rights reserved. [cit. 12.03.2023]. Dostupné  
z: <https://www.dtn.com/how-does-the-anti-icing-system-work-in-aircraft/>
- [13] Škultéty, F. Katedra leteckej dopravy Žilinská univerzita,  
Žilina. Lietadlá 2. 2022-27-10. Prednáška.
- [14] Čerňan, J. Katedra leteckej dopravy Žilinská univerzita,  
Žilina. Lietadlové pohonné jednotky 2. 2022-21-11.  
Prednáška.



## ANALYSIS OF SELECTED VITAL FUNCTIONS OF A PILOT DURING FLIGHT

**Timotej Rimarčík**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Frederik Chodelka**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Pilots work in distinct environment and there are many requirements they must fulfill to ensure the safe operation of an aircraft. However, there are also some psychological elements, that might be difficult to deal with, such as stress and high workload, while performing difficult flight tasks. This article explains what causes stress and high workload, and how does it affect pilots. Some of the vital functions of human body can be used to measure stress and high workload. The final part will deal with some research, using modern methods to measure stress and high workload during different flight phases, to upgrade cockpit ergonomics and procedures in aviation.*

### Keywords

*pilot, stress, workload, flight*

### 1. STRES

Prvou skúmanou oblasťou tohto článku je stres. Podľa Atlantic Flight Training je stres pojem, ktorý vyjadruje nadmerný a nežiadúci vplyv prostredia, ktorý v človeku vyvoláva určité fyziologické reakcie. Stres ovplyvňuje našu motiváciu a výkonnosť. Človek zažíva stres v každej chvíli svojho života, či už sa jedná o stres, ktorý mu pomáha alebo o nežiadúci stres. Pilot musí poznať problematiku stresu a možnosti ako sa s ním vysporiadať, aby mohol pochopiť negatívne vplyvy nadmerného stresu na jeho výkonnosť. [1]

#### 1.1. Základné delenie stresu

Stres má viacero podôb, je rozdelený do štyroch základných kategórií. Prvou kategóriou je pozitívny stres, pri ktorom človek nemá problém s jeho zvládnutím, nijako ho tento stres neobmedzuje, ale naopak zlepšuje výkonnosť a kreativitu človeka.

Druhou kategóriou je negatívny stres, ktorý vzniká pri situáciách, ktoré vyvolávajú strach a obavy, a sprevádzajú ich pocity nepohodlia, úzkosti a paniky. Negatívny stres narušuje výkonnosť človeka, čo môže mať negatívny vplyv na bezpečnosť letu.

Úzkosť je stres, ktorý vzniká v nepredvídateľnej situácii, alebo ak osoba v tejto situácii predstavuje hrozbu. Človek pri prežívaní úzkosti očakáva niečo nebezpečné a neverí tomu že by mohol danú situáciu zvládnuť.

Stres z minulosti môže nastať ak sa osoba ocitne v situácii, ktorú už v minulosti zažila a spája si ju so stresom alebo zlyhaním. V tomto prípade nemusí byť podmet spôsobujúci stres prítomný, ale stačí že sa vynoria nepríjemné skúsenosti z minulosti. [2]

#### 1.2. Delenie stresu podľa časového obdobia

Krátkodobý stres, ktorý človek zažíva keď počas dňa čelí rôznym problémom sa nazýva akútny stres. Po vystavení človeka s

akútnym stresom sa s ním telo začína okamžite vyrovnávať reakciou „boj alebo útek“, čo mu umožňuje v danej situácii rýchlo zareagovať. [1]

Ak je ľudské telo vystavené stresu dlhodobo, jedná sa o chronický stres. Tento typ stresu spôsobuje, že človek môže mať ťažkosti so zvládnutím situácie, ktorej by bežne čelil bez problémov a ak sa dostane do náročnej situácie tak prichádza o dôležitú výkonnosť. V prípade pilota sa jedná o nepresné riadenie lietadla, ťažkosti s komunikáciou alebo problémy s velením posádky. Okrem toho chronický stres zhoršuje vplyv akútneho stresu a v dlhodobom horizonte ohrozuje zdravie človeka. [1]

#### 1.3. Stresory

Každú okolnosť alebo situáciu, ktorá spôsobuje stres nazývame stresor. Ľudské telo stresory vníma a odpovedá na nich fyzickou, psychickou alebo emočnou odozvou. Môžeme ich rozdeliť na fyzické, psychologické, reakčné a organizačné.

Pri bežnej prevádzke sa môže na palube lietadla objaviť jeden alebo viacero faktorov, ktoré pochádzajú z prostredia, v ktorom sa človek nachádza. Sú spôsobené hlukom, vibráciami, nadmerným teplom, nedostatkom kyslíka, prítomnosťou oxidu uhoľnatého, únavou a podobne. Ďalšie faktory súvisia s činnosťami spojenými s pilotovaním a úroveň vytváraného stresu sa môže meniť pri jednotlivých letoch a fázach letu. Ideálna teplota pre väčšinu ľudí v bežnom oblečení je približne 20 °C. Teplota vyššia ako 30 °C zvyšuje pulzovú frekvenciu, krvný tlak a spôsobuje nadmerné potenie sa. Teplota nižšia ako 15 °C prináša nepohodlie, znižuje citlivosť v rukách a svaloch. [3]

Ďalším faktorom sú vibrácie, ktoré môžu nepríjemne pôsobiť na celé telo, zhoršujú vizuálnu ostrosť a spôsobujú únavu. Rôzne frekvencie vibrácií majú rozdielne symptómy. Pri nižších frekvenciách (1 – 10 Hz) je problémom narušené dýchanie, či bolesti brucha a hrudníka, frekvencie (10 – 20 Hz) vyvolávajú bolesti hlavy, krku, nepríjemné pocity v očiach a svaloch. [4]

Hluk nad 80 dB môže znížiť výkonnosť pri vykonávaní úlohy, pričom viac ako 90 dB prináša merateľné zhoršenie výkonnosti. Hluk však môže pomôcť zvýšiť úroveň vzrušenia v situáciách, pri ktorých hrozí strata pozornosti. Relatívna vlhkosť vzduchu má bežne hodnotu 40 – 60%. Vlhosť pod 20% sa prejavuje suchou pokožkou, očami, nosom a hrdlom, čo môže mierne zhoršiť komfort. Vlhosť vyššia ako 70% taktiež spôsobuje nepohodlie. [3]

Dôležitým faktorom je že stresory majú kumulatívny charakter. Ak na pilota pôsobí nejaký menší stresor a následne sa objaví ďalší stresor, tak bude prežívať vyššiu úroveň stresu, oproti prípadu ak by na neho pôsobil iba druhý stresor. Ak by teda pilota trápila nejaká nepríjemnosť na zemi nesúvisiaca s lietaním a potom by sa počas letu vyskytol malý problém, tak jeho úroveň stresu bude vyššia, než v prípade v ktorom by ho táto nepríjemnosť na zemi netrápila. [5] Život človeka je v dnešnej dobe vystavený mnohým životným stresorom a môže byť náročné prestať na nich myslieť. Preto na ľudí v práci majú často vplyv stresory z domácnosti a opačne. [6]

Letecké spoločnosti sú často prevádzkované v náročných finančných podmienkach, čo sa môže preniesť aj na pilotov vo forme predĺžených pracovných časov, či urýchlených predletových prehliadok, aby sa stihol čas odletového slotu. Boli zaznamenané aj prípady, v ktorých letecká spoločnosť od pilotov vyžadovala letieť pod povolené minimá pri zlom počasi, či znížiť minimálnu rezervu paliva, aby sa znížili prevádzkové náklady. Takéto postupy majú za následok, že piloti pracujú pod veľkým tlakom. Keďže moderné lietadlá sú najefektívnejšie pri automatickom ovládaní, piloti strávia pomerne málo času manuálnym riadením stroja a to v nich môže vzbudzovať obavy, že pri zlyhaní niektorého systému budú musieť prevziať riadenie. Ďalšími organizačnými stresormi sú kariérny rast, plánovanie letov, výcvik, preskúšania alebo únava. [6]

#### 1.4. Následky stresu

Každý jednotlivec má svoj osobný stresový limit, po prekročení ktorého dochádza k preťaženiu, po ktorom môže mať ťažkosti zvládať aj menšiu pracovnú záťaž. Stresový limit je u každého človeka rozdielny a závisí od jeho fyziologických a psychologických charakteristík. Príkladom je, že niektorí ľudia sa dokážu bez problémov odreagovať a zrelaxovať, čo im umožňuje znížiť následky stresu, iní však majú ťažkosti s odreagovaním sa, výsledkom čoho môže byť vysoká úroveň stresu. [3]

Stres často spôsobuje poruchy spánku a nespavosť. Vnímanie stresovej situácie, rozrušenie alebo premýšľanie o stresovej situácii prispieva k dlhšiemu zaspávaniu, častejšiemu prebúdzaniu sa a zhoršuje kvalitu spánku. [7] Ďalším nepriajným dopadom stresu sú poruchy tráviaceho traktu. [8] Pri ľuďoch pracujúcich v pozíciách zabezpečujúcich bezpečnosť (letová posádka, riadiaci letovej prevádzky, leteckí mechanici) môže mať nadmerný stres negatívny dopad na letovú bezpečnosť.

Fyzickým následkom stresu je zrýchlené dýchanie, vyššia pulzová frekvencia, potenie a chvenie. Prírodnou odpoveďou ľudského tela na stres je syndróm „bojuj alebo uteč“, vyvolávajúci rýchlu fyzickú reakciu, ktorá zdroj stresu porazí, alebo mu utečie. Výlučne fyzická reakcia je však vo väčšine prípadov nevhodná a vhodnejšia reakcia zahŕňa mentálne úsilie na vyriešenie problému. Syndróm „bojuj alebo uteč“ vyvoláva

uvoľnenie určitých hormónov, najmä adrenalínu, do krvného obehu. Pokyn k uvoľneniu hormónov pochádza zo sympatickej vetvy autonómnej nervovej sústavy. Parasympatická vetva následne po zániku nebezpečenstva telo ukľudní. [1]

## 2. PRACOVNÁ ZÁŤAŽ

Pracovná záťaž úzko súvisí so stresom, nedá sa však so stresom zamieňať. Hart definoval pracovnú záťaž ako „cena za plnenie úlohy pre ľudského operátora, ktorou môže byť únava, stres, alebo chyby“. [9] Sheridan a Simpson píšú o rozdielne fyzickej pracovnej záťaže a mentálnej pracovnej záťaže, pričom fyzická súvisí so zmenami dýchania a pulzovej frekvencie, ktoré môžeme merať, zatiaľ čo mentálna pracovná záťaž sa vzťahuje na spracovanie informácií, vykonávanie rozhodnutí, pozornosť, stres, emócie a únavu. [10] Kantowitz prirovnáva mentálnu pracovnú záťaž k „vplyvnej premennej, podobnej pozornosti, ktorá prispôsobuje voľbu medzi požiadavkami prostredia a kapacitou organizmu“ [11]

### 2.1. Príčiny vysokej pracovnej záťaže

Prvou príčinou vysokej pracovnej záťaže je obťažnosť úlohy. Ťažšie úlohy si vyžadujú náročnejšie spracovanie informácií, ukladanie dostupných dát do krátkodobej pamäte, vyvolávanie dát a skúmanie dlhodobej pamäte, alebo naučených pravidiel.

Druhou príčinou vysokej pracovnej záťaže je vykonávanie viacerých úloh naraz (multi-tasking). Informácie, ktoré má osoba spracovať, pochádzajú z dvoch krátkodobých pamäťových zdrojov (vstupov). Jedným je fonologický okruh, ktorý ukladá zvukové informácie, druhým je vizuálny okruh ukladajúci obrazové informácie. Spracované informácie sú potom využité pri výstupe buď vo forme fyzického pohybu, alebo hlasového výstupu. Na to aby bolo možné vykonávať dve úlohy súčasne, obe musia využívať rozdielny vstup informácií a rozdielny výstup informácií. Zároveň aspoň jedna z úloh musí byť dobre naučená, pretože človek dokáže súčasne spracovávať len jednu skupinu informácií. [3] Príkladom typického multi-taskingu je manuálne ovládanie lietadla, počas ktorého pilot konštantne využíva vizuálny okruh na sledovanie svojho okolia a prístrojov, a odpovedá naň pohybom rúk tak aby udržiaval lietadlo v požadovanej polohe. Súčasne však využíva ako vstup aj fonologický okruh s hlasovým výstupom na komunikáciu s riadením letovej prevádzky. Pilot by teda mal súčasne zvládať lietanie, aj komunikáciu. V priebehu letu sa však môžu objaviť aj ďalšie úlohy (navigácia, výpočty, porucha), na ktoré už nebude dostatok vstupov, výstupov alebo priestoru na spracovanie a preto začnú jednotlivé úlohy medzi sebou súperiť o zdroje, pričom dochádza k vysokej pracovnej záťaži.

Riešením by mohlo byť striedanie jednotlivých úloh tak aby sme súčasne nevyužívali jeden zdroj na dve úlohy. Problémom je, že striedanie úloh si vyžaduje veľké množstvo pozornosti a samotná zmena úlohy môže zvýšiť pracovnú záťaž, preto je odporúčané vyhýbať sa striedaniu úloh. Ďalšou možnosťou je pokúsiť sa splniť úlohu rýchlejšie, to však pridáva úlohe obťažnosť a dáva priestor chybám. Človek sa môže navyše tak sústrediť na skrátenie trvania úlohy, že tomu môže venovať až príliš veľa pozornosti a v konečnom dôsledku trvanie úlohy predĺžiť. [3]

Veľký vplyv na zníženie pracovnej záťaže počas letu má automatizácia, ktorá znižuje množstvo opakovaných

manuálnych zásahov pilota do riadenia lietadla. Zavedenie automatizácie viedlo k zmenšeniu objemu informácií, s ktorými musel pilot počas letu narábať a ktoré spôsobovali zahltenie pilota. Pri zlyhaní automatizácie však dochádza k náhlemu preťaženiu pilota, ktorý neočakával prechod na manuálne riadenie, čo vedie k strate situačného povedomia a chybám. [12]

## **2.2. Následky vysokej pracovnej záťaže**

Nárast pracovnej záťaže v rámci zvládnuteľného rozsahu nemá výrazný dopad na výkonnosť. Po ďalšom náraste pracovnej záťaže však dochádza k bodu, v ktorom už je na daného človeka pracovná záťaž príliš vysoká, čo sa prejaví poklesom jeho výkonnosti. Zvládnuteľná pracovná záťaž bez poklesu výkonnosti je kapacitou pracovnej záťaže, ktorá je u každého pilota individuálna. [13] Preťažený človek nie je schopný ďalej efektívne spracovávať informácie, riadiť lietadlo alebo učiť sa. Do situácie s vysokou pracovnou záťažou sa častejšie dostávajú menej skúsení piloti, ktorí potrebujú pri riadení lietadla viac premýšľať, môžu sa do nej však dostať aj tie najskúsenejšie posádky, najmä pri chorobe, strese alebo inom vonkajšom faktore. Pri komunikácii sa vysoká pracovná záťaž prejavuje skrátenými prejavmi, a menším počtom interakcií, ktorý vedie k vyššiemu počtu chýb. [6]

Význačným prejavom vysokej pracovnej záťaže je zameriavanie pozornosti iba na vybraný okruh signálov, čo na jednej strane umožňuje maximálnu koncentráciu na problém alebo hrozbu a minimalizuje vyrušovanie, na druhej strane však hrozí prehliadnutie kriticky dôležitého signálu bez ohľadu na to ako veľmi výrazný tento signál je. Pri vysokej pracovnej záťaži pilot nemusí mať potrebnú kapacitu na to, aby si mohol vytvoriť spoľahlivý prehľad o situácii a prejsť si všetky možné alternatívy. Ak sa v náročnej situácii objaví vhodnejší postup, pilot by musel pri zmene plánovaného postupu obetovať svoju pozornosť a preto sa mnohokrát prikloní k pôvodnému postupu. [3]

V rámci pochopenia problematiky stresu a pracovnej záťaže je dôležité poznať ich vzájomný vzťah. Vysoká pracovná záťaž, alebo práca, ktorá presahuje kapacitu jedinca vytvára stres. [14] Vo všeobecnosti platí, že vysoká pracovná záťaž prispieva k robeniu chýb, a tie sú potom ťažšie spozorovateľné. Problémom nie je iba vysoká pracovná záťaž, ale aj príliš nízka pracovná záťaž, ktorá spôsobuje nedostatočnú aktiváciu organizmu a nízku výkonnosť. [12]

## **3. SKÚMANIE STRESU A PRACOVNEJ ZÁŤAŽE V PRIEBEHU LETU**

Pre vylepšovanie ergonómie kokpitu a návrh lepších postupov je dôležité zaoberať sa skúmaním stresu a pracovnej záťaže pôsobiacej na pilotov počas letu. V minulosti sa uskutočnilo viacero výskumov zaoberajúcich sa problematikou stresu a pracovnej záťaže.

### **3.1. Sledovanie pohybu očí**

Jedným zo spôsobov skúmania správania pilotov a rozloženia ich pozornosti počas letu je na základe sledovania pohybu ich očí počas jednotlivých fáz letu. Počas výskumu vykonanom v roku 2022 na desiatich pilotoch Holandského kráľovského letectva bolo ich zorné pole rozdelené na deväť prvkov kokpitu, zahrňujúcich jednotlivé prístroje, ovládanie ťahu a výhľad z lietadla. Výskum prebiehal na simulátore, na ktorom každý pilot

vykonával manuálne 3 okruhy. Sledovacie zariadenie zaznamenalo čas sledovania jednotlivých prvkov a postupnosť v akej si ich piloti prezerali. Výsledné údaje umožňujú zistiť, na akú činnosť sa piloti v jednotlivých fázach sústredili najviac a medzi ktorými prístrojmi bola rozdelená ich pozornosť. [15]

Sledovanie pohybu očí umožňuje priblížiť, akej činnosti pilot venuje zvýšenú pozornosť v jednotlivých fázach letu. Pri sledovaní pohybu očí pri meniacich sa podmienkach je možné zistiť, ako dané podmienky zmenili rozloženie pozornosti. Podľa samotného sledovania pohybu očí sa však nedá určiť, akému stresu je pilot vystavený a ako narastá jeho pracovné zaťaženie. Ak by bol navrhnutý výskum počas ktorého by bol sledovaný stres alebo pracovná záťaž a pohyb očí, bolo by možné zistiť, ako sa mení pozornosť v konkrétnej situácii pri meniacom sa strese, alebo záťaži.

### **3.2. Technika subjektívneho hodnotenia záťaže**

Výskum uskutočnený pomocou 260 civilných pilotov z Indonézie, ktorého cieľom bolo zistiť akej pracovnej záťaži sú piloti vystavení počas vplyvu rôznych faktorov, prebiehal formou dotazníka SWAT (Subjective Workload Assessment Technique). Metóda SWAT pozostáva z dvoch častí. Počas prvej časti respondenti 3-krát zoradili 27 kariet s jednotlivými faktormi podľa časovej záťaže, úsilia a stresu. V druhej časti respondenti priradili ku každej karte ich hodnotenie časovej záťaže, úsilia a stresu od 1 (nízke) do 3 (vysoké), vďaka čomu získali zoradené karty z prvej časti určitú referenčnú hodnotu. Výsledkom výskumu bolo priradenie vypočítanej hodnoty pracovnej záťaže jednotlivým vplyvujúcim faktorom, ktoré sa nachádzali na kartách. Tieto faktory boli rozdelené do štyroch kategórií – fázy letu, meteorologické prvky, čas letu a terén. Ak bola výsledná hodnota <40, jedná sa o malú záťaž, pri hodnotách 41 – 60 sa jedná o miernu záťaž a pri hodnotách >61 sa jedná o vysokú záťaž, pri ktorej môže dôjsť k preťaženiu. [16]

### **3.3. Meranie pracovnej záťaže pomocou variácie pulzovej frekvencie a dotazníka NASA-TLX**

Výskum univerzity Enna zahrňoval subjektívne hodnotenie pracovnej záťaže pilotov, ale aj objektívne meranie záťaže pomocou fyziologických signálov. Napriek rozdielu týchto dvoch metód je pri analyzovaní pracovnej záťaže potrebné využiť všetky metódy. Subjektívne hodnotenie prebiehalo formou dotazníka NASA-TLX (NASA Task Load Index), to je však ovplyvňované vlastnou interpretáciou jednotlivých situácií. Objektívne meranie nie je priamo ovplyvnené zmýšľaním pilota a má potenciál poskytnúť detailnejšiu analýzu stresorov. Meranie tiež nemusí byť bezchybné a môže byť citlivé na aktivitu vykonávanú v danej chvíli. Objektívna časť výskumu prebiehala meraním variácie pulzovej frekvencie (HRV) počas simulovaného letu. [17]

Merania sa zúčastnilo 23 pilotov a ich úlohou bolo zaletieť simulovaný let na simulátore lietadla CESSNA Citation C560 XLS. Po vzlete vystúpili do výšky 10 000 stôp, v nej vykonali zatáčku vľavo a vpravo, pádový manéver, dostali lietadlo z nezvyklej polohy a vyčkávali. Cieľom vykonávaných manévrov bolo vytvorenie dodatočnej pracovnej záťaže každého pilota pred tým, ako začne s ILS priblížením a pristátím. Výstupom meraní bol elektrokardiogram (EKG), vytvorený hrudným pásom, ktorý mali piloti nasadený počas simulovaného letu, následne boli z EKG pomocou softvéru vytiahnuté 3 HRV parametre:



1. LF/HF – pomer hustoty EKG signálu v pásme s nízkou frekvenciou (0,04 – 0,15 Hz) a v pásme s vysokou frekvenciou (0,15 – 0,4 Hz). Tento parameter sa viaže na nervovú sústavu a pri náročnejších úlohách bol pozorovaný nárast pomeru LF/HF.
2. SD1 – parameter získaný zložitejšou geometrickou metódou. Nízka hodnota SD1 indikuje vysokú úroveň stresu.
3. SDNN – smerodajná odchýlka od pravidelného intervalu medzi dvoma údermi srdca, ktorý je považovaný za najužitočnejší parameter pri analyzovaní pracovnej záťaže. Zníženie SDNN indikuje zvýšenú mentálnu pracovnú záťaž. [17]

Dotazník NASA-TLX, využitý pri subjektívnom hodnotení je rozšíreným nástrojom k hodnoteniu pracovnej záťaže, vďaka jeho presnosti a spoľahlivosti. Podobne ako pri dotazníku SWAT, aj pri dotazníku NASA-TLX hodnotia piloti jednotlivé situácie podľa stupnice a aj porovnávaním medzi sebou. [17] Vyhodnotenie dotazníka je založené na výpočte vážených priemerov šiestich ukazovateľov: mentálna záťaž, fyzická záťaž, časová záťaž, výkonnosť, úsilie, úroveň frustrácie. [18]

Dotazník NASA-TLX je zadarmo dostupný v softvérovej verzii pre počítače, čo zjednodušuje zber, spracovanie a úschovu dát. Program je možné prispôbiť priamo pre potreby experimentu pomocou textového súboru. [18] Počas výskumu bolo cieľom dotazníka určiť celkovú záťaž pilotov počas vzletovej a pristávacej fázy.

Všetky spomenuté výskumy poskytujú vlastný pohľad na vyriešenie problematiky skúmania pracovnej záťaže a stresu počas letu. Pre potreby skúmania konkrétnej problematiky je vhodné navrhnúť výskum takým spôsobom, aby bol zameraný práve na túto problematiku. Vhodnými piliermi k vytvoreniu vlastného výskumu sú výskumy z oblasti skúmanej problematiky, vykonané v minulosti.

#### PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 024ŽU-4/2023** s názvom "*Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava*".

#### Referencie

- [1] ATPL Human Performance and Limitations. Atlantic Flight Training, 2003. 244 s.
- [2] VAGNER, J. a kol. 2018. Fatigue and Stress Factors among Aviation Personnel. In: Acta Avionica. 2018, roč. 20, č. 2, s. 23-28. ISSN 1339-9853.
- [3] JARVIS, S. a kol. 2014. Flight-crew human factors handbook. Gatwick Airport South: Civil Aviation Authority, 2014. 242 s.
- [4] DZVONÍK, O. 2005. Ľudské faktory v letectve: Ľudská výkonnosť a jej obmedzenia. Košice: Žilinská univerzita v Žiline, 2005. 291 s.

- [5] KENNY, J. a kol. 2014. Ground Training Series: Human Performance. Oxford: CAE Oxford Aviation Academy, 2014. 208 s.
- [6] ATPL Ground Training Series: Human Performance and Limitations. CAE Oxford Aviation Academy, 2014. 456 s.
- [7] DRAKE, C. L. - PILLAI, V. - ROTH, T. 2014. Stress and Sleep Reactivity: A Prospective Investigation of the Stress-Diathesis Model of Insomnia. In: Sleep. 2014, roč. 37, č. 8, s. 1295-1304. ISSN 1550-9109
- [8] KNOWLES, S. R. - NELSON, E. A. - PALOMBO, E. A. 2008. Investigating the role of perceived stress on bacterial flora activity and salivary cortisol secretion: A possible mechanism underlying susceptibility to illness. In: Biological Psychology. 2008, roč. 77, č. 2, s. 132-137. ISSN 0301-0511.
- [9] WEBB, C. M. a kol. 2010. Toward an Operational Definition of Workload: A Workload Assessment of Aviation Maneuvers. Army Aeromedical Research Lab Fort Rucker AL, 2010. 47 s.
- [10] SHERIDAN, T. B. - SIMPSON, R. W. 1979. Flight Transportation Laboratory Report R 79-4: Toward the Definition and Measurement of the Mental Workload of Transport Pilots. Massachusetts: Cambridge, 1979. 72 s.
- [11] KANTOWITZ, B. H. 2000. Attention and mental workload. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society - 3rd Annual Meeting. Santa Monica: 2000. s. 456-459.
- [12] ŠKVAREKOVÁ, I. - PECHO, P. - KANDERA, B. 2019. Vplyv automatizácie na letové zručnosti pilota. In: AEROjournal. 2019, roč. 13, č. 1, s. 17-22. ISSN 1338-8215.
- [13] MANSIKKA, H. a kol. 2016. Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during an instrument flight rules proficiency test. In: Applied Ergonomics. 2016, roč. 56, s. 213-219. ISSN 0003-6870.
- [14] QURESHI, M. I. 2013. Relationship Between Job Stress, Workload, Environment and Employees Turnover Intentions: What We Know, What Should We Know. 2013, roč. 23, č. 6, s. 764-770. ISSN 1818-4952.
- [15] PEYSAKHOVICH, V. a kol. 2022. Classification of Flight Phases Based on Pilots' Visual Scanning Strategies. In: 2022 Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2022. 7 s. ISBN 9781450392525.
- [16] SAPUTRA, A. D. - PRIYANTO, S. - MUTHOHAR, I. 2017. The pilot mental workload in flight operation. In: Aceh International Journal of Science and Technology. 2017, roč. 6, č. 1, s. 37-43. ISSN 2088-9860.
- [17] ALAIMO, A. a kol. 2020. Aircraft Pilots Workload Analysis: Heart Rate Variability Objective Measures and NASA-Task Load Index Subjective Evaluation. In: Aerospace. 2020, roč. 7. ISSN 2226-4310.
- [18] CAO, A. a kol. 2009. NASA TLX: Software for assessing subjective mental workload. In: Behavior Research Methods. 2009, roč. 41, s. 113-117. ISSN 1554-3528.



## CHANGES IN VISIBILITY CAUSED BY ATMOSPHERIC FRONTS

**Sebastián Valo**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Miriam Jarošová**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*This scientific thesis deals with the research and analysis of atmospheric fronts and their effect on visibility focused on aviation in Žilina airport, Poprad – Tatry airport and Košice airport. For the purposes of research and analysis of changes in visibility due to the atmospheric fronts passing through, METAR reports from the above-mentioned airports and bulletins of meteorology and climatology published every month were used. We analyzed reports from 2017 to 2021, a 5-year period. In this thesis, there is also an atmosphere with its layers, fronts and visibility. This scientific thesis was developed under the supervision of the thesis supervisor. For the analysis, we used METAR reports provided by the Slovak Hydrometeorological Institute.*

### Keywords

*atmospheric fronts, visibility, METAR, aviation*

### 1. ÚVOD

Cieľom tejto práce je priblížiť čitateľovi problematiku spájanú s atmosférickými frontami a ich vplyv na dohľadnosť v letectve. Nízka dohľadnosť môže byť veľmi nepríjemná, v niektorých prípadoch až nebezpečná, hlavne v kritických fázach letu, akými sú vzlet a pristátie.

Nízka dohľadnosť môže byť zapríčinená rôznymi faktormi. Na náš výskum sú používané letiská Žilina, Poprad- Tatry a Košice. Chceme zistiť, či má geografická poloha letísk nejaký vplyv na postupujúci atmosférický front, ktorý sa časom rozpadá a slabne aj jeho intenzita.

### 2. TEORETICKÉ POZNATKY

Atmosférický front je niekoľko stoviek až tisícok kilometrov dlhá vrstva vzduchu oddeľujúca dve vzduchové hmoty s rozdielnymi vlastnosťami. Pozdĺž frontu môže mať táto vrstva tisíce kilometrov a vertikálne stovky metrov, niekedy 1 až 2 kilometre. Frontálna plocha je voči vodorovnej rovine naklonená najviac 1 stupeň. Pri prechode z jednej vzduchovej hmoty do druhej cez atmosférický front sa menia hodnoty meteorologických prvkov skokovito. Rozpad frontu nastáva pri vyrovnaní vlastností vzduchových hmôt, ktoré front oddeľoval.

Studený front vzniká, keď sa studená a ťažšia masa vzduchu podsúva pod teplú, ľahšiu a núti teplý vzduch stúpať. Studený vzduch nahradí teplý pri zemskom povrchu. Pri stúpajúcom teplom a vlhkom vzduchu, ktorý chladne a kondenzuje, sa vyskytuje dážď, občasne aj búrky. Rozlišujeme 2 druhy studených frontov.

Studený front 1. druhu sa prejavuje vertikálnymi výstupmi teplého vzduchu, ktorý sa vo výške rozteká a postupuje šikmo po celej frontálnej ploche. Pred frontom vznikajú pri vertikálnom výstupe vzduchu oblaky typu kumulonimbus, za frontom pri šikmom výstupe vzduchu oblaky typu nimbostratus, altostratus, cirrostratus, cirus. Tento typ studeného frontu

prechádza našim územím zväčša v zimnom období, spôsobuje trvalé zrážky alebo prehánky a na šírku môže merať aj cez 1000 kilometrov.

Pri studenom fronte 2. druhu pozorujeme väčšinou len vertikálny výstup teplého vzduchu s oblakmi typu kumulonimbus. Tento typ je pre strednú Európu typickejší a vyskytuje sa najmä na jar a jeseň. Jeho postup je razantnejší a samotný studený front 2. druhu prichádza v podobe hradby búrkových oblakov, ktoré v lete môžu dosahovať výšku ďaleko nad 10km.

Počasiu studeného frontu sa prejavuje najmä na jeho čele a za ním, na rozdiel od teplého frontu, kedy sa jeho charakteristické počasie prejavuje hlavne pred čiarou frontálneho rozhrania. Počasie, ktoré nastane počas prechodu frontu veľmi závisí od rozdielu teplôt vzduchovej hmoty pred a za frontálnym rozhraním, ale takisto tu hrá dôležitú rolu ako ročná, tak aj denná doba.

Teplý front vzniká, ak sa teplá a vlhká masa vzduchu nasunie nad studenú a pomaly ju odtláča. Ako teplá vzduchová masa rastie, väčšinou kondenzuje a vytvára vrstevnatý systém oblačnosti typu cirus, cirrostratus, altostratus a nimbostratus. Rozsiahla vrstevnatá oblačnosť je pre teplý front charakteristická a z toho vyplýva aj typ zrážok, ktoré z takejto oblačnosti vypadávajú. Jedná sa o trvalé zrážky vo forme sneženia, dažďa, mrholenia alebo ich kombináciu.

Približne 500 kilometrov pred prechodom frontálnej čiar je možné pozorovať prvé zrážky trvalého charakteru padajúce nad rozsiahlym územím. V letectve predstavuje teplý front počas celého roka problém. V prízemných hladinách prináša vždy zhoršenie počasia, najmä nízku oblačnosť a zhoršenú dohľadnosť, čo znemožňuje lietanie za podmienok VMC (Visual Meteorological Conditions – podmienky lietania za vonkajšej viditeľnosti) a sťažuje lietanie za podmienok IMC (Instrument Meteorological Conditions – podmienky lietania podľa prístrojov).

Oklúzny front súvisí s vývojom tlakovej níže a jej frontálneho systému. Prednú časť teplého sektoru tvorí teplý front, postupujúci pomalšie (približne 50 km/h) a zadnú časť zase studený, rýchlejší (približne 80 - 100 km/h). Studený front sa tým pádom počas vývoja cyklóny približuje k teplému frontu a začína s ním splyvať. Deje sa tak najskôr od stredu tlakovej níže a ďalej pokračuje smerom k jej okrajovým častiam.

Teplý vzduch, vymedzený frontálnymi plochami teplého a studeného frontu, je týmto postupným uzatváraním teplého sektora vytesňovaný smerom nahor. V momente, keď sa obe frontálne plochy stretnú, pri zemi je už iba studený vzduch a do výšky bol vytlačený vzduch teplý. Oklúzny front sa niekedy prejavuje viacej ako teplý front, inokedy sa viac podobá na front studený.

### 2.1. DOHĽADNOSŤ

Pre letecké účely je za dohľadnosť považovaná najväčšia vzdialenosť, na ktorú je možné spoľahlivo vidieť a rozoznať na svetlom pozadí čierny predmet vhodných rozmerov umiestnený na zemi. V noci je to najväčšia vzdialenosť, na ktorú vie pozorovateľ spoľahlivo rozoznať na neosvetlenom pozadí svetlá so svetivosťou približne 1000 cd. Pri vizuálnom určovaní dohľadnosti sa využívajú reálne objekty.

Najväčší vplyv na dohľadnosť má obsah vlhkosti a rôznych tuhých častí v atmosfére, vďaka ktorým je svetlo rozptyľované. Dohľadnosť takisto ovplyvňujú padajúce zrážky vo forme dažďa, hmly, mrholenia, sneženia alebo prehánok.

Hmla je meteorologický jav, pri ktorom je dohľadnosť nižšia ako 1000 metrov a tvorí sa pri relatívnej vlhkosti vzduchu blízkej sa k 100%. Podľa spôsobu tvorby a príčin ich vzniku, môžeme hmly rozdeliť na:

- Radiačné hmly - typ hmiel, ktoré sa nad pevninou miernych zemepisných šírok vyskytujú najčastejšie. Postup vzniku hmly je nasledovný: za pokojnej jasnej noci sa vyžarovaním ochladzuje zemský povrch a od neho postupne aj prízemné vrstvy vzduchu. Ak je vzduch dostatočne vlhký, klesne jeho teplota na teplotu rosného bodu. Ďalším ochladzovaním nadbytočné množstvo vodnej pary kondenzuje a tvorí sa hmla.
- Advekčné hmly sa tvoria pri prúdení teplej a vlhkej vzduchovej hmoty nad studenším povrchom. Teplota zemského povrchu musí byť nižšia, ako je teplota rosného bodu vzduchu, v ktorom vodná para kondenzuje. Hmly takéhoto typu sa vyskytujú zväčša v prímorských oblastiach pri prúdení vlhkého vzduchu nad chladnejším morom.
- Frontálne hmly obvykle vznikajú pred teplým frontom. Zrážky vypadávajú z teplej vzduchovej hmoty do chladnejšej a hmla sa tvorí tak, že tekuté zrážky padajú cez vrstvu vzduchu so zápornou teplotou. Pokles tlaku pred frontom spôsobuje adiabatickú expanziu, teda aj pokles teploty. Napriek tomu silnejšie zrážky a vietor pred frontom hmly rozpúšťajú tým, že vietor premiešava vzduch a zrážky vyplávajú z ovzdušia kvapôčky hmly. Hmla tohto typu väčšinou trvá iba niekoľko hodín.

- Zafrontálne hmly môžu vzniknúť za teplým frontom tak, že teplá vzduchová hmota prúdi nad studeným povrchom a tvorí sa advekčná hmla. Ak napadne pred frontom sneh a za frontom sa vyjasní, môže byť takáto advekčná hmla zosilnená radiačným ochladzovaním a vznikne advekčne – radiačná hmla.

Zákal je jav, ktorý spôsobujú veľmi malé, okom neviditeľné častice rozptýlené vo vzduchu. Často sa vyskytuje v priemyselných oblastiach a dohľadnosť sa pri ňom pohybuje okolo 5 až 2 kilometre a od dymna ho vieme rozlíšiť podľa toho, že relatívna vlhkosť vzduchu nie je zvýšená nad 70 až 80%.

Dymno spôsobuje prítomnosť mikroskopických kvapôčok vody vo vzduchu, čo sa prejaví zvýšením vlhkosti vzduchu. Ak sa pri západe alebo východe Slnka pozeráme cez takúto vrstvu, má sýtočervenú farbu. Dohľadnosť pri dymne býva väčšinou 1 až 2 kilometre. Ak dohľadnosť klesá pod 1000 metrov, hovoríme už o hmle.

Zrážky ovplyvňujú dohľadnosť v závislosti od ich intenzity a kvality. Snehové prehánky, hlavne na jar pri vyšších teplotách a silnej konvekčii, pri ktorých padajú veľké snehové vločky, sú pre letectvo najneprijemnejšie. V takýchto prehánkach môže dohľadnosť poklesnúť aj na niekoľko desiatok metrov a viditeľnosť z kabíny lietadla je skoro nulová. Pri tekutých zrážkach býva výhľad z kokpitu zhoršený pri hustom mrholení alebo pri daždi.

### 2.2. METAR

METAR z anglického „Meteorological Terminal Air Report“ je pravidelná meteorologická správa používaná pre letiská, letové prevádzky a pilotov, štandardizovaná podľa ICAO, vďaka čomu sú porozumiteľné po celom svete. Tieto správy sú na Slovensku vykonávané každú pol hodinu na letiskách Bratislava, Piešťany, Žilina, Tatry a Košice a poskytujú informácie o aktuálnych meteorologických podmienkach a javoch na danom letisku. V správe METAR je zakódovaných množstvo informácií, vrátane teploty, vetra, oblačnosti, dohľadnosti a tlaku. Všetky informácie v tejto správe sú kódované v skratkách a v určitom poradí.

### 3. METODIKA SKÚMANIA

Na základe informácií poskytnutých Slovenským hydrometeorologickým ústavom, sa budeme v tomto článku zaoberať dohľadnosťou pri prechode jednotlivých frontálnych rozhraní na letiskách Žilina (LZZI), Poprad - Tatry (LZTT) a Košice (LZKZ) v 5 ročnom období, medzi rokmi 2017 až 2021. Analýza sa bude zameriavať na správy METAR, konkrétne na dni, kedy sme zaznamenali postup frontálneho rozhrania cez naše územie. Túto informáciu sme vyčítali z mapiek prízemných tlakových polí, ktoré sú archivované v „Bulletin Meteorológia a Klimatológia“ uverejňované mesačne Slovenským hydrometeorologickým ústavom. Za každý deň v mesiaci sa tu nachádza fotka prízemného tlakového poľa z daného dňa, kde môžeme postupujúce fronty vidieť a určitý typ frontu o aký sa jedná. Správ METAR za 5 ročné obdobie bolo celkovo 262 000, ale my budeme analyzovať len časové úseky, kedy front postupoval cez územie Slovenska alebo zasahoval do jeho okrajových častí.

Pre účely výskumu sme sa zamerali na tri slovenské letiská: Žilina, Poprad - Tatry a Košice. Žilinské letisko bolo vybrané ako hlavné, z dôvodu pilotného výcviku. Ďalej letisko Poprad - Tatry a Košice preto, že sú od seba dostatočne vzdialené na to, aby bolo možné pozorovať rozpad frontu, prípadne zmenu v dohľadnosti pri jeho postupe.

#### 4. ANALÝZA LETISKA ŽILINA

##### 4.1. Studený front

V mesiacoch november, december, január a február studený front znižoval dohľadnosť hmlou, dymnom a snežením. Pri snežení bol pokles v dohľadnosti kratší (približne na 3-5 hodín), dymno znižovalo dohľadnosť na 5-8 hodín a najdlhšie pretrvávali hmla okolo 10 hodín.

V mesiacoch február, marec a apríl znižovali dohľadnosť dažď so snehom, alebo samotný dažď, miestami dymno. Avšak aj pri prechode frontu spojeného s dažďom sme pomocou správ METAR zanalyzovali, že až v polovici prípadov dažď neznížil dohľadnosť pod 10 kilometrov. Ak dažď spôsobil pokles v dohľadnosti, bolo to väčšinou na 5 hodín, ojedinele na 8 – 12 hodín.

S príchodom letných mesiacov sa studený front skoro neprejavoval a aj s jeho frontom sme len málokedy spozorovali zmeny v dohľadnosti. Mesiace jún, júl, august a september sa vyznačujú pekným letným počasím a z hľadiska dohľadnosti tomu nebolo inak. Za 5 rokov pozorovaní sa za leto znížila dohľadnosť vplyvom studeného frontu ročne v priemere 4 krát, s výnimkou roka 2020, kedy sme pozorovali v mesiacoch jún a júl zhoršené dohľadnosti v skorých ranných hodinách. Asi na tretine frontov, ktoré prešiel územím Slovenska sme pozorovali pokles dohľadnosti pod 1000 metrov na pár hodín. Avšak väčšina studených frontov aj v tomto období prešla cez naše územie bez toho aby zhoršila dohľadnosť pod 9999, teda pod 10 kilometrov. V letných mesiacoch bola dohľadnosť zhoršená prostredníctvom búrok a silného dažďa.

Koniec septembra a mesiace október a november začali so sebou opäť prinášať zhoršovanie v dohľadnosti, ale zmena v zhoršení dohľadnosti nebola pozorovaná tak dlho, ako v zimných mesiacoch. Môžeme teda povedať, že prechodové obdobia sú prechodové aj z hľadiska zhoršovania dohľadnosti. V jesenných mesiacoch zhoršenie dohľadnosti postupom studeného frontu pretrvávalo v priemere 4 – 6 hodín, ale zopár frontov so sebou prinieslo aj dohľadnosť menšiu ako 1000 metrov, pretrvávajúcu pol dňa. S istotou sa však nedá určiť, či nočné hmly boli spôsobené postupujúcim frontálnym rozhraním alebo Vodnou nádržou Žilina, teda zvýšenou vlhkosťou v ovzduší a vhodnými podmienkami pre vznik hmly.

##### 4.2. Teplý front

V zimných mesiacoch december, január a február teplý front znižoval dohľadnosť na dlhšiu dobu ako front studený. Väčšinou to bolo na pol dňa, niekedy až celý deň. Vo väčšine prípadov zníženú dohľadnosť spôsobovalo mrholenie, dymno, dažď alebo dažď so snehom, ojedinele snehové prehánky. Po dôkladnom zanalyzovaní správ METAR sme zistili, že v mesiacoch január a február bolo znižovanie dohľadnosti postupné, no oproti studenému frontu pretrvávalo o niečo dlhšie.

V letných mesiacoch sme pozorovali najmenší počet teplých frontov, ktoré prešli cez územie Slovenska a vo väčšine prípadov sa pri ich postupovaní neznížila dohľadnosť pod 10 kilometrov, avšak v ojedinelých prípadoch, hlavne v noci spôsoboval teplý front zhoršenie dohľadnosti aj pod 1 kilometer. Správy METAR ukázali, že pri postupe teplého frontu cez naše územie boli na letisku Žilina pozorované prehánky a mierny dažď, ktoré ale nespôsobili zníženie dohľadnosti.

##### 4.3. Oklúzny front

Oklúzny front sa vzhľadom na dohľadnosť prejavoval najviac v zimnom polroku, teda v mesiacoch od decembra do marca, kedy dohľadnosť znížil vo všetkých prípadoch na viac ako 14 hodín, najviac však 2 dni. Vo väčšine prípadov bolo zhoršenie dohľadnosti pozorovateľné od 20 do 24 hodín, sprevádzané snežením, dymnom alebo dažďom. Dohľadnosť bola v porovnaní so studeným frontom väčšia, pohybovala sa okolo 2-5000 metrov, no pretrvávalo oveľa dlhšie.

V mesiacoch od apríla do septembra – októbra cez naše územie za 5 rokov prešiel oklúzny front iba 11 krát. Nespôsobil pri tom žiadne signifikantné zmeny v dohľadnosti.

#### 5. ANALÝZA LETISKA POPRAD-TATRY

##### 5.1. Studený front

Na letisku v Tatrách ovplyvňoval studený front dohľadnosť v zimných mesiacoch december, január, február a marec hlavne mrznúcou hmlou, pri ktorej sa dohľadnosť zhoršovala pod 1000 metrov a pretrvávala 10-12 hodín. Ďalej to bolo dymno, ktoré znižovalo dohľadnosť na 4-6 hodín, miestami aj celú noc. Často bolo spojené so snežením, mrholením alebo mrznúcim dažďom, kedy sme pozorovali zhoršenie v dohľadnosti o niečo viac, avšak dohľadnosť bola vždy väčšia ako pri hmla.

Snehové prehánky a sneženie znižovali dohľadnosť menej ako hmla a dymno. Zníženie viditeľnosti sme na základe analýzy správ METAR spozorovali vo väčšine prípadov na 4-8000 metrov. Sneženie pretrvávalo veľa krát celý deň, no znížená dohľadnosť bola zaznamenaná iba v krátkom časovom úseku, zvyčajne 2-3 hodiny, kedy sneženie bolo intenzívne a husté.

V apríli sa najčastejšie vyskytoval mrznúci dažď pri prechode studeného frontu, ktorý ale dohľadnosť pod 10 kilometrov veľmi neznížoval.

V letných mesiacoch sme pri postupe studeného frontu zníženie dohľadnosti pozorovali najmenej. Frontálne rozhranie bolo zvyčajne sprevádzané dažďom alebo búrkou, kedy znížil dohľadnosť na veľmi krátky čas na vzdialenosť približne 5-7 kilometrov, ojedinele okolo 2-3 pri zvýšenej intenzite dažďových prehánok.

V porovnaní s letiskom v Žiline sme prišli na to, že v zimných mesiacoch ovplyvňoval studený front viac počasie a dohľadnosť v Žiline, zatiaľ čo v letnom polroku bol pokles v dohľadnosti vplyvom prechádzajúceho frontu o niečo vyšší na letisku v Poprade.

##### 5.2. Teplý front

Takisto ako studený, aj teplý front ovplyvňoval dohľadnosť na letisku Poprad-Tatry v zimných mesiacoch formou dažďa, dažďa so snehom alebo snežením. Analýzou správ METAR sme zistili, že snehové zrážky ovplyvňovali dohľadnosť najviac. Zhoršená dohľadnosť formou sneženia pretrvávala zo všetkých typov zrážok najdlhšie a väčšinou poklesla na hodnoty okolo 2-5000 metrov.

V letných mesiacoch sa aj na tomto letisku prejavil postupujúci teplý front, ktorý ale nespôsobil žiadne zhoršenie dohľadnosti, ktoré by bolo pre leteckú prevádzku limitujúce, alebo nebezpečné.

Porovnaním analýzy letiska Žilina s letiskom Poprad-Tatry za 5 ročné obdobie sme aj pri teplom fronte spozorovali oveľa menší pokles v dohľadnosti na letisku v Poprade ako na letisku v Žiline. Zatiaľ čo prechodom teplého frontu cez letisko Žilina sa dohľadnosť znížila častokrát pod 10 kilometrov, v Poprade dohľadnosť pri prechode tohto frontu podľa správ METAR pretrvávala nad 10 kilometrov.

### 5.3. Oklúzny front

Na základe analýzy správ METAR sme zistili, že takisto ako na letisku v Žiline, aj na letisku Poprad-Tatry zníženie dohľadnosti pretrvávalo najdlhšie práve prechodom oklúzneho frontu, väčšinou snežením, ojedinele dažďom so snehom v zimných mesiacoch. Znížená dohľadnosť pretrvávala okolo 24 hodín, nie však dlhšie ako dva dni. V letných mesiacoch sa oklúzny front na letisku Poprad-Tatry prejavoval búrkovou činnosťou, alebo prehánkami, kedy zhoršenie dohľadnosti bolo pozorované len na veľmi krátku dobu alebo vôbec.

Na jar, v mesiacoch apríl a máj a na jeseň v mesiacoch október, november sa intenzita javov spôsobených oklúznym frontom postupne zvyšovala a zhoršenie v dohľadnosti sme opäť pozorovali čoraz viac ako v lete.

## 6. ANALÝZA LETISKA KOŠICE

### 6.1. Studený front

Fronty, ktoré postupovali od severu alebo východu, znižovali v zimných mesiacoch dohľadnosť na tomto letisku na pomerne dlhú dobu dymnom, hmlou, snežením alebo prehánkami. Môžeme ale s istotou povedať, že frontálnych rozhraní postupujúcich od západu bolo podstatne viac ako tých postupujúcich zo severu alebo z východu Európy, takže dohľadnosť na tomto letisku bola väčšinou času nad 10 kilometrov.

V letných mesiacoch sa studený front na tomto letisku prejavoval veľmi málo, vo forme prehánok a krátkych búrok. V jarných a jesenných mesiacoch sa pri prechode studeného frontu znižovala dohľadnosť postupne, no jej zhoršenie pod 10 kilometrov netrvalo až tak dlho ako v zime.

### 6.2. Teplý front

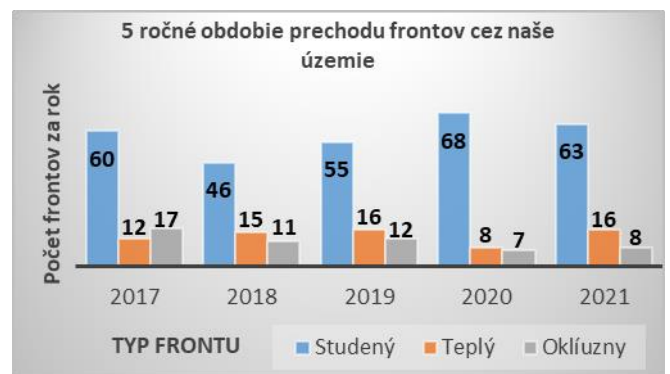
Teplý front sa v zimných mesiacoch prejavoval vo forme dažďa, mrholenia a dažďa so snehom. Tak, ako pri studenom fronte, aj pri prechode teplého frontu sme v niektorých prípadoch spozorovali na letisku Košice v zimných mesiacoch veľmi dlhé zníženie dohľadnosti hmlou a dymnom, ktoré pretrvávali dva

dni. Nie je isté, či bola znížená dohľadnosť zapríčinená práve postupujúcim frontálnym rozhraním, no podľa klesajúceho tlaku s príchodom frontu a jeho zotrvaní po prechode sa domnievame, že aj takéto dlhodobé zhoršenie dohľadnosti bolo ovplyvnené teplým frontom.

Takisto sme tu pozorovali s teplým frontom sneženie vo forme SG (snehové krúpy), ako na jedinom z troch analyzovaných letísk. Výskyt tejto formy sneženia sme pozorovali ako pri teplom, tak aj studenom fronte a nevenovali sme tomu veľkú pozornosť, keďže dohľadnosť samostatne znižovala na maximálne 6-7000 metrov a skoro vo všetkých správach METAR bola sprevádzaná s dymnom alebo hmlou, ktoré znižovali dohľadnosť na letisku omnoho viac.

### 6.3. Oklúzny front

Ako pri studenom a teplom fronte, aj oklúzia sa prejavovala na Košickom letisku podobne. V zimných mesiacoch boli prejavy frontu sprevádzané snežením, dažďom, ich kombináciou, prípadne hmlou alebo dymnom. V lete to boli búrky a prehánky, ktoré neznižovali dohľadnosť skoro vôbec.



Obrázok 1 – 5 ročné obdobie frontov cez územie SR.

## 7. ZÁVER

Pomocou Bulletinov publikovaných Slovenským hydrometeorologickým ústavom sme zistili, ako často prechádzajú jednotlivé frontálne rozhrania cez územie Slovenska. Porovnaním výsledkov so správami METAR sme zistili, ako jednotlivé fronty ovplyvňujú dohľadnosť na letiskách v Žiline, Poprade a Košiciach.

V tejto práci sme sa bližšie pozreli na atmosféru, priblížili sme si jednotlivé fronty a dohľadnosť.

Najviac fronty ovplyvňovali dohľadnosť na letisku v Žiline formou hmly a dymna. S istotou vieme povedať, že frontálne rozhrania mali najväčší vplyv na dohľadnosť v zimných mesiacoch od novembra do marca. Snažili sme sa týmto výskumom dokázať, že jednotlivé frontálne rozhrania naozaj znižujú dohľadnosť, ktorá je pre letectvo veľmi dôležitým meteorologickým faktorom.

## Referencie

- [1] KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN isbn8072044478.

- [2] NEDELKA, Milan. Prehľad leteckej meteorológie. Bratislava: Alfa, 1984.
- [3] ZVEREV, Aleksej Semenovič. Synoptická meteorologia: celoštátna vysokoškolská učebnica pre matem.-fyz. a prírodoved. fakulty vysokých škôl. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia matematicko-fyzikálnej literatúry.
- [4] Učebnice pilota 2019: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost. Cheb: Svět křídel, 2019. ISBN 978-80-7573-049-7.
- [5] DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie 2017. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [6] LEXMANN, Eugen. Meteorológia pre športového pilota. 2. dopl. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia dopravnej literatúry.



## OPTIMIZATION OF GROUND HANDLING PROCESSES AT KSC AIRPORT

**Zuzana Baštáková**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Ján Rostaš**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Content of this professional article is to describe ground handling processes at the airport in Košice. The main goal is to optimize ground handling with an emphasis on their efficiency not only from the point of view of the range and quality of services provided, but also their correct timing. At the beginning of the article, I describe ground support equipments as well as all related activities that must be performed by handling workers to ensure the smooth operation of the airport and the satisfaction of air carriers, including their passengers. Part of the work is the analysis of technical parameters and functionalities of the equipment and technologies used on apron. The next part is devoted to the description and analysis of the system of ground handling at Košice airport. The last part will belong to the issue of process improvement with the identification of proposed changes leading to more efficient ground handling.*

### Keywords

*ground handling, optimization, processes, analysis, Košice International Airport, handling*

### 1. ÚVOD

Problematika optimalizácie systému pozemnej obsluhy lietadiel je v súčasnosti predmetom záujmu viacerých leteckých spoločností, poskytovateľov handlingu a v neposlednom rade aj samotných letísk. Letiská ako hlavní poskytovatelia týchto služieb sa s tým stretávajú na dennej báze. S rýchlym rozvojom civilného letectva sa počet letov na letiskách neustále zvyšuje a nízka efektívnosť letových pozemných služieb sa stala jedným z hlavných dôvodov meškania letov. Získanie presného popisu siete letových pozemných služieb má veľký význam pre efektívnu a bezpečnú prevádzku letísk.

Cieľom článku je identifikovať a analyzovať nové metódy, ktoré by zlepšili kvalitu a odrážali zefektívnenie služieb pozemnej obsluhy lietadiel. Na základe zistených skutočností sa analýza bude zaoberať skrátením času potrebného na vykonanie všetkých činností pozemnej obsluhy lietadla.

Článok pozostáva z troch hlavných častí. V prvej časti sa budeme venovať opisu služieb pozemnej obsluhy, vysvetlíme si pojem „Turn-around Time“ a popíšeme prostriedky, ktoré sa využívajú pri odbavovaní lietadiel na letisku. V druhej časti identifikujeme súčasný stav pozemnej obsluhy na letisku Košice. Na začiatku charakterizujeme letisko Košice a následne prejdeme na opis odbavovania lietadiel. Tretia časť sa zameriava na analýzu a optimalizáciu procesov pozemnej obsluhy na letisku Košice.

### 2. SLUŽBY POZEMNEJ OBSLUHY

Súbor aktivít súvisiacich s lietadlom na pohybových a odstavných plochách letiska a jeho prípravou na ďalší let sa označuje ako pozemná obsluha, pozemné podporné vybavenie a prevádzka na letiskovej ploche. Zamestnanci pozemnej obsluhy začínajú pracovať na príprave lietadla hneď, ako pristane a dorazí na stojisko. [1]

Po pristátí sa lietadlo pohybuje po rolovacích dráhach na miesto, ktoré sa nazýva stojisko. Po navedení lietadla na stojisko a jeho

zastavení je medzi prvými procedúrami odbavenia lietadla potrebné umiestniť pod kolesá podvozku zakladacie klíny. Vo väčšine prípadov sa jedná len o zaistenie kolies predného podvozku. Tie zabraňujú samovoľnému pohybu lietadla po odbavovacej ploche v prípade zlyhania brzd. Bez tohto úkonu sa lietadlu nemôže priblížiť žiadne vozidlo GSE. Nasleduje rozmiestnenie výstražných kužeľov okolo lietadla, ktoré majú za úlohu zvýraznenie dôležitých častí lietadla, okolo ktorých sa často odbavovacia technika pohybuje, ako je napríklad koniec krídel alebo motory, aby sa zabránilo novej kolízii s týmito miestami.

Následne dôjde k prisunutiu schodov alebo nástupného mosta, ktorý slúži k vystupovaniu alebo nastupovaniu cestujúcich, či posádky. Cestujúci sa presúvajú buď pomocou autobusu alebo idú vo vyhradených koridoroch pešo do terminálu. Z hľadiska bezpečnosti sa uprednostňuje prevoz cestujúcich autobusmi tam, kde nie sú nástupné prsty. Vo výnimočných prípadoch sa vystupujúci cestujúci pohybujú pešo pokiaľ je vstup do terminálu umiestnený veľmi blízko a nehrozí žiadne nebezpečenstvo. Zamestnanci pozemnej obsluhy ďalej zabezpečia aby bolo lietadlo pripojené na pozemný zdroj energie. Pozemná energetická jednotka (angl. Ground Power Unit – GPU) je spravidla vozík alebo vozidlo s nadstavbou, ktorý dodáva lietadlu elektrickú energiu, môže byť kombinovaný s klimatizačným systémom.

Nasleduje proces vykládky batožiny a nákladu alebo pošty z batožinových a nákladných priestorov. Po vyložení všetkých kufrov a nákladu sa okamžite začína s nakládkou na ďalší let. Upratovací tím následne lietadlo dôkladne vyčistí vrátane dezinfekcie. Dôkladné čistenie a dezinfekcia celého lietadla je potrebná na prevenciu šírenia infekčných chorôb.

Súčasťou odbavenia lietadla je aj doplnenie paliva. To môže byť plnené buď z hydrantového systému zabudovaného pri každom stojisku, alebo pomocou mobilných cisterien, ktoré prídu ku krídlu lietadla. V prevažnej väčšine prípadov sa v súčasnosti používa tlakové plnenie paliva zo spodnej časti krídel. Súčasne s

týmto úkonmi prebieha aj doplňovanie jedál a nápojov (súhrnne nazývané aj ako catering) na ďalší let. Počas servisu lietadla môže personál pozemnej obsluhy naplniť nádrže lietadla pitnou vodou. Táto voda sa na palube lietadla používa na rôzne účely vrátane pitia, varenia a umývania. V niektorých prípadoch môžu letecké spoločnosti poskytovať cestujúcim počas letu aj balenú vodu alebo iné nápoje. Tieto nápoje sa zvyčajne nakladajú do lietadla v rámci cateringu.

Posledná činnosťou je technická kontrola lietadla (tzv. walk around) a ak je všetko v poriadku, je lietadlo pripravené na štart. Dochádza k uzatvoreniu nákladového priestoru, po nastúpení cestujúcich a posádky sa zatvárajú aj dvere kabíny a dôjde k odtiahnutiu schodov či nástupných mostov. Lietadlo sa odpojí od pozemného zdroja elektrickej energie a je pripravené na začatie rolovania (ak je to povolené vlastným pohonom lietadla) alebo pomocou takzvaného ťahača je lietadlo vytlačené zo stojiska (angl. push-back). [2]

### 2.1. Prostriedky pri odbavovaní lietadla

Na odbavovacej ploche využívajú handlingové spoločnosti pri odbavení lietadla mnoho druhov pozemného podporného zariadenia. Pozemné podporné zariadenia sa primárne používajú na obsluhu lietadiel na odbavovacej ploche alebo pre údržbu lietadla v hangári. Použité GSE a ďalšie vybavenie sa líšia podľa typu lietadla, druhu stojiska a požiadaviek na obsluhu lietadla. Medzi pozemné podporné zariadenia patria napríklad pozemná energetická jednotka (GPU), schody, push-back, klimatizačné jednotky, nástupný mostík, vodné, toaletné, odmrazovacie a cateringové autá, pásové nakladače a cisterna.



Obrázok 1 - Pozemná energetická jednotka

- Pozemná energetická jednotka sa používa na dodávku energií do lietadla pri parkovaní na zemi.
- Ťahač sa používa na vytlačenie (tzv. push-back) lietadla zo stojiska alebo ťahanie (tzv. towing), premiestňovanie lietadla po pozemných prevádzkových plochách bez spustených pohonných jednotiek, napr. na pravidelnú údržbu a opravu alebo hangárovanie.
- Schody slúžia na vystupovanie a nastupovanie cestujúcich a posádky alebo pre ostatných členov pozemnej obsluhy lietadla, ktorí majú prístup na palubu lietadla. Jedná sa o napr. upratovaciu službu, handlingových supervízorov a pod.. Pristavujú sa k lietadlám len vtedy, pokiaľ to požaduje letecká spoločnosť alebo lietadlo parkuje na odľahlých státiach bez nástupného mosta, nemá svoje vlastné schody alebo chce využiť viac dverí pre vystupovanie a

nastupovanie cestujúcich za účelom urýchlenia pozemného odbavenia lietadla.

- Nástupný mostík pre cestujúcich je špeciálny tubus ktorý chráni cestujúcich pri nastupovaní alebo vystupovaní pred poveternostnými vplyvmi (v lete zabezpečuje klimatizáciu týchto uzatvorených priestorov), predstavuje vyvýšenú a pohyblivú chodbu, ktorá sa pripojí od terminálu letiska (priamo zo vstupnej brány nazývanej aj ako gate) k vstupným dverám lietadla.
- Klimatizačná jednotka sa používa na ohrev, resp. chladenie vzduchu do lietadla pri parkovaní na zemi.
- Pásové nakladače sa využívajú na nakladanie a vykladanie batožín z nákladných priestorov lietadla. Pre vysoké a širokotrupé lietadlá sa na prekonanie výškových rozdielov a pohodlnú manipuláciu s kontajnermi alebo paletami používajú nožnicové nakladače. Pozostávajú z nožnicového zdvíhania plošiny nainštalovanej na podvozku nákladného vozidla. Podvozok je vybavený hydraulicky výsuvnými podperami, ktoré zabezpečujú jeho stabilitu počas prevádzky.
- Cisterna slúži na plnenie požadovaného množstva paliva do nádrží lietadla cez plniace otvory v krídlach. Na letiskách môže byť zabudovaný centrálny rozvod paliva s hydrantovým systémom na každom stojisku, v tomto prípade je potrebné len menšie prečerpávacie vozidlo. Výhodami zabudovaného palivového rozvodu je zvýšenie bezpečnosti, priestoru okolo lietadla, zníženie prevádzky v okolí lietadla a opotrebenia komunikácií na odbavovacích plochách. Tento systém však musí byť spoľahlivý, aby nedošlo k jeho výpadkom a tým znemožneniu tankovania lietadiel. [3]

## 3. POZEMNÁ OBSLUHA NA LETISKU KOŠICE

### 3.1. Letisko Košice

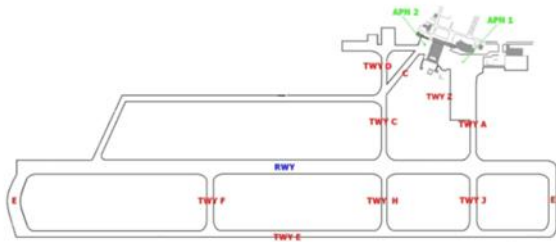
Letisko Košice je druhým najväčším medzinárodným letiskom na Slovensku z hľadiska počtu pravidelných liniek, aj počtu ročne prepravených cestujúcich. Nachádza sa v mestskej časti Barca, asi 6 kilometrov od centra mesta Košice. [4]

Letový poriadok letiska Košice sa líši v zimnom a letnom období. Letové poriadky znamenajú plánované časy priletov a odletov na letisku lietadiel prepravujúcich cestujúcich na pravidelnej alebo charterovej linke. Komerčné letiská môžu byť preplnené najmä počas obdobia, ako je letná dovolenková sezóna. V letnom období je väčší záujem o leteckú prepravu hlavne vo forme charterových letov. Význam charterového letu je veľmi odlišný od pravidelného letu. Pre charterový let je charakteristické, že nie je publikovaný v cestovných poriadkoch, väčšinou si takéto lety prenajímajú cestovné kancelárie, kedy sa jedná o prenájom celého lietadla (resp. celej sedadlovej kapacity lietadla). Nastavenie harmonogramu a časov odletov a priletov vrátane výberu, zostáva v kompetencii objednávateľa, teda cestovnej kancelárie, podlieha však schváleniu leteckej spoločnosti z pohľadu prevádzkových špecifikácií lietadla a kvalifikácie posádky. [5]

Letisko sa využíva hlavne na civilnú vnútroštátnu dopravu, medzinárodnú osobnú a nákladnú dopravu. Na letisku Košice sa



nachádzajú dve vybavovacie plochy. Pravidelné a charterové linky využívajú APN 1, pre všeobecné letectvo je vyhradené APN 2. Povrch je bitumenový. [6]



Obrázok 2 - Mapa letiska

Na obrázku 2 je vyznačená mapa letiska s jednou vzletovou a pristávacou dráhou (angl. Runway – RWY), rolovacími dráhami (angl. Taxiway – TWY) a dvoma vybavovacími plochami, označené ako APN 1 a APN 2. Vybavovacia plocha (angl. Apron - APN) je parkovacia plocha lietadla (nazývaná aj ako stojisko), ktorá sa bežne nachádza mimo pristávacej alebo vzletovej a rolovacej dráhy letiska. Je to miesto, kde cestujúci buď nastupujú alebo vystupujú z lietadla a kde zamestnanci pozemnej obsluhy nakladajú a vykladajú batožinu a náklad. Vybavovacia plocha je miesto, kde sa odohrávajú všetky činnosti pozemnej obsluhy. Na vybavovacej ploche košického letiska sa nachádza 12 stojísk, 3 alternatívne stojiská a 5 stojísk pre vrtuľníky, určených pre státie lietadiel. Konkrétne stojisko prilietavajúcemu lietadlu určí pracovník prevádzkového dispečingu letiska na základe technickej charakteristiky lietadla, typu letu, priestorových možností lietadla, času obratu lietadla či prideleného východu pre nastupujúcich cestujúcich. [7]

### 3.2. Odbavenie lietadiel

Zamestnanci pozemnej obsluhy na letisku Košice musia byť oboznámení a vyškolení v zmysle „Smernice pre činnosť oddelenia pozemnej obsluhy lietadiel.“ Smernica určuje jednotné postupy pre pozemné technické vybavenie lietadiel, poskytuje usmernenia pre činnosť pozemnej obsluhy a pokrýva témy ako odbavovanie a nakladanie lietadiel, odbavovanie batožiny, nákladu a pošty, tankovanie lietadiel a pohyb lietadiel po zemi. Smernica sa pravidelne aktualizuje, aby sa zabezpečilo, že bude odrážať najnovšie postupy a normy. [7]

Bezpečnosť a disciplína s uvedomelou zamestnancov na odbavovacej ploche spolu priamo súvisia. Okrem fyzickej práce musia byť schopní ovládať mnoho pozemných podporných zariadení. Následkom toho sa musia presne dodržiavať postupy, aby nedošlo k žiadnym nežiadúcim problémom. Práca každého zamestnanca na vybavovacej ploche zahŕňa vykonávanie určitých povinností v súlade s bezpečnostnými požiadavkami. Aby bola práca efektívna, je potrebné úplné sústredenie. Ak sa vždy nevenuje maximálna opatrnosť, môže dôjsť k nehodám, ktoré spôsobia škody na majetku alebo zranenia. [8]

Dokonca aj v rámci vybavovacích plôch, ktoré sa týkajú vymedzenej oblasti letiska určenej na umiestnenie lietadiel na účely nakladania alebo vykladania cestujúcich, pošty alebo nákladu, tankovania, parkovania alebo údržby, platia presné predpisy, ktoré sa musia z bezpečnostných dôvodov dodržiavať. Prostredníctvom navrhovania infraštruktúr, navrhovania špecifických postupov (ako je napríklad osvedčovanie vodičov, pokynov na správne používanie vybavenia atď.) a práce

Bezpečnostného výboru dôsledne znižuje riziko nehôd v oblasti APN.

### 3.3. Kategórie lietadiel

Lietadlá sa delia podľa rôznych kritérií. Existuje niekoľko spôsobov, ako identifikovať lietadlá podľa typu. Primárny rozdiel je medzi tými, ktoré sú ľahšie ako vzduch a tými, ktoré sú ťažšie ako vzduch. Lietadlá ľahšie ako vzduch, ako sú balóny, vzducholode sú navrhnuté tak, aby vo svojej konštrukcii obsahovali dostatočný objem, ktorý po naplnení plynom ľahším ako vzduch (ohriaty vzduch, vodík alebo hélium) vytlačí okolitý vzduch a vznáša sa. Lietadlo ťažšie ako vzduch musí mať zdroj energie na zabezpečenie ťahu potrebného na dosiahnutie vztlaku. Delenie môže byť taktiež podľa fyzikálnych a technických princípov, napríklad podľa výkonov, spôsobu použitia, či podľa rýchlosti letu. [9]

Na letisku Košice sa najviac používajú prúdové lietadlá, najčastejšie Boeing 737 alebo Airbus 320. Sú to lietadlá prioritne určené pre stredné trate. Boeing 737 využíva Ryanair, ktorý prevádzkuje linky do Londýna, lietadlá Airbus A320 zase využíva Wizz Air, ktorý pravidelne lieta do Prahy alebo do Londýna. Austrian Airlines využívajú lietadlá Embraer 195 prevažne pre letecké spojenie s Viedňou.

## 4. CIELE A METODIKA PRÁCE

Hlavným cieľom článku je identifikovať, zosumarizovať a následne analyzovať nové metódy, ktoré by zlepšili kvalitu a odrážali zefektívnenie služieb pozemnej obsluhy lietadiel.

Na začiatku praktickej časti bolo potrebné si vybrať leteckú spoločnosť.

Po rozhovore s vedúcou osobou a po vyhľadaní leteckých spoločností na stránke košického letiska sme si vybrali leteckú spoločnosť Wizz Air. Z poskytnutého podkladu sme si vytvorili tabuľku odporúčaných časov procesu odbavenia lietadla. Na základe letového poriadku na letisku Košice sme si vybrali konkrétny let. Po vybratí konkrétneho letu sme mohli začať s pozorovaním.

Pozorovanie sme doplnili o rozhovor so zainteresovanými stranami, čo nám poskytlo viac informácií o danej problematike. Zvolili sme si neštruktúrovaný rozhovor. Uskutočnil sa v počiatočných fázach výskumu, kde sme si vybrali respondenta na základe jeho schválenia.

Po zozbieraní potrebných podkladov prostredníctvom pozorovania a rozhovoru sme prešli na záznam dát a následne na porovnanie daných subjektov.

## 5. OPTIMALIZÁCIA PROCESOV POZEMNEJ OBSLUHY

Rôznorodosť leteckej techniky a vybavenia leteckých spoločností, rýchly rozvoj technológií, znižovanie čakacích hodín, vysoká vyťaženosť letísk ovplyvňuje efektivitu procesu odbavovania lietadiel na letisku. Ide o navrhovanie postupov na optimalizáciu využívania dostupných zdrojov na zvýšenie efektívnosti systému pozemnej obsluhy lietadla. S rýchlym rozvojom civilného letectva sa počet letov na letiskách neustále zvyšuje a nízka efektívnosť letových pozemných služieb sa stala jedným z hlavných dôvodov meškania letov. Získanie presného

popisu siete letových pozemných služieb má veľký význam pre efektívnu a bezpečnú prevádzku letísk.

Pozemná obsluha, ako jadro prevádzky letiska, pozostáva zo série servisných uzlov, ako je nástup cestujúcich, nakladanie batožiny a tankovanie paliva. Vykonáva sa medzi príchodom lietadla na letisko a vzletom. Tieto uzly tvoria sieť služieb s jednou alebo viacerými komplexnými závislosťami. V podmienkach letovej prevádzky s vysokou hustotou sa interval medzi dvoma letmi na letisku neustále znižuje. V dôsledku toho, ak dôjde k meškaniu v jednom letovom uzle pozemnej služby, spôsobí to nielen meškание tohto letu, ale aj sériu meškání v nasledujúcich letoch, čo následne spôsobí, že pasažieri budú čakať s úzkosťou a dokonca to spôsobí nebezpečné incidenty. Presný popis siete letových pozemných služieb má preto veľký význam pre efektívnu a bezpečnú prevádzku letísk. [10]

### 5.1. Analýza procesu

Dôležitý ukazovateľ výkonnosti leteckých spoločností sa týka miery časovej výkonnosti (ang. On Time Performance – OTP). OTP je cenným ukazovateľom spoľahlivosti pre letecké spoločnosti. Spokojnosť zákazníkov je ovplyvnená ich očakávaniami a let, ktorý príde po plánovanom čase príchodu, môže byť pre cestujúcich stresujúcim zážitkom. Každý typ lietadla a letecká spoločnosť majú zadaný minimálny čas potrebný na zabezpečenie kompletnej pozemnej obsluhy. Čas závisí od počtu a zložitosti procesov, ktoré je potrebné vykonať. Prevádzkový čas bude dlhší pre väčšie lietadlá alebo letecké spoločnosti poskytujúce doplnkové služby pre cestujúcich. [11]

Jedným z krokov, ktoré možno realizovať na dosiahnutie vysokej miery OTP, je zvýšenie výkonu procesov pozemného odbavenia lietadla. Pozemné odbavenie lietadiel sa skladá z mnohých činností, ako je catering, dopĺňanie paliva, údržba, odbavenie cestujúcich, odbavenie batožiny a ďalšie. Ak sa jedna z týchto služieb kedykoľvek oneskorí, ovplyvní to celú činnosť pozemnej obsluhy

Existuje veľa príčin, ktoré by mohli ovplyvniť oneskorenie služieb pozemnej obsluhy. Komunikácia je kľúčovým faktorom pri dorozumívaní sa medzi pracovníkmi. Turn-around Time sa môže predĺžiť, ak posádka nie je schopná efektívne komunikovať. Ďalšie oneskorenie môže byť spôsobené nedodržiavaním pravidiel, preto štandardizácia a rešpektovanie určitých postupov sú nevyhnutné na zlepšenie času odbavenia lietadla.

Celkový čas odbavenia jedného lietadla je čas, od zastavenia lietadla na stojisku do uvedenia lietadla do pohybu (ang. time from on-block to off-block). Pozostáva z niekoľkých procesov, pri ktorých je potrebný personál a prostriedky na vykonanie pozemnej obsluhy. Cieľom zrýchlenia pozemnej obsluhy lietadiel je poskytnúť pozemnú obsluhu, čo najväčšiemu počtu leteckých spoločností a zlepšiť celkové využitie stojísk.

Na analýzu sme si vybrali leteckú spoločnosť Wizz Air. Meškание letu je typickou súčasťou cestovania. Väčšina cestujúcich sa s meškáním stretne a môže to byť pre nich veľmi stresujúce. K meškáním letu môže dôjsť z mnohých príčin, jednou z nich sú extrémne výkyvy počasia, ktoré môžu spôsobiť nielen meškание letov, ale v niektorých prípadoch aj ich zrušenie. Výber leteckej spoločnosti Wizz Air bol zvolený na analýzu vzhľadom na spomenuté meškание letov.

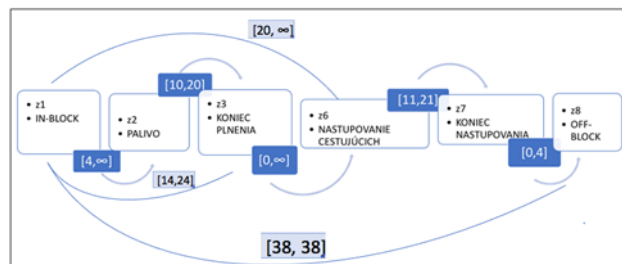
Analýzu sme začali zberom údajov o celom procese pozemnej obsluhy, priamym pozorovaním a rozhovormi so zainteresovanými stranami. Hlavným cieľom bolo porovnanie odporúčaného času, ktorý bol získaný z tréningového manuálu Wizz Air a reálneho času, ktorý bol získaný priamym meraním činnosti.

Premenná	In/off block time	Začiatok činnosti (letecká spoločnosť)	Koniec činnosti (letecká spoločnosť)	Začiatok činnosti (namerané časy)	Koniec činnosti (namerané časy)
z1 (n - blok)	23:39				
z2 (začiatok plnenia)		23:50		23:43	
z3 (koniec plnenia)			0:00		0:03
z4 (začiatok vykladania batožiny)		23:41		23:44	
z5 (koniec vykladania batožiny)			23:52		23:49
z6 (začiatok nastupovania cestujúcich)		23:59		0:01	
z7 (koniec nastupovania cestujúcich)			0:10		0:22
z8 (off-block)	0:31				

Obrázok 3 - Činnosti pozemnej obsluhy

Informácie o odporúčaných časoch a reálnych časoch nameraných na letisku rozdelíme do dvoch skupín ako je znázornené na obrázku 3. V prvej skupine sú informácie a časy definované leteckou spoločnosťou (čas odbavenia a trvanie jednotlivých služieb pozemnej obsluhy). Ide o takzvané "štandardné" časy, ktoré musí dodržiavať pozemná obsluha na každom letisku. V druhej skupine sú reálne časy činností, získané priamym meraním.

Pri dokončení procesu odbavenia lietadla, keď všetci cestujúci sú na palube pol hodiny pred časom odletu, cestujúci začínajú byť netrpezliví. Preto je potrebné stanoviť obmedzenia pre určité činnosti, ako je nástup a výstup cestujúcich. Vystupovanie cestujúcich by sa malo začať čo najskôr po čase príchodu lietadla na stojisko a nástup cestujúcich by sa nemal začať príliš skoro pred časom odletu lietadla. Podľa tréningového manuálu by nástup cestujúcich mal skončiť 4 minúty pred odletom lietadla.



Obrázok 4 - Graf zefektívnenia pozemnej obsluhy

Na obrázku 4 je zobrazený postup, ktorý znázorňuje ideálny priebeh pozemnej obsluhy lietadla A-321 leteckou spoločnosťou Wizz Air. Pri postupe sme použili 6 premenných z tabuľky 4 : z1, z2, z3, z6, z7, z8. Z1 nám predstavuje zastavenie lietadla na letisku (in-block) v čase 23:39. Interval [4, ∞], ktorý leží medzi premennými z1 a z2 značí začiatok plnenia paliva. Tým pádom dopĺňanie paliva môže začať 4 minúty po čase zastavenia lietadla. Doplnenie paliva môže trvať od 10 minút (čas určený leteckou spoločnosťou) do 20 minút (čas určený letiskom). Preto je prechod medzi dopĺňovaním paliva z2 s koncom dopĺňovania paliva z3 obmedzený časmi [10, 20]. Koniec plnenia by nastal v 14. alebo maximálne 24. minúte [14,24]. V našom prípade koniec plnenia v čase 00:03. Odporúčaný čas konca plnenia je 00:00, čo znamená že čas 00:03 je prijateľný. Ďalší interval [20, ∞] značí, že nastupovanie cestujúcich by malo začať najneskôr 20 minút od in-block. Nastupovanie cestujúcich môže trvať od 11. ( čas určený leteckou spoločnosťou) do 21. minút (čas určený letiskom), to nám vytvára interval [11,21]. Po nastúpení cestujúcich, by mal nastať čas pre ďalšie činnosti, ktoré sme v našom príklade neuviedli. Posledná premenná značí uvedenie lietadla do pohybu (off-block). Ako sme spomenuli vyššie, koniec nastupovania cestujúcich by nemal byť skôr ako 4 minúty pred odletom lietadla [0,4]. Ak by sme sa držali tohto postupu, off-block by nastal v 38. minúte. Off-block lietadla by sa mal vykonať presne o 0:17, preto sme pridali interval [38,38] medzi časom z1 a časom z8.

Týmto návrhom riešenia vypočítaný čas sedí s odporúčaným časom z tréningového manuálu. Pri určovaní času činností si musíme uvedomiť, že nie vždy je vhodné vykonať všetky činnosti čo najskôr a čo najrýchlejšie.

## 6. ZÁVER

Optimalizácia procesov je v súčasnosti dôležitá vo viacerých oblastiach priemyslu, vrátane letectva. Umožňuje dosiahnuť najlepšie možné výsledky s využitím dostupných zdrojov. Hlavným cieľom odborného článku bolo nájsť nové spôsoby, ktoré by umožnili zefektívniť proces odbavenia lietadla na letisku Košice.

Účinnosť a efektívnosť činností pozemnej obsluhy má významný vplyv na celkovú výkonnosť leteckých spoločností a letísk. Preto je nevyhnutné optimalizovať činnosti pozemnej obsluhy s cieľom zlepšiť efektívnosť, znížiť náklady a zvýšiť bezpečnosť. Analýzou súčasných postupov a identifikáciou oblastí na zlepšenie bola navrhnutá stratégia na zvýšenie efektívnosti. Návrh spočíval v skrátení času obrátky lietadla, kde sme vytvorili graf zefektívnenia pozemnej obsluhy. Pomocou tohto grafu sme zredukovali nameraný čas obrátky lietadla.

## PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 040ŽU-4/2022** *Transfer progresívnych metód vzdelávania do študijného programu "Technológia údržby lietadiel" a "Letecká doprava"*.

## Referencia

- [1] A Guide to Airport Ramp Operations, Ground Handling and Ground Support Equipment (GSE) [online]. [2020]. [cit. 2023-01-28]

Dostupné na: <https://aviationlearnings.com/ground-handling-ramp-operations-aircraft-ground-support-equipment-gse-machines-that-supplement-the-airplane/>

- [2] Technické odbavenie lietadiel [online]. [2019]. [cit. 2023-02-10] Dostupné na: <https://www.click2claim.sk/technicke-odbavenie-lietadiel>
- [3] SHEIBANI, K. 2020. Scheduling Aircraft Ground Handling Operations Under Uncertainty Using Critical Path Analysis and Monte Carlo Simulation: Survey and Research Directions. Vancouver, 2020. 9 s.
- [4] Základné informácie [online]. [cit. 2023-03-11] Dostupné na: <https://zkosicdosveta.sk/kosicke-letisko/zakladne-informacie/>
- [5] What Is Difference Between Charter Flights And Scheduled Flights? [online]. [2022]. [cit. 2023-03-11]
- [6] Dostupné na: <https://www.stratosjets.com/blog/difference-between-charter-flights-and-scheduled-flights/>
- [7] História [online]. [cit. 2023-03-11] Dostupné na: <https://www.airportkosice.sk/sk/o-letisku/historia>
- [8] [KESAN, M. 2020. Smernica pre činnosť oddelenia pozemnej obsluhy lietadiel 4. vyd. Košice, 2020 41 s.](#)
- [9] Apron safety [online]. [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://www.adr.it/web/aeroporti-di-roma-en/apron-safety>
- [10] Types of aircraft [online]. [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://www.britannica.com/technology/airplane/Types-of-aircraft>
- [11] [CHANG, L. 2022 Sliding window change point detection based dynamic network model inference framework for airport ground service process.](#)
- [12] WHAT IS ON-TIME PERFORMANCE (OTP)? [online]. [cit. 2023-03-12] Dostupné na: <https://www.oag.com/on-time-performance-airlines-airports>



## FUELS FOR CARBON NEUTRALITY IN AVIATION

**Denis Valášek**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Jozef Čerňan**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

Aviation is one of the fastest-growing industries, but its contribution to greenhouse gas emissions cannot be ignored. In recent years, the development of alternative fuels for aviation has gained increasing attention to reduce carbon emissions and achieve carbon neutrality. This thesis provides an overview of the current situation in aviation, focusing on the use of conventional jet fuels and the need for alternatives. Various types of alternative fuels for aviation are presented, including biofuels, synthetic fuels, and hydrogen. The advantages and disadvantages of each type of fuel are analysed, as well as the current production methods and their potential for commercial use. With a greater focus on biobutanol as an alternative fuel.

### Keywords

aviation, alternative fuels, biofuels, synthetic fuels, hydrogen, carbon neutrality, biobutanol

### 1. ÚVOD

Rastúca závislosť na leteckej doprave a s ňou spojený nárast emisií skleníkových plynov je jedným z najväčších výziev, ktorým musíme čeliť, ak chceme dosiahnuť uhlíkovú neutralitu. Preto je dôležité hľadať riešenia, ktoré by umožnili letectvu redukovat' jeho emisie CO<sub>2</sub>.

Jedným z možných riešení je palivo pre uhlíkovú neutralitu. Tento typ paliva je vyrábaný z obnoviteľných zdrojov, ako sú biomasa, odpad alebo dokonca vzduch a voda. Palivá pre uhlíkovú neutralitu majú potenciál znížiť emisie CO<sub>2</sub> o 80-100% v porovnaní s tradičnými fosílnymi palivami.

Okrem toho sú palivá pre uhlíkovú neutralitu kompatibilné s existujúcimi lietadlovými motormi a sú schopné poskytnúť rovnakú výkonnosť ako tradičné fosílna palivá. To znamená, že letectvo by mohlo pokračovať v plnení svojich funkcií, ale s výrazne nižším dopadom na životné prostredie.

Okrem toho, hľadanie alternatívnych palív môže tiež pomôcť zmierniť závislosť na fosílnych palivách a zabezpečiť stabilitu dodávok palív v prípade krízy na trhu s ropou alebo inými fosílnymi palivami.

Ďalším dôvodom, prečo sa hľadajú alternatívne palivá v letectve, je zlepšenie energetickej účinnosti a zníženie nákladov na palivo. Alternatívne palivá môžu byť účinnejšie a ekonomickejšie ako tradičné fosílna palivá.

Alternatívne palivá sa stávajú čoraz dôležitejšími v letectve z dôvodu potreby zníženia emisií oxidu uhličitého a iných škodlivých látok. Hlavnými alternatívnymi palivami sú momentálne biopalivá a vodík.

Biopalivá sú vyrobené z rastlinných olejov, tukov, rastlinnej biomasy a dokonca aj odpadových materiálov. Biopalivá môžu byť vyrobené aj z rastlín, ktoré nie sú určené na výrobu potravín, čím sa minimalizuje konkurencia medzi výrobou potravín a

palív. Biopalivá majú v porovnaní s fosílnymi palivami nižšiu emisiu oxidu uhličitého, ale tiež produkujú iné škodlivé látky, ako napríklad oxid dusný.

Vodíkové palivové články sa tiež stávajú stále populárnejšími v letectve. Vodík sa môže získavať z rôznych zdrojov, ako sú napríklad obnoviteľné zdroje energie alebo vodná elektrolýza. Palivové články využívajú vodu a kyslík na výrobu elektrickej energie, pričom jedinou emisiou je voda.

V súčasnosti sa však používanie alternatívnych palív v letectve stretáva s niekoľkými výzvami, vrátane nákladov na výrobu a zabezpečenie dostatočnej zásoby paliva pre lety na dlhé vzdialenosti. V každom prípade, alternatívne palivá predstavujú dôležitý krok smerom k udržateľnému letectvu a ich vývoj sa bude pravdepodobne rozvíjať v budúcnosti.

S tým sú spojené otázky ako:

- potenciálna certifikácia,
- kompatibilita s konvenčným leteckým palivom,
- manipulácia s palivom v infraštruktúre.

Alternatívne zdroje palív pre leteckú dopravu musia spĺňať základné požiadavky:

- zabezpečená dostatočná zásoba,
- zabezpečená dostatočná dodávka,
- nesmú byť riadené faktorom fosílného paliva,
- zabezpečená dostupnosť paliva.

### 2. UHLÍKOVÝ CYKLUS

Uhlíkový cyklus pre letectvo predstavuje proces, v ktorom sektor leteckej dopravy vypúšťa skleníkové plyny v podobe oxidu uhličitého a vody do atmosféry, ktoré prispievajú k

globálnemu otepľovaniu ak sa hromadia v atmosfére. No to je iba časť cyklu, druhú časť predstavuje spätné odobranie skleníkových plynov pomocou rastlín z atmosféry. Väčšina týchto emisií pochádza zo spaľovania fosílnych palív, ktoré sa používajú na pohon lietadiel, no ak vyrobíme palivá z odpadových produktov rastlín, uzatvoríme tento cyklus.

Uhlíkový cyklus leteckej dopravy môže byť zjednodušene popísaný ako nasledujúci proces:

Fáza 1 - Emisie CO<sub>2</sub>: Lietadlá vypúšťajú oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a iné skleníkové plyny pri spaľovaní fosílnych palív.

Fáza 2 - Vstrebávanie CO<sub>2</sub>: Rastliny a iné organizmy absorbujú CO<sub>2</sub> z atmosféry cez fotosyntézu. Táto fáza je kľúčová pre zníženie množstva CO<sub>2</sub> v atmosfére.

Fáza 3 - Výroba biopalív: Z biomasy sa dajú vyrobiť biopalivá, ktoré môžu byť použité ako alternatíva k fosílnym palivám. Pri spaľovaní biopalív sa uvoľňuje CO<sub>2</sub>, ale táto emisia je vyvážená vstrebávaním CO<sub>2</sub> rastlinami počas ich rastu.

Celkovým cieľom v rámci uhlíkového cyklu pre letectvo je dosiahnutie uhlíkovej neutrality, čo znamená, že emisie CO<sub>2</sub> produkované letectvom by mali byť vyvážené množstvom CO<sub>2</sub>, ktoré sa vstrebáva z atmosféry.

Biobutanol môže byť alternatívnym palivom pre letectvo s potenciálom znížiť emisie skleníkových plynov v porovnaní s tradičným leteckým palivom na báze ropy. Jeho uhlíkový cyklus je pomerne komplexný a zahŕňa viaceré kroky.

Rastliny: Biobutanol sa vyrába z biomasy, najčastejšie z obilnín ako je jačmeň alebo kukurica. Tieto plodiny rastú a absorbujú oxid uhličitý z atmosféry cez proces fotosyntézy.

Zber a spracovanie biomasy: Po zbere biomasy sa táto biomasa spracuje, aby sa získala celulóza, ktorá sa potom pretaví na cukry, ktoré sa môžu ďalej použiť na výrobu biobutanolu.

Fermentácia: Cukry sa potom fermentujú pomocou mikroorganizmov na biobutanol.

Istenie a separácia: Po fermentácii sa biobutanol oddelí od zvyšku fermentu a iných nečistôt.

Distribúcia a skladovanie: Biobutanol sa potom distribuuje do letísk a uloží sa v nádržiach na palivo, podobne ako tradičné letiskové palivá.

### 3. HISTÓRIA

Biopalivá pre letectvo majú relatívne krátku históriu v porovnaní s biopalivami pre iné sektory, pretože letectvo má špecifické požiadavky na palivá, ktoré súvisia s vysokými požiadavkami na výkon, bezpečnosť a kvalitu. Prvé testy s biopalivami v letectve sa uskutočnili v 90. rokoch 20. storočia, keď boli v USA testované rôzne druhy biopalív na báze rastlinných olejov a tukov. Od tej doby sa uskutočnili rôzne skúšky a testy biopalív v letectve, ktoré ukázali, že je možné ich použiť ako alternatívu k tradičným fosílnym palivám.

V roku 2008 sa uskutočnil prvý komerčný let s biopalivami v USA, keď bol do palivového systému lietadla zmiešaný biopalivo vyrobené z rastlinného oleja. V nasledujúcich rokoch sa

uskutočnili ďalšie skúšky a testy, ktoré ukázali, že biopalivá pre letectvo sú schopné splniť požiadavky na bezpečnosť a kvalitu a sú ekologicky prijateľné.

V roku 2011 zahájila americká spoločnosť United Airlines prevádzku pravidelných letov s biopalivami. V rovnakom roku uskutočnila spoločnosť KLM prvý komerčný let s biopalivami v Európe. V súčasnosti mnohé spoločnosti využívajú biopalivá ako súčasť svojej stratégie na zníženie emisií skleníkových plynov a zlepšenie udržateľnosti

### 4. FIT FOR 55

Európska únia má ambiciózný plán s názvom "Fit for 55", ktorý sa zameriava na zníženie emisií skleníkových plynov o 55 % do roku 2030 v porovnaní s úrovňou z roku 1990. Tento plán sa týka všetkých hospodárskych sektorov, vrátane leteckej dopravy.

Konkrétne sa plán zameriava na nasledujúce kroky:

1. Zavedenie systému obchodovania s emisiami pre leteckú dopravu, ktorý by mal zaisťovať, že letecké spoločnosti budú platiť za svoje emisie. Tento krok by mal podporiť investície do vývoja alternatívnych palív.
2. Zavedenie povinných cieľov pre podiel alternatívnych palív v leteckom palive. Európska únia si stanovila cieľ, aby do roku 2030 podiel alternatívnych palív dosiahol 2 % a do roku 2050 až 63 %.
3. Podpora výskumu a inovácií v oblasti alternatívnych palív pre leteckú dopravu. Európska únia investuje do projektov zameraných na výrobu syntetických palív, biopalív a iných alternatívnych palív.
4. Zlepšenie energetickej účinnosti lietadiel a modernizácia leteckej infraštruktúry, ako sú napríklad letiská.

Celkovo sa plán "Fit for 55" snaží zabezpečiť, aby letecká doprava prispievala k zníženiu emisií skleníkových plynov a aby bola trvalo udržateľná.

Európska únia vníma alternatívne palivá pre letectvo ako dôležitý prvok v boji proti zmene klímy a ochrane životného prostredia. V rámci európskej politiky na ochranu klímy a udržateľný rozvoj, bola prijatá aj tzv. "Green Deal", ktorá stanovuje ciele pre zníženie emisií skleníkových plynov a podporu výskumu a vývoja obnoviteľných zdrojov energie. V súvislosti s letectvom, Európska komisia navrhla tzv. "Flightpath 2050", ktorý stanovuje ciele a stratégie pre udržateľné letectvo do roku 2050. Jedným z hlavných cieľov je dosiahnutie nulových emisií CO<sub>2</sub> do roku 2050 a v tomto kontexte sa alternatívne palivá stávajú dôležitým prvkom.

Európska únia podporuje vývoj a využitie alternatívnych palív v letectve a prijala opatrenia, ktoré podporujú ich výrobu a využitie. Napríklad, Európska komisia poskytuje finančnú podporu na výskum a vývoj alternatívnych palív pre letectvo prostredníctvom programu Horizont 2020 a v roku 2020 predstavila iniciatívu "ReFuelEU Aviation", ktorá má za cieľ zvýšiť podiel alternatívnych palív v letectve na 2% do roku 2025 a na 5% do roku 2030.

Európska únia tiež spolupracuje s ostatnými krajinami a medzinárodnými organizáciami, ako napríklad Medzinárodnou organizáciou pre civilné letectvo (ICAO), na zlepšenie emisnej účinnosti letectva a na podpore udržateľného letectva vo svete.

## 5. VZŤAH VÝROBCOV LIETADIEL K ALTERNATÍVNYM ZDROJOM

Výrobcovia lietadiel sa stále viac snažia prispieť k udržateľnosti letectva a znižovaniu emisií skleníkových plynov. Preto sa zvyšuje ich záujem o alternatívne zdroje energie a palivá. Výrobcovia lietadiel si uvedomujú, že súčasná situácia s klimatickými zmenami a rastúca regulácia emisií v letectve si vyžaduje nové riešenia a technológie.

Niektorí výrobcovia lietadiel sa už začali angažovať v projektoch týkajúcich sa alternatívnych palív a technológií, ktoré znižujú emisie. Napríklad Boeing a Airbus sa zúčastňujú projektov na vývoj biopalív pre letectvo a využitie vodíkových palivových buniek. Výrobcovia lietadiel tiež spolupracujú s rôznymi organizáciami a inými výrobcami, aby sa zlepšila výkonnosť a udržateľnosť letectva.

Avšak, prechod na alternatívne palivá a technológie je pre výrobcov lietadiel náročný, pretože musia prekonať rôzne prekážky, ako sú vysoké náklady na vývoj a testovanie nových technológií, technické problémy, neistoty v oblasti zdrojovania palív a časové obmedzenia. Okrem toho musia výrobcovia lietadiel zohľadniť aj potreby a požiadavky leteckých prevádzkovateľov a regulatorov.

V každom prípade, výrobcovia lietadiel by mali byť motivovaní a spolupracovať na vývoji nových technológií, ktoré zlepšujú udržateľnosť a znižujú emisie, aby sa dosiahla dlhodobá udržateľnosť letectva a prispelo sa k ochrane životného prostredia.

### 5.1. Airbus

Spoločnosť Airbus je jedným z popredných výrobcov letectva na svete a aktívne sa angažuje v hľadaní a vývoji alternatívnych zdrojov energie a palív pre letectvo. Airbus sa zaviazal, že do roku 2035 dosiahne nulové emisie CO<sub>2</sub> z lietadiel v celom životnom cykle, od výroby až po ich prevádzku a likvidáciu.

Airbus už uskutočnil niekoľko projektov v oblasti alternatívnych palív, ktoré zahŕňajú využitie biopalív, syntetických palív a vodíkových palivových buniek. V roku 2016 firma Airbus uskutočnila prvý komerčný let lietadla A321 s palivom zmiešaným s biopalivom. V roku 2018 Airbus oznámil, že plánuje vyvinúť a testovať hybridné elektrické lietadlá, ktoré by mohli byť schopné prevádzky s nulovými emisiami uhlíka do roku 2030.

Okrem toho, Airbus spolupracuje s inými organizáciami a výrobcami, ako sú Rolls-Royce a Safran, na vývoji hybridných elektrických pohonných systémov pre lietadlá a na zlepšení energetického výkonu leteckých motorov. Airbus sa tiež snaží zlepšiť efektívnosť lietadiel a využívať materiály s nízkou hmotnosťou, aby sa zlepšila energetická účinnosť a znížili emisie.

### 5.2. Boeing

Spoločnosť Boeing, podobne ako Airbus, patrí medzi popredných výrobcov letectva na svete a aktívne sa zaoberá o alternatívne zdroje energie a palivá pre letectvo.

Boeing sa zaviazal k tomu, že do roku 2050 dosiahne nulové emisie CO<sub>2</sub> z lietadiel v celom životnom cykle, od výroby až po ich prevádzku a likvidáciu. Boeing sa tiež zaviazal k tomu, že do roku 2030 bude používať biopalivá na báze odpadových materiálov a mimo potravinárskej produkcie na 100 % svojich testovacích letov.

Boeing uskutočnil niekoľko projektov v oblasti alternatívnych palív, ktoré zahŕňajú využitie biopalív, syntetických palív a vodíkových palivových buniek. V roku 2018 Boeing uskutočnil spolu s Air New Zealand prvý let s biopalivom na báze odpadového oleja. V rovnakom roku Boeing predstavil projekt "Fuel Cell Demonstrator Airplane", v ktorom sa používa vodík na pohon lietadla.

Okrem toho, Boeing spolupracuje s inými organizáciami a výrobcami, ako sú Rolls-Royce, Safran a GE Aviation, na vývoji technológií zvyšujúcich efektívnosť leteckých motorov a na využívaní alternatívnych palív. Boeing tiež investuje do výskumu a vývoja nových technológií, ako sú hybridné a elektrické pohonné systémy pre lietadlá.

## 6. PREČO SA HLADAJÚ BIOPALIVÁ

Hľadanie alternatívnych palív v letectve je dôležité z niekoľkých dôvodov. Hlavným dôvodom je potreba znížiť emisie oxidu uhličitého a iných škodlivých látok, ktoré vznikajú pri spaľovaní tradičných fosílnych palív, ako je napríklad kerozín. Tieto emisie majú významný vplyv na zmenu klímy a zhoršujú kvalitu ovzdušia. Hľadanie alternatívnych palív sa tak stáva dôležitým krokom smerom k udržateľnému letectvu.

## 7. ALTERNATÍVNE PALIVÁ V LETECTVE

### 7.1. Syntetické palivá

Syntetické palivá v letectve sú palivá vytvorené chemickými procesmi, ktoré sa podobajú na procesy, ktoré sa používajú na výrobu petroleja alebo zemného plynu. Syntetické palivá sú vyrobené z rôznych surovín, ako sú biomasu, uhlie, plyný zemný plyn alebo zemný plyn získaný z baktérií, ako aj z iných zdrojov uhlíka.

Výhody syntetických palív v letectve sú mnohostranné. Syntetické palivá majú vysokú energetickú hodnotu, čo znamená, že majú vysoký výkon a môžu poskytnúť rovnaký výkon ako tradičné fosílné palivá. Syntetické palivá tiež obsahujú minimálne nečistoty a škodlivé látky, ktoré môžu poškodzovať motor a vytvárať znečistenie ovzdušia.

Okrem toho, syntetické palivá môžu byť vyrobené z rôznych surovín, čo znamená, že existuje veľa možností, ako vytvárať syntetické palivá v závislosti na miestnych zdrojoch uhlíka a potrebách danej krajiny. Syntetické palivá tiež môžu byť skladované a prepravované bez straty kvality, čo znamená, že ich výroba a distribúcia môže byť flexibilná.

Jednou z výziev pri výrobe syntetických palív v letectve je vysoká cena výroby a potreba vysokých investícií do infraštruktúry, aby boli k dispozícii v dostatočnom množstve. Okrem toho, procesy na výrobu syntetických palív tiež vyžadujú veľké množstvo energie, čo znamená, že je potrebné zabezpečiť dostupnosť obnoviteľných zdrojov energie pre tieto procesy.

V každom prípade, syntetické palivá predstavujú zaujímavú alternatívu k tradičným fosílnym palivám v letectve a ich vývoj sa bude pravdepodobne rozvíjať v budúcnosti. [7]

## 7.2. Biodiesel

Biodiesel je biopalivo, ktoré sa vyrába z rastlinných olejov alebo tukov, často z rastlín ako repka, slnečnica, sója, palmový olej a iné. Biodiesel sa často používa ako náhrada za tradičné fosílné palivá v doprave a aj v letectve.

letectve sa biodiesel používa v niekoľkých formách, najčastejšie ako prídavné palivo do lietadiel, ktoré využívajú klasické fosílné palivá. Biodiesel môže byť zmiešaný s tradičnými palivami v rôznych pomeroch, čím sa znižujú emisie oxidov dusíka a oxidu uhličitého. Tento proces sa nazýva "splash blending". V niektorých prípadoch sa používa aj čistý biodiesel, ktorý sa nazýva B100. Toto palivo sa však používa len v špeciálnych motoroch, ktoré sú na tento typ paliva prispôbené. Pre letectvo by to znamenalo, že by bolo nutné vyrábať nové motory, ktoré by mohli byť poháňané biodieselom.

Jedným z hlavných problémov s použitím biodieselu v letectve je však jeho výrobný proces, ktorý môže vyžadovať veľké množstvo pôdy a vody. Ak by sa používali poľnohospodárske plodiny na výrobu biodieselu, mohlo by to mať negatívny vplyv na dodávky potravín a ceny potravín. Z tohto dôvodu sa výroba biodieselu často snaží využiť odpadové suroviny, ako sú zvyšky rastlinnej biomasy a odpadové rastlinné oleje, ktoré by inak končili na skládke.

## 7.3. Biopalivá

Biopalivá v letectve sú palivá vyrobené z obnoviteľných zdrojov ako sú rastlinné oleje, rastlinné tuky, drevo, slama a iné. Biopalivá môžu byť použité ako náhrada klasických fosílnych palív v letectve a poskytujú niekoľko výhod.

Jednou z hlavných výhod biopalív je zníženie emisií oxidu uhličitého v porovnaní s tradičnými fosílnymi palivami. Pri spaľovaní biopalív sa uvoľňuje menšie množstvo oxidu uhličitého, pretože rastliny použité na ich výrobu pohlcujú oxid uhličitý z atmosféry počas svojho rastu. Výsledkom je menšia uhlíková stopa a nižšie emisie škodlivých látok.

Jedným z hlavných problémov s biopalivami v letectve je však ich výrobný proces, ktorý vyžaduje veľké množstvo pôdy, vody a iných zdrojov. Ak by sa na výrobu biopalív používali poľnohospodárske plodiny, mohlo by to mať negatívny vplyv na dodávky potravín a ceny potravín. Z tohto dôvodu sa výroba biopalív často snaží využiť odpadové suroviny, ako sú zvyšky rastlinnej biomasy a odpadové rastlinné oleje, ktoré by inak končili na skládke

## 7.4. Ďalšie alternatívne palivá

### 7.4.1. Na báze metánu

Metán je výhodné palivo, pretože obsahuje menej uhlíka ako tradičné fosílné palivá a teda aj produkujú menej oxidu uhličitého.

Jedným z týchto palív je napríklad biometán, ktorý sa vyrába z biologického odpadu, ako sú rastlinné zvyšky alebo živočíšne trusy. Tento proces sa nazýva anaeróbna digestia, ktorá umožňuje mikroorganizmom rozložiť organický odpad a vytvoriť biometán.

Ďalším palivom na báze metánu je syntetický metán, ktorý sa vyrába prostredníctvom chemických procesov, ktoré sa nazývajú Fischer-Tropsch syntéza. Tento proces umožňuje kombinovať vodík a oxid uhličitý, aby sa vytvoril syntetický metán. Syntetický metán môže byť využitý ako náhrada pre tradičné kerozínové palivá.

Ďalšie alternatívne palivá na báze metánu zahŕňajú napríklad bio-SNG (biomasa-to-syngas) a LNG (zkapalnený zemný plyn). Bio-SNG sa vyrába pomocou termickej konverzie biomasy, ktorá sa následne pretvára na syntetický plyn, ktorý obsahuje značné množstvo metánu. LNG je zase skvapalnený zemný plyn, ktorý sa môže používať ako náhrada kerozínu.

Okrem uvedených palív na báze metánu existujú aj ďalšie alternatívne palivá, ktoré by mohli byť použité v letectve.

### Amoniak

Amoniak (NH<sub>3</sub>) je ďalšie palivo, ktoré sa môže použiť ako alternatíva pre kerozín. Amoniak je bezfarebný plyn, ktorý sa vyrába z kyseliny dusičnej a vodíka. Jeho výroba je však náročná na energiu a technologicky náročná, a preto by vyžadovala väčšie úsilie a investície v porovnaní s inými alternatívnymi palivami.

### Methanol

Methanol (CH<sub>3</sub>OH) je ďalšie palivo, ktoré sa môže vyrábať z metánu. Jeho výhodou je, že sa už vyrába vo veľkom množstve pre iné účely, ako napríklad na výrobu formaldehydu a iných chemikálií. Jeho použitie ako paliva však tiež vyžaduje upravené motory a náklady na výrobu.

### Dimetyléter (DME)

Dimetyléter (DME) je bezfarebný plyn, ktorý sa vyrába z metanolu. Môže byť použitý ako palivo pre vysokotlakové plynové motory alebo ako aditívum pre kerozínové palivá. Jeho výroba je relatívne jednoduchá, pretože vyžaduje iba katalytickú reakciu metanolu so vzduchom.

### Bio-metanový

Kvapalný plyn (Bio-LNG): Bio-LNG je palivo, ktoré sa vyrába z biometánu, ktorý je následne skvapalnený na LNG. Tento proces produkuje palivo s nízkou emisnou stopou, ktoré môže byť použité ako alternatíva pre tradičné kerozínové palivá. Bio-LNG je však stále v ranom štádiu vývoja a vyrába sa iba v obmedzených množstvách.



Všetky tieto alternatívne palivá majú potenciál na znížovanie emisií skleníkových plynov a zlepšenie energetickeho zabezpečenia pre letectvo. Avšak, ich výroba a využitie si vyžaduje ďalší výskum a rozvoj technológií, ako aj investície do infraštruktúry pre ich distribúciu a použitie.

#### 7.4.2. Na báze alkoholu

Alkoholové palivá sú tiež alternatívou pre tradičné kerozínové palivá v letectve. Niektoré z týchto palív zahŕňajú:

##### Bio-etanol

Bio-etanol sa vyrába z obnoviteľných zdrojov ako sú rastliny obsahujúce cukor alebo škrob, ako sú kukurica, cukrová trstina, zemiaky alebo zrna. Bio-etanol môže byť použitý ako palivo v lietadlách s upravenými motorovými systémami. V súčasnosti však etanolové palivá v letectve zatiaľ nie sú priamo kompatibilné s kerozínom a preto by si vyžadovali aj investície do infraštruktúry.

##### Bio-butanol

Bio-butanol je palivo vyrábané z obnoviteľných zdrojov ako sú rastliny ako kukurica, cukrová trstina a iné rastliny obsahujúce cukor. Bio-butanol má vyššiu energetickú hustotu ako bio-etanol a má nižšiu hygroskopickosť. To znamená, že sa menej zmiešava s vodou, čo môže byť výhodou pre letecké palivá.

##### Isopropylalkohol

Isopropylalkohol, tiež známy ako izopropanol alebo IPA, sa používa ako palivo pre rakety a v rámci letectva by mohol byť použitý ako palivo pre malé drony alebo ako aditívum pre tradičné kerozínové palivá. Avšak, jeho použitie ako hlavného paliva v lietadlách zatiaľ nie je reálnou možnosťou.

Tieto alkoholové palivá môžu byť využité ako alternatíva pre tradičné kerozínové palivá, čím by sa znížili emisie skleníkových plynov. Avšak, ich použitie si vyžaduje upravené motory a náklady na výrobu, ktoré by mohli zvýšiť náklady na prevádzku a letenky. Z tohto dôvodu sa stále vyvíja a testuje nové technológie pre výrobu a použitie alternatívnych palív v letectve.

#### 7.4.3. Na báze vodíka

Palivové bunky s vodíkom sú jedným z možných typov alternatívnych palív pre letectvo. Vodíkové palivové bunky vyrábajú elektrinu a vodu z vodíka a kyslíka. Tento proces produkuje významne menej skleníkových plynov a emisií oxidu uhličitého ako tradičné spaľovacie motory.

Niektoré z možností využitia vodíkových palivových buniek v letectve zahŕňajú:

##### Elektrické pohonné systémy:

Vodíkové palivové bunky môžu byť použité na výrobu elektriny, ktorá môže napájať elektromotory v lietadle. Toto riešenie by bolo vhodné pre menšie, ľahšie lietadlá a helikoptéry.

##### Hybridné pohonné systémy:

Hybridné pohonné systémy by mohli využívať kombináciu vodíkových palivových buniek a kerozínových spaľovacích motorov. Tento typ pohonného systému by mohol byť vhodný pre väčšie, ťažšie lietadlá.

##### Kombinácia s bio-plynom:

Vodíkové palivové bunky by mohli byť kombinované s bioplynom z odpadových látok, ako sú potravinové odpady alebo hnojivá. Tento proces by umožnil využiť odpad ako zdroj paliva a zároveň by znížil emisie skleníkových plynov.

Aj keď majú vodíkové palivové bunky veľký potenciál ako alternatívne palivá v letectve, stále je nutné zlepšiť ich technológie, aby boli efektívnejšie, lacnejšie a bezpečnejšie. V súčasnosti sa na vývoji týchto technológií pracuje a v budúcnosti by mohli byť vodíkové palivové bunky zaujímavou alternatívou pre letectvo. [77]

## 8. VÝROBNÝ PROCES PRE BIOBUTANOL

Biobutanol má podobné vlastnosti ako benzín, preto sa môže použiť ako alternatívne palivo pre spaľovacie motory v doprave a priemysle. V porovnaní s etanolom má však vyššiu energetickú hustotu, čo znamená, že môže poskytnúť viac energie na jednotku objemu paliva. Bio-butanol tiež môže byť vyrobený z rôznych uhlíkových zdrojov, vrátane zrna, travy a iných biomasy, čo z neho robí sľubný zdroj pre výrobu obnoviteľných palív.

Etanol a biobutanol sú oba alternatívne palivá s potenciálom použitia v letectve. Avšak, biobutanol sa zdá byť lepšou voľbou v porovnaní s etanolom z niekoľkých dôvodov.

Po prvé, biobutanol má vyššiu energetickú hustotu ako etanol, čo znamená, že môže poskytnúť viac energie na kg paliva a mať lepšiu výkonnosť v lietadle. Okrem toho má biobutanol nižšiu teplotu varu ako etanol, čo znamená, že je menej náchylný na vyparovanie pri vysokých teplotách v motore.

Druhým faktorom je, že biobutanol má lepšie vlastnosti pri nízkych teplotách a menej negatívny vplyv na koróziu motora ako etanol. To znamená, že biobutanol by mohol byť vhodnejší pre použitie v oblastiach s chladnejším počasím.

Napokon, výroba biobutanolu sa môže realizovať prostredníctvom rôznych procesov vrátane syntézy, fermentácie a hybridných procesov, zatiaľ čo etanol sa vyrába najčastejšie fermentáciou. To znamená, že biobutanol môže byť získaný aj z lignocelulózy, ktorá je bežnou surovinou pre výrobu biopalív a môže byť v súčasnosti hospodárne ťažká na využitie pri výrobe etanolu.

Celkovo povedané, biobutanol môže byť lepšou voľbou ako etanol pre letectvo z dôvodu jeho vyššej energetickej hustoty, lepších vlastností pri nízkych teplotách, menej negatívneho vplyvu na koróziu motora a možnosti výroby z lignocelulózy.

Existujú rôzne spôsoby výroby biobutanolu. Tu sú niektoré z nich:

1. ABE fermentácia: Táto metóda je založená na fermentácii kukuričnej múky, ktorá sa používa ako zdroj cukru. Fermentáciu vykonávajú tri druhy baktérií: Clostridium acetobutylicum, Clostridium beijerinckii a Clostridium



saccharo-perbutylaceticum. Tieto baktérie vytvárajú acetón, butanol a etanol (ABE) ako vedľajšie produkty. Tento proces sa nazýva ABE fermentácia.

2. Fermentácia lignocelulózy: Tento proces využíva rôzne druhy mikroorganizmov na rozklad ligno-celulózy, ktorá sa získava z rôznych zdrojov, ako sú napríklad slama, drevo alebo kôra. Po rozložení sa využívajú mikroorganizmy, ktoré produkujú biobutanol.
3. Syntza biobutanolu: Táto metóda využíva chemické reakcie na vytvorenie biobutanolu z rôznych zdrojov. Zvyčajne sa používajú cukry, kyselina maslová alebo glycerol ako suroviny. Syntza biobutanolu sa využíva hlavne v priemysle, ale nie je tak ekologická ako iné metódy.
4. Hybridné procesy: Táto metóda kombinuje viacero procesov, ako sú fermentácia a chemická syntéza. Tieto procesy sa používajú v rôznych kombináciách a využívajú rôzne suroviny na výrobu biobutanolu.

Všetky tieto metódy majú svoje výhody a nevýhody. Niektoré z nich sú ekologickejšie, ale menej efektívne, zatiaľ čo iné sú efektívnejšie, ale môžu byť menej ekologické. V každom prípade sa však biobutanol ukazuje ako nádejný kandidát na alternatívne palivo, ktoré by mohlo nahradiť tradičné palivá v budúcnosti.

### 8.1. ABE fermentácia

ABE fermentácia je proces výroby biobutanolu z rôznych cukrových surovín pomocou kvasníc a baktérií. ABE je skratka pre acetón-butanol-etylénový proces, ktorý popisuje hlavné vedľajšie produkty, ktoré sa vytvárajú počas fermentačného procesu.

V ABE fermentácii sa zvyčajne používa kukurica, ale môžu sa použiť aj iné cukrové suroviny, ako sú pšenica, jačmeň, cukrová repa a ďalšie. Proces začína tým, že sa surovina rozdrví a zmes sa vystaví tepelnému procesu, aby sa uvoľnilo škrobové alebo cukrové zloženie. Tento proces sa nazýva gelatinizácia.

Potom sa do zmesi pridajú kvasinky a baktérie, ktoré začnú rozkladať cukry na kyselinu maslovú, aceton a butanol. Tieto zlúčeniny sa potom oddelia od zvyšku zmesi a zostávajú ako vedľajšie produkty.

Biobutanol, ktorý je cieľom ABE fermentácie, má niekoľko výhod oproti iným biopalivám, ako je napríklad etanol. Biobutanol má vyššiu energetickú hodnotu a môže byť použitý v súčasných motoroch bez nutnosti upravovania motora. Navyše, biobutanol je menej náchylný k korózii a môže byť

### 8.2. Fermentácia lignocelulózy

Fermentácia lignocelulózy je proces výroby biopalív z lignocelulóзовých biomasy, ktorá je zložená z celulózy, hemicelulózy a lignínu. Tento druh biomasy sa často nachádza v dreve, tráve, slamení, sláme a iných rastlinných materiáloch.

Fermentácia lignocelulózy sa skladá z niekoľkých krokov. Prvým krokom je predpríprava biomasy, ktorá zahŕňa mletie a predbežné ošetrenie. Po predpríprave sa biomasa rozkladá na cukry, ktoré môžu byť použité na produkciu biopalív.

Rozklad celulózy a hemicelulózy na cukry sa zvyčajne uskutočňuje s použitím kyseliny alebo enzymatických procesov. Potom sa cukry použijú na kvasenie, aby sa vytvorili biopalivá ako etanol, butanol alebo vodík.

V procese fermentácie lignocelulózy sa môžu použiť rôzne mikroorganizmy, kvasinky alebo baktérie, ktoré sú schopné rozkladať celulózu a hemicelulózu. Pri niektorých procesoch sa môžu použiť aj mikroorganizmy, ktoré sú schopné rozkladať lignín.

Fermentácia lignocelulózy je dôležitá technológia v oblasti výroby biopalív, pretože umožňuje používať širokú škálu biomasy ako surovinu na výrobu biopalív, vrátane takých, ktoré by inak boli nevyužiteľné. Navyše, biopalivá vyrobené z lignocelulózy majú nižšiu emisiu skleníkových plynov a môžu pomôcť znižovať závislosť na fosilných palivách. [8][9][10]

### 8.3. Syntza biobutanolu

V prípade syntézy biobutanolu sa obvykle používa chemický proces známy ako dehydrogenácia butanolu, ktorý sa vyrába fermentáciou cukru alebo iných uhlíkových zdrojov.

Dehydrogenácia butanolu sa vykonáva pomocou katalyzátorov, ktoré odstraňujú vodík z butanolu, čím vzniká biobutanol. Tento proces môže byť energeticky náročný a využíva sa obvykle ako doplnková metóda na zvýšenie výťažku biobutanolu v procese fermentácie.

Dehydrogenácia znamená odstránenie vodíka z molekuly a v prípade butanolu to znamená odstránenie dvoch atómov vodíka z butanových zvyškov v molekule, čím sa vytvára butenová zlúčenina.

Existujú rôzne spôsoby, ako sa dá dehydrogenácia butanolu uskutočniť. Jedným z bežných spôsobov je katalytická dehydrogenácia, ktorá sa uskutočňuje za použitia katalyzátora. Katalyzátor zvyčajne zahŕňa kovové zlúčeniny ako platina alebo palládium, ktoré katalyzujú reakciu odstraňovania vodíka z butanolu.

V procese katalytickej dehydrogenácie je butanol zahrievaný a prechádza cez katalyzátor, ktorý katalyzuje reakciu dehydrogenácie. Pri tejto reakcii sa odstránia dva atómy vodíka z molekuly butanolu a vytvorí sa dva atómy vodíka ako vedľajší produkt. Tým sa vytvára butenová zlúčenina, ktorá môže byť následne využitá na výrobu biobutanolu. [8][9][10]

### 8.4. Hybridné procesy

Hybridné procesy kombinujúce fermentáciu a chemickú syntézu môžu byť použité na výrobu biopalív na báze biobutanolu. Biobutanol sa môže vyrábať fermentáciou rôznych zdrojov uhlíka, ako sú cukry, celulóza alebo lignocelulóza, pomocou mikroorganizmov ako sú Clostridium spp. alebo Ruminococcus spp. Tieto mikroorganizmy vylučujú enzýmy, ktoré premieňajú zdroje uhlíka na butan-1-ol, ktorý sa potom musí oddeliť od kultivovanej tekutiny a očistiť.

V ďalšom kroku sa biobutanol z chemických dôvodov musí dehydratovať na butén alebo butadién, ktoré sa potom môžu použiť na výrobu biopalív. Táto dehydratácia by sa mohla vykonať aj hybridným procesom, ktorý kombinuje fermentáciu a chemickú syntézu. Pri takomto procese by sa biobutanol

najskôr vyrobil fermentáciou, potom by sa pomocou katalyzátorov a tepla dehydrato-val na butén alebo butadién. Následne by sa butén alebo butadién podrobil chemickému procesu k vytvoreniu biopaliva. [8] [9] [10]

### 8.5. Obehové biohospodárstvo

Zhodnocovanie potravinového odpadu na biobutanolu predstavuje zaujímavú alternatívu výroby biopalív, pre-tože potravinový odpad je zdrojom organických látok, ktoré môžu byť využité na výrobu biopalív. Biobutanol, ktorý sa získava z potravinového odpadu, sa nazýva aj bio-MNA (n-butanol) alebo bio-ABE (aceton-butanol-etylalkohol).

Proces výroby biobutanolu z potravinového odpadu zahŕňa niekoľko krokov. Najprv sa musí potravinový odpad spracovať na cukry pomocou hydrolyzy, čím sa získajú monosacharidy ako glukóza, fruktóza a sacharó-za. Tieto cukry sa následne fermentujú pomocou kvasi-niek alebo baktérií na aceton, butanol a etanol. V procese fermentácie sa vytvárajú vedľajšie produkty, ako sú kyselina octová a kyselina mliečna, ktoré je potrebné odstrániť.

otravinový odpad predstavuje obrovský zdroj organic-kých látok, ktoré môžu byť využité na výrobu biopalív. Využitie tohto zdroja by mohlo prispieť k znižovaniu množstva odpadu a zároveň k výrobe obnoviteľných palív. Avšak, výroba biobutanolu z potravinového od-padu ešte nie je dostatočne efektívna z hľadiska nákladov na výrobu a ekonomických aspektov, pretože potravino-vý odpad je často veľmi znečistený a jeho spracovanie môže byť nákladné. Z tohto dôvodu sa výroba biobuta-nolu z potravinového odpadu zatiaľ nevyužíva v širokej miere, ale v budúcnosti by mohla byť zaujímavou alter-natívou v oblasti biopalív.

### 8.6. Výroba biobutanolu z odpadu

Výroba biobutanolu z exkrementov, alebo aj nazývaná jako "poo power" alebo "brown energy", je založená na anaeróbnej fermentácii organického materiálu, ktorý obsahuje vysoký podiel uhľovodíkov. Exkrementy patria medzi tieto materiály, pretože obsahujú množstvo rôz-nych organických látok, ktoré môžu byť premenené na biopalivá.

Proces výroby biobutanolu z exkrementov je podobný procesu výroby bioplynu. Exkrementy sa zbierajú a následne sa dajú do nádrže, kde sa za pomoci anaerób-nych baktérií rozložia na základné zložky ako sú metán a oxid uhličitý. Následne sa separuje metán a zvyšné zlož-ky, ktoré sa použijú na výrobu biopaliva, v tomto prípa-de biobutanolu.

Výhodou výroby biobutanolu z exkrementov je, že táto látka je často dostupná a jej zdroj je nevyčerpatelný. Taktiež je to ekologická a udržateľná metóda, pretože využíva organický odpad, ktorý by inak skončil na skládke a znečisťoval prírodu.

V súčasnosti sa táto metóda výroby biopaliva stáva čoraz populárnejšou a niektoré spoločnosti už využívajú tento proces ako súčasť svojho výrobného procesu.

Výroba biobutanolu z exkrementov prebieha v niekoľ-kých krokoch:

5. Zber exkrementov: Exkrementy sú zhro-mažďované a transportované do výrobného zariadenia.
6. Odstránenie nečistôt: Exkrementy sú naj-skôr ošetrené, aby sa odstránili nečistoty ako napríklad papierové utierky, plastové vrecká a podobne.
7. Fermentácia: Čisté exkrementy sú potom umiestnené do nádrže, kde prebieha fermen-tácia. V tomto kroku sa exkrementy pre-mieňajú na bioplyn, ktorý obsahuje metán a oxid uhličitý. Bioplyn sa zvyčajne oddeľuje od pevných odpadov a používa sa na výro-bu energie alebo na ďalšiu výrobu biopalív.
8. Ďalšie ošetrenie bioplynu: Bioplyn sa ďalej upravuje odstránením oxidu uhličitého a iných nečistôt, aby sa získal čistý vodík a oxid uhličitý.
9. Syntéza biobutanolu: Získaný vodík a oxid uhličitý sa používajú na výrobu biobutanolu pomocou chemických procesov, ako je na-príklad dehydrogenácia butanolu.

Tento proces je stále v skúšobnej fáze a neexistuje žiadne výrobné zariadenie, ktoré by vyrábalo biobutanol z ex-krementov v komerčnom meradle. Avšak výskumníci v oblasti biopalív využívajú tento proces ako jeden z prí-kladov, ako môžu byť obnoviteľné zdroje energie využí-vané na výrobu biopalív.

### 8.7. Výhody biobutanolu

Biobutanol ako alternatívne palivo pre letectvo má nie-koľko výhod, ktoré by mohli viesť k jeho budúcemu využitiu v tejto oblasti. Niektoré z týchto výhod sú:

1. Udržateľnosť a ekologická zodpovednosť: Bio-butanol je vyrábaný z obnoviteľ-ných zdrojov a môže byť vyrobený z rastlinných odpadov alebo rastlín, ktoré sa pestujú na neúrodných pôdach a nepoužívajú sa na potraviny. Jeho využitie by teda nemalo viesť k potravi-novej konkurencii a zároveň by mohlo pomôcť zni-žovať emisie skleníkových plynov v letectve.
2. Vyššia energetická hodnota ako biopalivá: Bio-butanol má vyššiu energetickú hodnotu ako etanol alebo metanol a má podobné vlastnosti ako tradičné letecké palivá ako petrolej. To znamená, že by sa mohol ľahko miešať s tradičným le-teckým palivom a používať sa v existujúcich lietadlách a motoroch.
3. Kompatibilita s existujúcou infraštruktúrou: Biobutanol by sa mohol vyrábať v ra-finériách, ktoré už produkujú tradičné letecké palivá, a tak by bolo možné použiť existujúcu infraštruktúru a distribučnú sieť. To by znamenalo menšie náklady na vytvorenie novej infra-štruktúry na výrobu a distribúciu paliva.
4. Nižšie emisie skleníkových plynov: Využitie biobutanolu by mohlo prispieť k zní-ženiu emisií sklení-kových plynov v letectve. Biobutanol má nižšiu emisnú hodno-tu ako tradičné letecké palivá a jeho využitie by mohlo prispieť k dosiahnutiu cie-ľov emisnej regulácie.
5. Vylepšená výkonnosť motora: Biobutanol má vyššiu oktánovú hodnotu ako tra-dičné letecké palivá, čo môže viesť k vylepšeniu výkonnosti motora a zvýšeniu účinnosti paliva. [15],[16]

## 8.8. Nevýhody biobutanolu

Hoci biobutanol ponúka množstvo výhod ako alternatívne palivo pre letectvo, existujú aj niektoré nevýhody, ktoré by sa mali zväžiť:

1. Nízka výťažnosť: Výroba biobutanolu v súčasnosti nie je tak efektívna ako výroba tradičných ropných palív. Na dosiahnutie rovnakého množstva biopaliva ako tradičné ropné palivá, je potrebné získať väčšie množstvo biomasy, čo môže mať negatívny vplyv na životné prostredie.
2. Vysoké náklady na výrobu: Výroba biobutanolu je nákladnejšia ako výroba tradičných ropných palív. To je spôsobené vysokými nákladmi na získanie a spracovanie biomasy, ako aj na technológie potrebné na výrobu biopaliva.
3. Konkurencia s potravinovými plodinami: Niektoré zdroje biomasy, ktoré sa používajú na výrobu biobutanolu, môžu byť konkurenciou s potravinovými plodinami. To môže mať negatívny vplyv na potravinovú bezpečnosť a ceny potravín.
4. Nestabilita paliva: Biobutanol je nestabilnejší ako tradičné ropné palivá, čo môže mať vplyv na jeho skladovanie a použitie v letectve. Preto sú potrebné špeciálne opatrenia na skladovanie a manipuláciu s biopalivom.
5. Nízka dostupnosť: V súčasnosti nie je biobutanol dostupný vo veľkom meradle a nie je ho možné získať na každej čerpacej stanici. To môže mať obmedzený vplyv na jeho použitie ako alternatívne palivo pre letectvo.
6. Riziko vzniku korózie: Biobutanol obsahuje vodu a kyslík, čo môže spôsobiť koróziu v niektorých častiach lietadla, ako napríklad v palivovom systéme. To môže zvýšiť náklady na údržbu a opravy. [15],[16]

### Riešenie nevýhod biobutanolu pre letectvo

1. Zlepšenie technológií výroby: Jednou z hlavných nevýhod biobutanolu v súčasnosti je vysoká cena jeho výroby v porovnaní s tradičnými palivami. Zlepšenie technológií výroby by mohlo pomôcť znížiť náklady na výrobu biobutanolu a zvýšiť jeho konkurencieschopnosť na trhu.
2. Využitie odpadových produktov: Ďalším spôsobom, ako sa dajú vyriešiť nevýhody biobutanolu, je využitie odpadových produktov z poľnohospodárskej, potravinárskej a odpadových vôd (exkrementov) výroby na jeho výrobu. Týmto spôsobom by sa minimalizovala konkurencia medzi biopalivami a potravinovými plodinami.
3. Podpora výskumu a vývoja: Rozvoj nových technológií a lepšieho porozumenia vlastnostiam biobutanolu by mohlo pomôcť zvýšiť jeho efektívnosť a zlepšiť jeho vlastnosti ako alternatívneho paliva pre letectvo.
4. Zavedenie regulácií: Vlády a medzinárodné organizácie by mohli zaviesť regulácie a politiky, ktoré podporia používanie biopalív v leteckej doprave. Týmto spôsobom by sa mohol minimalizovať negatívny dopad na potravinovú bezpečnosť a zároveň by sa podporilo zavádzanie alternatívnych palív.
5. Vytvorenie trhu pre biopalivá: Vytvorenie trhu pre biopalivá v leteckej doprave by mohlo pomôcť zvýšiť ich dostupnosť

a konkurencieschopnosť na trhu. Tým by sa mohla zlepšiť ich efektívnosť a zároveň by sa podporilo zavedenie alternatívnych palív do letectva.

## 9. ZÁVER

V tejto článku sme sa zameriavali na biobutanol ako alternatívne palivo pre letectvo a jeho potenciálne využitie v oblastiach, kde by mohol byť udržateľnou a nízkou emisnou alternatívou. Na začiatku sme sa venovali vysvetleniu problematiky environmentálnej udržateľnosti v letectve a súčasných trendov v oblasti vývoja alternatívnych palív pre letectvo. V ďalších častiach sme sa venovali charakteristike biobutanolu, jeho výrobe, vlastnostiam a potenciálnemu využitiu v letectve.

Podľa zistení má biobutanol mnoho výhod v porovnaní s tradičnými palivami používanými v letectve. Jednou z hlavných výhod je nízka emisná stopa, ktorú produkuje počas spaľovania. Biobutanol obsahuje menej uhlíka ako tradičné palivá, čo znamená, že pri jeho spaľovaní sa produkuje menšie množstvo oxidu uhličitého. Okrem toho biobutanol neobsahuje síru, ktorá je zodpovedná za tvorbu kyslých dažďov a ďalších negatívnych vplyvov na životné prostredie. Ďalšou výhodou biobutanolu je jeho vysoká energetická hustota, ktorá umožňuje vyššiu výhrevnosť v porovnaní s inými biopalivami ako napríklad etanol.

Výroba biobutanolu z biomasy je považovaná za ekonomickejšiu a environmentálne výhodnejšiu voči iným biopalivám, pretože je možné ju vyrábať z rôznych druhov biomasy. Pri správnom výbere biomasy sa dá viac znížiť environmentálna stopa napríklad odpadová biomasa alebo exkrementová biomasa. Navyše, biobutanol má podobné vlastnosti ako letecký petrolej, čo umožňuje jeho použitie v súčasných lietadlách bez potreby zásadných úprav.

Stále však existujú určité výzvy a prekážky, ktoré bránia širšiemu využitiu biopalív v letectve. Medzi najvýznamnejšie patria vysoké náklady na výrobu a distribúciu, nedostatok dostupných surovín a nedostatočné investície do výskumu a vývoja biopalív v letectve. Preto do budúcnosti musíme viac investovať do výskumu a vývoja biopalív.

### Referencie

- [1] ENERGY. *energetickú efektívnosť a obnoviteľnú energiu*. [online]. [cit.26 November 2018]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/historical-time-renewable-jet-fuel>
- [2] About Science Direct. *Sustainable alternative fuels in aviation*. [online]. [cit.01 December .2017]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217312537?via%3Dihub>
- [3] BBC. *Climate change: World aviation agrees aspirational' net zero plan*. [online]. [cit 7 October 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217312537?via%3Dihub>
- [4] World Economic Forum. *The aviation sector wants to reach net zero by 2050. How will it do it*. [online]. [cit 9 December 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217312537?via%3Dihub>

- [5] EASA. European Aviation Environmental Report 2019. [online]. [cit 2019 ]. Dostupné z: [https://www.carboncare.org/fileadmin/uploads/carboncare/219473\\_EASA\\_EAER\\_2019\\_WEB\\_HI-RES\\_190311.pdf](https://www.carboncare.org/fileadmin/uploads/carboncare/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf)
- [6] Rada Európskej únie. *Balik Fit for 55* [online]. [cit 29 marca 2023]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/sk/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [7] LUBOŠ SOCHA, MONIKA KIMLIČKOVÁ. ALTERNATÍVNE PALIVÁ - VÝVOJOVÉ TRENDY LETECKEJ DOPRAVE [online]. [cit 06.2015]. Dostupné z: [http://zn.wsbip.edu.pl/sectioa/images/aktualnosci/zeszty/005-2015/224-234\(1\).pdf](http://zn.wsbip.edu.pl/sectioa/images/aktualnosci/zeszty/005-2015/224-234(1).pdf) in Journal of Clean Energy Technologies  
[https://www.researchgate.net/publication/296468440\\_A\\_Short\\_Review\\_on\\_Biobutanol\\_a\\_Second\\_Generation\\_Biofuel\\_Production\\_from\\_Lignocellulosic\\_Biomass](https://www.researchgate.net/publication/296468440_A_Short_Review_on_Biobutanol_a_Second_Generation_Biofuel_Production_from_Lignocellulosic_Biomass)
- [8] Front. Energy Res., 11 August 2022
- [9] Sec. Bioenergy and Biofuels. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.903775/full>
- [10] BMC. Butanol production from food waste: a novel process for producing sustainable energy and reducing environmental pollution, 15 September 2015 <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-015-0332-x>
- [11] IATA 2015 Report on Alternative Fuels Effective December 2015 <https://www.iata.org/contentassets/462587e388e749eeb040df4d4df02cb1/2015-report-alternative-fuels.pdf>
- [12] Sustainable Administration Aviation Fuels (SAF) March 22, 2022 [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/508.20220322\\_1545\\_Brown\\_Oldani\\_SAF\\_Update\\_v04.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/508.20220322_1545_Brown_Oldani_SAF_Update_v04.pdf)
- [13] ATAG, A. (2009). Beginner's guide to aviation biofuels. [online]. 2009. [cit. 2023-05-4]. Dostupné na internete: [https://www.verifavia.com/bases/ressource\\_pdf/124/BeginnersGuide-Biofuels-WebRes.pdf](https://www.verifavia.com/bases/ressource_pdf/124/BeginnersGuide-Biofuels-WebRes.pdf)
- [14] Najafi, B., Ghobadian, B., & Yusaf, T. F. (2017). Hydrogen-rich gas production from biomass gasification: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 148-167.
- [15] "Bio-butanol as aviation fuel: Advantages, drawbacks and potential," Renewable and Sustainable Energy Reviews, ScienceDirect, Vol. 114, September 2019, Pages 1-11.
- [16] A comprehensive review on bio-butanol as a sustainable aviation fuel: Pro-duction, characterization, challenges and prospects," Renewable and Sustainable Energy Reviews, ScienceDirect, Vol. 94, February 2018, Pages 1143-1157.



## NEW TRENDS IN UAV CONSTRUCTION

**Anastasiia Iakovlieva**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Martin Bugaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Aviation is one of the fastest developing segments of transport, the development of which did not bypass the construction of unmanned aerial vehicles. The main purpose of this paper is to analyze current trends that may affect the development of unmanned aircrafts in civil aviation. For the purpose of researching new trends in the construction of unmanned aerial vehicles, is needed to define today's state of development and also to divide UAVs by the type. In conclusion, the goal of the article is to define the direction in which the development of construction solutions is currently going and what the potential development in the use of UAVs new trends can bring.*

### Keywords

*UAV, unmanned aerial vehicles, development, trends, sensors, hybrid propulsion engines, surveillance, environmental monitoring, LiDAR*

### 1. ÚVOD

Bezpilotné vzdušne prostriedky, určujú smer vývoja v mnohých oblastiach, od vojenských operácií až po komerčné aplikácie. S pokrokom v technológii a rastúcim dopytom sa odvetvie UAV neustále vyvíja. Bezpilotné lietadlá sa teraz používajú na úlohy, ktoré boli kedysi nemožné alebo príliš nebezpečné pre ľudí, ako je kontrola infraštruktúry, doručovanie tovaru a vykonávanie pátracích a záchranných operácií. Keďže odvetvie bezpilotnej leteckej dopravy sa neustále rozširuje, objavujú sa nové trendy, ktoré formujú budúcnosť konštrukcie UAV. Tieto trendy zahŕňajú pokroky v oblasti umelej inteligencie, pokročile senzory, zvýšenú autonómiu, 3D tlač sučiastok a hybridné energetické systémy. V tomto kontexte je pochopenie najnovších trendov v konštrukcii UAV kľúčové pre predpoklad smeru vývoja a potencionálneho využitia UAV.

### 2. DRUHÝ A POUŽITIE UAV

#### 2.1. Legislatívny rámec pre UAV

Legislatívny rámec pre UAV, čiže bezpilotné lietajúce zariadenia, na Slovensku upravuje Rozhodnutie č. 2/2019 zo dňa 14.11. 2019, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu lietadlom spôsobilým lietať bez pilota a vyhlasuje zákaz vykonania letu určených kategórií lietadiel vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky.[1]

Rozhodnutie č. 2/2019 zo 14.11. 2019, článok 2, stanovuje kategorizáciu bezpilotných vzdušných prostriedkov na území Slovenskej republiky.

Na účely tohto rozhodnutia sa rozumie:

g) bezpilotným lietadlom triedy C0 diaľkovo riadené lietadlo alebo model lietadla s maximálnou vzletovou hmotnosťou, ktorá neprekračuje 250 g,

h) bezpilotným lietadlom triedy C1 diaľkovo riadené lietadlo alebo model lietadla s maximálnou vzletovou hmotnosťou, ktorá je väčšia ako 250 g a neprekračuje 900 g,

i) bezpilotným lietadlom triedy C2 diaľkovo riadené lietadlo alebo model lietadla s maximálnou vzletovou hmotnosťou, ktorá je väčšia ako 900 g a neprekračuje 4 kg,

j) bezpilotným lietadlom triedy C3 diaľkovo riadené lietadlo s maximálnou vzletovou hmotnosťou, ktorá je väčšia ako 4 kg a neprekračuje 25 kg a s typickým rozmerom menej ako 3 m,

k) bezpilotným lietadlom triedy C4 model lietadla s maximálnou vzletovou hmotnosťou, ktorá je väčšia ako 4 kg a neprekračuje 25 kg, [1]

Každá trieda ma vlastné podmienky lietania, ktoré určujú a vymedzujú ich potencionálne využitie v civilnom letectve na území Slovenskej republiky. Podľa legislatívy Slovenskej republiky bezpilotné lietadlo nesmie byť použité na rozprašovanie chemických látok z bezpilotného lietadla alebo na zhadzovanie predmetov z bezpilotného lietadla; to neplatí, ak ide o vykonanie leteckých prác, vykonanie letu bezpilotným lietadlom na základe súhlasu podľa čl. 8 ods. 1 písm. b) a pri plnení úloh podľa čl. 1 ods. 4. [1]

Článkom 8 ods. 1 písm. b) sa rozumie let bezpilotným lietadlom podľa podmienok kategórie prevádzky B možno vykonať so súhlasom Dopravného úradu a určenými podmienkami na vykonanie letu bezpilotným lietadlom, ak nie je ustanovené inak, ak ide o let bezpilotným lietadlom vykonaný iným spôsobom ako podľa podmienok kategórie prevádzky A, najmä

1. v noci, ak je bezpilotné lietadlo vybavené primeraným osvetlením,

2. v riadenom vzdušnom priestore, ak je vykonanie letu bezpilotným lietadlom koordinované s príslušným stanovištom riadenia letovej prevádzky,

3. v inej vzdialenosti od nezúčastnených osôb ako je vzdialenosť určená na vykonanie letu bezpilotným lietadlom podľa podmienok kategórie prevádzky A alebo

4. bezpilotným lietadlom, ktorého maximálna vzletová hmotnosť je väčšia ako 25 kg.

Pri plnení úloh podľa čl. 1 ods. 4 sa rozumie na vykonanie letu bezpilotným lietadlom pri plnení úloh pre finančnú správu v oblasti colníctva, záchranné zložky integrovaného záchranného systému, ozbrojené sily, ozbrojené bezpečnostné zbory a informačné a spravodajské služby sa vzťahujú len všeobecné podmienky vykonania letu bezpilotným lietadlom podľa článku 5 a koordinácia podľa článku 9, ak ďalej nie je ustanovené inak.

Vychádzajúc z tohto rozhodnutia niektoré z potencionálnych využití UAV sú na území Slovenskej republiky obmedzene alebo zakázané, preto trendy v použití a konštrukcii je potrebné analyzovať v celosvetovom kontexte.

## **2.2. Použitie UAV**

Bezpilotné lietadlá alebo UAV spôsobili revolúciu v spôsobe, akým sa pristupujeme k rôznym úlohám v letectve ale aj v iných odvetviach. Schopnosť bezpilotných lietadiel byť ovládané na diaľku a lietať v oblastiach, ktoré sú pre ľudí nedostupné alebo nebezpečné, ich robí čoraz preferovanejšími v celom rade priemyselných odvetví. V tejto kapitole preskúmame početné aplikácie UAV, od vojenských operácií až po komerčné využitie, ako je kontrola infraštruktúry, doručovacie služby a pátracie a záchranné misie.

### **2.2.1. Použitie v vojenskom sektore**

Vojenské aplikácie UAV boli jedným z primárnych použití tejto technológie od jej počiatkov. Bezpilotné lietadlá sa stali základným nástrojom vojenských operácií na celom svete a ich používanie v posledných rokoch rýchlo vzrástlo.

Jednou z najvýznamnejších výhod UAV vo vojenských aplikáciách je ich schopnosť operovať v oblastiach, ktoré sú pre ľudí nedostupné alebo nebezpečné, ako sú nepriateľské územie alebo oblasti postihnuté prírodnými katastrofami. Bezpilotné lietadlá sa používajú na celý rad vojenských operácií vrátane prieskumu, sledovania a identifikácie cieľov. Bezpilotné lietadlá sú obzvlášť užitočné na monitorovanie a sledovanie pohybu nepriateľa, pričom vojenským veliteľom poskytujú spravodajské informácie v reálnom čase.[2]

### **2.2.2. Použitie v komerčnom sektore**

Komerčné aplikácie UAV sa v posledných rokoch rýchlo rozširujú, bezpilotné vzdušne prostriedky sa používajú na širokú škálu účelov v rôznych odvetviach. UAV sa ukázali ako nákladovo efektívne riešenie pre mnohé úlohy, od monitorovania plodín až po kontrolu infraštruktúry.

V stavebnom priemysle sa bezpilotné prostriedky používajú na prieskum a mapovanie lokalít, sledovanie pokroku a kontrolu stavieb. Poskytovaním záberov s vysokým rozlíšením a 3D modelov môžu bezpilotné prostriedky pomôcť architektom, inžinierom a stavebným manažérom efektívnejšie plánovať projekty a identifikovať potenciálne problémy skôr, ako sa stanú nákladnými problémami.[3]

Ďalšou komerčnou aplikáciou UAV je kontrola infraštruktúry. Bezpilotné lietadlá možno použiť na kontrolu mostov, elektrických vedení a potrubí, čím sa znižuje potreba ľudských pracovníkov na vykonanie týchto úloh, ktoré môžu byť nebezpečné a časovo náročné. Bezpilotné lietajúce zariadenia vybavené senzormi dokážu odhaliť aj potenciálne problémy v infraštruktúre, čo spoločnostiam umožňuje riešiť problémy skôr, ako sa stanú závažnejšími problémami.

Používanie UAV v energetickom sektore sa tiež rýchlo rozširuje. Bezpilotné vzdušne prostriedky možno použiť na kontrolu veterných turbín, solárnych panelov a elektrických vedení, čím sa znižuje potreba pre pracovníkov šplhať po vysokých konštrukciách a zvyšuje sa efektívnosť údržby a opráv. V ropnom a plynárenskom priemysle môžu byť bezpilotné lietadlá použité na monitorovanie potrubí a identifikáciu potenciálnych únikov alebo iných nebezpečenstiev. [4][5]

V zábavnom priemysle sa bezpilotné prostriedky používajú na leteckú fotografiu a videozáznam, čím poskytujú jedinečné perspektívy pre filmy, televízne programy a reklamy. UAV možno použiť aj na podujatia, ako sú koncerty a športové zápasy, na snímanie záberov zhora.

### **2.2.3. Nájsť a zachrániť**

Pátracie a záchranné operácie sú ďalšou oblasťou, kde sa UAV ukázali ako vysoko účinné. Bezpilotné lietajúce prostriedky je možné použiť na pátranie po nezvestných osobách v oblastiach, ktoré sú ťažko dostupné alebo nebezpečné, ako sú členitý terén alebo oblasti postihnuté prírodnými katastrofami. Bezpilotné prostriedky možno použiť aj na poskytovanie snímok oblasti prehľadávania v reálnom čase, čo umožňuje záchranným tímom posúdiť situáciu a efektívnejšie plánovať svoju reakciu.[6]

Pri pátracích a záchranných operáciách môžu byť UAV vybavené termovíznymi kamerami a inými senzormi, ktoré dokážu rozpoznať telesné teplo a pohyb, a to aj v prostredí so slabým osvetlením alebo v zatemnenom prostredí. Vďaka tomu sú bezpilotné lietajúce zariadenia ideálnym nástrojom na lokalizáciu nezvestných osôb alebo preživších katastrofu v ťažko dostupných oblastiach.[6]

### **2.2.4. Monitorovanie životného prostredia**

Monitorovanie životného prostredia je ďalšou oblasťou, kde UAV ukázali veľký potenciál. Bezpilotné prostriedky je možné použiť na zhromažďovanie údajov o kvalite ovzdušia, kvalite vody a iných environmentálnych faktoroch, ktoré poskytujú výskumníkom cenné informácie o stave životného prostredia a potenciálnych nebezpečenstvách.

V oblasti monitorovania kvality ovzdušia môžu byť UAV použité na zber údajov o úrovni znečistenia ovzdušia v mestských oblastiach, priemyselných zónach a iných lokalitách v reálnom čase. Bezpilotné prostriedky môžu byť vybavené senzormi, ktoré merajú pevné častice, ozón, oxidy dusíka a iné znečisťujúce látky, čím poskytujú detailný dohľad nad kvalitou ovzdušia v konkrétnych oblastiach. Tieto informácie môžu pomôcť vypracovať predpisy na zníženie úrovne znečistenia ovzdušia a ochranu verejného zdravia.

### 2.2.5. Polnohospodárstvo

UAV sa čoraz viac používajú v poľnohospodárstve na monitorovanie plodín a optimalizáciu poľnohospodárskych operácií. Bezpilotné prostriedky môžu poskytnúť poľnohospodárom podrobný pohľad na ich polia, čo im umožní identifikovať potenciálne problémy, ako sú škodcovia alebo nedostatok živín, skôr ako sa stanú závažnejšími problémami.

Jednou z hlavných výhod používania bezpilotných lietadiel v poľnohospodárstve je ich schopnosť rýchlo a efektívne zbierať dáta. UAV môžu byť vybavené kamerami, senzormi a ďalšími nástrojmi, ktoré dokážu zachytávať snímky, zisťovať zmeny v stave rastlín a zbierať údaje o vlhkosti pôdy a teplote. Tieto informácie možno použiť na vytvorenie podrobných máp plodín a pôdy na poľnohospodárskom území, čo umožňuje poľnohospodárom prijímať rozhodnutia o zavlažovaní, hnojení a iných postupoch na základe získaných údajov.[7]

## 3. ANALÝZA KONŠTRUKČNÝCH RIEŠENÍ UAV

Bezpilotné lietajúce zariadenia alebo UAV sa v posledných rokoch stávajú čoraz obľúbenejšími vďaka svojej všestranosti a efektívnosti. Keďže dopyt po UAV neustále rastie, existuje zodpovedajúca potreba neustálej inovácie v konštrukcii UAV, ktorá je prispôbovaná meniacimi sa potrebami používateľov. Tato kapitola bude venovaná aktuálnym trendom v konštrukcii UAV a ich aplikáciách, ako aj dôvodom rastúcej popularity takýchto riešení.

### 3.1. Ľahké materiály

Jedným z najvýznamnejších trendov v konštrukcii UAV je použitie ľahkých materiálov. Hmotnosť UAV je kritickým faktorom pri určovaní jeho výkonu, odolnosti a doletu, takže výrobcovia neustále hľadajú spôsoby, ako znížiť hmotnosť svojich bezpilotných zariadení. V konštrukcii UAV sa čoraz častejšie používajú ľahké materiály, ako sú uhlíkové vlákna, titán a hliníkové zliatiny, aby sa znížila hmotnosť pri zachovaní pevnosti a odolnosti.[8]

Hmotnosť je rozhodujúcim faktorom pri určovaní výkonu UAV. Čím je bezpilotný prostriedok ťažší, tým viac energie je potrebné na jeho udržanie vo vzduchu a tým kratší bude čas jeho letu. Na prekonanie tejto výzvy sa výrobcovia UAV museli sústrediť na ľahké materiály, aby vytvorili ľahšie a efektívnejšie bezpilotné lietadlá. Tieto materiály sa vyberajú na základe ich pevnosti, odolnosti a hmotnosti a používajú sa na konštrukciu rôznych komponentov UAV vrátane rámu, rotorov a vrtúľ.[8]

### 3.2. Pokročilé senzory

Pokročilé senzory sa stali neoddeliteľnou súčasťou technológie UAV a poskytujú široké spektrum možností pre vojenské aj civilné aplikácie. Senzory, ako sú kamery, infračervené snímače a systémy LiDAR možno použiť na rôzne úlohy vrátane prieskumu, sledovania, mapovania a monitorovania životného prostredia.

#### 3.2.1. Kamera

Jedným z najbežnejších snímačov používaných v UAV je kamera, ktorá sa dá použiť na snímanie fotografií a videí s vysokým rozlíšením zhora. Bezpilotné prostriedky vybavené kamerami sa

bežne používajú na mapovanie a prieskum, ako aj na monitorovanie dopravy a udalostí veľkého rozsahu.

#### 3.2.2. Infračervené snímače

Na druhej strane infračervené snímače môžu byť použité na detekciu tepelných stôp a poskytovanie tepelného zobrazovania, vďaka čomu sú užitočné pri úlohách, ako je pátranie a záchrana, ako aj pri vojenských aplikáciách, ako je detekcia nepriateľa a vozidiel. Infračervené snímače zohrávajú veľkú úlohu pri environmentálnom výskume v oblasti pohybu fauny, keďže prinášajú možnosť z výšky identifikovať jednotlivcov až cele stáda živočíchov bez toho aby boli vyplašene.

#### 3.2.3. Multispektrálne a hyperspektrálne senzory

V posledných rokoch výrobcovia vyvinuli pokročilejšie senzory pre UAV, ako sú multispektrálne a hyperspektrálne senzory. Tieto senzory dokážu rozoznať a zmerať rôzne vlnové dĺžky svetla, čo umožňuje zber detailnejších a presnejších údajov. Tieto údaje možno použiť v celom rade aplikácií vrátane poľnohospodárstva, monitorovania životného prostredia a inšpekcie infraštruktúry. Multispektrálne a hyperspektrálne senzory sú pokročilé senzory používané v UAV, ktoré zachytávajú dáta v širokom rozsahu elektromagnetického spektra, od viditeľného svetla po infračervené. Tieto senzory môžu poskytnúť podrobné informácie o životnom prostredí a bežne sa používajú pri monitorovaní životného prostredia, poľnohospodárstve a lesníctve.[9]

#### 3.2.4. Systémy LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) je pokročilá technológia diaľkového snímania, ktorá využíva laserové svetlo na meranie vzdialenosti a vytváranie 3D máp prostredia s vysokým rozlíšením. Senzory LiDAR sa stávajú čoraz využívaným nástrojom v UAV vďaka svojej vysokej presnosti a schopnosti prenikať hustou vegetáciou a poskytovať podrobné topografické informácie. [10]

Senzory LiDAR fungujú na princípe vyžarovania laserových impulzov a merania času, za ktorý sa svetlo odrazí späť od objektov v prostredí. Analýzou času a intenzity odrazeného svetla dokáže LiDARový senzor vytvoriť vysoko presnú 3D mapu prostredia, vrátane tvaru a veľkosti objektov a ich vzdialenosti od senzora.[10]

#### 3.2.5. Magnetometre

Magnetometre sú pokročilé senzory, ktoré sa bežne používajú v UAV na meranie magnetického poľa Zeme. Sú založené na princípe zisťovania prítomnosti magnetických materiálov, ako je železo a nikel, v okolí prostredí. Keď je magnetometer namontovaný na UAV, môže poskytnúť cenné informácie o magnetickom poli Zeme.

Jednou z dôležitých aplikácií magnetometrov v UAV je navigácia. Pomocou merania magnetického poľa Zeme môžu magnetometre poskytnúť informácie o orientácii a umiestnení UAV. Tieto informácie sú užitočné najmä v oblastiach, kde môžu byť signály GPS slabé alebo nespoľahlivé, ako napríklad v budovách alebo v blízkosti vysokej výstavby.

### 3.3. Hybridné pohonné systémy

Hybridné pohonné systémy sa v odvetví UAV stávajú čoraz obľúbenejšími vďaka svojej schopnosti kombinovať výhody pohonných systémov s elektrickým aj spaľovacím motorom.

Hybridné pohonné systémy ponúkajú niekoľko výhod oproti tradičným elektrickým alebo spaľovacím motorovým pohonným systémom pre UAV. Kombináciou výhod oboch systémov môžu hybridné pohonné systémy poskytnúť dlhšie letové časy, vyššiu efektivitu a redundanciu v prípade zlyhania systému. Hybridné pohonné systémy však predstavujú aj niekoľko výziev, vrátane zvýšenej zložitosti, hmotnosti a požiadaviek na integráciu.[11]

Jedným zo spôsobov, ako prekonať výzvy hybridných pohonných systémov, je použitie pokročilých materiálov a výrobných techník. Napríklad ľahké materiály, ako sú uhlíkové vlákna, môžu byť použité na zníženie hmotnosti UAV, zatiaľ čo pokročilé výrobné techniky, ako je 3D tlač, môžu byť použité na zníženie zložitosti systému.[11]

### 3.4. Zvýšená autonómia

Pokroky v oblasti umelej inteligencie viedli k zvýšenému zameraniu na autonómne UAV. Autonómne UAV môžu operovať bez ľudského zásahu, vďaka čomu sú ideálne pre aplikácie, ako je pátranie a záchrana, sledovanie a prieskum.

Nedávne pokroky v technológii umožnili, aby boli UAV vybavené sofistikovanými autonómnymi systémami vrátane senzorov vyhýbania sa prekážkam, GPS a algoritmov počítačového videnia. Tieto systémy umožňujú UAV navigovať sa v zložitých prostrediach a vykonávať úlohy autonómne, bez potreby ľudského operátora.

### 3.5. Modulárny dizajn

Modulárny dizajn je koncept, ktorý si v priebehu rokov získava na popularite vo vývoji UAV. Zahŕňa návrh UAV takým spôsobom, aby sa dal ľahko upraviť, upgradovať alebo opraviť výmenou komponentov alebo modulov, ktoré tvoria UAV. Takéto riešenie prináša niekoľko výhod, vrátane zníženia nákladov na údržbu a zvýšenia životnosti UAV. [12]

Modulárny dizajn môže byť aplikovaný na niekoľko komponentov UAV vrátane draku lietadla, pohonného systému, systému užitočného zaťaženia a avioniky. Napríklad v draku lietadla umožňuje modulárna konštrukcia ľahkú výmenu poškodených alebo opotrebovaných komponentov, ako sú krídla alebo podvozok, bez potreby kompletnej generálnej opravy celého UAV. [12]

Modulárny dizajn pohonného systému umožňuje jednoduchú výmenu motorov alebo zdrojov energie v závislosti od požiadaviek ktoré jeho využitie prináša. Napríklad hybridný pohonný systém možno jednoducho integrovať do UAV, aby sa zvýšila výdrž a dolet.[12]

## 4. POTENCIÁLNY VÝVOJ UAV V RÁMCI VYUŽITIA

### 4.1. Ľahké materiály

V budúcnosti vieme predvídať trend snahy o odľahčenie výrobného materiálu pre UAV. Keďže hlavnou požiadavkou je čo najmenšie zaťaženie ale vysoká pevnosť a odolnosť materiálu

môžeme predpokladať aditívnu výrobu, grafén, kompozity s kovovou maticou a nanomateriály vo veľkej časti konštrukcii bezpilotných prostriedkov.

#### 4.1.1. Aditívna výroba

Technológia UAV neustále napreduje, rastie aj dopyt po ľahkých materiáloch, ktoré ponúkajú ešte vyšší výkon a odolnosť. Jedným z budúcich trendov v konštrukcii UAV je rozhodne aditívna výroba. Aditívna výroba, známa aj ako 3D tlač, je v konštrukcii UAV čoraz populárnejšia. Umožňuje vytváranie zložitých, ľahkých konštrukcií, ktoré by bolo ťažké vyrobiť pomocou tradičných výrobných metód. Táto technológia umožňuje rýchle prototypovanie a výrobu zložitých dielov, čím sa znižuje čas a náklady na výrobu. Umožňuje tiež vytváranie ľahkých, ale pevných komponentov, čím sa zlepšuje výkon a účinnosť UAV. Keďže sa technológia 3D tlače neustále zlepšuje a stáva sa čoraz dostupnejšou, bude mať pravdepodobne významný vplyv na priemysel UAV, čo umožní väčšie prispôsobenie a inovácie v dizajne a výrobe UAV.[13]

Ďalšou výhodou použitia technológie 3D tlače v konštrukcii UAV je schopnosť vytvárať ľahké, ale pevné komponenty. Optimalizáciou dizajnu a vlastností materiálu môžu byť 3D tlačené diely vyrobené tak, aby boli rovnako pevné ako tradičné výrobné metódy, pričom sú výrazne ľahšie. To môže zvýšiť čas letu a kapacitu užitočného zaťaženia UAV, čo im umožní používať na dlhšie misie alebo niesť pokročilejšie senzory a užitočné zaťaženie. [13]

Okrem toho možno technológiu 3D tlače použiť na vytváranie dielov so zložitými geometriami, ktoré by bolo ťažké alebo nemožné vyrobiť tradičnými výrobnými metódami. To môže viesť k efektívnejším dizajnom a lepšej aerodynamike, čím sa zlepší celkový výkon UAV.

#### 4.1.2. Grafén

Grafén je materiál, ktorý si v posledných rokoch získal významnú pozornosť vďaka svojim jedinečným vlastnostiam, akými sú vysoká mechanická pevnosť a vynikajúca elektrická vodivosť. Vďaka týmto vlastnostiam je grafén atraktívnym materiálom na použitie v rôznych aplikáciách vrátane UAV. [14]

Jednou z potenciálnych aplikácií grafénu v UAV je konštrukcia ľahkých a pevných komponentov. Grafén má vysoký pomer pevnosti k hmotnosti, vďaka čomu je ideálny na použitie v komponentoch, ako sú draky lietadiel, krídla a podvozky. Jeho elektrickú vodivosť možno využiť aj pri vývoji ľahkých a účinných elektrických systémov, ako sú batérie a motory. [14]

Ďalšou potenciálnou aplikáciou grafénu v UAV je vývoj pokročilých senzorov. Sensory na báze grafénu sa ukázali ako sľubné pri detekcii širokého spektra stimulov vrátane plynov, chemikálií a elektromagnetických polí. Tieto senzory môžu byť použité v UAV na monitorovanie prostredia, detekciu nebezpečných materiálov a navigáciu.

#### 4.1.3. Kompozity s kovovou maticou

Kompozity s kovovou maticou (MMC) sú materiály, ktoré sú tvorené kovovou maticou vystuženou sekundárnym materiálom, ako sú keramické alebo uhlíkové vlákna. Výsledný materiál má zlepšené mechanické vlastnosti, vrátane vyššej



pevnosti, tuhosti a odolnosti proti opotrebovaniu, vďaka čomu je vhodný na použitie v UAV.

Jednou z možných aplikácií MMC v UAV je konštrukcia drakov lietadiel a konštrukčných komponentov. Vysoká pevnosť a tuhosť MMC ich robí ideálnymi na použitie v aplikáciách, kde je kritické zníženie hmotnosti, ako napríklad v UAV. Vďaka vylepšenej odolnosti MMC proti opotrebovaniu sú tiež ideálne na použitie v náročnejšom prostredí, ako sú vojenské alebo priemyselné aplikácie.

#### **4.2. Nanomateriály**

Jednou z potenciálnych aplikácií nanomateriálov v UAV je konštrukcia ľahších, pevnejších a odolnejších materiálov. Napríklad uhlíkové nanorúrky (CNT) možno použiť na vystuženie kompozitných materiálov používaných v UAV, čo vedie k zlepšeniu pevnosti a tuhosti. Podobne môžu byť do polymérov pridané nanočastice, aby sa vytvorili ľahké, vysoko pevné materiály so zlepšenými tepelnými a elektrickými vlastnosťami. [14]

#### **4.3. Miniaturizácia**

Miniaturizácia je ďalším trendom vo vývoji a konštrukcii UAV. Ako technológia neustále napreduje, bezpilotné prostriedky sú stále menšie a ľahšie, pričom si stále zachovávajú svoju funkčnosť a schopnosti.

Miniaturné UAV zvyčajne vážia menej ako 100 gramov a zmestia sa do dlane. Napriek svojej malej veľkosti sú tieto bezpilotné lietadla vybavené pokročilými funkciami, ako sú kamery s vysokým rozlíšením, senzory a autonómne navigačné schopnosti.

Miniaturizácia tiež otvára nové možnosti pre aplikácie UAV. Výskumníci napríklad skúmajú využitie miniaturné UAV na monitorovanie životného prostredia, kde môžu byť použité na zber údajov o ťažko dostupných oblastiach, ako sú lesy alebo oceány. Miniaturné UAV je možné použiť aj na lekárske doručovanie v odľahlých oblastiach, pretože dokážu prepravovať malé balenia liekov alebo zdravotníckych pomôcok.

#### **4.4. Vylepšená technológia batérií**

Vylepšenie batérií a jej výkonnosti je ďalším dôležitým trendom vo vývoji UAV. S intenzívnym vývojom bezpilotných prostriedkov, zvyšovaním ich výkonu a hmotnosti, požiadavky na batérie pre UAV sa zvyšujú, čo vedie k potrebe výkonnejších batérií s dlhšou životnosťou.

Tradičné batérie pre bezpilotné prostriedky sú zvyčajne založené na lítium-iónovej technológii, ktorá poskytuje vysokú hustotu energie, ale je obmedzená z hľadiska kapacity a životnosti. Objavujú sa však nové technológie batérií, ktoré ponúkajú lepší výkon a efektívnosť.

Jednou z takýchto technológií sú polovodičové batérie, ktoré namiesto tekutého alebo gélového elektrolytu používaného v tradičných batériách využívajú tuhý elektrolyt. Polovodičové batérie majú potenciál ponúknuť vyššiu hustotu energie, rýchlejšie nabíjacie časy a lepšiu bezpečnosť v porovnaní s tradičnými batériami.

Ďalšou sľubnou technológiou sú batérie na báze grafénu, ktoré využívajú grafén ako vodivý materiál na zlepšenie výkonu batérie. Grafénové batérie ponúkajú rýchlejšie nabíjacie časy, vyššiu hustotu energie a dlhšiu životnosť v porovnaní s tradičnými batériami. [14]

Okrem týchto nových technológií batérií výskumníci tiež skúmajú spôsoby, ako zlepšiť účinnosť existujúcich batérií. To zahŕňa vývoj nových nabíjacích algoritmov a systémov, ktoré môžu maximalizovať výkon a životnosť lítium-iónových batérií.

#### **4.5. Hybridné pohonné systémy**

Ďalším trendom sa predpokladá používanie palivových článkov v hybridných pohonných systémoch, ktoré ponúkajú niekoľko výhod oproti tradičným spaľovacím motorom. Palivové články premieňajú vodík alebo iné palivá na elektrickú energiu, ktorú možno použiť na napájanie elektromotora UAV. Palivové články ponúkajú vysokú účinnosť, nízke emisie a tichú prevádzku, čo z nich robí atraktívnu alternatívu k tradičným spaľovacím motorom. Tradičné spaľovacie motory produkujú hluk ako vedľajší produkt spaľovacieho procesu, ktorý môže byť obťažujúci v obytných zónach alebo rušiť zver v prírodných oblastiach. [15]

Jednou z hlavných výhod palivových článkov je ich vysoká hustota energie. Palivové články môžu produkovať až trikrát viac energie na jednotku hmotnosti ako tradičné batérie, čo umožňuje dlhší čas letu a väčší dosah pre UAV. Palivové články navyše produkujú veľmi nízke emisie, keďže jediným vedľajším produktom elektrochemickej reakcie je vodná para. To z nich robí atraktívnu možnosť pre UAV, ktoré musia fungovať v environmentálne citlivých oblastiach, ako sú prírodné rezervácie alebo mestské oblasti. [15]

Primárnym problémom vodíkových palivových článkov je nedostatočná infraštruktúra na ich tankovanie spojená s ich relatívne vysokými nákladmi. Scenár sa však postupne mení, pretože náklady na palivové články sa znižujú. To podnietilo aj popredných výrobcov automobilov, aby prijali vodíkové palivové články a začali hromadne vyrábať vozidlá, ktoré na nich jazdia. [16]

#### **4.6. Bepilotné lietajúce taxi**

Bepilotné lietajúce taxi, známe aj ako lietajúce autá, sú konceptom, ktorý už dlho priťahuje predstavivosť spisovateľov sci-fi a futuristov. S pokrokom v technológii a inžinierstve sa táto myšlienka v blízkej budúcnosti môže stať realitou. Bepilotné lietajúce taxi majú potenciál spôsobiť revolúciu v spôsobe cestovania a ponúkajú rýchlejšie, efektívnejšie a ekologickejšie možnosti dopravy.

Bepilotné lietajúce taxi je typ lietadla s vertikálnym vzletom a pristátím (VTOL), ktoré využíva elektrický alebo hybridný pohon na vzlet a pristátie vertikálne a potom na prechod na dopredný let na dlhšie vzdialenosti. Tieto vozidlá sú navrhnuté tak, aby boli autonómne, pričom na ich obsluhu nie je potrebný fyzicky prítomný pilot. Na výmenu pilotovi prichádza pokročilý softvér a senzory na navigáciu vo vzduchu, vyhýbanie sa prekážkam a zaistenie bezpečnosti cestujúcich.

Jednou z hlavných výhod bezpilotných lietajúcich taxi je, výrazne skrátenie času cestovania. V preplnených mestách, kde sú hlavným problémom dopravné zápchy, môžu lietajúce autá

obísť preplnené cesty a letieť priamo do cieľa. To môže dochádzajúcich ušetriť hodiny cestovania každý deň, zlepšiť ich kvalitu života a produktivitu. Okrem toho môžu bezpilotné lietajúce taxi ponúkať priame trasy do destinácií, čím sa ďalej skracuje čas cesty a zvyšuje sa efektívnosť.

#### 4.7. Trend doručovania bezpilotnými lietadlami

Trend využitia bezpilotných lietadiel na donášku

v posledných rokoch naberá na popularite. Ako technológia napreduje, stále viac spoločností skúma využitie UAV na účely doručovania, najmä pre malé a ľahké balíky

Použitie UAV na doručenie ponúka niekoľko výhod. Najväčšou výhodou je rýchlosť. Bepilotné prostriedky dokážu doručiť balíky v priebehu niekoľkých minút v porovnaní s hodinami alebo dňami, ktoré by trvali tradičné spôsoby doručenia. Táto rýchlosť je užitočná najmä pri urgentných zdravotníckych zásobách alebo núdzových situáciách. Po druhé, používanie UAV na doručovanie je ekologickjšie ako tradičné spôsoby doručovania. UAV neprodukujú emisie a vyžadujú menej energie na prevádzku ako dodávky alebo lietadlá. Po tretie, UAV sa môžu dostať do vzdialených alebo ťažko prístupných oblastí, kde môžu byť tradičné spôsoby doručenia nepraktické alebo nemožné.

Napriek týmto výhodám má používanie UAV na doručenie aj určité nevýhody. Významnou nevýhodou je obmedzený dosah a kapacita užitočného zaťaženia. Väčšina bezpilotných prostriedkov môže lietať len na obmedzenú vzdialenosť a niesť malý balík. Preto nie sú vhodné na doručovanie veľkých alebo ťažkých predmetov. Okrem toho sú UAV citlivé na poveternostné podmienky, ako je silný vietor, dážď a sneh, čo môže spôsobiť, že dodávky nie sú možné alebo sú nebezpečné. A napokon, používanie UAV na doručovanie vyvoláva obavy o súkromie a bezpečnosť.

Na záver možno povedať, že trend doručovania bezpilotnými lietadlami je sľubným vývojom vo svete logistiky a dopravy. Aj keď existujú výzvy a obmedzenia, ktoré treba prekonať, potenciálne výhody používania bezpilotných lietadiel na doručovanie sú značné. Keďže technológia neustále napreduje a zavádzajú sa predpisy, môžeme očakávať, že v budúcnosti dôjde k rozsiahlejšiemu používaniu UAV v sfére donášky.

#### 5. ZÁVER

Primárnym cieľom tejto práce bolo získať a preskúmať pomocou analýzy údaje o súčasných bezpilotných lietadlách a posúdiť súčasné trendy, ktoré by mohli ovplyvniť budúcnosť tejto oblasti. Analýza rôznych zdrojov ukázala, že konštrukcia UAV predovšetkým závisí od budúceho využitia bezpilotného prostriedku.

Na záver možno povedať, že bezpilotné lietadlá spôsobili revolúciu v mnohých priemyselných odvetviach a čoraz viac sa používajú v širokej škále aplikácií. Od vojenských a komerčných aplikácií po vyhľadávanie a záchranu osôb, monitorovanie životného prostredia a poľnohospodárstvo, UAV poskytujú nové riešenia starých problémov. Jedným z kľúčových faktorov poháňajúcich rozvoj UAV je trend smerovania k ľahkým materiálom, ktoré umožňujú dlhšie letové časy a dovoľujú niesť väčšie užitočné zaťaženie.

Hybridné pohonné systémy sú tiež hlavným trendom v konštrukcii UAV s použitím palivových článkov, ktoré ponúkajú vysokú hustotu energie, nízke emisie a tichú prevádzku. Použitie pokročilých senzorov, ako sú multispektrálne a hyperspektrálne senzory, LiDAR a magnetometre, tiež poskytuje nové príležitosti na zber a analýzu údajov, čo umožňuje UAV vykonávať širokú škálu úloh.

Modulárny dizajn je ďalším trendom v konštrukcii UAV, ktorý umožňuje jednoduché prispôbenie a údržbu, ktoré sú obzvlášť dôležité v komerčnom a priemyselnom sektore, kde sa UAV používajú na kontrolu, prieskum a monitorovanie.

Celkovo sú trendy v konštrukcii UAV zamerané na zlepšenie výkonu, spoľahlivosti a všestrannosti. Ako sa technológia neustále vyvíja, môžeme očakávať, že uvidíme ešte viac pokrokov v konštrukcii UAV s novými materiálmi, pohonnými systémami a senzormi. Vďaka svojej schopnosti pracovať vo vzdialených a nebezpečných prostrediach sú UAV pripravené stať sa čoraz dôležitejším nástrojom pre širokú škálu priemyselných odvetví a aplikácií.

#### Podakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **313011ATR9** "Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémiej COVID-19".

#### Referencie

- [1] Rozhodnutie č. 2/2019 zo 14.11. 2019, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu lietadlom spôsobilým lietať bez pilota a vyhlasuje zákaz vykonania letu určených kategórií lietadiel vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky. [online] [cit. 2022-12-12] Dostupné na internete: <http://nsat.sk/wp-content/uploads/2019/11/R2-2019.pdf>
- [2] The Impact of Drones on Future of Military Warfare [online] [cit. 2023-3-24] Dostupné na internete: <https://www.zenadrone.com/drones-impact-the-future-of-military-warfare/>
- [3] Giordan, D., Adams, M.S., Aicardi, I. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bull Eng Geol Environ* **79**, 3437–3481 (2020). [online] [cit. 2023-3-24] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>
- [4] Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., Breen B., Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei – Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand, 2016, ISSN 0960-1481, [online] [cit. 2023-2-19] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.042>.
- [5] Asadzadeh S., Wilson J., Roberto C., UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, ISSN 0920-4105, [online] [cit. 2023-2-14] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109633>

- [6] The How and Why of Using Drones for Search and Rescue Operations?
- [7] [online] [cit. 2023-3-24] Dostupné na internete: <https://www.flytnow.com/blog/drones-for-search-rescue>
- [8] Muchiri G. N., Kimathi S., A Review of Applications and Potential Applications of UAV, [online] [cit. 2023-2-04] Dostupné na internete: <https://sri.ikuat.ac.ke/jkuatsri/index.php/sri/article/view/325>
- [9] Exploring the Different Materials Used in Drone Design. [online] [cit. 2023-01-11] Dostupné na internete: <https://ts2.space/en/what-are-the-expected-materials-and-construction-options-for-a-drones-design/>
- [10] Ing. Mgr. Smejkalová E., Vybrané metódy diaľkového prieskumu zeme pre detegovanie pevninských ropných presako. [online] [cit. 2023-01-11] Dostupné na internete: <file:///C:/Users/anasy/Downloads/Smejkalova.pdf>
- [11] Wallace L, Lucieer A, Watson C, Turner D. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*. 2012; 4(6):1519-1543. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/rs4061519>
- [12] Lipovský P, Draganová K, Novotňák J, Szőke Z, Fiľko M. Indoor Mapping of Magnetic Fields Using UAV Equipped with Fluxgate Magnetometer. *Sensors*. 2021; 21(12):4191. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/s21124191>
- [13] HOW DOES A DRONE'S MODULAR DESIGN SYSTEM WORK? [online] Dostupné na internete: <https://ts2.shop/en/posts/how-does-a-drones-modular-design-system-work>
- [14] Za hranicou možného, Aditívna výroba – nový spôsob myslenia. [online] Dostupné na internete: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/slovakia/sk/sluzby/aditivna-vyroba/>
- [15] Potential of Nanotechnology and Graphene in Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for the Aerospace Industry. [online] Dostupné na internete: [https://nanomalaysia.com.my/news\\_articles/potential-of-nanotechnology-and-graphene-in-unmanned-aerial-vehicles-uav-for-the-aerospace-industry/](https://nanomalaysia.com.my/news_articles/potential-of-nanotechnology-and-graphene-in-unmanned-aerial-vehicles-uav-for-the-aerospace-industry/)
- [16] Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. 2019. [online]. Power Supply Architectures for Drones - A Review. [cit. 2020-04-07]. Dostupné na internete: [https://www.researchgate.net/publication/336669179\\_Power\\_Supply\\_Architectures\\_for\\_Drones\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/336669179_Power_Supply_Architectures_for_Drones_-_A_Review)
- [17] Kristina Rudich. 2019. Drony pracujúce na vodíku: prečo nie sú nebezpečné a ako ich spoločnosť BM Power startup používa v ropnom priemysle a dodávkach nákladu. (v ruštine). [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné na internete: <https://hightech.fm/2019/10/22/bm-power>
- [18] You may be able to book a flying taxi within three years. [online]. Dostupné na internete: <https://www.bbc.com/news/business-58895259>
- [19] Why Amazon, UPS and even Domino's is investing in drone delivery services. [online]. Dostupné na internete: <https://www.insiderintelligence.com/insights/drone-delivery-services/>



## ANALYSIS OF ALTERNATIVE CONTROL OPTIONS FOR THE ROTAX 915 IS ENGINE

Jana Plochová  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

Kristína Šajbanová  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*This article focuses on analyzing the possibilities of alternative management of the ROTAX 915 IS aircraft engine using the ECU MASTER electronic control unit. The article examines how the use of ECU MASTER could become a beneficial alternative to the traditional manufacturer's control system. The new control system would ensure lower costs for purchasing ECU and reduce the number of sensors required to operate the engine. This would achieve a lower weight of the entire system, which is very important for aircraft in terms of fuel efficiency and cost savings.*

### Keywords

*Engine control unit, ROTAX 915, mixture control, regulation, sensors, optimization.*

### 1. ÚVOD

V dnešnej dobe je stále dôležité hľadať efektívnejšie riešenia v mnohých oblastiach, kde sa využíva technika a technológia. Jednou z oblastí, ktorá sa ním zaoberá, je aj letecký priemysel, kde každá malá zmena môže mať vplyv na bezpečnosť a účinnosť letu. V súčasnosti sa pri vývoji leteckých motorov kladie dôraz na ich efektívnosť a spoľahlivosť, aby sa minimalizovali emisie a náklady na prevádzku. V tomto článku sa zameriame na analýzu možností alternatívneho riadenia motora ROTAX 915 IS, ktorý sa používa na pohon najmä ultra-ľahkých lietadiel. Cieľom článku je preskúmať možnosti nahradenia pôvodnej riadiacej jednotky od výrobcu ROTAX novou jednotkou ECU MASTER, s cieľom zvýšiť efektívnosť a jednoduchosť prevádzky motora. V úvodnej časti článku sa budeme venovať teoretickým základom týkajúcich sa motora. Ďalej popíšeme použitý letecký motor ROTAX 915 IS, jeho sústavu a riadiacu jednotku od výrobcu ROTAX. Následne predstavíme novú riadiacu jednotku ECU MASTER a jej možnosti. V záverečnej časti článku si vysvetlíme možnosti jej implementácie do motorových systémov.

### 2. MOTOR ROTAX 915 IS

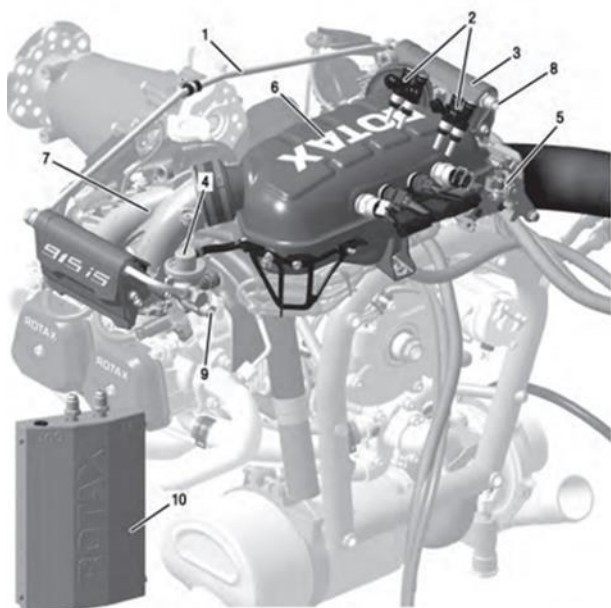
Motor ROTAX 915 IS bol vyvinutý na základe dopytu po modernom a výkonnejšom motore. Tento motor je vhodný pre ťažšie lietadlá, väčšie vlničky a malé helikoptéry. Jeho maximálna prevádzková výška je 23 000 stôp a plný výkon si udržuje až do výšky 15 000 stôp. V roku 2017 sa dostal do sériovej výroby a v roku 2015 bol predstavený na leteckých dňoch v Oshkosh v štáte Wisconsin. Najvýkonnejšou verziou z rady motorov ROTAX 915 je motor ROTAX 915 iSc C24. Tento motor má maximálny výkon 141hp pri 5800rpm a maximálny trvalý výkon 135hp pri 5500rpm. Motor je štvortaktný, turbom preplňovaný a má štyri kvapalinou a vzduchom chladené hlavy valcov. Jeho valce sú usporiadané v protíľahom smere a pokryté vrstvou nikasilu, čo zvyšuje ich odolnosť a životnosť. Motor má tiež väčšie kľukové čapy a kované piesty, ktoré zvyšujú životnosť piestov. Dolná časť piestov je dodatočne chladená olejom. Motor ROTAX 915 iSc C24 má tiež prepracovanú prevodovku a používa nový systém riadenia motora (EMS). Tento systém zahŕňa mód "ECO", ktorý

automaticky spustí pri výkone pod 97% a ochudobňuje zmes pre čo najnižšiu spotrebu. EMS tiež automaticky stiahne dáta z motora po každom lete a pošle ich do firmy ROTAX na vyhodnotenie a zvýšenie predikcie zlyhania motora [1] [2].

#### 2.1. Sústavy motora ROTAX 915 IS

##### 2.1.1. Palivová sústava

Tento motor sa líši od modelu ROTAX 912 iSc tým, že obsahuje turbodúchadlo, ktoré pomáha pri tvorbe zmesi. Palivová sústava je vybavená dvojitým vstrekovaním paliva, ktoré je riadené elektronickou jednotkou ECU. ECU dokáže vyhodnotiť optimálnu veľkosť vstrekovanej dávky a tiež počiatočnú fázu vstrekovania. Palivo sa dodáva do systému cez palivový filter a zachytávač vody a putuje do elektrických palivových čerpadiel. Hlavné palivové čerpadlo je vždy aktívne za chodu motora a je plne riadené pomocou ECU. Pomocné/záložné palivové čerpadlo je používané v prípade poruchy hlavného čerpadla, prípadne pri vzlete alebo pristáti. Za čerpadlami sa nachádza jemný palivový filter a taktiež snímač tlaku paliva, ktorý poskytuje informáciu o tlaku paliva v systéme pre ECU. Motor dosahuje vysoký výkon pri relatívne nízkej spotrebe paliva vďaka elektronickému systému vstrekovania paliva. ECU berie do úvahy kľúčové vstupné premenné, ako sú poloha škrtiacej klapky, otáčky motora, teplota nasávaného vzduchu, okolitý tlak, tlak v potrubí a teplotu výfukových plynov. Tieto údaje sa využívajú na výpočet optimálneho množstva paliva. Palivový systém je tiež vybavený regulátorom tlaku paliva, ktorý zabezpečuje konštantný tlakový rozdiel v palivových tryskách a v sacom potrubí, čím sa umožňuje vstrekovať rovnaké množstvo paliva nezávisle od režimu motora [3] [4].



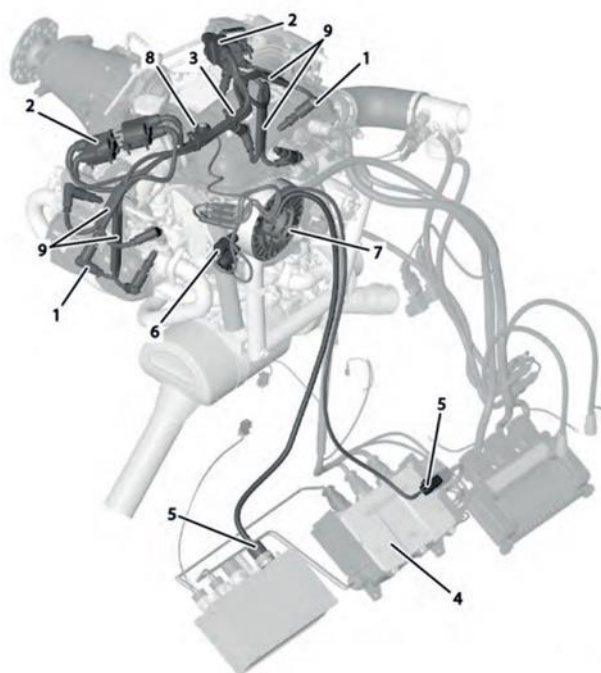
Obrázok 1 - Palivová sústava [1].

Tabuľka 1 - Palivová sústava [1].

1. Súprava palivového potrubia	6. Vzduchové potrubie
2. Palivové trysky	7. Nasávacie potrubie
3. Rozdeľovač paliva	8. Rozdeľovač paliva
4. Regulátor tlaku paliva	9. Rozdeľovač paliva výstupné potrubie
5. Teleso škrtiacej klapky	10. Zostava palivového potrubia

### 2.1.2. Zapaľovacia sústava

Zapaľovacia sústava leteckého motora 915 iSc C24 má dvojité zapaľovanie, kde každý valec disponuje dvoma zapaľovacími sviečkami. Sústava umožňuje tri módy aktivácie sviečok, vrátane módu "ON", kde sú aktívne všetky sviečky, a módu "LANE A" alebo "LANE B", kde sa používa len jedna sviečka na valec. Energia sa vytvára vo vnútorných generátoroch A a B, ktoré sú napojené na kľukový hriadeľ. Pri normálnom režime generátor A dodáva energiu do dvojitého zapaľovania, zatiaľ čo generátor B nabíja batériu. V prípade, že motor beží na voľnobehu, zapaľovacia sústava využíva energiu z generátora B. Elektronická riadiaca jednotka (ECU) riadi zapaľovanie pomocou senzorov, ktoré určujú pozíciu a rýchlosť rotácie kľukového hriadeľa. Systém obsahuje aj senzor klepania motora, ktorý deteguje frekvenciu detonácie a zabezpečuje ochranu motora pred poškodením. ECU spracováva údaje z týchto senzorov a na základe databázy od výrobcu vyhodnocuje optimálny čas zapálenia zmesi. Na výrobu vedenia vysokého napätia pre zapaľovací systém sa použili zliatiny medi kvôli ich nižšiemu odporu a vyššej odolnosti voči teplu. Systém zapaľovania je takmer celkom odolný voči opotrebeniu, pretože ECU generuje a spracováva zapaľovacie signály elektronicky. Celkový systém zapaľovania je navrhnutý tak, aby zabezpečil optimálny chod motora a jeho bezpečnú prevádzku [3] [4].



Obrázok 2 - Zapaľovacia sústava [1]

Tabuľka 2 - Zapaľovacia sústava [1]

1. Konektor zapaľovacej sviečky	6. Snímač kľukového hriadeľa
2. Dvojité zapaľovacie cievky	7. Generátor A a B
3. Zostava zapaľovacieho kábla	8. Senzor klepania motora
4. Zostava poistkovej skrinky	9. Silikónový obal zo sklenených vlákien
5. Konektor na 24V a AC-DC konvektor	

### 2.1.3. Olejová sústava

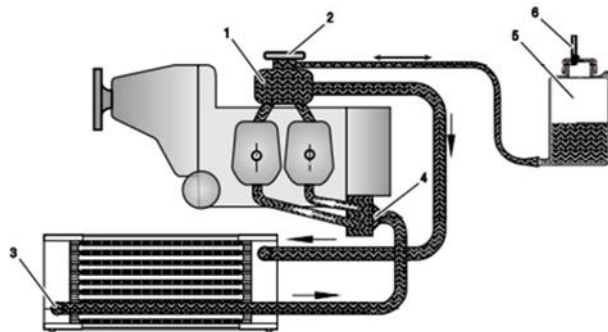
Olejová sústava je dôležitou súčasťou leteckého motora, ktorá zabezpečuje jeho mazanie, chladenie, tesnenie a ochranu povrchov. Systém používa suchú skriňu, kde zásoba oleja sa nachádza v nádrži mimo motora. Ideálny olej pre mazanie je SAE 10 W-40 od výrobcu Shell s označením AeroShell Sport Plus 4, ktorý má najlepšie vlastnosti pri normálnych a vysokých prevádzkových teplotách a možno ho použiť s rôznymi typmi palív. Olejový tok zabezpečujú trochoidné olejové čerpadlá, ktoré sú poháňané vačkovým hriadeľom a sú vybavené integrovaným regulátorom tlaku. Prvé čerpadlo nasáva olej z olejovej nádrže cez olejový chladič a tlačí ho cez olejový filter do mazacích bodov, zároveň obstrekuje spodnú stranu valcov. Druhé čerpadlo slúži na mazanie turbodúchadla a používa oddelenú olejovú vetvu. Hlavnú olejovú vetvu využíva hydraulický regulátor, ktorý ovláda uhol vrtule. Na odvodu oleja z olejovej sústavy sa používa systém odvodu oleja v nádrži. Tepelný a tlakový senzor merajú stav olejovej sústavy a poskytujú údaje pre pilota. Systém bol navrhnutý s cieľom dosiahnuť čo najvyššiu spoľahlivosť a udržať čo najnižšiu hmotnosť. Olejová sústava motora ROTAX 915 iSc C24 je preto dôležitým prvkom, ktorý zabezpečuje bezproblémový chod leteckého motora [3] [4].

### 2.1.4. Chladiaca sústava

Chladiaci systém leteckého motora je navrhnutý s cieľom efektívne odvádzať teplo vytvorené počas spaľovania paliva. Na



tento účel sa používa kvapalina na chladenie hláv valcov a nápor vzduchu na chladenie bloku a valcov. Chladiaci systém je uzavretý okruh, ktorý pozostáva z expanznej nádoby, vodného čerpadla a chladiča. Vedenia sú tvorené hadicami, ktoré môžu byť z gumy alebo silikónu. Vodná pumpa poháňaná pomocou vačkového hriadeľa zabezpečuje tok chladiacej kvapaliny. Tá preteká cez chladič, následne je nasávaná vodnou pumpou a tlačaná do hláv valcov. Odtiaľ sa dostáva späť do expanznej nádoby. Expanzná nádoba má tlakový uzáver a tlakový ventil, ktorý odvádza nadbytočnú kvapalinu do prepadovej nádoby v prípade prekročenia maximálneho tlaku. Senzor teploty kvapaliny meria teplotu priamo na hlave valca. Na chladenie sa nepoužíva čistá destilovaná voda, ale kvapalina s bodom varu minimálne 125°C. Maximálny tlak v sústave je 1,2 bar a maximálny objem nezahriatej kvapaliny musí byť 1,5 litra. Prietok kvapaliny pri 5800rpm je 70 l/min. Hadice z gumy majú životnosť 5 rokov, silikónové sú obmedzené iba opotrebovaním a vymenia sa až vtedy, keď nie sú vhodné pre prevádzku [3] [4].



Obrázok 3 - Schéma chladiacej sústavy [7]

Tabuľka 3 - Chladiaca sústava [7]

1. Expanzná nádrž	3. Chladič	5. Prepadovej nádrž
2. Tlakový uzáver	4. Vodné čerpadlo	6. Odvzdušňovač

### 2.1.5. Elektrická sústava

Systém leteckého motora ROTAX 915 IS obsahuje elektrickú sústavu, ktorá zabezpečuje dodávku elektrickej energie pre EMS a ostatné systémy. Elektrický systém pozostáva z generátorov, poistkovej skrine s regulátormi a vnútorných generátorov. Generátory sú od seba izolované a poháňané sú pomocou kľukového hriadeľa. Poistková skriňa manažuje elektrickú energiu a rozhoduje, či EMS bude napájaná pomocou jedného z generátorov alebo vonkajšieho zdroja elektrickej energie. ECU rozhoduje, ktorý generátor bude napájať EMS a pri štartovaní motora sa EMS napája z vonkajšieho zdroja elektrickej energie. Po naštartovaní motora sa generátor číslo dva používa ako zdroj pre EMS, zatiaľ čo generátor číslo jedna sa používa ako zdroj pre iné systémy motora. V prípade nefunkčnosti generátora číslo jedna, ECU automaticky použije generátor číslo dva ako zdroj pre EMS. V prípade motora ROTAX 915 iSc C24 má systém dva vývody elektrickej energie - prvý vývod je používaný na napájanie lietadla a má nominálne napätie 24V DC, zatiaľ čo druhý vývod má nominálne napätie 12V DC a je používaný na napájanie EMS. Zdrojom pre tieto vývody je menič striedavého prúdu na jednosmerný prúd, ktorý je zásobovaný pomocou trojfázového striedavého prúdu z generátorov a 24V batérie. V prípade potreby naštartovania motora je zdrojom elektrickej energie pre EMS batéria s napätím 24V, ktoré je regulované

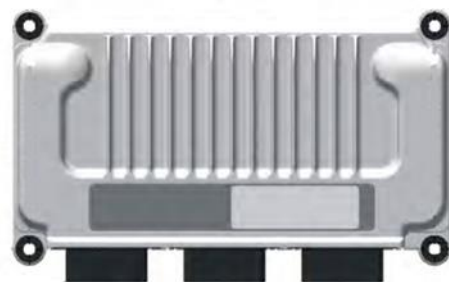
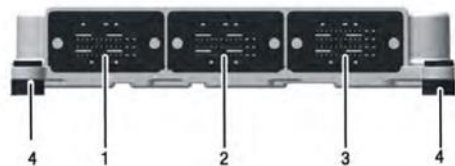
regulátorom na 12V. Po nadobudnutí požadovaných otáčok sa systém stáva samostatným a nepotrebuje vonkajší zdroj elektrickej energie [3] [4].

### 2.1.6. Systém riadenia motora (EMS)

Systém riadenia leteckého motora (EMS) je zložený z rôznych častí, vrátane ECU, zapaľovacej a vstrekovacej sústavy, senzorov, ovládacích prvkov a káblov. ECU je hlavnou súčasťou EMS a pozostáva z dvoch modulov - LANE A a LANE B. EMS má funkcie riadenia zapaľovania, vstrekovania paliva, detekcie porúch a manažmentu generátorov. V prípade poruchy sa systém automaticky prepne na funkčný modul na riadenie motora. Celý systém je zodpovedný za správne fungovanie leteckého motora a jeho bezpečné používanie [3] [4].

### 2.1.7. Elektronická riadiaca jednotka (ECU)

Elektronická riadiaca jednotka (ECU) je kľúčovým prvkom systému riadenia leteckého motora. Tento systém neustále zaznamenáva množstvo parametrov motora, vrátane tlaku, otáčok, teploty, záťaže a klepania, ktoré sa následne prenášajú do ECU. Digitálna riadiaca jednotka v ECU následne spracováva tieto dáta a vyhodnocuje optimálne nastavenie zmesi paliva, časovania vstrekovania a zapaľovania pre každý valec motora. Systém riadenia motora pozostáva z dvoch variantov - Lane A a Lane B, ktoré používajú rôzne senzory na meranie parametrov motora. Lane A používa senzory na detekciu tlaku v turbodúchadle, vonkajšieho tlaku, tlaku a teploty v rozdeľovači, teplotu výfukových plynov, vonkajšie teploty, pozíciu príпустi, klepania motora, teplotu chladiacej kvapaliny a rýchlosť otáčania kľukového hriadeľa. Na druhej strane, Lane B používa senzory na meranie tlaku v turbodúchadle, vonkajšieho tlaku, tlaku a teploty v rozdeľovači, tlaku a teploty oleja a rýchlosti otáčania kľukového hriadeľa. Vďaka ECU pilotovi stačí nastaviť, koľko percent výkonu potrebuje, a ECU automaticky zohľadní všetky podmienky a prispôbi nastavenie motora. Táto technológia zvyšuje efektívnosť a spoľahlivosť leteckých motorov a zabezpečuje ich bezproblémový chod [3] [4].



Obrázok 4 - Elektronická riadiaca jednotka ECU [1]

Tabuľka 4 - Elektronická riadiaca jednotka ECU [1]

1. Konektor zásuvky pre "LANE A1"	3. Konektor zásuvky pre "LANE B"
2. Konektor zásuvky pre "LANE A2"	4. Upevňovacie body

### 2.1.8. Výstupné ústrojenstvo

Výstupné ústrojenstvo odvádza výfukové plyny z valcov spaľovacieho motora a zabezpečuje optimálny priebeh spaľovacieho procesu. Systém pozostáva z viacerých komponentov, ako je výfukové potrubie, turbodúchadlo, tlmič výfuku a snímače teploty. Výfukové plyny sú zhromaždené v systéme a privádzané na turbínovú stranu, kde je poloha ventilu riadená ECU. Tlmič výfuku zlepšuje akustický komfort a snímače teploty slúžia na monitorovanie teploty a určenie optimálneho pomeru zmesi. Údržba a kontroly sú dôležité pre optimálnu funkčnosť a celkovú účinnosť spaľovacieho motora. [3] [4].

### 2.1.9. Turbodúchadlo

Motor ROTAX 915 IS má turbodúchadlo, ktoré zvyšuje tlak v sacom potrubí a udržiava výkon aj vo vysokých výškach. Turbodúchadlo využíva výfukové plyny motora a tlak v sacom potrubí sa reguluje škrtiacou klapkou. Vzduch sa nasáva vzduchovým filtrom a stláčaný vzduch prechádza chladičom a potom spolu s palivom do sacieho potrubia. Kompresný pomer vzduchu závisí od množstva výfukových plynov prechádzajúcich cez turbínu, ktorá premieňa kinetickú energiu na rotačný pohyb. Systém má obtokový ventil, ktorý riadi kompresiu a senzory teploty a tlaku vzduchu a plynu. Pretlakový ventil uvoľňuje nadmerný tlak v sacom potrubí a ventil na odvetranie kľukovej skrine uvoľňuje tlak z piestových krúžkov. Sensory vonkajšej teploty a tlaku musia byť mimo priameho ofukovania vzduchu a senzor plniaceho tlaku sa nachádza pred škrtiacou klapkou, ďalší snímač tlaku sa nachádza za ňou. [3] [4].

## 3. NÁVRH ALTERNATÍVNEHO RIADENIA MOTORA ROTAX 915 IS

Návrh alternatívneho riadenia motorov ROTAX 915 IS zahŕňa výmenu pôvodnej riadiacej jednotky ECU od firmy ROTAX za ECU MASTER od IMFsoft, s.r.o. Toto riešenie prináša množstvo výhod, ako napríklad zjednodušenie riadenia motora, jednoduchšiu údržbu, zníženie nákladov v prípade poruchy, zníženie elektrického zaťaženia a zníženie hmotnosti. Zníženie hmotnosti motorov môže mať pozitívny dopad na výkon a manévrovaciu schopnosť lietadiel, zatiaľ čo zníženie elektrického zaťaženia môže znamenať menšie a ľahšie batérie a alternátory. Pre dosiahnutie efektívneho riadenia motora ROTAX 915 IS je dôležité monitorovať procesy v motore a riadiť aktuátory na základe pokynov z riadiacej jednotky ECU MASTER. Funkcie a vlastnosti ECU MASTER umožňujú presné a efektívne riadenie motora. Postup návrhu alternatívneho riadenia motorov ROTAX 915 IS sa musí zamerať na vytvorenie systému, ktorý bude plne kompatibilný s motorom a jeho požiadavkami. Celkovo je návrh alternatívneho riadenia motorov ROTAX 915 IS zameraný na zlepšenie efektívnosti, spoľahlivosti a údržby motorov. Toto riešenie môže mať pozitívny dopad na výkon a funkčnosť lietadiel, ako aj na celkové náklady, na údržbu a prevádzku motorov [3] [4].

## 3.1. Elektronická riadiaca jednotka ECU MASTER

ECU MASTER je elektronická riadiaca jednotka, ktorá slúži na ovládanie predstihu zapalovania a dobu vstrekovania v spaľovacích motoroch s jedným až dvanástimi valcami. V závislosti od konkrétneho typu ECU môže mať výstupy pre indukčné alebo kapacitné zapalovacie cievky, ale aj kombinované výstupy pre oba typy cievok. S ECU MASTERom je možné zaznamenávať údaje zo senzorov a následne ich vyhodnocovať. Týmto spôsobom dokáže riadiť aktuátory motora. Mapy od výrobcu alebo navrhnuté používateľom môžu byť použité na vyhodnocovanie a nastavenie parametrov ECU MASTERa. Vďaka širokej škále vlastností ECU MASTERa je možné ho použiť na riadenie spaľovacích motorov rôznych typov vozidiel vrátane motocyklov, automobilov, lodí a dokonca aj leteckých motorov. Navyše, vďaka možnosti riadenia vysokých otáčok dokáže ECU MASTER riadiť aj turbíny. ECU MASTER od výrobcu IMFsoft, s.r.o. je tak univerzálnym nástrojom na optimalizáciu výkonu a účinnosti spaľovacích motorov [5] [6].

### 3.1.1. Funkcie ECU MASTER

#### Technológia programovateľného logického zariadenia (FPGA)

Elektronické riadiace jednotky (ECU) sa stali dôležitými pre riadenie moderných spaľovacích motorov. V ECU MASTER sa používa programovateľné logické zariadenie (FPGA), ktoré umožňuje digitálny a analógový prevod signálov zo senzorov. ECU následne vyhodnocuje tieto signály a vykonáva matematický model skutočných otáčok motora. ECU MASTER podporuje ľubovoľné usporiadanie snímaných zubov, čo znamená, že je možné použiť ľubovoľné ozubené koleso so snímačom polohy kľukového hriadeľa a nastaviť ho v softvéri ECU. To umožňuje ECU určiť rýchlosť a smer rotácie kľukového hriadeľa, čo je dôležité pre správnu synchronizáciu kľukového a vačkového hriadeľa, aby sa zabezpečilo správne zapalovanie a vstrekovanie paliva. FPGA je vďaka svojmu vysokému operačnému výkonu a presnosti ideálnym riešením pre digitálny a analógový prevod signálov zo senzorov. Táto technológia sa používa nielen v ECU MASTER, ale aj v iných ECU pre rôzne aplikácie. Použitie programovateľného logického zariadenia prináša výhody v podobe presného riadenia motorov a možnosti nastavenia rôznych parametrov v softvéri ECU [5] [6].

#### 5D mapy

Jednotka ECU MASTER disponuje tiež 5D mapami predstihu zapalovania a vstrekovania. 5D mapy zahŕňajú päť hlavných rozmerov. Tieto rozmery sú zvyčajne rýchlosť motora, poloha škrtiacej klapky, teplota nasávaného vzduchu, zaťaženie motora a pomer vzduchu a paliva. Vďaka použitiu 5D mapy vieme komplexnejšie zobrazit' prevádzkové podmienky motora. To umožňuje presnejšie nastavenie motora na dosiahnutie optimálneho výkonu a účinnosti v širšom rozsahu podmienok [5].

#### Snímanie podtlaku v sacom potrubí

Snímanie podtlaku v sacom potrubí motora, slúži na kontrolu a monitorovanie podtlaku, ktorý vzniká v dôsledku pohybu piestov vo valcoch motora. Snímač podtlaku sa nachádza priamo v sacom potrubí a poskytuje informácie riadiacej jednotke, ktorá na základe týchto informácií riadi prívod paliva a emisie motora.

Integrácia snímania podtlaku umožňuje dosiahnuť vysokú presnosť merania podtlaku a zlepšenie výkonu, účinnosti a emisií motora. Tento prvok je dôležitý najmä v súvislosti s modernými motorovými systémami, ktoré vyžadujú vysokú presnosť a efektívnosť riadenia. Preto je správne a presné snímanie podtlaku v sacom potrubí kľúčovým faktorom v riadení moderných motorových systémov [5] [6].

#### Snímanie teploty v motore

Snímanie teploty v motore je kľúčové pre riadenie mnohých parametrov prevádzky motora, pretože teplota môže ovplyvniť výkon, účinnosť a životnosť motora. Na monitorovanie teploty slúžia rôzne senzory na meranie teploty, ktoré sú podporované riadiacou jednotkou ECU MASTER. Tieto senzory môžu byť umiestnené v olejovom, chladiacom alebo výfukovom systéme motora, alebo pred sacím ústrojenstvom. Informácie z týchto snímačov sa prenášajú priamo do riadiacej jednotky motora, ktorá ich používa na riadenie rôznych parametrov prevádzky. Ak napríklad teplota motora presiahne bezpečnú úroveň, riadiaca jednotka môže zmeniť dávkovanie paliva na zníženie teploty [5].

#### Meranie otáčok motora

Riadiaca jednotka motora používa výstup schopný prenášať digitálny signál cez CANbus na meranie otáčok motora. Táto informácia sa využíva na reguláciu rýchlosti chodu motora, riadenie zapalovania a iných parametrov prevádzky motora. Otáčky motora sa môžu získať aj z iných senzorov, ako napríklad senzorov polohy vačkového hriadeľa alebo kľukového hriadeľa, no otáčkomer predstavuje jednoduchší a spoľahlivejší spôsob merania otáčok motora [5] [6].

#### Riadenie palivového čerpadla

Riadiaca jednotka motora ECU MASTER dokáže zhromažďovať a analyzovať údaje zo senzorov na riadenie palivového čerpadla. Tento proces zahŕňa viaceré parametre, ako sú rýchlosť otáčania motora, tlak v palivovom systéme, teplota motora, množstvo vzduchu, ktoré vstupuje do motora a množstvo paliva, ktoré sa dostáva do valcov. Riadiaca jednotka ponúka rôzne typy riadenia palivového čerpadla, vrátane pulzného riadenia a najpokročilejšieho PWM riadenia. PWM riadenie umožňuje presnejšie nastavenie rýchlosti palivového čerpadla v závislosti od prevádzkových požiadaviek a riadiaca jednotka môže regulovať množstvo paliva, ktoré sa dodáva do motora. V prípade problému s palivovým čerpadlom, riadiaca jednotka dokáže upozorniť pilota na technickú poruchu a prepnúť systém do núdzového režimu, kde je palivové čerpadlo riadené iným spôsobom, aby sa predišlo možnému poškodeniu motora [5] [6].

#### Regulácia dobíjania batérie

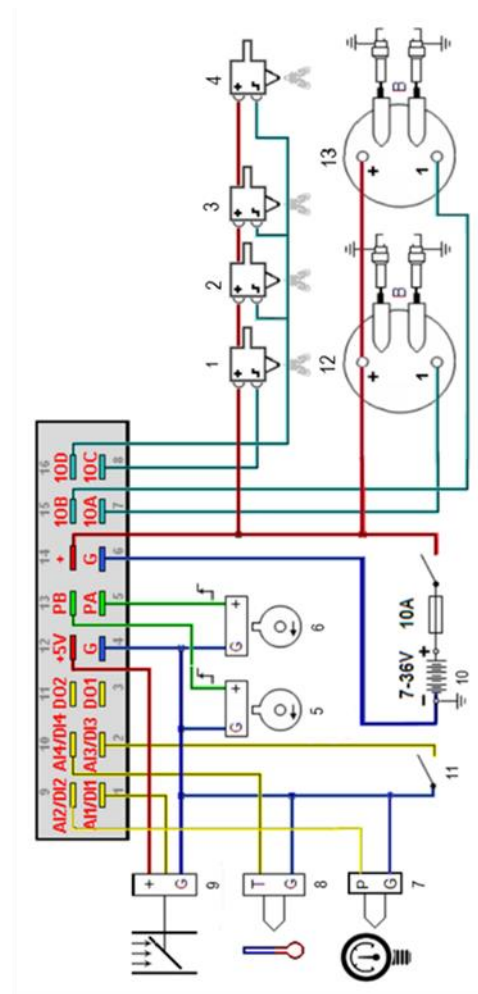
Riadiaca jednotka zabezpečuje optimálne nabíjacie napätie a prúd pre batériu v závislosti od jej stavu a požiadaviek systému. Riadiaca jednotka môže upravovať napätie a prúd generátora a ďalšie charakteristiky nabíjania batérie, za účelom najlepšej účinnosti a bezpečnosti nabíjania. Kľúčovým prvkom riadenia dobíjania batérie je zabezpečiť, že batéria je v optimálnom stave pre spustenie motora a prevádzku elektrických zariadení na palube lietadla a zároveň poskytuje ochranu pred nadmerným nabíjaním. Riadiaca jednotka motora ECU MASTER umožňuje

monitorovanie stavu batérie a zobrazovanie týchto informácií na prístrojovej doske lietadla [5] [6].

#### Riadenie výkonu a spotreby paliva

ECU MASTER je moderná riadiaca jednotka motora s PID regulátorom pre presné riadenie výkonu a spotreby paliva. PID regulátor sleduje chybu v otáčkach motora a plniacom tlaku turbodúchadla a kombinuje proporcionálne, integračné a diferenciálne regulovanie. Využitie PID regulácie umožňuje zlepšiť efektívnosť motora a dosiahnuť lepšiu spotrebu paliva. Toto riadenie môže byť užitočné aj pre iné aplikácie, ako sú generátory a člny [5] [6].

#### 3.1.2. Prvý návrh zapojenia ECU MASTER



Obrázok 5 - Návrh prvého zapojenia ECU MASTER [8]

Prvý návrh zapojenia ECU MASTER pre riadenie spaľovacieho motora obsahuje štyri aktuátory vstrekovania (1) (2) (3) (4) a dve indukčné zapalovacie cievky TCI (12) (13). Snímače otáčok kľukového a vačkového hriadeľa (5) (6) a snímač tlaku v sacom potrubí (7) sú potrebné pre optimálny chod motora. Tento návrh obsahuje aj senzor teploty motora (8) a senzor polohy škrtiacej klapky TPS (9). Riadiaca jednotka je napájaná pomocou zdroja jednosmerného prúdu s napätím 7 až 36V (10) a je zabezpečená 10A poistkou. V prípade vysadenia motora sa v schéme nachádza senzor blokovania chodu motora (11), ktorý deteguje



poruchy a umožňuje ECU zareagovať naň napríklad zastavením dodávky paliva.

#### 4. ZÁVER

Záver tohto článku naznačuje, že náhrada pôvodnej riadiacej jednotky ECU v leteckom motore ROTAX 915 IS novou ECU MASTER predstavuje reálne možnosti optimalizácie a zjednodušenia motora. V článku sa nezameriavame na simulované lety ani testovacie situácie v reálnom prostredí. Skúmame teoretickú analýzu alternatívneho riadenia leteckého motora ROTAX 915 IS s cieľom jeho zjednodušenia. Hoci ECU MASTER môže byť náhradou pôvodnej riadiacej jednotky, nie je možné prevádzkovať motor s touto riadiacou jednotkou na lety, pretože nemá zálohu. Táto práca môže byť využitá pre vedecké účely a merania v laboratóriu pre študentov, ktorí sa zaujímajú o alternatívne riadenie spaľovacích motorov v letectve. Veríme, že naše zistenia a výsledky budú mať veľký prínos pre študentov a môžu slúžiť ako zdroj inšpirácie pre ďalšie experimentovanie a rozvíjanie technológií v tejto oblasti.

#### Referencie

- [1] History. In Rotax Aircraft Engines [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné na internete: <<https://www.flyrotax.com/p/about-rotax/history>>
- [2] BERTORELLI, P. Rotax 915 is: Incremental Power Boost. In Aviation Consumer [online]. 2019. [cit. 2023-03-25]. Dostupné na internete: <<https://www.aviationconsumer.com/maintenance/rotax-915-is-incremental-power-boost/?fbclid=IwAR1-VtNsHi2OSgO3dkylmRjQ1rk-M3GdPwEtunY85cQnDzeWg93S1Rt3jI0>>
- [3] Maintenance manual heavy for ROTAX engine type 915 i Series. REF NO.: MMH-915 i A / C24 | PART NO.: 898861
- [4] Operators Manual for ROTAX engine type i A / C24 Series. REF NO.: OM-915 i A / C24 | PART NO.: 898851
- [5] Master ignition map sensor. In IMFsoft, s.r.o. [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné na internete: <<https://imfsoft.com/en/category-control-units/master-ignition-map-sensor#toc-documentation>>
- [6] ECU master CDI - TCI V8 - imfsoft. In [online]. [cit. 2023-03-025]. Dostupné na internete: <[https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterCDI\\_TCI\\_V8\\_43\\_EN.pdf](https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterCDI_TCI_V8_43_EN.pdf)>
- [7] Installation manual for ROTAX engine type 915 i Series. REF NO.: IM-915 i A / C24 | PART NO.: 898871
- [8] ECU master CDI - TCI Scheme & Configuration rev 8 - imfsoft. In [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné na internete: <[https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterSchemeV8\\_43\\_EN.pdf](https://imfsoft.com/files/master/documentation/MasterSchemeV8_43_EN.pdf)>



## EVALUATION OF SLOVAK MANUFACTURED AIRCRAFT SUITABLE FOR PILOT TRAINING IN FLIGHT TRAINING ORGANIZATION

**Emília Alexandra Pavlusíková**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Frederik Chodelka**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Aeroplanes described in this paper are designed for sporting and recreational purposes, but also meet the requirements for training purposes of pilots. Paper is focused on detailed characterization and technical specification of individual aeroplane, their usability, safety, and economy. The contribution of the title is to create a methodology for selecting aeroplanes suitable for training purposes in a particular training organization, and subsequently applying the procedure to the one of the aeroplanes.*

### Keywords

*training, training organization, Viper SD4, Dynamic WT9, comparison, technical specification, methodology of selection*

### 1. ÚVOD

Letecká doprava patrí medzi najrýchlejšie sa rozvíjajúce oblasti dopravy. História letectva sa začala oficiálne datovať do roku 1903, odvtedy si prešla letecká doprava obrovským rozvojom. Preprava pasažierov, tovaru a pošty pomocou lietadiel sa stala pre nás bežným spôsobom prepravy, ktorý nám poskytuje atribúty akými sú bezpečnosť, rýchlosť a pohodlnosť. Vysoké nároky na bezpečnosť si vyžadujú aby bol pozemný, ale aj letový personál adekvátne a odborne vyškolený. Odbornosť leteckého personálu – pilotov sa začína už v leteckej škole, v ktorej budúci piloti vykonávajú prípravné kurzy. Letecké školy preto musia klásť vysoké požiadavky na svojich zamestnancov, žiakov, ale aj lietadlá, ktoré budú zaradovať do výcviku. (1)

Cieľom práce je stanoviť vhodné lietadlo, ktoré bude zaradené do základného výcviku pre získavanie Licencie súkromného pilota, timebuildingu (nalietavanie hodín na získanie kvalifikácie) a ktoré bude využiteľné aj pre získanie kvalifikácie VFR night (Pravidlá lietania za viditeľnosti zeme v noci). Lietadlo musí spĺňať kritéria akými sú: bezpečnosť, ľahká ovládateľnosť náročnosť na pilotáž musí byť adekvátna výcviku a ďalšie.

V práci sa budeme venovať detailnej technickej špecifikácii lietadiel slovenskej výroby, vykonáme ich stručné porovnanie a zhodnotíme výhody a nevýhody jednotlivých lietadiel. Dôležitou časťou práce bude analýza a porovnanie lietadiel pomocou Saatyho metódy, metóda analytického hierarchického procesu, pomocou ktorej matematickými vzorcami a rovnicami určíme, ktoré z definovaných lietadiel je vhodnejšie pre použitie vo vybranej výcvikovej organizácii.

Výsledkom práce bude jasné zhrnutie kritérií výberu lietadla do výcviku, na základe čoho budeme môcť zdefinovať lietadlo vhodnejšie na výcvik v nami vybranej výcvikovej organizácii spolu s odôvodnením výberu daného typu.

### 2. CHARAKTERISTIKA VÝCVIKOVEJ ORGANIZÁCIE

Letecký výcvik na Žilinskej univerzite sa poskytuje už od roku 1962. Spočiatku sa výcvik pilotov uskutočňoval prostredníctvom organizácie Zväz pre spoluprácu s armádou, neskôr, v roku 1975 sa Vysoká škola dopravy a spojov stala samostatným poskytovateľom praktického aj teoretického výcviku.

Praktický výcvik dopravných pilotov na Žilinskej univerzite v Žiline prebieha pod vedením kvalifikovaných inštruktorov s dlhoročnými skúsenosťami, teoretický výcvik zabezpečujú odborne kvalifikovaní, vzdelaní a skúsení vyučujúci.

Letecká škola LVVC (Letecké výcvikové a vzdelávacie centrum) SK.ATO.01 v súčasnosti poskytuje dve formy výcviku a to:

- integrovaný kurz ATPL(A)
- modulový kurz ATP – teória ATPL

Integrovaný kurz je odporúčaný pre uchádzačov bez predošlých skúseností. Minimálny vek uchádzača o integrovaný kurz ATP je 18 rokov, kurz je časovo obmedzený (36 mesiacov) a pred prvým samostatným letom musí pilot-žiak disponovať platným osvedčením zdravotnej spôsobilosti 1. triedy. Počas kurzu pilot-žiak absolvuje skúšky pre získanie osvedčenie rádiotelefonistu a po ukončení teoretickej časti poskytovanej prostredníctvom LVVC, pilot-žiak absolvuje teoretické preskúšanie celkových vedomostí na Dopravnom úrade. Skúška pozostáva z 13 predmetov a je vykonávaná v anglickom jazyku. Po úspešnom ukončení teoretického a praktického výcviku absolvuje žiak praktické preskúšanie vykonávané pod dozorom examinátora Dopravného úradu. (2)

Modulový kurz je určený pre pilotov v nadväznosti na ich predošlé skúsenosti. Podmienkou pre zaradenie do modulového kurzu je aby pilot-žiak disponoval preukazom spôsobilosti PPL(A) alebo CPL(A). Podmienky pre typ Osvedčenia o zdravotnej spôsobilosti sa líšia v závislosti od kurzu a modulov, odporúča sa však aby pilot-žiak disponoval osvedčením o zdravotnej

spôsobilosti 2. triedy. Rovnako ako pri integrovanom kurze aj tu platí, že po ukončení teoretickej časti výcviku žiak absolvuje teoretické preskúšanie celkových vedomostí na Dopravnom úrade a praktické preskúšanie pod dozorom examinátora Dopravného úradu. (3)

### 3. VÝCVIK PPL

Licencia súkromného pilota PPL (A) kvalifikačná kategória pre jednomotorové piestové letúne SEP (L), je licencia, ktorá oprávňuje držiteľa tohoto preukazu vykonávať funkciu veliaceho pilot na súkromné účely bez možnosti odplaty. Cieľom kurzu je aby bol pilot-žiak schopný samostatne uskutočniť bezpečný a efektívny let za podmienok lietania za viditeľnosti zemi na jednomotorových piestových letúnoch.

Minimálny vek uchádzača o licenciu súkromného pilota je 16 rokov, pred vykonaním prvého samostatného letu musí pilot-žiak disponovať Osvedčením zdravotnej spôsobilosti 1. alebo 2. triedy.

Počas výcviku žiak absolvuje teoretickú prípravu, ktorá sa vykonáva prezenčne v priestoroch letiska Dolný Hričov pod vedením skúsených inštruktorov. Náročnosť teoretickej prípravy je 100 hodín. Počas prvej fázy výcviku sa žiak oboznámi s letovou príručkou lietadla určeného na základný výcvik, z ktorej absolvuje preskúšanie teoretických znalostí o lietadle. V praktickej časti výcviku sa žiak zoznámí so základnými letovými vlastnosťami lietadla, základnou technikou pilotáže, núdzovými postupmi a zoznámí sa aj s nezvyklými polohami lietadlami a ich následným vyberaním. Ak inštruktor zhodnotí, že je žiak dostatočne pripravený, pilot-žiak vykoná prvý samostatný let pozostávajúci z troch letiskových okruhov. Následne prebiehajú úlohy zamerané na zlepšenie techniky pilotáže, základné lety podľa prístrojov a navigačné lety s inštruktorom aj samostatne. Časová náročnosť praktickej časti výcviku je 45 hodín.

Podmienkou pri získaní licencie súkromného pilota je vek 17 rokov a preukaz rádiotelefonistu. Ďalšou podmienkou je absolvovanie preskúšania z teoretických vedomostí v leteckej škole, praktické preskúšanie examinátorom a následne môže byť pilot-žiak uvoľnený na teoretické preskúšanie vedomostí na Dopravnom úrade z nasledujúcich predmetov:

- Letecké právo a postupy ATC
- Všeobecné znalosti o lietadle
- Letové výkony lietadla a plánovanie letov
- Ľudská výkonnosť a obmedzenia
- Meteorológia
- Navigácia
- Prevádzkové postupy
- Základy letu
- Komunikácia

Po úspešnom absolvovaní teoretických skúšok a praktickej skúšky získava pilot-žiak licenciu súkromného pilota PPL (A) /SEP (L). Platnosť licencie je neobmedzená, triedna kvalifikačná

kategória SEP (L) je obmedzená na 24 mesiacov a pre udržanie kvalifikácie sa musí obnovovať. (4) (5)

### 4. KRITÉRIA VÝBERU LIETADLA DO VÝCVIKU

Na začiatku procesu výberu lietadla vhodného na výcvik sa uskutoční zasadnutie členov leteckej výcvikovej organizácie pozostávajúceho z riaditeľa výcvikovej organizácie, vedúceho letového inštruktora a vedúceho výcviku. Na zasadnutí predkladajú návrhy vhodných a odporúčaných lietadiel, o ktorých vedú diskusie z hľadiska finančnej, odbornej a celkovej vhodnosti lietadla pre výcvik. Najmarkantnejšími kritériami, ktoré zohľadňuje výcviková organizácia pri výbere sú nasledovné:

- druh výcviku, pre ktorý je zavedenie nového typu lietadla zamýšľané,
- bezpečnosť,
- ovládateľnosť a náročnosť na pilotáž,
- vybavenie lietadla,
- stabilita lietadla,
- ekonomická náročnosť pri obstarávaní,
- rezurzy (motor, vrtuľa, podvozok),
- ekonomická náročnosť na servis ,
- vzdialenosť servisu.

Markantným prvkom, ktorý zohráva hlavnú úlohu pri výbere lietadla do výcviku je v LVVC aj požiadavka domácej výroby. Táto požiadavka úzko súvisí aj s koronakrízou, ktorá sužovala svet v období 2020-2022. Počas obdobia karanténnych opatrení a zákazu cestovať do zahraničia bolo pre LVVC náročné uskutočniť servisovanie lietadiel, ktoré vyžadovali prevoz lietadla napríklad do Českej republiky. Ak medzi základné požiadavky zaradíme domácu výrobu, servis lietadla bude takmer vždy uskutočniť v rámci štátu. Ďalšou výhodou domácej výroby lietadla je, že školenia personálu, inštruktorov ale aj žiakov prebiehajú v slovenskom jazyku, letové príručky a dokumenty potrebné pre údržbu lietadiel sú poskytované výrobcom aj v slovenskom jazyku, rovnako aj samotná komunikácia s výrobcom pri obstarávaní lietadla a následne pri servisovaní môže prebiehať v našom materinskom jazyku- v slovenčine.

Jednou z posledných významných požiadaviek, ktoré definuje LVVC pri výbere lietadla je, že lietadlo musí byť certifikované na nočné lety za podmienok viditeľnosti zeme. V základnom výcviku je veľmi dôležité aby bola nastolená istá rovnorodosť medzi lietadlami, bolo nutné aby všetky lietadlá, ktoré sa budú poskytovať na základný výcvik pochádzali od rovnakého výrobcu. Ak by sme do výcviku zaradili lietadlá od rozličných výrobcov, psychická záťaž na pilota-žiaka sa bude stupňovať, čo je v základnom výcviku nevhodné.

Po zadefinovaní požiadaviek na lietadla, sa členovia leteckej školy dohodnú a vyberú jedno, najvhodnejšie pre danú leteckú školu a pre daný typ výcviku. (6)

## 5. TECHNICKÁ ŠPECIFIKÁCIA VIPER SD4

Viper SD4 je dvojmiestny, jednomotorový, dolnokrídly, celokovový, ultraľahký jednoplošník. Lietadlo je vyvíjané a vyrábané na Slovensku a je určené predovšetkým na rekreačné a športové lietanie, verzia Viper SD4-RTC je však certifikovaná agentúrou EASA na výcvik dopravných pilotov. Pohon lietadla je zabezpečený jedným štvorvalcovým, kombinovane vzduchom/vodou chladeným motorom Rotax 912 ULS2 s maximálnym vzletovým výkonom 73,5 kilowattov a s pevnou, na zemi staviteľnou trojlístou vrtuľou Neuform.

Letún Viper SD4 je vybavený jedným motorom Rotax 912ULS. Je to štvorvalcový, štvordobý, zážihový motor. Hlavy valcov sú chladené vodou, samotné valce sú chladené vzduchom, ktorého prívod môže regulovať pilot z kabíny. Maximálny vzletový výkon motora je 73,5 kilowattov, čo predstavuje 100 konských síl a 5800 otáčok za minútu. Otáčky motora nad 5500 otáčok za minútu sú obmedzené na maximálny časový interval päť minút. Pri prevádzkovom výkone 75% motor dosahuje 51 kilowattov, 68 konských síl a motor vykazuje zhruba 5000 otáčok za minútu.

Vrtuľa Neuform CR3-65-(IP)-47-101.6 je trojlístá, na zemi staviteľná vrtuľa s priemerom 1,65 metrov. Uhol nastavenia vrtule je 22° s odchýlkou ±0,5°, meraný vo vzdialenosti 42,5 centimetra od koreňovej časti listu. Maximálne otáčky vrtule predstavujú 2600 otáčok za minútu, čo sa rovná 6320 otáčok za minútu motora. Maximálne otáčky vrtule tak presahujú maximálne povolené otáčky motora.

Palivo používané na prevádzku letúna Viper SD4 je AVGAS 100LL alebo klasický automobilový benzín. Celkový objem palivových nádrží je sto litrov, použiteľné množstvo paliva je deväťdesiat litrov. Nevyčerpatelné množstvo paliva tvorí päť litrov v každej z nádrží uložené v krídle.

Mazacím prvkom využívaným v pohonnej jednotke letúna je olej SAE 5W-30 až 15W-50, ktorý sa vyberá podľa prevádzkovej teploty oleja. Celkový objem olejovej nádrže je 3,5 litra, prevádzkový rozsah objemu je od 2,5 litra do 3 litrov oleja.

Viper SD4 RTC je letún určený na športové, rekreačné aj výcvikové lety. Letún RTC môže byť prevádzkový iba pre lety počas dňa, za podmienok viditeľnosti zeme a podľa pravidiel lietania za viditeľnosti zeme. Verzia SD4 NIGHT je certifikovaná na nočné lety podľa pravidiel lietania za viditeľnosti zeme. Na lety v námraze alebo za meteorologických podmienok pre lety podľa prístrojov lietadlo nemá certifikáciu. Akrobatické lety a úmyselné vývrty sú prísne zakázané. Maximálna zložka bočného vetra pre vzlet je 15 uzlov a zadného vetra 5 uzlov. Prevádzkový rozsah vonkajšej teploty je od -15 stupňov Celzia do +40 stupňov Celzia. Prevádzkový strop je určený výrobcom na 15 500 stôp. (7)

## 6. TECHNICKÁ ŠPECIFIKÁCIA DYNAMIC WT9

Dynamic WT9 je letún slovenskej výroby, vyrábaný slovenskou firmou Aerospol, spol. s r.o so sídlom v Prievidzi. Letún je určený na športové a rekreačné lietanie, disponuje aj certifikátom EASA na výcvik dopravných pilotov. Letún Dynamic WT9 je dvojmiestny, jednomotorový, dlhokrídly, jednoplošník s pevným podvozkom. Je poháňaný jedným štvorvalcovým motorom Rotax 912 ULS, kombinovane vzduchom/vodou chladeným a s maximálnym výkonom 73,5 kilowattov.

Rotax 912 ULS použitý v lietadle Dynamic WT9 je štvorvalcový, zážihový motor v usporiadaní typu boxer. Chladenie motora je kombinované, kvapalino-vzduchové. Maximálny vzletový výkon pri 5800 otáčok za minútu je obmedzený na päť minút a predstavuje 73,5 kilowattov, čo v prepočte činí sto konských síl. Maximálny trvalý výkon dosiahneme pri 5500 otáčkach za minútu a výkon motora bude dosahovať 69 kilowattov, 92,5 konských síl.

Letún disponuje jednou trojlístou vrtuľou, ktorej priemer je 1750 mm, vrtuľa je pevná, na zemi staviteľná a uhol nastavenia meraný vo vzdialenosti 270 milimetrov od špičky listy je 23°.

Celkový objem palivových nádrží predstavuje 126 litrov, celkové využiteľné palivo činí 119 litrov. Nevyčerpatelná zásoba paliva je 3,5 litra v každej z nádrží, 7 litrov celkovo. Schválený typ paliva na prevádzku letúna je AVGAS 100 LL, EN 228 Super Plus a EN 228 Super. Letová príručka však neodporúča využívanie AVGAS 100 LL, nakoľko dochádza k zvýšenému opotrebovaniu motora.

Kapacita olejovej nádrže je 3,5 litra, v samotnom olejovom systéme sa nachádzajú 3 litra. Typ oleja sa vyberá podľa samotnej špecifikácie uvedenej na štítku motora.

Dynamic WT9 je letún určený na rekreačné, športové, výcvikové lety a na vlekanie vetroňov. Letún je certifikovaný iba na použitie za meteorologických podmienok za viditeľnosti zeme, pre pravidlá lietania za viditeľnosti zeme a počas dňa. Lety v námraze, akrobatické lety a úmyselné vývrty sú výrobcom zakázané. Maximálna zložka bočného vetra pre vzlet je 12,4 metrov za sekundu. Prevádzkový rozsah letúna na základe vonkajšej teploty je od -25 stupňov Celzia do +50 stupňov Celzia. Prevádzkový strop je určený na 15 000 stôp. (8)

## 7. POROVNANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV LIETADIEL

V predchádzajúcich kapitolách sme zadefinovali základné technické špecifikácie dvoch slovenských lietadiel. Pre lepšie porovnanie sme vytvorili nasledovnú tabuľku, ktorá hodnotí dôležité faktory ovplyvňujúce výber lietadla do výcviku.

Tabuľka 1 - Porovnanie technických parametrov Viper SD4 a Dynamic WT9

	Viper SD4	Dynamic WT9
<b>Motor</b>	Rotax 912 ULS	Rotax 912 ULS
<b>Vrtuľa</b>	trojlístá, staviteľná na zemi	trojlístá, staviteľná na zemi/ za letu
<b>Použiteľné palivo</b>	90 l	120,2 l
<b>Cestovná rýchlosť</b>	102 kt	135 kt
<b>VFR nočné lety</b>	áno	nie
<b>Bezpečnosť</b>	záchranný padákový systém	záchranný padákový systém
<b>Cena v základnej výbave</b>	70 490€ (9)	84 935 € (10)

Z uvedenej tabuľky vyplýva, že jednotlivé lietadlá majú veľmi podobné, v niektorých prípadoch až rovnaké parametre. Motor použitý u daných lietadiel je totožný, vrtuľa ja u oboch lietadiel staviteľná na zemi (u Dynamicu je možné zvoliť konfiguráciu vrtule staviteľnej za letu), Viper SD4 disponuje záchranným systémom, čo môžeme z hľadiska bezpečnosti výcvikových letov hodnotiť ako výhodu a tento fakt pozitívne prispieva k samotnému výberu lietadla. Kritéria zadané LVVC tak spĺňajú obe lietadlá, až na jeden markantný faktor: jednou z požiadaviek Leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra v Žiline bolo, aby výrobca poskytoval takú konfiguráciu lietadla, ktorá bude spĺňať požiadavky pre nočné lety VFR. V tomto bode môžeme zhodnotiť a určiť, že pre Letecké výcvikové a vzdelávacie centrum je vhodnejšou alternatívou Viper, ktorého výrobca poskytuje konfiguráciu Viper SD4 Night VFR.

## 8. LIMITÁCIE LETOVEJ SPÔSOBILOSTI LIETADIEL

Z hľadiska prísne stanovených požiadaviek na bezpečnosť lietadiel zaradených do výcviku u poskytovateľov leteckého výcviku je dôležité, aby sme poznali životné cykly jednotlivých lietadiel. Každému lietadlu zaradenému do prevádzky bol výrobcom lietadla definovaný dokument nazývajúci sa Aircraft Maintenance Manual – Návod na údržbu lietadla, označovaný skratkou AMM. AMM je dokument, ktorý určuje intervaly na vykonávanie pravidelných kontrol stavu lietadla, ktoré môžu byť definované na základe časového obdobia, počtu odlietanych hodín alebo počtu pristátí. V príručke môžeme nájsť aj podrobný opis, ako vykonávať údržbu lietadla, jeho servis a definuje aj stav kedy je potrebné aby bol servis vykonaný priamo výrobcom.

Cieľom kapitoly je určiť životnosť jednotlivých dielov, ale aj samotnej konštrukcie lietadla a na základe týchto poznatkov určiť vhodnejšiu alternatívu.

## 9. SAATYHO METÓDA

V predošlých kapitolách sme sa venovali určeniu kritérií výcvikovej organizácie, technickou špecifikáciou daných lietadiel a následným stručným porovnaním a zhodnotením vhodnosti daných lietadiel. Kritérium, ktoré prevážilo ostatné a rozhodlo o výbere lietadla Viper SD4 je jeho možnosť konfigurácie na nočné lety.

V tejto časti sa budeme venovať matematickému zhodnoteniu výberu lietadla pomocou Saatyho metódy.

- Saatyho metóda je metóda párového porovnávania, kde je potrebné určiť definovaným kritériám istú váhu, na základe ktorej budú matematické rovnice fungovať. Pri bodovaní kritérií budeme používať deväťbodovú stupnicu, s primárnym využitím nepárnych číslíc. Párne hodnoty sa používajú na presnejšie a detailnejšie hodnotenie kritérií. Jednotlivé kritéria sa zapisujú do tabuľky kde sa im následne pridelí váha nasledovným spôsobom:
- ak kritérium, ktoré sa nachádza v riadku má pre nás väčšiu váhu ako kritérium nachádzajúce sa v stĺpci, zapíšeme do príslušného poľa tabuľky hodnotu kritéria v riadku ku kritériu v stĺpci
- ak kritérium, ktoré sa nachádza v stĺpci má pre nás väčšiu váhu ako kritérium nachádzajúce sa v riadku, zapíšeme do príslušného poľa tabuľky prevrátenú hodnotu preferencie

- každé kritérium je samo sebe rovnocenné = diagonálny zápis v tabuľke bude preto vždy rovný 1 (11)

Tabuľka 2 - Zápis tabuľky podľa Saatyho metódy

	x	y	z
x	1	2	6
y	1/2	1	3
z	1/6	1/3	1

Výhodou Saatyho metódy je, že hodnotiteľ až do získania konečného výsledku nevie, ako jednotlivé váhy, ktoré kritériám udelil, ovplyvnia samotný končený výsledok. Hodnotiteľ tak môže objektívne udeliť váhu jednotlivým kritériám, na výslednom hodnotení sa to však neodrazí.

Samotná Saatyho metóda je viackroková matematická operácia, ktorá však nevyžaduje nadpriemerné matematické znalosti a proces získavania výsledkov je tak pomerne jednoduchý. Podstatou metódy je určiť geometrické priemery jednotlivých kritérií a následne určiť váhu jednotlivých kritérií.

Po vypracovaní všetkých krokov Saatyho metódy, získame pomocou matematických rovníc a operácií výsledok, ktorý bude určovať percentuálny podiel daného kritéria. Variant s najvyšším percentuálnym hodnotením bude výsledkom Saatyho metódy, ktorý na základe objektívneho hodnotenia bude najvhodnejšou alternatívou spomedzi definovaných.

## 10. ZÁVER SAATYHO METÓDY

Na základe kritérií, ktoré sme určili z požiadaviek Leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra a na základe lietadiel, ktoré sme spomedzi dostupných na trhu definovali ako vhodné varianty, sme dospeli k záveru, že vhodnejšou alternatívou pre výcvikové centrum v Žiline je pre daný požadovaný výcvik (základný a pokračovací) vhodnejšou alternatívou Viper SD-4.

Ak vyberieme Viper SD-4, splníme všetky požiadavky LVVC a ostatné parametre, ktoré prevážili u lietadla Dynamic sú menej podstatné a pri výbere lietadla zanedbateľné. Viper SD-4 teda spĺňa požiadavku domácej výroby, je certifikovaný na nočné lety VFR, obstarávacia cena lietadla je podľa zdrojov podstatne nižšia a zvyšné kritéria sú pre základný a pokračovací výcvik menej podstatné.

## 11. ZÁVER

Úvodné kapitoly sa zameriavajú na históriu a súčasnosť Leteckého výcvikového a vzdelávacieho centra v Žiline. Na začiatku bolo potrebné definovať pole pôsobnosti organizácie, druh zamerania a neskôr sme sa zamerali na podrobnejšiu činnosť a druh výcvikov, ktoré daná organizácia poskytuje. Ďalej sme definovali požiadavky výcvikovej organizácie pri výbere lietadla do výcviku, na základe čoho sme vybrali dve najvhodnejšie alternatívy lietadiel, ktoré sme podrobne opisovali z hľadiska technickej špecifikácie.

Záverom práce má byť určenie vhodnejšieho lietadla pre výcvik, s využitím Saatyho metódy, pomocou ktorej matematickými operáciami určíme vhodnejšiu alternatívu pre danú výcvikovou organizáciu.

Na základe matematických výpočtov, ktoré sme aplikovali v kapitole číslo IX. na lietadlá Viper SD-4 a Dynamic WT9 sme dospeli k záveru, že pre výcvikovou organizáciu opisovanú v našom článku je vhodnejšou alternatívou lietadlo Viper SD-4. Z dôvodu rozsahu celej Saatyho metódy uvádzame v článku iba závery bakalárskej práce, celý proces výpočtov spolu s vysvetlením a výsledkami je zhrnutý v mojej bakalárskej práci.

## Referencie

- [1] PRUŠA, J. a kol. Svet leteckej dopravy. Praha : Galileo CEE ČR s.r.o., 2008. s. 321. ISBN 978-80-8073-938-6.
- [2] Integrovaný kurz ATPL(A). [Online] Dostupné z: <https://www.lvvc.uniza.sk/sk/letecky-vycvik/integrovaný-vycvik/integrovaný-vycvik-atpl>.
- [3] Modulový kurz ATP - "Teória ATPL(A)". [Online] Dostupné z: <https://www.lvvc.uniza.sk/sk/letecky-vycvik/modulový-vycvik/modulový-teoretický-vycvik-atp>.
- [4] Výcvikový kurz PPL(A). [Online] Dostupné z: <https://www.lvvc.uniza.sk/sk/letecky-vycvik/integrovaný-vycvik/vycvik-ppl-a>. Dostupné z: <https://www.lvvc.uniza.sk/sk/letecky-vycvik/integrovaný-vycvik/vycvik-ppl-a>.
- [5] Letecký výcvik - PPL(A) / SEP(land). [Online] Dostupné z: <https://leteckaskola.sk/letecky-vycvik/>.
- [6] TOPOLČÁNY, Roman. Kritéria výberu lietadla do výcviku [rozhovor]. Dolný Hričov, 14. 3 2023.
- [7] Aircraft Flight Manual Viper SD-4. Prešov : TOMARK, s.r.o., 2020.
- [8] Flight manual WT9 Dynamic LSA. Prievidza : Aerospool spol. s r.o, 2012.
- [9] Viper SD4. [Online] Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/ultralighty/viper-sd4>.
- [10] Aerospool WT9 Dynamic . [Online] Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/letadla/ultralighty/aerospool-wt9-dynamic>.
- [11] MELÍŠKOVÁ, L. Posúdenie významnosti rizík pre prepravu nebezpečných vecí aplikáciou Saatyho. [diplomová práca]. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta špeciálneho inžinierstva, Katedra technických vied a informatiky FŠI ŽU, 2013. s. 86.



## USE OF ADVANCED MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

**Monika Timková**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Martin Bugaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*The latest subject of research in the aerospace industry is the design and manufacture of the lightest possible aircraft while guaranteeing safety. Due to the ever-increasing requirements for weight reduction, various researches are underway in the field of nanotechnology and its associated possible implementation in aircraft design. The primary focus of this article is the analysis of composite materials, their structure, fabrication and different types of composites. At the same time, it focuses on their use in specific aircraft structural components. The main focus of the work is to analyze the incorporation of nanotechnology in the production of innovative materials used in aerospace industry, as well as to define nanomaterials, namely nanocomposites themselves. The result of the work is an evaluation and prediction of the use and implementation of progressive materials in structural elements and their impact on the economy and performance of aircraft.*

### Keywords

*composite, matrix, weight reduction, nanotechnology, reinforcement, CNT*

### 1. ÚVOD

Malé rozmery, nízka hmotnosť a priaznivé vlastnosti sú cieľové požiadavky na materiály používané v leteckých konštrukciách, hlavne kvôli požiadavkám na redukciiu hmotnosti a s tým spojené zníženie produkovaných emisií a spotreby paliva. Kompozity využívajúce nanovystuženie v podobe CNT predstavujú materiály spĺňajúce dané požiadavky. Čiastkovým cieľom práce je vysvetlenie kompozitných materiálov a ich už známe využitie v letectve, ako aj priblíženie kompozitných častí v jednotlivých typoch lietadla. Následné vystuženie kompozitov nanomateriálmi a predikcie ich implementácie predstavujú primárny cieľ.

### 2. KOMPOZIT

Vo všeobecnosti je kompozit združený umelo vytvorený materiál, zhotovený fyzikálnou kombináciou rôznych materiálov. Pozostáva z dvoch alebo viacerých zložiek pričom každá z nich má odlišné vlastnosti a zároveň je medzi nimi jasné rozhranie, teda sa nespájajú. [1] Jednotlivé fázy majú väčšinou iné chemické zloženie a odlišné fyzikálne a mechanické vlastnosti. Prvá fáza tvorí spojité prostredie, nazývaná aj ako matrica. Sekundárna vložená fáza, poprípade aj viaceré fázy, plnia úlohu spevňovania matrice kompozitu a zároveň prenášajú vonkajšie zaťaženie. Vďaka optimálnemu pomeru vzájomného objemu medzi matricou a spevňujúcou fázou, taktiež vhodným výberom jednotlivých materiálov, možno vytvoriť nový materiál, ktorý je nielen vhodnejší ako akákoľvek forma samostatného materiálu, ale nadobúda aj špeciálne vlastnosti, ktoré samotná zložka nemá.

Kompozit je moderným avšak nie univerzálnym materiálom. Navrhovaný je vždy pre konkrétnu implementáciu pri maximalizovaní využitia jeho hmoty. Vlastnosti ako vysoká merná tuhosť a pevnosť, odolnosť voči veľmi nízkym teplotám ale aj výhodné únavové vlastnosti im zabezpečili široké uplatnenie v leteckom priemysle a v konštrukcii dopravných

prostriedkov. Sú vhodné na výrobu výstuže krídiel, nosníkov, vrtule a rotujúcich častí v motore, ako sú lopatky kompresora a turbíny. [2]

#### 2.1. Vlastnosti

Medzi hlavné výhody využitia kompozitov v konštrukcii lietadiel okrem ich nízkej hmotnosti patrí aj vysoká statická pevnosť, dobrá tepelná odolnosť ako aj odolnosť voči korózii. Ich vhodné únavové vlastnosti zvyšujú životnosť leteckých konštrukcií, znižujú frekvenciu a náklady na údržbu. Vďaka možnosti vytvorenia dielu s ľubovoľným tvarom prispieva k čistejšiemu aerodynamickému povrchu lietadla a zredukovaniu množstva potrebných komponentov v konštrukčných celkoch. Následne dochádza aj k zníženiu potreby spojovacích prvkov a spojov, ktoré môžu predstavovať náchylné miesta na poškodenie komponentu. Na druhej strane sú s použitím kompozitov spojené vysoké náklady na výrobu materiálu ale aj ich opravy. [3]

#### 2.2. Matrica

Úlohou matrice je spájať dohromady spevňujúce vlákna v kompozitoch, zabezpečiť ich správne rozmiestnenie v priečnom reze a s tým spojené priaznivé mechanické vlastnosti ako odolnosť voči trhlinám a poškodeniu. Taktiež musí byť matrica dostatočne pružná pre elimináciu jej porušenia pri namáhaní ťahom a to ešte skôr ako by došlo k poruche vlákna.

Matrica na rozdiel od výstuže má nižšiu pevnosť, avšak je pružnejšia. Pre zníženie celkovej hmotnosti kompozitného materiálu sa u matrice využíva nižšia hustota, ako má spevňujúca fáza. Predstavuje hlavného nositeľa všetkých dôležitých chemických a mechanicko – fyzikálnych vlastností. Jej základnou funkciou je prenášanie vnútorného zaťaženia na sekundárnu vloženú fázu. Úloha matrice je všeobecne

zvyšovaná so znižujúcim sa obsahom vystužujúcej fázy. Na základe druhu zvoleného materiálu rozlišujeme kompozity s kovovými, polymérnymi a keramickými matricami.

#### 2.2.1. Kompozity s kovovou matricou (MMC)

MMC najčastejšie využívajú materiály na báze hliníka, horčíka a titánu.

- Vhodným vystužením kompozitu s hliníkovou matricou (AMC) je možné ešte výraznejšie znížiť ich hustotu a to aj pri ich súčasnom markantnom zvýšení tuhosti. Výhody AMC zahŕňajú vyššiu pevnosť a tuhosť, možnosť prevádzkovania vo vyššom teplotnom rozsahu, väčšiu odolnosť materiálu voči poškodeniu a takisto voči opotrebovaniu. AMC nachádzajú využitie napr. v podvozkoch lietadiel, vysokotlakových tesneniach a motoroch.
- Kompozity s horčíkovou matricou (Mg MMC) sú vynikajúcimi materiálmi na využitie pri ľahkých konštrukciách pre vojenské a civilné letecké aplikácie vďaka ich nízkej hustote. Využitie nachádzajú napríklad v drážkach piestnych krúžkov, rotoroch, ložiskách prevodoviek a ozubených kolesách. Nevýhodou je zložitejší výrobný proces, s ktorým sú spojené aj vyššie výrobné náklady. Vzhľadom na ich nízku hmotnosť sa MMC považujú za žiaduce materiály pre konštrukcie lietadiel, pri ktorých je zníženie hmotnosti hlavným faktorom. Potreba ďalšieho výskumu je však nutná s cieľom zlepšenia mechanických vlastností horčíka a jeho zliatin na efektívne využitie v leteckom priemysle.
- Kompozity s titánovou matricou (TMC) sa vo veľkej miere používajú v leteckom, lodnom a automobilovom priemysle vďaka ich vynikajúcej odolnosti proti korózii a vysokej pevnosti pri zvýšených teplotách v porovnaní s hliníkovými zliatinami, čo je výhodné pri konštrukcii lietadiel a rakiet s vyššími prevádzkovými rýchlosťami a teplotami. Sú vhodným materiálom na použitie v podvozku. [4]

#### 2.2.2. Kompozity s polymérnou matricou (PMC)

PMC sú jedným z najľahších kompozitných materiálov. Vykazujú vysokú prevádzkovú pevnosť, avšak sú citlivými na vysoké teploty. Je možné ich rozdeliť do troch skupín: reaktoplasty, termoplasty, elastoméry. Základným rozdielom je možnosť ich pretváranie po zohriatí. Termoplasty aj elastoméry túto vlastnosť majú zatiaľ čo reaktoplasty vo fáze vytvrdzovania majú termosety zosieťované polymérne reťazce, čo na konci vedie k vzniku tuhého výrobku, ktorý sa nedá pretvárať.

Polymér vystužený uhlíkovými vláknami nadobúdajú materiálové vlastnosti ako vysoká tuhosť a pevnosť, odolnosť voči ohňu a teplu, odolnosť voči únave, korózii a vibračné tlmiace vlastnosti. Tie ho robia vhodným konštrukčným materiálom na výrobu rámov lietadla, trupu, krídiel, chvostových plôch atď.

Do skupiny PMC patrí aj najstaršie priemyselne vyrábaný kompozit sklolaminát. Taktiež je aj najbežnejším kompozitným materiálom, ktorý pozostáva zo sklenených vlákien vložených do matrice z epoxidovej alebo polyesterovej živice. [5]

#### 2.2.3. Kompozity s keramickou matricou (CMC)

CMC boli navrhnuté pre letecké konštrukcie, ktoré vyžadujú vysokú pevnosť a odolnosť voči tvoreniu trhlin. Okrem toho sa vyznačujú nízkou hmotnosťou, nízkou tepelnou rozťažnosťou, odolnosťou voči vysokým teplotám, oxidácii a odolnosťou voči katastrofickým poruchám. V porovnaní s tradičnými konštrukčnými materiálmi, ako sú kovy, CMC sú oveľa odolnejšie voči agresívnemu prostrediu a vysokým teplotám. Práve vďaka ich tepelnej odolnosti sú vhodnými materiálmi pri výrobe spaľovacích motorov, turbín a nadzvukových lietadiel. Vhodné použitie predstavujú aplikácie v motoroch, na turbínových lopatkách a v brzdovom systéme. [4]

### 2.3. Výstuž

Sekundárnu vloženú fázu, teda výstuž môžu tvoriť vlákna, častice alebo whiskery. Vyrobené sú z materiálov ako polyméry, keramika alebo kovy a sú zásadne používané na zvýšenie mechanických vlastností kompozitu. Poskytujú zväčšenú úroveň pevnosti a tuhosti. Prenášajú 70 – 90 % vyvíjaného zaťaženia. Okrem štruktúrnych vlastností môžu poskytovať aj elektrickú a tepelnú vodivosť, vyššiu odolnosť proti opotrebovaniu alebo riadenú tepelnú rozťažnosť. Hlavným rozdielom medzi kompozitmi vystuženými časticami a vláknami je závislosť ich vlastností od smeru pôsobenia. Časticové kompozity sú izotropné, teda ich vlastnosti ako pevnosť a tuhosť sú rovnaké vo všetkých smeroch. Vlastnosti kompozitov vystužených vláknami sa naopak menia na základe smeru zaťaženia v závislosti od orientácii vlákien. Možno ich nazvať anizotropnými. [6]

#### 2.3.1. Vystužujúce vlákna, whiskery

Na spevnenie kompozitu sú najčastejšie využívané práve vystužujúce vlákna. Forma výroby môže byť rôzna, napríklad výroba práškovou metalurgiou alebo zalievanie vlákien matricovým materiálom. Uloženie vystužujúcich vlákien môže byť suché a mokré. Suché vlákna neobsahujú živicu na rozdiel od mokrych vláknitých materiálov impregnovaných živicom. Možno ich rozdeliť na kovové, sklené, minerálne, uhlíkové a keramické vlákna. Najvyššou tepelnou odolnosťou disponujú keramické vlákna a to 1500 – 3600 °C. V leteckých aplikáciách sú najvyužívateľnejšími práve uhlíkové vlákna.

Whiskery alebo aj monokrystály boli vyvinuté kovové aj keramické typy avšak kvôli ich vysokej cene sa takmer nepoužívajú. [7]

### 2.4. Kompozity v konštrukcii lietadiel

Najvýraznejším priekopníkom implementácie kompozitu do primárnych konštrukcií lietadiel sa stal Airbus, čoho výsledkom je vedúci produktový rad ekonomických a ekologických prúdových lietadiel – od A320 až po A380. Kompozit bol využitý prvýkrát ako väčšinový materiál v konštrukcii krídla na vojenskom štvormotorovom lietadle A400M "Atlas". Taktiež implementáciou kompozitných materiálov na A350 XWB, a to v podobe až 53 %, sa podarilo spoločnosti Airbus predĺžiť intervaly údržby lietadiel zo 6 rokov na 12. Prvenstvo v percentuálnom použití kompozitov na konštrukciu lietadla pripadá spoločnosti Boeing s lietadlom B787 inak známeho aj pod názvom Dreamliner. Z objemového množstva tvoria až 80 % celkových použitých materiálov. Využitý bol najmä polymér vystužený



uhlíkovými vláknami, konkrétne na veľkej časti trupu, hornom a dolnom plášti krídla, klapkách krídiel, výškovom kormidle, krídielkách a takisto na vertikálnom a horizontálnom stabilizátore.

### 3. NANOTECHNOLÓGIE

Hlavnými hnacími silami súčasného výskumu a vývoja v leteectve sú ľahšie konštrukčné materiály a účinnejšie motory. Spoločným cieľom je zníženie spotreby paliva a emisií uhlíka spojené s leteckou dopravou a nákladnou leteckou dopravou. Nanotechnológie v leteckom a kozmickom priemysle predstavujú potenciál dosiahnutia tohto cieľa.

Pojem nanotechnológia zahŕňa vytváranie a používanie materiálov alebo zariadení v extrémne malých rozmeroch, ktoré majú rozsah 1 až 100 nanometrov (nm) a sú nazývané ako nanokryštály alebo nanomateriály. Progresívna technológia sa využíva na tvorbu nanokompozitov, ktoré patria medzi inovatívne materiály a od bežných kompozitov sa odlišujú svojimi lepšími mechanickými vlastnosťami. [8]

#### 3.1. Nanokompozity

Nanokompozity sú triedou kompozitných materiálov s lepšími mechanickými vlastnosťami, v ktorých sa nanomateriály používajú buď na spevnenie, alebo na zvýšenie funkčnosti kompozitov. Ich použitie na výstuž predstavuje niekoľko výhod, ako napríklad lepšia povrchová úprava, menšia náchylnosť na poškodenie a nízky objemový podiel potrebný na zlepšenie vlastností. Medzi nanomateriály s pozoruhodnými mechanickými vlastnosťami patria uhlíkové nanorúrky a nanovlákná. Ukázalo sa, že sú vynikajúcimi výstužnými materiálmi. [9]

##### 3.1.1. Uhlíkové nanorúrky

Uhlíkové nanorúrky (CNT) sú alotropy uhlíka, ktoré existujú v kvázi jednorozmernej štruktúre. Pozostávajú z grafitu (atómov uhlíka) usporiadaných do hexagonálnej štruktúry vytvárajúcej nanorúrky tvoriace viacero vrstiev. CNT sú materiály s trubicovou štruktúrou vyrobené z vrstiev grafitu v nanorozmeroch s rôznym vonkajším priemerom. Je možné ich považovať za derivát uhlíkových vlákien. Pri rozmiestnení CNT do polymérnych matric sa zvyčajne dosahuje značné zlepšenie mechanických vlastností, spôsobené interakciou medzi nanovýstužou a materiálom matrice prostredníctvom medzifázy a veľkou reaktívnou plochou na jednotku objemu uvedenej nanovýstuže. Zlepšenie mechanických vlastností vzhľadom na vystužené polyméry je silne závislé od hmotnostného podielu CNT, ako aj od rovnomernosti ich disperzie. Kompozity s CNT vykazujú vysokú tepelnú stabilitu, zlepšené elektrické vlastnosti, ako aj vysokú účinnosť tlmenia vibrácií v porovnaní s nevystuženými polymérmi.

Bežne sú klasifikované do dvoch kategórií vzhľadom na kombináciu množstva vrstiev grafénu použitých na vytvorenie povrchu uhlíkových nanorúrok, ktoré sú označované ako jednovrstvové a viacvrstvové uhlíkové nanorúrky. [10]

##### Jednovrstvové uhlíkové nanorúrky (SWCNT)

SWCNT pozostáva z jedného grafitového plátu zrolovaného do valcovitej rúrky. Pri pohľade normálou k osi trubice sa vytvorí

zoskupenie koncentrických trubíc. Vrstva grafénu má priemer v rozmedzí 0,4 - 5 nm. Rôzny počet vrstiev uhlíka, umožňujú diverzitu vlastností. SWCNT sú vhodné napr. pre elektronické zariadenia, senzory a vysielacie poľa.

##### Viacvrstvové uhlíkové nanorúrky (MWCNT)

Viacvrstvové uhlíkové nanorúrky sú analogicky podobné uhlíkovým nanovláknam (CNF). Vo všeobecnosti sú však CNF odlišné na základe usporiadania grafénovej roviny. Ak je grafénová rovina a vlákno rovnobežné, štruktúra je považovaná za CNT a naopak ak k danému usporiadaniu nedôjde, je definovaná ako CNF. Vo viacvrstvových nanorúrkach sa vzdialenosť vrstiev grafénu pohybuje v intervale 0,34 až 0,39 nm. Vonkajší priemer daných nanorúrok dosahuje až 100 nm, pričom vnútorný priemer dosahuje približne len 2 nm. Použitie MWCNT je vhodné prevažne na mechanické aplikácie. [11]

##### Syntéza

Keďže sa CNT líšia svojimi vlastnosťami, líšia sa aj techniky syntézy. Výroba MWCNT je jednoduchšia v porovnaní s SWCNT, ktoré si vyžadujú kontrolovaný rast a osobitné atmosférické podmienky, čo vedie k ťažkostiam pri syntéze. Na výrobu vysokokvalitných CNT podľa požiadaviek výskumu sa vyvíja niekoľko metód, ako je metóda oblúkového výboja, chemickej depozície z pár (CVD) a metóda laserovej ablácie.

- CVD je najčastejšie využívanou metódou syntézy CNT v priemyselnej výrobe. Jej výhodou je využitie zdrojových látok uhlíka v plynenej podobe. Na reguláciu tlaku a dávkovanie sú síce kladené vyššie nároky, avšak táto metóda umožňuje vznik homogénnejších fáz s menším percentuálnym obsahom neželaných zložiek. V jednovrstvových a viacvrstvových nanorúrkach je dosiahnutá výrazne vyššia čistota. Zároveň je umožnená lepšia kontrola vlastností syntetizovaných nanorúrok a to najmä tvaru a rozmerov.
- Metóda oblúkového výboja je najstaršou metódou. Jej primárne vyvinutie bolo na syntézu fullerénov. Využíva vysokú teplotu (> 3 000 °C) na odparovanie atómov uhlíka do plazmy, čím sa vytvárajú SWCNT alebo MWCNT v závislosti od atmosférických podmienok. Výsledkom danej syntézy sú značne znečistené CNT s nežiadúcimi vedľajšími produktami, ktorých oddelenie je náročné niekedy až nemožné.
- Metóda laserovej ablácie pozostáva z procesu vyparovania atómov uhlíka. Zahriatím uhlíku na 1200 °C a súčasným namierením laserového lúča na daný materiál dôjde k vyparovaniu. Reakčná atmosféra je tvorená héliom alebo plynným argónom. Tieto plyny prepravujú atómy uhlíka na medený kolektor chladený vodou. Práve v kolektore dochádza k ich usadzovaniu. V prípade, že zdrojový materiál je tvorený čisto uhlíkom, prednostne vznikajú MWCNT. Pre syntézu SWCNT je potrebné využitie zmesi katalyticky aktívneho kovu a uhlíka. [12]

##### 3.1.2. Nanovlákná

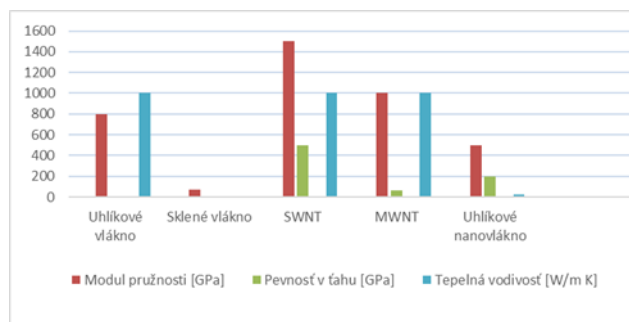
Nanovlákná sa tradične definujú ako valcové štruktúry s vonkajším priemerom pod 1 000 nm a pomerom strán väčším ako 50nm. Pričom pomer strán je pomer medzi dĺžkou a šírkou.

Prevažne sa výskumy venujú nanovláknam na báze uhlíka alebo polyméru.

Uhlíkové nanovlákná (CNF) sú trojrozmerné grafénové nanoštruktúry valcovitého tvaru, ktoré majú tvar kužeľa alebo valca. Je tvorený paralelným usporiadaním grafénových vrstiev pozdĺž pozdĺžnej osi. Disponujú výnimočne dobrými mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Rozhodujúcim faktorom pri zachovaní a zlepšení vlastností CNF je dosiahnutie dokonale vyrovnanej grafickej štruktúry. Tá sa zvyčajne dosahuje následnou grafitizáciou pri vysokej teplote (< 2400 °C) počas syntézy a spracovania CNF. Pričom grafitizácia je proces zahrievania amorfného uhlíka počas dlhšieho časového obdobia, pri ktorom sa zmení usporiadanie atómovej štruktúry, aby sa dosiahla usporiadaná kryštalická stavba. CNF sú pevnejšie, pružnejšie a ľahšie ako oceľ. Vedú teplo a elektrinu lepšie ako kovy. Charakteristické vlastnosti, ako je vysoký povrch, pórovitosť, pružnosť a vyššia mechanická pevnosť umožňujú využitie CNF v rôznych oblastiach. [13]

### 3.2. Komparácia materiálov výstuže kompozitu

Výber vhodného materiálu na spevnenie matrice je kľúčový z hľadiska požadovanej aplikácie. Nanomateriály prinášajú do kompozitu mnoho vylepšených vlastností ako tepelnú a elektrickú vodivosť ale aj vyššiu pevnosť v ťahu, čím sa stáva odolnejším proti poškodeniu.



Graf 1 – Najznámejšie typy výstuže

V grafe sú zobrazené najznámejšie typy výstuže pričom zobrazené údaje predstavujú najvyššie možné hodnoty. Tie sa môžu líšiť na základe spôsobu výroby materiálov. Z grafu jednotlivých vlastností materiálov používaných ako výstuž je zrejmé, že jednovrstvové uhlíkové nanorúrky disponujú najvyššími hodnotami v oblasti pružnosti a to s maximom až 1500 GPa. Dosahujú aj vysokú tepelnú vodivosť. Maximálna dosiahnutá tepelná vodivosť SWNT, MWNT a uhlíkových vlákien predstavuje 1000 W/m K. Vďaka tejto vlastnosti sú oba deriváty CNT vhodným materiálom na protinámrazovú ochranu. Dôvodom horších vlastností nanovláknien oproti CNT je ich povrch, ktorý je oveľa väčší ako pri nanorúrkach. Avšak oproti klasickým uhlíkovým vláknam dosahujú výrazne vyššiu pevnosť v ťahu, až 200 GPa. SWNT dosahuje najpriaznivejšie hodnoty, avšak sú výrazne drahšie a aj náročnejšie na výrobu. Z týchto dôvodov je možné povedať, že najperspektívnejším nanomateriálom je MWNT. Dosahuje výrazne vyššie hodnoty pevnosti v ťahu (60 GPa) oproti spomenutým materiálom a porovnateľné výsledky s SWNT v testoch pružnosti ako aj tepelnej vodivosti.

Čo sa týka elektrickej vodivosti daných materiálov, SWNT a MWNT predstavujú najlepšie elektrické vodiče s maximálnou hodnotou 10 000 S/cm. Uhlíkové nanovlákná dosahujú až 1000 S/cm, čo je v porovnaní s vodivosťou uhlíkových vlákien stonásobok. Schopnosti elektrického vodiča predstavujú pre nanomateriály možnosť širšieho spektra aplikácií. Sklené vlákna sú elektrickým izolantom. [14]

### 3.3. Využitie nanomateriálov v konštrukcii lietadiel

Nanomateriály sú v konštrukciách dopravných lietadiel novým pojmom, nakoľko sa v súčasnosti jedná zatiaľ iba o ich výskum. Existuje malé množstvo lietadiel, ktorých konštrukčné celky obsahujú nanomateriály.

#### 3.3.1. Protektia voči poškodeniu

Nanomateriály majú potenciál chrániť lietadlá pred nepriaznivými vplyvmi počasia a pred mnohými rôznymi faktormi, ktoré môžu na lietadlo počas letu pôsobiť. Táto ochrana sa môže realizovať buď integráciou nanomateriálov do kompozitnej štruktúry hlavného rámu lietadla, alebo ako ochranná bariérová vrstva na povrchu lietadla, ktorá umožňuje buď priame blokovanie, alebo rozptýlenie vonkajšieho nebezpečenstva.

Príkladom vonkajšieho nebezpečenstva, ktoré môže ovplyvniť lietadlo, je blesk. Lietadlá sú neustále vystavené riziku úderu blesku, najmä do krídel. Ak sa energia účinne neodvedie, môže spôsobiť vážne poškodenie konštrukcie lietadla. Pokrytím alebo integráciou vysoko vodivých nanomateriálov, ako je napríklad grafén, do krídel lietadla, možno dosiahnuť elektrický rozptyl energie z úderu blesku. V mnohých lietadlách sa na rozptýlenie blesku používajú ťažké kovové konštrukcie. Nanomateriály ponúkajú potenciál na vytvorenie ľahkých vodivých kompozitov, ktoré by mohli účinne nahradiť kovový systém konštrukcie.

#### 3.3.2. Nanonanótery

Aplikácia nanotechnológií v náteroch zaznamenala v posledných dvoch desaťročiach výnimočný rast. Pozoruhodný vývoj je výsledkom zvýšenej dostupnosti nanomateriálov, ako sú nanočastice a uhlíkové nanorúrky. Ďalším dôvodom rozvoja je pokrok v procesoch nanášania umožňujúcich kontrolu štruktúry povrchových náterov na nanoúrovni. Nanovrstvy sú zvyčajne jednofázové alebo viacfázové pevné štruktúry nanosené na neporušený povrch s hrúbkou približne 100 nm alebo menej, ktoré pridávajú materiálu substrátu špecifickú vlastnosť alebo funkciu.

Bežné vlastnosti, ako je teplota tavenia, elektrická vodivosť, magnetická priepustnosť, hydrofóbnosť a chemická reaktivita, silne závisia od veľkosti častíc materiálu. Medzi hlavné priemyselné aplikácie nanonáterov patrí ochrana proti korózii, povlaky odolné proti opotrebovaniu, tepelná ochrana a samočistiace (nepriľnavé) povrchy. Takéto aplikácie sú obzvlášť dôležité pre letecký priemysel, pretože umožňujú modifikáciu rámov lietadiel, interiérov a komponentov motorov s cieľom zlepšiť výkon, zvýšiť palivovú účinnosť a znížiť prevádzkové náklady.

### Protektcia proti námraze

Na prekonanie problémov s námrazou existuje niekoľko techník vrátane protinámrazových náterov a tepelných izolátorov, ktoré by mohli byť použité na povrchoch. Pridanie tepelného izolátora by však mohlo viesť k zvýšeniu hmotnosti, čo by mohlo znížiť účinnosť lietadla. Na základe požiadaviek boli vyvinuté samozahrievacie kompozity vystužené CNT, ktoré poskytujú elektrický ohrev pri nízkej teplote okolia. Tenké laminované pásy na báze MWCNT pôsobia ako elektroteplné vyhrievanie na ochranu proti námraze, kde je štruktúra pásu zarovnaná so zanedbateľným prírastkom hmotnosti. [15]

### Hydrofóbné nátery

Testovanie počas letu na lietadle Airbus A320 spoločnosti British Airways preukázalo 20 - 40 % zlepšenie hydrofóbnosti povrchu pri použití nanonáterov v porovnaní s inými komerčne dostupnými konvenčnými nátermi. Inovatívne nátery na báze nano uhlíkových materiálov (ako sú uhlíkové nanorúrky a oxid grafénu) zároveň znižujú odpor vetra na povrchu lietadla, čím znižujú spotrebu paliva a emisie CO<sub>2</sub>.

### Znižovanie odporu

Vývoj nových metód na zníženie pasívneho odporu vzduchu v letectve je jedným z najaktuálnejších prístupov na zníženie spotreby paliva, emisií CO<sub>2</sub> a hluku lietadiel. Jeden z najslubnejších systémov na pasívne zníženie odporu vzduchu v lietadlách novej generácie predstavujú rebrované povrchy pozostávajúce z veľmi malých (2 - 100 mikróv) paralelných drážok.

Projekt ReSiSTant (Large Riblet Surface with Super Hardness, Mechanical and Temperature Resistance by nanofunctionalization) financovaný z programu EÚ je zameraný na vývoj pokročilých nanovrstiev a metód nanášania, ktoré zvýšia výkonnosť rebrovania v náročných podmienkach zabezpečením odolnosti voči oderu a korózii.

### 3.3.3. Zmierňovanie buffetingu

Vysoká účinnosť tlmenia CNT umožňuje ich použitie v konštrukcii, najmä na chvoste lietadla, na zmiernenie buffetingu. Experimenty naznačujú až 200% zvýšenie úrovne tlmenia. [15]

## **4. ZÁVER**

Hlavným cieľom práce je prieskum možných implementácií progresívnych materiálov, konkrétne nanokompozitov, na základe ich špecifických vlastností. Prvá časť predstavuje charakterizovanie samotných kompozitných materiálov a priblíženie ich aplikácie už v existujúcich konštrukčných častiach. Hlbší rozbor kompozitných materiálov a porozumenie ich vlastnostiam a rozdeleniu na základe jednotlivých kritérií je kľúčový pre následnú analýzu zaoberajúcu sa ich vylepšením nanotechnológiou a využitím. Analyzovanie možností implementácie skúmaných prvkov je vo fáze spracovania a naďalej preverovaná.

Na základe zistených poznatkov o vlastnostiach nanomateriálov, by ďalšie možné využitie mohla predstavovať ich implementácia do brzdoých kotúčov, konkrétne MWNT do uhlíkovej matrice vystuženej uhlíkovými vláknami. Vysoká tepelná odolnosť

MWNT a odolnosť voči poškodeniu, by teoreticky mohla predĺžiť životnosť brzd. Následne je možné uvažovať o znížení nákladov na údržbu a opravu.

### **Podakovanie**

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **313011ATR9** "Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémie spôsobenej COVID-19".

### **Referencie**

- [1] KRIZBERGS, J. a kol. 2016. *Kompozitné materiály* [online]. [cit.2023-02-18]. Dostupné z:
- [2] <https://zep.sk/wp-content/uploads/2017/11/SKILLM21.pdf>
- [3] KOBLEN, I. a SZABO, S. 2017. *Manažment životného cyklu leteckej techniky II.* [online]. [cit.2023-02-18] Dostupné z:
- [4] [https://www.researchgate.net/profile/Stanislav-Szabo/publication/320336164\\_Manazment\\_zivotneho\\_cyklu\\_leteckej\\_techiky\\_II/links/59de93e1458515376b29e676/Manazment-zivotneho-cyklu-leteckej-techniky-II.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Stanislav-Szabo/publication/320336164_Manazment_zivotneho_cyklu_leteckej_techiky_II/links/59de93e1458515376b29e676/Manazment-zivotneho-cyklu-leteckej-techniky-II.pdf)
- [5] CÍGER, A. 2022. *Kompozitové materiály: Budúcnosť letectva?*. [online]. [cit.2023-02-18]. Dostupné na:
- [6] <https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Ciger-II.pdf>
- [7] PARVEEZ, B. a kol. 2022. *Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review.* [online]. [cit.2023-02-26]. Dostupné na:
- [8] <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/22/5007>
- [9] ERDEN, S. a HO, K. 2017. *Fiber reinforced composites.* [online]. [cit.2023-02-26]. Dostupné na:
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/fiber-reinforced-composite>
- [11] QUILTER, A. 2004. *Composites in Aerospace Applications.* [online]. [cit.2023-03-02]. Dostupné na:
- [12] <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-airframe-accessories/article/10386441/composites-in-aerospace-applications>
- [13] NEDELUCU, R. a REDON, P. 2012. *Composites material materials for aviation industry.* [online]. [cit.2023-03-02]. Dostupné na:
- [14] [https://www.afahc.ro/ro/afases/2012/air\\_force/Nedelcu\\_Redon.pdf](https://www.afahc.ro/ro/afases/2012/air_force/Nedelcu_Redon.pdf)
- [15] KHANNA, A. 2019. *NanoTechnology In Aerospace.* [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [16] [https://www.academia.edu/6781200/NANOTECHNOLOGY\\_IN\\_AEROSPACE?fbclid=IwAR1YNdUv3Q9NPYUsIDMyTzKNwCJHEkxUiat\\_IPn6XxE-Ji33sQtI0Tmjv5U](https://www.academia.edu/6781200/NANOTECHNOLOGY_IN_AEROSPACE?fbclid=IwAR1YNdUv3Q9NPYUsIDMyTzKNwCJHEkxUiat_IPn6XxE-Ji33sQtI0Tmjv5U)

- [17] RANA, S. a FANGUEIRO, R. 2016. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [18] <https://books.google.sk/books?id=QauSBgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sk#v=onepage&q&f=false>
- [19] RAMACHANDRAN, K. a kol. 2021. *Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review*. [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [20] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06760-x>
- [21] JESENÁK, K. a kol. 2018. *Nanokompozity na báze uhľíkových nanorúrok a vybraných silikátových minerálov*. [online]. [cit.2023-03-12]. Dostupné na:
- [22] <https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/chem/kag/Zam-Jesenak/2018/nanokompozity2018.pdf>
- [23] VASILEV, C. 2021. *Applying Nanocoatings to Aviation: A Review*. [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné na:
- [24] [https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5843&fbclid=IwAR3rLQGoFd6v2Lwfwu5I3IX1VlxPw4Olmh\\_KyCPMYO322VxWInUpuwO\\_rM8](https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5843&fbclid=IwAR3rLQGoFd6v2Lwfwu5I3IX1VlxPw4Olmh_KyCPMYO322VxWInUpuwO_rM8)
- [25] HARDYAL, K. 2020. WHAT IS GRAPHITIZATION? [online]. METCAR. [cit. 2023-20-03]. Dostupné na: <https://blog.metcar.com/what-is-graphitization>
- [26] GOHARDANI, O. – ELOLA, M. C. – ELIZATXEA, C. 2014. Potential and prospective implementation of carbon nanotubes on next generation aircraft and space vehicles: A review. In: *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2014, roč. 70, č. 3, s. 42-68. [cit. 2023-21-03]. ISSN 0376-0421. Dostupné na:
- [27] [https://www.academia.edu/14361897/Potential\\_and\\_prospective\\_implementation\\_of\\_carbon\\_nanotubes\\_on\\_next\\_generation\\_aircraft\\_and\\_space\\_vehicles\\_A\\_review\\_of\\_current\\_and\\_expected\\_applications\\_in\\_aerospace\\_sciences](https://www.academia.edu/14361897/Potential_and_prospective_implementation_of_carbon_nanotubes_on_next_generation_aircraft_and_space_vehicles_A_review_of_current_and_expected_applications_in_aerospace_sciences)
- [28] ZUAN, J. a kol. 2012. *Buffeting mitigation using carbon nanotube composites: A feasibility study*. [online]. [cit.2023-03-24]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/235672705\\_Buffeting\\_mitigation\\_using\\_carbon\\_nanotube\\_composites\\_A\\_feasibility\\_study](https://www.researchgate.net/publication/235672705_Buffeting_mitigation_using_carbon_nanotube_composites_A_feasibility_study)



## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF INCREASING SAFETY AT THE SELECTED AIRPORT

**Adéla Šimov**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Tatiana Remencová**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Civil aviation safety is one of the most discussed issues in air transport. Airport safety must meet certain requirements, both in terms of safety management and security. Therefore, this article is focused on the definition of basic definitions for the issue, such as the already mentioned concept of safety and security, terrorism or theoretical basic models used in connection with the human factor in aviation. In the context of the current situation, there are examined the security systems at airports and their use at specific world airports. The main goal of this article was to analyze security systems at selected European airport, which is Amsterdam Schiphol Airport. Security at this airport is characterized by high level, not only because of the introduction of new technologies in the field of security checks, but also high staff qualification has its part on it. The number of terrorist attacks at Schiphol Airport also showed a high level of security system, with the first and last terrorist attack were in 2009. This attack caused certain changes in the field of security, in particular the modernization of security systems and the additional qualification of staff. Based on the analysis of safety and security system, there were formulated opportunities to increase security at this airport.*

### Keywords

*safety, security, terrorism, Amsterdam Schiphol Airport, security check*

### 1. ÚVOD

Bezpečnost je klíčovým faktorem ve všech oblastech, jak už z pohledu bezpečnosti státu, tak samotná bezpečnost civilního letectví. Vzhledem na to, že letecká doprava je jedním z nejvyužívanějších a nejbezpečnějších druhů doprav, klade se velký důraz na udržení vysokého stupně bezpečnosti. S rozvíjením moderních technologií vznikají nové hrozby, které mohou ohrozit bezpečnost letecké dopravy. V minulosti bezpečnostní ochrana nepředstavovala tak velkou oblast, jakou představuje v dnešní době. Toto je také díky velkému rozvoji letectví, který zapříčinil růst počtu teroristických útoků. Právě z tohoto důvodu bylo potřebné věnovat bezpečnosti civilního letectví větší pozornost. Největší změny v oblasti bezpečnosti byly zavedeny jako reakce na teroristické útoky z 11. září 2001, kdy se stala hrozba terorismu řešenou tématem, které bylo věnováno nejvíc pozornosti a bylo nutné provést potřebné změny, aby se tyto útoky znova již neopakovaly.

Cílem tohoto článku je charakterizovat bezpečnost civilního letectví, jak ve světě, tak v České republice a na Slovensku, a zároveň analyzovat bezpečnostní systémy na letišti, kdy vybraným letištěm je Letiště Amsterdam Schiphol. V neposlední řadě také analyzovat závěrečnou zprávu pokusu o teroristický útok v roce 2009 na palubě letadla Northwest, kdy bezpečnostní kontrola na letišti Amsterdam Schiphol byla díky tomuto útoku pozměněna.

Struktura článku se skládá z několika hlavních částí. První část je zaměřená na objasnění klíčových pojmů v oblasti bezpečnosti, jako jsou pojmy safety a security, terorismus nebo teoretické modely zabývající se lidským faktorem. Další část pojednává o bezpečnosti civilního letectví ve světě, jejím rozvoji a současném stavu, a jsou zde popsány bezpečnostní systémy používané na letištích. Následně se zaměřuji na letiště Amsterdam Schiphol, jak zde probíhají jednotlivé typy bezpečnostních kontrol a získání Schiphol passu. V poslední části se zabírám analýzou

teroristického útoku a opatřeními, které byly přijaté pro zvýšení bezpečnosti po uskutečnění daného teroristického útoku, a novým systémem, který by měl zajistit zvýšení bezpečnosti na amsterdamském letišti.

### 2. ZÁKLADNÍ POJMY

Zásadním milníkem v oblasti letecké bezpečnosti byly teroristické útoky 11. září 2001, které způsobily náhlé zpřísňování ochrany civilního letectví a zavádění nových zákonů a předpisů souvisejících s bezpečností letecké dopravy. Tyto události měly největší dopad na zpřísnění podmínek vstupu na palubu letadla. Zpřísnily se bezpečnostní kontroly na celém světě, přibýlo velké množství věcí, zakázaných na palubě letadla, a proto se kladl větší důraz na provedení bezpečnostních kontrol cestujících, příručních i odbavených zavazadel pomocí moderních systémů nebo například pomocí profilování cestujících podle jejich chování [1].

Bezpečnost civilního letectví představuje samostatné odvětví bezpečnosti, které se zabývá bezpečností v letecké dopravě, zejména v civilním letectví. Můžeme na ni nahlížet ze dvou pohledů, a to z pohledu provozní bezpečnosti (anglický pojem „safety“) a z pohledu ochrany civilního letectví před protiprávními činy (anglický pojem „security“). Provozní bezpečnost se zabývá především prevencí nehod a incidentů, natož ochrana civilního letectví před protiprávními činy je jedním z odvětví, kterým se zabývá Ministerstvo vnitra z hlediska jeho působnosti [1].

Hlavním úkolem preventivních bezpečnostních opatření v civilním letectví je předejít jakýmkoliv zákonným prostředkem vnesení a použití zbraní, výbušnin a dalších nebezpečných zařízení a předmětů, jejichž držení a převoz není povolen a byly by možné použít ke spáchání protiprávního činu na palubě letadla nebo na letišti [2].

V případě selhání bezpečnostních opatření může dojít ke spáchání protiprávních činů, mezi které patří také terorismus. Definicí pro pojem terorismus existuje velké množství, avšak v současnosti neexistuje pouze jedna správná přijímaná definice. Terorismus ve své podstatě představuje úmyslné a plánované jednání, které je zaměřené proti nezúčastněným osobám a slouží k dosažení daných cílů. Hlavní vlastností terorismu je vyvolat strach a paniku. Cílem teroristů je hlavně civilní obyvatelstvo, proto je tento akt jedním z nejobávanějších činů [2].

S terorismem se střetáváme i v letecké dopravě, která má nadnárodní dopad. Právě letiště jsou místy s vysokou koncentrací osob, proto jsou tyto místa lákadlem pro teroristy. Stejně je to v případě únosu letadla, kdy se na palubě nachází velké množství rukojmích při minimálním počtu pachatelů. Ačkoliv se teroristické útoky mohou lišit, všechny mají jeden společný prvek, a to je selhání nejen bezpečnostních systémů, ale i lidského faktoru. Selhání lidského faktoru představuje klíčový prvek, který umožňuje teroristům provádět jejich útoky. Lidský faktor je nejvíce flexibilní a cenná část letectví, avšak je nejzranitelnější. Zkoumáním lidského faktoru se zabývá mnoho modelů, díky kterým lze tento pojem lépe pochopit. Základní modely se zaměřují na různé vlivy ovlivňující zaměstnance a jejich úsudek, a tak dochází k tvorbě chyb, které ohrožují bezpečnost letecké dopravy. Mezi nejznámější modely se řadí model SHELL nebo Swiss cheese model.

### 2.1. SHELL model

Název modelu vznikl z prvních písmen jeho komponentů: S – software, H – hardware, E – environment a L – Liveware. Obrázek níže popisuje daný model pomocí čtverců představující jednotlivé prvky lidského faktoru. Jeho cílem je usnadnit pochopení lidského faktoru. Tento model vysvětluje téměř všechny faktory, které budou ovlivňovat zaměstnance. Například při rozhraní Software – Liveware, pokud není software správně navržen pro zaměstnance, může se dopustit chyby. Podle tohoto modelu, aby se předešlo nehodám způsobenými lidským faktorem, softwarem, hardwarem, prostředním a člověkem, všechny 4 komponenty musí kooperovat s centrálním Liveware [3].

### 2.2. Swiss cheese model

Swiss cheese model neboli model Reason je založený na předpokladu, že ke vzniku nehody je zapotřebí spojení různých faktorů. Reasonův model přirovnává lidské systémy k několika plátkům švýcarského sýra. V tomto modelu se většina nehod dá vysledovat k jedné nebo více ze čtyř hlavních oblastí selhání: organizační vlivy, dohled, předpoklady a konkrétní činy, stejně jako čtyři plátky sýra. Plátky sýra jsou určité prvky obrany před spácháním chyby, ale nachází se v nich díry, které představují selhání daných prvků obrany. Pokud se díry ve všech plátcích seřadí, stane se nehoda. Tento model dokazuje, že nehoda většinou není izolovaný incident, ale může být způsobena více organizačními chybami, kdy každá chyba může podpořit tvorbu další chyby. Při porovnání s SHELL modelem, Reasonův model představuje důležitost organizace. Ačkoliv Reasonův model je založený na základě lidského faktoru v leteckých procesech, ve skutečnosti problém lidského faktoru neřeší. Tento model pouze poskytuje logickou metodu analýzy procesu nehody, bez určení přesného faktoru, který vedl ke vzniku děr v plátcích sýra [3].

## 3. BEZPEČNOST CIVILNÍHO LETECTVÍ

Jak již bylo uvedeno, bezpečnost civilního letectví je klíčovým faktorem v poskytování letecké dopravy. Bezpečnostní pravidla a systémy musí na všech letištích splňovat určité požadavky, avšak na jednotlivých letištích se tyto požadavky liší. Tématem bezpečnosti se zabírají i mnohé studie. Studie z roku 2015 tvrdí, že ačkoliv je letectví jedním z nejběžnějších způsobů dopravy v dnešní době, nehody se stávají, a pro další rozvoj bezpečnosti musí být použit proaktivní přístup. Kniha s názvem „Commercial aviation safety“ z roku 2011 zmiňuje mýty ohledně safety bezpečnosti. Těchto mýtů je velké množství, a jedním z nich je tvrzení, že bezpečnost je vždy prioritou. Bezpečnost by nikdy neměla být opomenuta, ale největší prioritou komerčních podniků je zisk. Bezpečnost nelze umístit na první místo, jelikož způsob jak zajistit nejvyšší možnou míru bezpečnosti je nelétat. Otázkou tedy není jako dosáhnout bezpečnosti, ale jak dosahovat zisku bezpečným způsobem [4].

Jak jsem již zmiňovala výše, teroristické útoky 11. září 2001 změnilly pravidla bezpečnosti letecké dopravy od základu. Byly učiněny bezpečnostní kroky, jejich většina je uvedena v ANNEXu 17 Chicagské úmluvy. Bezpečnostní pravidla se zpřísnily a zavedly se podrobnější kontroly zavazadel a cestujících. Jedna ze studií z roku 2006 navrhuje klasifikování cestujících do určitých skupin, například pomocí barevných značek na palubním lístku, které by sloužily k označení úrovně případné hrozby. Každá skupina by měla určité typy bezpečnostních prohlídek. Tento přístup je výhodný v případě konstantní hrozby u všech cestujících [5].

Studie z roku 2011 navrhuje online registrace cestujících pro různé úrovně bezpečnostní kontroly. Po online ověření by většinu cestujícím ve skupině s nízkým rizikem stačilo projít regulární bezpečnostní kontrolou s případnými náhodnými prohlídkami. Podobný systém je využíván v USA, kdy cestující jsou na základě online vyplněného formuláře rozděleni do různých úrovní ověření. Tento přístup zahrnuje i výběr nesprávných osob, jelikož není snadné rozlišit, který cestující představuje hrozbu.

Ve studii s názvem „Why do Europeans fly safer? The politics of airport security in Europe and the US“ se autoři zabývají rozdíly v bezpečnosti civilního letectví v Evropě a v USA. Faktem zůstává, že letecká bezpečnost v USA, před útoky 11. září 2001, byla mnohem horší než v Evropě. Experti na leteckou dopravu se shodli, že evropská bezpečnost letectví je efektivnější a podléhá přísnějším standardům. Například bezpečnostní prohlídka cestujících a zavazadel byla na zcela jiné úrovni. Podle získaných dat byl problém v nedostatečném školení zaměstnanců, nízkém platu a vysokém obratu zaměstnanců. Bez dostatečného proškolení pracovníků detekčních zařízení jeho efektivita nebyla dostatečná. Problémem v USA však bylo vnímání letecké dopravy jako businessu, přičemž v Evropě jsou letiště vlastněná a financovaná převážně státem, a ten dohlíží na jejich bezpečnost. V případě přenechání státního dozoru nad bezpečností letecké dopravy studie ukazují, že efektivita zajištění bezpečnosti je významně vyšší. Toto tvrzení podporuje většina států Evropy, například Irsko, Belgie, Francie nebo Nizozemsko. Ale například Velká Británie je speciální případ, jelikož letecká bezpečnost je svěřena organizace British Aviation Authority (BAA), která získává příjem aerolinek využívajících letiště. Přestože je BAA alespoň částečně nezávislou agenturou, potvrzuje argument, že bezpečnost je potřeba delegovat jedinou instituci, která nemá komerční zájem na letecké

dopravě a má dostatečně dlouhý časový horizont působnosti, tj. úspěch instituce musí být přímo spojen s výkonem bezpečnosti [6].

Z hlediska bezpečnosti je potřeba stále modernizovat a vyvíjet různé metody sloužící k zajištění vysoké míry bezpečnosti. K zajištění bezpečnosti se používá celá řada bezpečnostních systémů, které se postupem času vyvíjí a jsou tak schopny identifikovat případné hrozby.

#### 4. BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY POUŽÍVANÉ NA LETIŠTÍCH

S vyvíjejícím se počtem hrozeb se vyvíjí bezpečnostní opatření praktikovaná na letištích. K udržení akceptovatelné úrovně bezpečnosti slouží různé bezpečnostní systémy. Takových systémů je na letišti je celá řada, od systémů rozpoznávání osob až po systémy použité při bezpečnostních kontrolách. Nejvíce využívaným systémem rozpoznávání osob je biometrický systém.

##### 4.1. Biometrický systém

Biometrické metody nejsou založeny na tom, co někdo ví nebo vlastní, ale na tom kým je. Základní biometrické vlastnosti jsou buď fyziologické nebo behaviorální. Mezi fyziologické patří například otisk prstu, geometrie ruky, rozpoznání obličeje, oční duhovky nebo oční sítnice. Zato pod behaviorální vlastnosti řadíme ověřování hlasu, dynamiku podpisu nebo dynamiku stisku kláves. Mezi hlavní výhodu biometrického systému patří snadná propojitelnost s moderní technikou a její spolehlivost, jelikož biometrické údaje každého člověka jsou jedinečné a neměnné. Aplikace těchto systémů na letištích zvyšují bezpečnost při ověřování identity cestujících při odbavení i při kontrole vstupu zaměstnanců do neveřejné zóny letiště. Navzdory výhodám biometrického systému jsou zde mnohá negativa. Problémem je změna biometrických vlastností člověka, jako je stárnutí, zranění nebo růst živé tkáně. Dalším negativem je riziko úniku personálně citlivých dat, proto databáze s biometrickými daty musí být zabezpečena s ohledem na ochranu osobních údajů [7].

Jednou z vlastností biometrického systému je rozpoznávání podle charakteristiky tváře. Výhodou metody je dostupnost kamer a snímačů, snadné ověření výsledků nebo umožnění identifikace z dálky, bez vědomí subjektu. Zato nevýhodou je citlivost na změny osvětlení, výrazu a pózy, změna tváře v průběhu času nebo zakrytí části obličeje vlasy. Technologie se využívá na mnoha civilních letištích včetně letiště Václava Havla v Praze nebo na letišti Amsterdam Schiphol. [7]

Mezi další biometrické technologie patří rozpoznání podle oční duhovky. Duhovka je prstenec obklopující zornici lidského oka. Každý člověk má unikátní a jedinečnou duhovku. Proces rozpoznání probíhá tak, že osoba se přiblíží k přístroji asi na vzdálenost 40 cm, kdy se automaticky zapne hlasové a vizuální navádění pro správné umístění uživatele. Problémy mohou nastat v případě nošení brýlí nebo barevných kontaktních čoček. Tato technologie se používá při vstupu zaměstnanců do neveřejné zóny letiště na letišti Amsterdam Schiphol [7].

##### 4.2. Průchozí detektor kovů

Provedení detekční kontroly se liší podle toho, zda je daná země v oblasti Schengenského prostoru nebo mimo něj. Jedná se o 27

zemí, které mezi sebou zrušili kontrolu při překročení hranic. Ve všech zemích EU odbavování probíhá podobně, jelikož jsou sjednocené požadavky vydávající Evropskou Unii. Cestující musí absolvovat kontrolu alespoň jednou z daných metod, a to ruční prohlídkou, průchozí detektor kovů, ruční detektor kovů, kontrolu pomocí celotělového skeneru nebo kontrolu pro detekci výbušnin [8].

Průchozí detektor kovů (anglicky walk-through metal detector) slouží k odhalení kovových předmětů nacházejících se na těle cestujících a osob, které se nachází v neveřejné části letiště. Tyto detektory pracují na principu elektromagnetické indukce. To znamená, že zařízení vytváří konstantní magnetické pole, které je narušeno osobou nesoucí kovový předmět. Typ a síla narušení záleží na materiálu, ze kterého je předmět vyroben, na jeho velikosti, tvaru a rychlosti pohybu osoby. Jelikož detektory kovů mohou odhalit pouze kovové předměty, v dnešní době už nejsou adekvátní pro použití v letectví. Hrozbou mohou být také nekovové předměty, jako například plastové nože nebo plastické trhaviny. Proto by měli být použity v souvislosti s ruční prohlídkou a kontrolou zavazadel pomocí rentgenového zařízení. Navzdory jeho nevýhodám tento systém patří mezi nejpoužívanější bezpečnostní systémy na světě. Je použit například na letišti Katowice – Pyrzowice nebo na letišti Václava Havla v Praze [9].

##### 4.3. Celotělový skener

Vylepšené bezpečnostní systémy vyvolávající největší vlnu kontroverze jsou celotělové skenery. Tyto zařízení umožňují pracovníkům letiště efektivně detekovat pašované předměty, především umístěné pod oblečením, bez nutnosti fyzického kontaktu s osobou. Existují dva typy celotělových skenerů používaných na letištích po celém světě, a to pracující buď na principu zpětného rozptylu nebo na principu milimetrových vln pomocí elektromagnetického záření. Navzdory odlišným způsobům detekce, oba typy celotělových skenerů slouží ke stejnému účelu, a to pro odhalení nekovových předmětů na těle osob, jako jsou například tekutiny, gely či plastové předměty [10].

###### 4.3.1. Technologie milimetrových vln

Jelikož technologie fungující na principu milimetrových vln nejsou ionizující, jejich použití během bezpečnostních prohlídek nepředstavuje žádná rizika. Milimetrové vlny jsou elektromagnetické vlny v rozsahu 30-300 GHz s vlnovými délkami v rozmezí 1-10 milimetrů. Tyto vlny snadno pronikají neprůhlednými bariérami, jako je oblečení, avšak nepronikají kůží, proto daný objekt musí být skenován z obou stran. Tyto skenery jsou denně využívány na letištích, jelikož mají mnoho výhod. Jednou z nich je schopnost rychlého skenování plně oblečených osob od 1-10 sekund. Vzhledem k obavám ohledně narušení soukromí je toto zařízení vybaveno softwarem odstraňujícím privátní lidské rysy z výsledných snímků. Zavedením této technologie došlo ke zvýšení bezpečnosti na daných letištích, jelikož byly bezpečnostní pracovníci schopni odhalit nekovové předměty umístěné na lidském těle, namísto používaných průchozích detektorů, které rozpoznali pouze kovové předměty. Technologie se používá například na letišti Eindhoven v Nizozemsku nebo na letišti Kolín/Bonn v Německu [11].

#### 4.3.2. *Techonologie zpětného rozptylu*

Druhou technologií používanou při celotělovém skenování byla technologie zpětného rozptylu. Tato technologie spočívá v detekování záření, které se poté odráží od skenovaného objektu. Nejedná se o ozařování těla, ale pouze oblečení, proto dávky, kterým je cestující vystavován, jsou zanedbatelné. Systém pracující na principu zpětného rozptylu funguje tak, že generuje malé množství rentgenových paprsků, které se odráží od pokožky skenované osoby. Rozptýlená ionizační energie rentgenu je poté zachycena detektory a pomocí počítače zpracována za účelem vytvoření dvourozměrného obrazu. Jelikož výsledný obraz zobrazuje citlivé partie osob, vedou se ohledně používání tohoto systému rozsáhlé debaty. Zato mezi jeho výhody patří rychlost skenování, kdy celý proces trvá přibližně 15 sekund. Vzhledem na obavy z důvodu narušení lidského soukromí, byly systémy na základě technologie zpětného rozptylu zakázány, a to jak v EU v roce 2012, tak v USA o rok později [10].

Obrázek níže zobrazuje vzpomínané typy bezpečnostních systémů, kdy systém nacházející se vlevo je systém využívající technologii zpětného rozptylu, prostřední systém používá technologii milimetrových vln, a posledním systémem na obrázku je průchozí detektor kovů.

Dané bezpečnostní systémy se využívají na většině světových letišťích, ale pro účely článku se nadále budeme zabývat bezpečnostními opatřeními na vybraném letišti, a to na letišti Amsterdam Schiphol.

### 5. LETIŠTĚ AMSTERDAM SCHIPHOL

Letiště Amsterdam Schiphol je jedno z nejvýznamnějších a nejstarších letišť na světě, a se svým počtem 25,5 milionů přepravených cestujících jej žebříček ACI řadí na 3. místo z hlediska přepravy mezinárodních cestujících. Provoz amsterdamského letiště Schiphol je hlavní činností Royal Schiphol Group. Tato společnost se zabývá vytvořením světově nejudržitelnějších a vysoce kvalitních letišť, a tak umožňuje rozkvět mezinárodního obchodu a cestovního ruchu [12].

Na největším nizozemském letišti pracuje několik desítek tisíc zaměstnanců, kteří se podílejí na plynulém a bezpečném provozu letiště. Letiště Schiphol má zavedeno několik pravidel, které jsou určeny k udržení vysoké míry bezpečnosti provozu. K získání práce na letišti je potřeba nejprve požádat o bezpečnostní prověrku vydávanou nizozemským ministerstvem vnitra. Zpracování a případné udělení prověrky je zdoluhavý proces, který trvá 2-3 měsíce. Bez schválené bezpečnostní prověrky nelze pracovat na letišti Schiphol v souvislosti s výkonem práce v neveřejných částech letiště. K práci na letišti v Amsterdamu je potřeba Schiphol pass, což je identifikační průkaz, který musí vlastnit každý zaměstnanec pohybující se v letištních neveřejných prostorech. K získání Schiphol passu je zapotřebí složit písemný test, složený z kontrolních otázek, týkajících se bezpečnosti na letišti. Účelem těchto zkoušek je zabezpečit bezpečné prostředí pro zaměstnance pracující v neveřejné zóně letiště. Po úspěšném absolvování testu přijde na řadu vytvoření Schiphol passu. Dochází k tomu ve speciálních kancelářích tzv. buňkách, kdy pověřený pracovník vytvoří, na základě osobních informací, Schiphol pass. Jedním z kroků pro vytvoření Schiphol passu je sken očí, jelikož při každém vstupu do neveřejné části letiště je zaměstnanec podroben skenu očí.

Na tomto letišti je možné získat vícero druhů Schiphol passu. Vše závisí na druhu pracovní pozice a prostorech, ve kterých se bude pracovník pohybovat. Přístup do jednotlivých prostorů závisí na typu Schiphol passu. Ty se liší barvou a písemným označením. Schiphol pass je dostupný také pro návštěvníky letiště, s jedinou výjimkou, kdy na tomto passu není fotografie. Jednotlivé druhy Schiphol passu zobrazuje obrázek níže.

Základním pravidlem, které se několikrát opakuje v rámci tréninků, je povinnost ve všech neveřejných prostorech letiště nosit Schiphol pass viditelně a v prostorech odbavovací plochy je také povinnost nošení reflexní vesty. Dalším neméně významným pravidlem je zneužití Schiphol passu. Schiphol pass může používat je osoba, které byl vydán, a je striktní zákaz půjčování Schiphol passů mezi ostatními osobami.

Stanoviště jednotlivých bezpečnostních kontrol jsou na tomto letišti oddělené. Vstup do těchto prostorů je možný pouze pro zaměstnance letiště s platným Schiphol passem, který slouží jako klíč ke všem dveřím. Při přechodu z veřejné části letiště do neveřejné části, při vstupu přes vchod pro zaměstnance, se nachází speciální budky, které slouží pro kontrolu zaměstnance. Tyto budky fungují na principu skenu očí. Pro otevření budky je nutné přiložit Schiphol pass na vyznačené místo. Díky tomuto kroku se budka z jedné strany otevře a zaměstnanec může vejít dovnitř. Po vstupu do budky se dveře zavřou, a následuje samotné skenování očí. Uvnitř budky se nachází přístroj, který obsahuje malé zrcátko, které je potřeba nastavit do takové polohy, kde jsou obě oči dobře viditelné. Při správném nastavení se v odrazu očí v zrcátku objeví zelená kolečka, které signalizují úspěšně provedený sken, na základě kterého se otevrou dveře na druhé straně budky a pracovník vchází přímo ke stanovišti bezpečnostní kontroly.

Všichni pracovníci letiště se při vstupu do neveřejné části letiště musí podrobit bezpečnostní kontrole, která má za cíl odhalit zakázané předměty. Zakázané předměty jsou například nože, ostré předměty, výbušniny nebo drogy. Samotná bezpečnostní kontrola se skládá z několika částí, a to je bezpečnostní prohlídka letadla, bezpečnostní kontrola cestujících, bezpečnostní kontrola jak příručních, tak odbavených zavazadel a bezpečnostní kontrola zaměstnanců.

#### 5.1. *Bezpečnostní prohlídka letadla*

Bezpečnostní prohlídku provádí školený personál letiště, který pracuje v určitých skupinách, kdy v každé skupině se nachází teamleader, který má na starosti rozdělení úkolů a celkovou zodpovědnost za tuto prohlídku. Prohlídka se skládá z kontroly interiéru a exteriéru letadla.

#### 5.2. *Bezpečnostní kontrola cestujících*

Nejen letadla se podrobují bezpečnostní kontrole, ale i každý cestující musí podstoupit bezpečnostní kontrolu před vstupem na palubu letadla. Výjimkou není ani palubní personál a jejich zavazadla. Bezpečnostní kontrola cestujících se skládá z několika činností. Jednou z nejzákladnějších je získávání a zpracování osobních údajů o cestujících. Zaměstnanci letiště kontrolují tyto údaje s údaji na cestovních dokladech. Cestujícího následně čeká detekční kontrola a kontrola jeho zavazadel. Pro kontrolu cestujících, v rámci detekční kontroly na letišti Schiphol, slouží detektory kovů nebo celotělový skener, případně ruční prohlídka. Cílem detekční kontroly je odhalení nebezpečných a



zakázaných předmětů. Používá se zde již zmíněné zařízení, a to celotělový skener, který pracuje na principu milimetrových vln. Proces kontroly probíhá následovně: při průchodu tímto skenerem se cestující zastaví na krátkou dobu, zaujme polohu, která je vyobrazená jako silueta před ním, a je na několik sekund se nesmí hýbat, aby jej přístroj mohl oskenovat. Tento způsob je velice efektivní, jelikož přístroj ukáže nebezpečná místa, která jsou podrobena fyzické kontrole [13].

### **5.3. Bezpečnostní kontrola příručních zavazadel**

Bezpečnostní kontrole podléhají i zavazadla. Příruční zavazadla jsou omezena svými rozměry a hmotností na základě pravidel dané letecké společnosti. Přeprava tekutin a aerosolů je zastřešena horní hranicí 100 ml. Donedávna všechny tekutiny v příručním zavazadle musely být umístěny v průhledném sáčku a před bezpečnostní kontrolou vytáhnuty ze zavazadla. Avšak díky nové technologii CT skenu všechny tekutiny mohou zůstat v zavazadle. Kontrola probíhá pomocí Rentgenového zařízení, kdy o prozkoumání snímků se stará vyškolený personál letiště.

### **5.4. Bezpečnostní kontrola odbavených zavazadel**

Tak jako u kontroly příručních zavazadel, kontrola odbavených zavazadel má za cíl odhalit zakázané a nebezpečné předměty obsažené v zavazadle. Už s prvním náznakem bezpečnostní kontroly se cestující setkává na odbavovací přepážce, kdy se jich zaměstnanec ptá, zda jejich zavazadlo neobsahuje zakázané předměty. Po odbavení zavazadla je zavazadlo označeno štítkem a posláno do třídírný zavazadel. V třídírně proběhne detekční kontrola zavazadla, kdy se používá obdobné zařízení jako při kontrole příručních zavazadel. Používají se RTG zařízení, ruční prohlídka, EDS a ETD [14].

V zapsaných zavazadlech je zakázáno přepravovat výbušniny, plyny, hořlavé kapaliny a látky, toxické a infekční látky, radioaktivní materiál, peroxidy, žiraviny a paliva. Avšak podrobný rozpis zakázaných předmětů se doporučuje ověřit u letecké společnosti nebo u provozovatele letiště.

### **5.5. Bezpečnostní kontrola zaměstnanců**

Tak jako musí cestující projít bezpečnostní kontrolou, musí i zaměstnanci letiště a posádky letadel procházet bezpečnostní kontrolou. Pro kontrolu zaměstnanců jsou vyhrazené speciální bezpečnostní kontroly, ke kterým se běžný cestující nemůže dostat. Bezpečnostní kontrola zaměstnanců probíhá obdobně jako kontrola cestujících. Používají se zařízení jako průchozí detektor kovů, celotělový skener a rentgenové zařízení pro kontrolu osobních věcí. Každý zaměstnanec se musí při vstupu do neveřejné zóny letiště prokázat Schiphol passem.

## **6. TERORISTICKÝ ÚTOK NA LETIŠTI AMSTERDAM SCHIPHOL**

Do Vánoc roku 2009 bylo letiště Schiphol prakticky nepoznamenané hrozbou narušení bezpečnosti z hlediska terorismu. Na Štědrý den roku 2009 nastoupil Nigérijec Umar Farouk Abdulmutallab na let Northwest 253 na amsterdamském letišti s 80 gramy vysoce výbušné chemické látky umístěnými uvnitř kalhot. Když se letadlo blížilo k cílovému letišti v Detroitu, Umar se pokusil bombu zapálit pomocí vstříknutí chemikálie do balíčku. Tento pokus selhal, ale tato akce, koordinovaná Al-Kaidou v Jemenu, otevřela kontroverzi týkající se nejen

bezpečnosti na letišti Schiphol, ale také bezpečnosti na letištích po světě [15].

Po tomto nevydařeném pokusu o teroristický útok evropské letiště zpřísnily bezpečnostní prohlídky na letech do USA. Pár týdnů po teroristickém útoku došlo k vyhodnocení dvou potencionálních problémů. Jednak se to týkalo ostrahy pracujících na letišti, a skenovacích zařízení, na které zaútočily média. Jelikož měl Umar na sobě tekutinu, detektory kovů nestačily. Řešením byly dvě alternativní cesty. Pokud byla problémem zastaralá technologie, pak by možná novější, lepší skener mohl ukončit obavy zúčastněných stran, že potencionální bomby nebudou detekovány. Pokud však problémem bylo selhání bezpečnostních pracovníků, poté lepší bezpečnostní opatření by mohly tento problém vyřešit [15].

Tento útok ukázal, že nejen zbraně a ostré předměty mohou být nebezpečné, ale také tekutiny a prášky. Proto bylo zavedeno do provozu nové zařízení, tzv. celotělový skener, které sloužilo k odhalení nežádoucích objektů na lidském těle. Systém celotělového skeneru je popsán v předchozí kapitole. Jelikož se množství hrozeb cílených na letiště neustále zvyšuje, zavádí se nové systémy, které by měly pomoci zvýšit bezpečnost na letišti, a tak i bezpečnost celé letecké dopravy.

## **7. INOVACE V PROCESU BEZPEČNOSTNÍ KONTROLY**

Bezpečnostní systémy se neustále vyvíjejí a musí splňovat aktuální požadavky při odhalování potencionálních hrozeb. Jedním ze způsobů inovace bezpečnostních systémů je jejich modernizace a využívání moderních technologií. Vzhledem k tomuto faktu se letiště Schiphol rozhodlo navázat spolupráci se společností Pangiam, která se zabývá bezpečnostními technologiemi, aby vytvořili nový způsob skenování příručních zavazadel rychle a bezpečně. Nová technologie, fungující na principu umělé inteligence, může pomoci umožnit cestujícím projít bezpečnostní kontrolou rychleji, bez dodatečného negativního vlivu na bezpečnost. Letiště Schiphol je prvním větším evropským letištem podporujícím projekt DARTMOUTH, což je spolupráce mezi firmou Pangiam a Google. Nová technologie je testována na daném letišti v malém měřítku, aby se mohla dále rozvinout na všech bezpečnostních procesech. Technologii lze aplikovat na již existující hardware a zařízení, jako je CT sken, používaný na amsterdamském letišti. Také může být použita v kombinaci s jiným softwarem. Pokud tato technologie splní všechny požadavky a evropské nařízení, a její testování bude úspěšné, bude aplikována ve větším měřítku [16].

## **8. ZÁVĚR**

Letecká doprava se neustále vyvíjí, a proto se musí upravovat také požadavky pro udržení vysoké úrovně bezpečnosti. Při položení otázky, zda je současný stav letecké dopravy na dostatečné úrovni požadované bezpečnosti je odpověď z mého pohledu nejednoznačná. Při respektování bezpečnostních opatření a dodržování postupů ve spojení s použitím nejmodernějších technologií zaměřené na využití umělé inteligence je možné dosáhnout vysokou úroveň bezpečnosti. Jedním z problémů představuje selhání lidského faktoru, kterému nelze vždy předejít. Další problém představuje fakt, že pachatelé objevují nové možnosti jak proniknout s nebezpečnými předměty do neveřejné zóny letiště a na palubu letadla. Z tohoto důvodu byla poslední část tohoto článku

zaměřená na použití moderních technologií v oblasti bezpečnostní kontroly, které by měly zrychlit a zefektivnit proces bezpečnostní kontroly.

Tento článek se snaží poukázat na důležitost spolupráce všech segmentů působících v oblasti letištní bezpečnosti. Na základě studia literatury, odborných materiálů a důvěryhodných internetových stránek byla snaha o co nejlepší přiblížení problematiky v této oblasti a možné řešení na zabezpečení lepší budoucnosti v rámci bezpečnosti.

## Referencie

- [1] *Bezpečnost civilního letectví*. Ministerstvo vnitra České republiky, 2016
- [2] Předpis L 17 - Ochrana mezinárodního civilního letectví před protiprávními činy. In.: 2022.
- [3] LIU, Xiong; WANG, Lin Lin. Civil aviation accident Human Factors analysis model. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 1825-1828.
- [4] RODRIGUES, Clarence C., et al. *Commercial aviation safety*. McGraw-Hill Education, 2012.
- [5] BABU, Vellara L. Lazar; BATTA, Rajan; LIN, Li. Passenger grouping under constant threat probability in an airport security system. *European Journal of Operational Research*, 2006, 168.2: 633-644
- [6] HAINMULLER, Jens a Jan Martin LEMNITZER. *Why do europeans fly safer? The politics of airport security in Europe and The US* [online]. 2010. s 1-16. [cit. 2023-01-25]. ISSN 1556-1836. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09546550390449863>
- [7] SAINER, Jakub. Zajištění bezpečnosti na mezinárodním letišti před protiprávními činy s možnostmi využití metod profilace cestujících. 2017. 144 s. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [8] HÁJKOVÁ, Tereza. *Vybrané metody a způsoby zajištění bezpečnosti na letišti* [online]. Praha, 2019, 62 s. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://is.ambis.cz/th/p532v/>. Bakalářská práce. AMBIS vysoká škola, a.s.
- [9] SKORUPSKI, Jacek; UCHROŃSKI, Piotr. A fuzzy model for evaluating metal detection equipment at airport security screening checkpoints. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 16: 39-48.
- [10] ACCARDO, Julie a M. Ahmad CHAUDHRY. Radiation exposure and privacy concerns surrounding full-body scanners in airports. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* [online]. USA, 2014, (7), 198-200 [cit. 2023-03-25]. ISSN 1687-8507. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.005>.
- [11] MCMAKIN, Douglas, David SHEEN, Thomas HALL, Jonathan TEDESCHI a A. Mark JONES. New Improvements to Millimeter-Wave Body Scanners. *Proceedings of 3DBODY.TECH* [online]. USA, 2017, 263-271 [cit. 2023-03-25]. ISSN 1687-8507. Dostupné z: doi:10.15221/17.263
- [12] Schiphol group. *Schiphol* [online]. Amsterdam Schiphol Airport, 2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.schiphol.nl/en/schiphol-group/page/our-profile/>
- [13] HORKÁ, Zuzana. Mezinárodněprávní ochrana bezpečnosti civilního letectví: (zejména před činy ohrožujícími bezpečnost letectví). Praha, 2011, 70 s. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [14] GÜRLICHOVÁ, Valentina. *Postupy, metody a prostředky zajištění bezpečnosti na palubě letadla*. Praha, 2021, 63 s. Bakalářská práce. AMBIS vysoká škola, a.s.
- [15] SCHOUTEN, Peer. Security as controversy: Reassembling security at Amsterdam Airport. *Security Dialogue* [online]. School of Global Studies, University of Gothenburg, Sweden, 2014, (45), 23-42 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: doi:10.1177/0967010613515014
- [16] Schiphol and Pangiam innovate with artificial intelligence in security process. *Schiphol Newsroom* [online]. Amsterdam Airport, 2023 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://news.schiphol.com/schiphol-and-pangiam-innovate-with-artificial-intelligence-in-security-process/>



## WEATHER AND ITS IMPACT ON THE WORK OF RESCUE HELICOPTERS IN TERRAIN

**Alexandra Zacharová**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Jozef Čerňan**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*In the article it was necessary to define and clarify the basic theoretical knowledge and concepts in the field of aviation meteorology and also the technical and performance parameters of the rescue helicopters used in Slovakia. It was important to mention and clarify the elements of aviation meteorology that significantly affect the operation and reliability of the aircraft. Based on the theoretical aspects related to the issue, it was possible in the following chapters to proceed to the analysis and detailed examination of the impact of weather on the work of rescue helicopters, which was the main objective of the thesis. On the basis of the analysis of the activities and interventions of rescue helicopters from the past years and thanks to the clarified theoretical concepts, I was able to clarify the impact of weather on the number of emergencies requiring helicopter rescue medical service.*

### Keywords

*weather, helicopter, rescue helicopter, rescue, mountain rescue, air ambulance, helicopter emergency medical service*

### 1. ÚVOD

Odborný článok sa z počiatku venuje definovaniu dôležitých teoretických prvkov, ktoré úzko súvisia s meteorológiou, špeciálne meteorológiou v letectve. V prvej časti sú definované termíny a pojmy ako počasie, stav a premenlivosť počasia a tiež jednotlivé typy zrážok či tlakových útvarov. Pre leteckú meteorológiu je nevyhnutné oboznámiť sa s prvkami ako SYNOP, METAR či TAF, vďaka ktorým sa piloti jednoducho orientujú v zmenách a predpovediach počasia a dokážu spoľahlivo naplánovať let vzhľadom na predpokladaný vývoj počasia počas letu. V ďalšej časti sú definované prvky význačného počasia, ktoré výrazne ovplyvňujú letové podmienky a let samotný. Patrí sem napríklad viditeľnosť, turbulencia, rôzne typy miestnych vetrov, námraza, búrky..Samostatnou časťou je ozrejenie pojmov z oblasti vrtuľníkovej záchranej zdravotnej služby, špecificky na území Slovenska. Charakteristika jednotlivých typov vrtuľníkov určených na záchranné práce umožní lepšie porozumenie danej témy. Hlavným cieľom je analýza dopadu význačných prvkov počasia na let vrtuľníkov a špecificky vrtuľníkov leteckej záchranej zdravotnej služby Slovenska.

### 2. TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ

Vysvetlenie elementárnych poznatkov z teórie je dôležité pre pochopenie nasledujúcich častí práce. Vymedzenie základných faktov a termínov z oblasti všeobecnej ale najmä leteckej meteorológie nám priblíži tému práce, vďaka čomu bude možné jasne porozumieť ďalším častiam akou je napríklad analýza vplyvov prvkov význačného počasia na let vrtuľníkov, koľko zásahov bolo v dôsledku nepriaznivého počasia odmietnutých či naopak ako priaznivé počasie vplýva na úrazovosť v horskom prostredí s potrebou leteckej záchrany.

Informácie o počasí a ďalšie s počasím súvisiace služby nám poskytujú letecké meteorologické stanice SHMÚ. Takéto stanice sa nachádzajú napríklad vo „flight information region“

Bratislava a tiež na letiskách v okolí Bratislavy. Ďalšie významné stanice sa nachádzajú v oblasti letísk Košice a Poprad-Tatry. Tieto tri spomínané stanice patria medzi najvýznamnejšie pre oblasť Slovenska a sú zdrojom meteorologických informácií pre vnútroštátne lety, lety v oblasti Európy a tiež pre lety z Európy do iných oblastí ICAO.

### 3. ZÁKLADNÉ METEOROLOGICKÉ POJMY

Vzhľadom na fakt, že počasie zásadne ovplyvňuje pravidelnosť, bezpečnosť i hospodárnosť leteckej prevádzky, sú znalosti z oblasti meteorológie nevyhnutnou súčasťou vedomostí každého pilota. Je nutné, aby pilot rozumel meteorologickým podkladom, bol schopný správne pozorovať a následne analyzovať meteorologické prvky a správne ich počas letu interpretovať. V oblasti letectva sa stretávame so špecifickou časťou meteorológie, a preto je nutné zdefinovať si základné pojmy leteckej meteorológie.

#### 3.1. Troposféra

Zemská atmosféra je tvorená niekoľkými časťami. Jej spodnou časťou je práve troposféra a jej charakteristickým prvkom je pokles teploty vzduchu s výškou o približne 0,65°C na každých 100m výšky. Práve v troposfére sa nachádza takmer všetká voda, ktorú atmosféra obsahuje. Z tohoto dôvodu je to oblasť vzniku hmiel, oblakov, búrkovej činnosti, vzniku atmosférických zrážok. oveternostná situácia pričom v cyklónach je tropopauza nižšie ako v anticyklónach.

#### 3.2. Počasie

Počasie je stav atmosféry, charakterizovaný ako súhrn hodnôt meteorologických prvkov a atmosférických javov na určitom mieste a v určitom čase. Spravidla sa počasím rozumie okamžitý stav atmosféry, niekedy tiež zmeny meteorologických prvkov či

atmosférických javov v krátkom časovom intervale (minúty, hodiny)

### 3.3. Zrážky

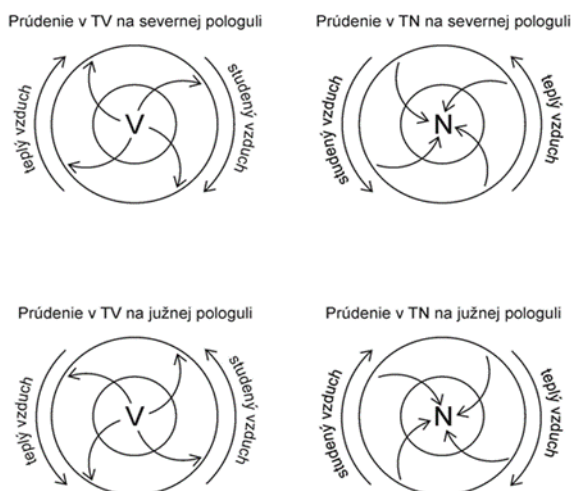
Zrážky patria medzi najdôležitejšie a najpremenlivejšie meteorologické prvky. Vyskytujú sa v podobe dažďa, snehu, mrholenia, krúpov alebo ľadových ihličiek. Zrážky sú vo všeobecnosti výsledkom kondenzácie. Vyskytujú sa v rôznom skupenstve – kvapalné/ tuhé, v ktorom opúšťajú oblaky. Ideálna oblačnosť pre tvorbu zrážok je zmiešaná. Ak dochádza k silnému prúdeniu v búrkovom oblaku, môže ísť o konvektívne či kompenzačné prúdenie, môže dochádzať k tvorbe ľadových krúpov.

### 3.4. Tlakové útvary

Tlakové útvary/ polia vznikajú v oblastiach s nízkym a vysokým tlakom vzduchu. Medzi tlakové útvary zaraďujeme cyklónu – tlakovú níz, ktorú tvoria izobary ohraničujúce oblasti, v ktorých postupne dochádza k znižovaniu tlaku pričom najnižší tlak je v strede útvaru. Naopak anticyklónu – tlakovú výš tvoria izobary ohraničujúce oblasti, kde dochádza k postupnému zvyšovaniu tlaku smerom do stredu tlakového útvaru [2].

Tlakovú níz (ďalej TN) charakterizuje prúdenie vzduchových hmôt na severe proti smeru hodinových ručičiek a súčasne jej stáčanie sa k samotnému stredu tlakovej níze. Typickým znakom cyklóny sú zrážky sprevádzané oblačným počasím. Zatiaľ čo v zimnom období tlaková níz prináša oteplenie, v letnom býva sprevádzaná ochladením. Jej postup je spravidla smerom zo západu Postupuje od západných oblastí smerom k východu [4].

Tlaková výš (ďalej TV) je charakteristická nízkou oblačnosťou, takmer bezvetriem a minimálnymi zrážkami. Na severnej pologuli dochádza k prúdeniu vzduchových hmôt v smere hodinových ručičiek a súčasne s stáčaním smerom od stredu samotnej anticyklóny. Prúdenie vzduchových hmôt na severnej pologuli je v smere hodinových ručičiek a stáča sa od stredu anticyklóny.



Obrázok 1 - Prúdenie vzduchu v tlakových útvaroch.

### 3.5. Prúdenie vzduchu - vietor

Samotné prúdenie vzduchu môžeme považovať za dôsledok snahy o vyrovnanie tlakových rozdielov. Vďaka vetru dochádza

k prenosu energie v atmosfére, zmene intenzity vyparovania a tiež vplyva na fyzikálne vlastnosti vzduchu. Vietor je tvorený dvomi hlavnými zložkami – horizontálnou, vzniká vďaka pôsobeniu horizontálnej sily, Coriolisovej sily a tiež silám odstredivej a trecej. Druhou zložkou tvoriacou vietor je zložka vertikálna, ktorá je výsledkom konvekcie, obtekania a pohybu vzduchu. Vzduch sa pohybuje najmä vo frontálnych a cirkulačných systémoch

[5].

## 4. ZÁKLADNÉ POJMY LETECKEJ METEOROLÓGIE

Keďže už poznáme základné definície z oblasti počasia, je dôležité zadefinovať si spôsoby, podľa ktorých sa piloti oboznamujú so situáciou týkajúcou sa počasia a stavu počasia na jednotlivých letiskách, ktoré sú súčasťou letovej trate a tiež počasia na samotnej letovej trati.

### 4.1. SYNOP

Označenie SYNOP poukazuje na meteorologickú správu, ktorá obsahuje informácie potrebné pre zakreslenie prízemných synoptických máp. Údaje zo SYNOP-u môžu byť použité tiež ako zdroj rôznych štatistík. Takáto správa obsahuje identifikačnú časť (deň v mesiaci kedy bola správa vydaná, hodina, jednotky rýchlosti vetra, identifikácia stanice, z ktorej správa pochádza) ďalej táto správa obsahuje informácie ako horizontálna dohľadnosť, smer a rýchlosť vetra, teplota vzduchu a tiež teplota rosného bodu, tlak vzduchu, stav a priebeh počasia, množstvo a druh zrážok, údaje o oblačnosti. V ďalšej časti sa nachádzajú informácie o extrémnych teplotách vzduchu, stave pôdy, výška snehovej pokrývky, dĺžka slnečného svitu, nárazy vetra či informácie o mozhnej námraze. Správy typu SYNOP sa zvyčajne zostavujú a odosielajú každú hodinu.

### 4.2. METAR

Správa metar znamená podanie informácií o hodinovom pozorovaní počasia, do ktorého spadá meranie atmosférického tlaku (nastavenie výškomeru), pozorovanie stavu oblohy a viditeľnosti, teploty, teploty rosného bodu, rýchlosti a smeru vetra a tiež možnosť pridania poznámky pozorovateľa. Skratkové slove METAR má niekoľko plných podôb a jeho doslovný preklad sa tak v niektorých prípadoch líši, napríklad METeorological Aviation Report – meteorologická letecká správa, METeorological Terminal Air Report – meteorologická letisková správa o ovzduší alebo METeorological Aerodrome Routine Report – meteorologická letisková pravidelná správa.

### 4.3. TAF

Meteorologická správa typu TAF (=Terminal Aerodrome Forecast) je určená pre letiskové predpovede, špeciálne pre letiská, ktoré majú riadenú leteckú prevádzku. Letiská s riadenou leteckou prevádzkou na území Slovenska sú Bratislava, Piešťany, Sliač, Žilina a Košice. Správy TAF pripravuje Letecká meteorologická služba a sú vydávané každých 6 hodín. Platnosť týchto správ je 24 hodín, prípadne môžu byť vydávané každé 3 hodiny a ich platnosť je v takomto prípade 9 hodín.

## 5. PRVKY VÝZNAČNÉHO POČASIA OVPLYVŇUJÚCE LETOVÉ PODMIENKY

Medzi prvky počasia, ktoré výrazne ovplyvňujú let a letové podmienky, v našom prípade vrtuľníkov, špecificky tých, ktoré úzko súvisia so záchranou ľudských životov, s transportom orgánov alebo s inými druhmi záchranných prác patrí viacero špecifických prvkov.

### 5.1. Viditeľnosť

Je charakterizovaná mierou vzdialenosti, v ktorej môžeme jasne rozoznávať predmety alebo svetlo pred nami. Viditeľnosť je ovplyvňovaná smerom a uhlom pohľadu a tiež výškou pozorovateľa. Ďalšími faktormi ovplyvňujúcimi viditeľnosť je prítomnosť hmly, oparu, zrážok a oblačnosti.

### 5.2. Turbulencia

V súvislosti s letectvom je turbulencia jedným z najnebezpečnejších, a teda aj najdôležitejších meteorologických prvkov. Turbulencia vo všeobecnosti je nepravidelný pohyb kvapalín či plynov po nepravidelnej dráhe nepravidelnou rýchlosťou. Z latinčiny tento názov znamená nepokoj či neporiadok. Samotnú turbulenciu ovplyvňuje tvar reliéfu – oblasti nížin, kotlín, pohorí, nadmorskou výškou, samotným tvarom a dĺžkou pohorí a pod.

V letectve turbulencia vzniká pri prudkých zmenách smeru prúdenia a rýchlosti prúdenia vzduchu. Najčastejšou príčinou turbulencie je oblačnosť vyvíjajúca sa vertikálne, búrkové činnosti a jav, pre ktorý je typická náhla zmena smeru a sily vetra známy ako strih vetra. Turbulencie sa vo všeobecnosti pri nočných či skorých ranných letoch vyskytujú zriedka vďaka pomerne plynulému prúdeniu vzduchu v týchto častiach dňa.

### 5.3. Miestne vetry

Ak dochádza k nerovnomernému zohrievaniu povrchu na pomerne malom území, dochádza k rozdielnym tlakovým pomerom na malom priestore v dôsledku čoho vznikajú miestne vetry známe ako bríza (vzniká v dôsledku nerovnomerného zahrievania pevniny a mora počas denného cyklu), bóra (podmieneny orografiou), ľadovcový vietor, malé vzdušné víry, dolinový vietor a pod.



Obrázok 2 - Výskyt miestnych vetrov v oblasti Vysokých Tatrách [4].

### 5.4. Námraza

Námraza patrí medzi najnebezpečnejšie prvky počasia negatívne ovplyvňujúce letové vlastnosti a výkonnosti lietadiel. Námraza spôsobuje znižovanie vztlaku, zvyšovanie odporu a hmotnosti lietadla, posúva pôsobisku vztlaku čo následne negatívne ovplyvňuje pozdĺžnu stabilitu celého letúnu. Vplýva tiež na prístroje nevyhnutné k bezpečnému letu [4].

### 5.5. Búrka

Jedným z najväčších nebezpečenstiev, ktoré predstavuje počasie pre letectvo sú búrky. Samotné búrky sa prejavujú v rôznych formách, a to napríklad ako downburst, microburst, blískanie sa, krúpobitie, silný dážď, poryvy vetra, nízka viditeľnosť a tiež ako už vyššie spomínané turbulencie či námraza.

## 6. VRTUĽNÍKOVÁ ZÁCHRANNÁ ZDRAVOTNÁ SLUŽBA

V ďalšej časti práce si zdefinujeme vývoj vrtuľníkov z hľadiska histórie a samotné vrtuľníky operujúce na území Slovenska. Špecificky sa budeme venovať záchranným typom. Popíšeme si ich jednotlivé časti, špecifikácie a použitie pri práci leteckých záchranárov.

Hlavnou myšlienkou pri vývoji vrtuľníka bola potreba vytvoriť lietajúci stroj, ktorý bude schopný zvisle vzlietať a pristávať, lietať aj dozadu a tiež do strán a najmä vznášať sa vo vzduchu na jednom mieste.

Začiatky vývoja stroja podobného dnešným vrtuľníkom pripisujeme roku 1918. Prvým predchodcom dnešného vrtuľníka bol vírnik – Cierva C I. V roku 1920 ho zostrojil a tiež pilotoval inžinier Juan de la Cierva v Španielsku. Zatiaľ čo moderné vrtuľníky sú poháňané výkonnými pohonnými jednotkami roztáčajúcimi rotory, toto zariadenie nedisponovalo žiadnou pohonnou jednotkou a rotor bol roztáčaný len prúdom vzduchu počas letu. Pohyb vzduchu bol zabezpečovaný motorom s vrtuľou. Vrtuľu roztáčal motor Le Rhône 60 Cv a jeho výkon bol 44 kW. Celková hmotnosť prvého vírniku bola 350 k.

## 7. TYPY ZÁCHRANÁRSKÝCH VRTUĽNÍKOV NA SLOVENSKU

Flotilu záchranných vrtuľníkov na Slovensku tvorí viacero typov. Konkrétne ide o modely Augusta A109, Bell 429 a EC135 T2+/ EC132 P2+.

### 7.1. Augusta A109

Tento typ záchranného vrtuľníka bol na Slovensko dovezený v marci v roku 2003. Ide o upravenú verziu vrtuľníka K2 a jeho vývoj prebiehal v spolupráci s leteckou záchrannou službou vo Švajčiarsku - REGA. Prvý vzlet pôvodného A109 sa uskutočnil v roku 1971 a vzlet jeho upravenej verzie A109K2 bol v roku 1990. Stroj je poháňaný dvoma turbohriadeľovými pohonnými jednotkami Turbomeca Arriel, každý s výkonom 550 kW, prípadne 2x Pratt&Whitney Canada. Maximálna letová rýchlosť je 285 km/h, dolet tohto stroja je 964km a dosah 6000m so stúpanosťou 9,8 m/s. Vrtuľník je schopný prepraviť 6 cestujúcich + pilota. Čo sa týka paliva, pohonnou hmotou je JET A1-L so spotrebou 300l/hod.



## 7.2. Bell 429

Hovoríme o ľahkom, viacúčelovom úžitkovom vrtuľníku, ktorý je vyrábaný americkou spoločnosťou Bell Helicopter. Je vývojovým pokračovateľom Bell-u 427. Tento typ vrtuľníka bol špeciálne navrhnutý podľa požiadaviek leteckých záchranárov. Jeho maximálny dostup je 6096m a je schopný pracovať v teplotnom rozmedzí od -40 do 51,7 stupňov. Pohon tohto stroja je zabezpečovaný dvomi turbohriadeľovými motormi, vďaka ktorým je schopný dosahovať rýchlosti letu takmer 280 km/h

Nosný aj vyrovnávací rotor je štvorlistý, podvozok lyžinový. Veľkou výhodou tohto typu je dĺžka lana, ktorá je takmer 90m a celková maximálna hmotnosť nákladu je takmer 250kg. Lano je upevnené v palubnom navijaku a práve vďaka jeho dĺžke je tento typ využívaný v najmenej dostupných terénoch, napríklad v oblasti Vysokých Tatier či Slovenského raja.

## 7.3. EC 135T2+, EC135 P2+

Tretím typom vrtuľníka vo flotile leteckej záchrannej služby je vrtuľník EC 135T2+, EC135 P2+. Jedná sa pomerne ľahký dvojmotorový vrtuľník so štvorlistovým nosným rotorom a lyžinovým podvozkom. Jeho zaujímavosťou je vyrovnávací rotor, tzv fenestron. Tento vrtuľník vyrába spoločnosť Airbus Helicopters. Rovnako ako pri leteckej záchrannej službe je tiež obľúbený v službách polície. Čo sa týka špeciálneho vybavenia, jeho súčasťou je automatické spúšťanie motorov a tiež multiinformačné displeje nachádzajúce sa v kabíne, ktorá pilotovi umožňuje veľmi dobrý výhľad. EC135T2+ je poháňaný motorom Turbomeca Arrius 2B2 vďaka čomu dosahuje výkon 2x473kW. V prípade modelu EC135P2+ sú používané pohonné jednotky Pratt&Whitney a je tak zabezpečený výkon 2x463kW .

## 8. VRTUĽNÍKOVÁ ZÁCHRANNÁ ZDRAVOTNÁ SLUŽBA

Súčasťou integrovaného záchraného systému je aj vrtuľníková záchraná zdravotná služba – VZZS.

Vrtuľníky záchrannej zdravotnej služby sú často využívané nielen na priamu záchranu zranených osôb, no tiež slúžia na prevoz pacientov medzi nemocnicami či prevoz samotných ľudských orgánov pre transplantačné programy.

Najväčšou výhodou vrtuľníkovej záchrannej služby je rýchlosť a takmer neobmedzená dostupnosť. Oba tieto faktory veľmi výrazne vplyvajú na úspešnosť záchrany ľudského života. Posádky leteckých záchranárov najčastejšie zasahujú pri úrazoch, ktoré sa odohrali v horskom teréne, lesných oblastiach, odľahlých lokalitách a tiež pri vážnych dopravných nehodách, katastrofách veľkých rozmerov, hromadných nešťastiach, záplavách.

Vrtuľníková záchraná zdravotná služba zabezpečuje tiež prevoz pacientov mimo územia Slovenskej republiky, do špecializovaných zdravotníckych zariadení v zahraničí alebo zabezpečuje prevoz slovenských občanov zo zahraničia do zdravotníckych zariadení na Slovensku [13].

Okrem vrtuľníkovej zdravotnej služby môžu pacienti vyžadujúci špeciálny typ prepravy využiť aj špeciálne sanitné lietadlo. Toto lietadlo je primárne určené na prevoz pacientov vyžadujúcich prevoz do SR napr. po ťažkom úraze či vážnej chorobe, ktoré sa udiali v cudzine. Je teda určené na dlhšie vzdialenosti alebo lety, kedy je nutné zabezpečiť zdravotnícky personál na celú dĺžku

transportu. Tento typ prevozu sa využíva najmä v prípadoch, kedy je nutné, aby bol pacient pod drobnohľadom odborníkov počas celého transportu pričom jeho zdravotné parametre musia byť sledované lekárom alebo zdravotných špecialistov.

## 9. ZHODNOTENIA A ZÁVER

Hlavným cieľom práce bolo zhodnotenie vplyvu počasia a jeho význačných prvkov na leteckú dopravu, špecificky na let a prácu záchranárskych vrtuľníkov v teréne.

V úvode práce sú definované teoretické východiská, ktoré významne napomáhajú správne porozumeniu danej problematiky.

Na základe analýzy bolo zistené, že jedným z najvýraznejších faktorov ovplyvňujúcim let vrtuľníka je jednoznačne počasie. Z analýzy počasia na území Slovenska počas rokov 2019-2021 vyplýva, že najvýraznejším faktorom s najväčším vplyvom na prácu leteckých záchranárov je vietor. Počas letných mesiacov stúpa riziko spojené s výskytom búrok, ktorých súčasťou je takmer vždy aj vietor. Napriek tomu, že sa dá búrková oblasť pomerne ľahko obísť, ak sa nachádza v mieste odletu alebo naopak priletu, let musí byť odložený alebo úplne zrušený. Spolu s vetrom do leteckej prevádzky výrazne zasahuje aj búrková činnosť, snehové prehánky, husté lejaky a privalové dažde, ktoré znemožňujú bezpečný let a ovplyvňujú tak schopnosť leteckých záchranárov zachraňovať ľudské životy.

Celkovo najvyťaženejším strediskom ATE je Banská Bystrica. Táto skutočnosť môže byť spôsobená najväčším zásahovým obvodom strediska, vzdialenosťou od iných stredísk a tiež lokalitou, v ktorej sa nachádza. V okolí Banskej Bystrice sa nachádza množstvo turistických atrakcií využiteľných počas letnej i zimnej sezóny, vedú v jej okolí dôležité dopravné ťahy. Naopak najmenej vyťaženým strediskom sa javí Bratislava, čo je spôsobené najmä relatívne dobrou dostupnosťou pre pozemnú záchranú službu, z čoho vyplýva znížená potreba zásahu leteckých záchranárov, relatívne vysoká zastavanosť a hustota obytných budov čo nepriaznivo ovplyvňuje možnosti pristátia záchranárskeho vrtuľníka. Rovnako sa v blízkom okolí Bratislavy nenachádzajú málo dostupné turistické trasy predstavujúce riziko s potrebou zásahu leteckej záchrannej zdravotnej služby. Lety v tejto oblasti sú často v spojitosti s prevozom pacientov či ľudských orgánov do špecializovaných zdravotníckych zariadení.

## Referencie

- [1] SHMÚ. *Letecká meteorológia*. [online]. [cit.2023-03-22]. dostupné z: <https://www.shmu.sk/sk/?page=34>
- [2] AIRPORT LUČENEC. *Meteorológia*. [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné z : <http://www.airportlucenec.sk/meteorologia.htm>
- [3] [3] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, *Počasí*. [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné z : <http://slovník.cmes.cz/fulltext/pocasi>
- [4] BALÁŽOVIČOVÁ, L. 2015. *Základy meteorológie a klimatológie pre geografov*. Banská Bystrica: Belianum, 2015. ISBN 978-80-557-0954-3 144 s.

- [5] MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J., ĎURSKÝ, J., LAPIN, M. a kol. 2003. *Lesy Slovenska a globálne klimatické zmeny*. Zvolen: EFRA , LVÚ Zvolen, 129 s.
- [6] [6] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, *SYNOP* [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné z : <http://slovník.cmes.cz/fulltext/počasie>
- [7] LAW INSIDER, *Metar definition*. [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné z : <https://www.lawinsider.com/dictionary/metar>
- [8] ICAO, 2016. *European guidance material on all weather operations at aerodromes*. 5th edition, European and North Atlantic Office, 2016. 84 s.
- [9] POLČÁK, N., BOCHNÍČEK, O. 2008: *GEOGRAFICKÁ REVUE, Vplyv geografických faktorov na veterné pomery Horehronia*. Geografická revue, roč. 4, 364-374.
- [10] METEOROLÓGIA EN ČERVENÁ. *Čo je turbulencia* [online]. [cit.2023-03-25]. Dostupné z : <https://www.meteorologiaenred.com/sk/que-son-las-turbulencias.html>
- [11] BISÁK, O. *Vývoj vrtulníkov (helikoptér) od roku 1918*. [online]. [cit.2023-02-20]. Dostupné z : <https://www.zones.sk/materialy/fyzika/vyvoj-vrtulnikov-od-roku-1918-21089.pdf>
- [12] [VRTULNIK.CZ. Augusta 109. [online]. [cit.2023-02-20]. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/a109.htm>
- [13] 13] AIR TRANSPORT EUROPE spol.s.r.o. *Flotila VZZS* [online]. [cit.2023-03-25]. Dostupné z : <https://www.ate.sk/sk/vzss/flotila/>
- [14] ZDRAVOTNÁ DOPRAVA s.r.o. *Zdravotná doprava-preprava pacientov* [online]. [cit.2023-03-25]. Dostupné z : <http://www.zdravotnadoprava.sk>



## OPTIMIZATION DESIGN OF FLIGHT TRAINING REGARDING COCKPIT EQUIPMENT

**Andrej Timotej Senaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**František Jůn**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*The technological progress and development of aircraft, flight instruments and aircraft cockpit equipment over the past 60 years has been enormous, which has been shown in the equipment and construction of aircraft. The flight syllabus, according to which the training for future aircraft pilots was compiled, had to be updated over time due to the safety and fluency of the training program. This bachelor's thesis will be focused on the design and optimization of flight training with regard to aircraft cockpit equipment, where we will deal with the implementation of aircraft with digital cockpit equipment. Nowadays, we encounter aircraft in training that are from different periods and their cockpit equipment often consists of analog instruments. Over the years, flight schools began to reach for more modern aircraft, which represent a significant saving on fuel and more modern aircraft equipment. The risk when training pilots on airplanes with analog and digital instruments is that a pilot who is not sufficiently trained and does not understand the distribution of information on digital instruments may evaluate the situation incorrectly and consequently a dangerous situation may occur. This work will therefore be the design of a training curriculum to prevent such situations.*

### Keywords

*flight instruments, flight training, safety, cockpit equipment*

### 1. ÚVOD

Letecký výcvik predstavuje pre mnohých ľudí pomyselnú vstupnú bránu do sveta lietania. Letectvo ako také a letecká doprava je považovaná za najbezpečnejšiu formu dopravy po svete vďaka kvalitným výcvikom pilotov a implementovaniu bezpečnostných opatrení, ktoré boli ako forma ponaučenia z predošlých chýb ľudí. Odvetvie leteckých výcvikov a leteckých škôl je značne regulovaný autoritami daného štátu a poprípade členskej organizácie, ktorej je daný štát členom. Tieto regulácie, ktoré vzišli vďaka mnohým leteckým nehodám, ktoré slúžili ako príklad na vyhnutie sa chybám spôsobeným pri lete. Modernizácia lietadiel a lietadlových flotíl leteckých škôl predstavuje isté riziko pri bezpečnom vykonaní letu. Týmto rizikom je prechod študentov a inštruktorov zo zastaralejších lietadiel na moderné letúne a naopak. Nové moderné lietadlá disponujú novodobým zostaveným kokpitom, ktorý je v značnej časti zložený z moderných displejov a systémov. Rozmiestnenie analógových prístrojov v bežnom kokpite je v tvare písmena T, a pozostáva z prístrojov ako sú : Umelý horizont, Výškomer, Rýchlomer a smerový zotrvačník. Toto rozloženie prístrojov bolo unifikované v priebehu druhej svetovej vojny kedy sa začalo v letectve zaoberať zjednodušovaním kokpitu lietadiel. Pri digitálnych prístrojoch je rozloženie týchto informácií rovnaké, kde sa v strede displeja nachádza umelý horizont, vľavo výškomer vo forme stĺpca, vpravo rýchlomer rovnako vo forme stĺpca a v dolnej časti obrazovky je situovaný smerový zotrvačník. Výhoda analógových prístrojov je na jednej strane ich lacnejšia nákupná cena a na druhej strane ich spoľahlivosť, ktorá pozostáva v ich napájaní vzduchom, ktorý prúdi okolo lietadla alebo poprípade vákuovou pumpou. Pri digitálnych letových prístrojoch už ide o pomerne väčšiu zaobstarávanú cenu a rovnako napájanie týchto systémov je elektrické, ktoré nemusí byť vždy tak spoľahlivé ako pri konvenčných prístrojoch. Pilot v kokpite za letu by mal byť schopný udržovať situačné povedomie kedy je schopný spracovávať informácie získané z

prístrojov. K téme situačného povedomia patrí aj forma takzvaného skenovania palubnej dosky a prístrojov, ktorá rázne vplyva na celkovú bezpečnosť vykonania letu.

### 2. ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

*„Najdôležitejšou úlohou odbornej prípravy v komerčnom letectve od 80. rokov minulého storočia je odborná príprava pilotov prechádzajúcich z tradičnej pilotnej kabíny na modernú počítačovú pilotnú kabínu s digitálnymi prístrojmi.“ (Dekker et al., 2018)*

Prechod pilotov z analógových prístrojov na digitálne moderné prístroje je výzva pre mnohé školiace strediská, ktoré sa venujú výcviku pilotov. [1] Prechodné obdobia spôsobili neočakávané situácie a reakcie, ktoré niekedy viedli k nehodám, a leteckému priemyslu dokázali, že takýto technologický posun sa v pilotnej kabíne mení a nemôže sa považovať za samostatný predmet alebo doplnok k existujúcej odbornej príprave. Hoci letecký priemysel investoval do zvýšenia účinnosti výcviku pre moderný kokpit, výcvik nových pilotov na udeľovanie licencií sa nezmenil rovnakým tempom. K prechodu na moderné pilotné prostredie často dochádza neskoro pri výcviku nového pilota, zvyčajne súčasne s tým, ako sa pilot zavádza na viacčlenné lety a lety lietadlovou dopravou. Vyhnúť sa problémom alebo ich zmierniť s týmto prechodom odporúča, aby sa vzdelávanie modernej digitálnej kabíny zaviedlo v počiatočných štádiách prípravy pilotov pri začiatkovom letovom výcviku. [2,3] Z dôvodu obmedzeného financovania na univerzitnom alebo súkromnom letovom výcviku to bolo často ťažké, čo malo za následok veľké rozdiely v tom, ako dobre boli pripravení noví piloti na vstup do modernej pilotnej kabíny.[4] Príchod modernej technológie pilotnej kabíny v kategórii ľahkých lietadiel všeobecného letectva, ktorý sa zaznamenal v poslednom desaťročí, poskytol príležitosť zaviesť od začiatku moderné prostredie pilotnej kabíny k predletovej odbornej príprave. Tieto lietadlá, známe



ako technicky pokročilé lietadlá alebo technologicky vyspelé letúny, sú vybavené väčšinou podobnými technológiami, aké sa nachádzajú vo veľkých dopravných lietadlách, s výnimkou systému riadenia letu. Podľa Federálneho leteckého úradu, Technologicky vyspelé lietadlo je lietadlo, v ktorom pilot komunikuje s jedným alebo viacerými počítačmi s cieľom letieť, navigovať alebo komunikovať.

### 2.1. Základné vybavenie kokpitu lietadiel

Letové prístroje sú prístroje v pilotnej kabíne lietadla, ktoré poskytujú pilotovi údaje o letovej situácii tohoto lietadla, ako sú nadmorská výška, rýchlosť letu, vertikálna rýchlosť, kurz a oveľa viac kľúčových informácií počas letu. Pravidlá vizuálneho letu (VFR) si vyžadujú indikátor rýchlosti, výškomer a kompas alebo iný vhodný magnetický smerový zotrvačník. Pravidlá letu podľa prístrojov (IFR) okrem toho vyžadujú gyroskopický náklon (umelý horizont), smer (smerový zotrvačník) a indikátor rýchlosti otáčania, ako aj indikátor sklzu, nastaviteľný výškomer a hodiny. Let do meteorologických podmienok prístrojov (IMC) vyžaduje rádiové navigačné prístroje na presné vzlety a pristátia

## 2.2. Systémy technologicky vyspelých letúnov

### 2.2.1. Systém syntetického videnia (SVS)

„Systémy syntetického videnia sa začali objavovať v letectve začiatkom roku 2000 kedy sa americkej firme Chelton Flight Systems podarilo certifikovať revolučný systém elektronických letových prístrojov Flight Logic, ktoré ako prvé nahradili rovnú čiaru umelého horizontu syntetickým zobrazením okolitého terénu.“ (Lubomír Čornák, 2016)



Obrázok 1 - Systém rozšíreného videnia – Honeywell [5].

Systém syntetického videnia (SVS) je umelé zobrazenie vonkajšieho terénu na primárnom letovom displeji pilota, ktoré pripomína pohľad z čelného skla kabíny. Toto zobrazenie je vytvorené synteticky pomocou počítača na základe GPS polohy kurzu a výšky lietadla za pomoci svetovej databázy terénu. Vďaka tomuto systému má pilot aj za zhoršených meteorologických podmienok stály prehľad v okolí lietadla a tak môže včas zamedziť nebezpečnému stretu s terénom.

### 2.2.2. Systém rozšíreného videnia

„Systémy syntetického videnia sa začali objavovať v letectve začiatkom roku 2000 kedy sa americkej firme Chelton Flight Systems podarilo certifikovať revolučný systém elektronických letových prístrojov Flight Logic, ktoré ako prvé nahradili rovnú čiaru umelého horizontu syntetickým zobrazením okolitého terénu.“ (Lubomír Čornák, 2016)



Obrázok 2 - Systém rozšíreného videnia – Rockwell Collins [6]

Systém rozšíreného videnia je spojený so systémom syntetického videnia, ktorý zahŕňa informácie zo senzorov lietadiel (napr. infračervené kamery, milimetrový vlnový radar) s cieľom poskytovať výhľad v obmedzenom prostredí viditeľnosti. Systémy nočného videnia sú pilotom vojenských lietadiel k dispozícii už mnoho rokov. Obchodné lietadlá nedávno pridali podobné schopnosti k lietadlám s cieľom zvýšiť informovanosť pilotov o situácii v slabej viditeľnosti v dôsledku počasia alebo oparu a v noci. Prvé civilné osvedčenie systému so zvýšeným výhľadom na lietadle bolo iniciované spoločnosťou Gulfstream Aerospace pomocou infračervenej kamery. Pôvodne ponúknutý ako voľba na lietadlo Gulfstream V, bol vyrobený ako štandardné zariadenie v roku 2003, keď bol zavedený Gulfstream G550 a nasledoval ho na Gulfstream G450 a Gulfstream G650. V dnešnej dobe je už takéto systémy vidieť aj vo všeobecnom letectve napríklad u výrobcu Cirrus SR22. [7]

## 3. VPLYV ROZDIELNEHO VYBAVENIA KOKPITU NA BEZPEČNOSŤ LETU

Zo štúdií údajov o nehodách lietadiel a ich činnosti vyplynulo, že počas štúdie došlo k poklesu celkovej miery nehôd, ale k zvýšeniu miery nehôd so smrteľným následkom pre vybranú skupinu lietadiel z digitálnym kokpitom v porovnaní s podobnými konvenčne vybavenými lietadlami. Celkovo analýzy štúdií nepreukázali významné zlepšenie bezpečnosti pre študijnú skupinu digitálnych kokpitov. Piloti musia byť schopní preukázať minimálne vedomosti o primárnych letových prístrojoch a displejoch lietadla, aby boli pripravení na bezpečnú prevádzku lietadiel vybavených týmito systémami, čo je potrebné pre všetky lietadlá, ale v súčasnosti nie je predmetom znalostných testov pre digitálne prístroje kokpitu. Niektoré digitálne prístroje obsahujú záznamové schopnosti, ktoré významne pomohli pri vyšetrowaní nehôd a umožnili všeobecnému leteckému spoločenstvu zlepšiť spoľahlivosť

vybavenia, bezpečnosti a účinnosti prevádzky lietadiel prostredníctvom analýz údajov. [8]

Pokiaľ ide o štúdie týkajúce sa otázky prechodu, väčšina publikácií naznačuje pokles výkonnosti pilotov. Najnovší komplexný výskum v tejto oblasti teda skúmal 20 účastníkov rozdelených do dvoch skupín, ktorí prešli z analógovej kabíny na digitálny dizajn kokpitu.[9] Táto štúdia skúmala výkonnosti pilotov, ktorý prechádzali z analógových prístrojov na digitálne, kde pozorovali variabilitu srdcovej frekvencie ako ich záťaž a stres, ktorý na nich vplýval pri týchto činnostiach. Okrem toho sa časť zberu údajov uskutočnila na skutočných lietadlách, čím sa prispelo k dôveryhodnosti a uplatniteľnosti výskumu. Analýza potvrdila, že prechod medzi ergonómiou analógového a digitálneho kokpitu je potenciálnym faktorom spôsobujúcim stres a zhoršujúci výkonnosť. Podľa publikácie však zvýšenie stresu nemusí nevyhnutne viesť k zhoršovaniu presnosti pilotáže. Okrem toho sa zistilo, že pracovné zaťaženie neboli ovplyvnené letovými údajmi, ktoré sa v rámci výskumu zmenili napriek očakávaniam autorov. Predpokladá sa, že primeraná prechodná odborná príprava by mohla zmierniť pokles výkonnosti spojený s prechodom. Tieto závery sú vo všeobecnosti v súlade so zisteniami predchádzajúcich štúdií. V publikácii Technickej univerzity v Košiciach sa tak uznal negatívny vplyv prechodu na pilotnú kabínu a potenciál osobitného vzdelávania na jeho zníženie.

### 3.1. Stratégie vizuálneho skenovania v kokpite lietala

Počas letu musia piloti dôkladne monitorovať svoje letové prístroje, pretože je to jedno z kritérií, ktoré prispieva k aktualizácii ich situačného povedomia. Monitorovanie je kognitívne náročné, ale je potrebné pre včasný zásah v prípade odchýlky parametrov. [9] Mnohé štúdie ukázali, že veľká časť nehôd v komerčnom letectve sa týkala slabého monitorovania pilotnej kabíny zo strany posádky. Výskum zameraný na sledovanie očí vyvinul mnohé metriky na preskúmanie vizuálnych stratégií v oblastiach, ako sú šport, šach, čítanie, letectvo. Do experimentu bola zapojená skupina šestnástich kvalifikovaných profesionálnych pilotov a skupina šestnástich nováčikov počas manuálneho pristátia v letovom simulátore. Obidve skupiny pristáli trikrát s rôznymi úrovňami ťažkostí. Počas letu museli piloti aktualizovať svoje situačné povedomie, aby si udržali bezpečnostné limity letu. Letová posádka nemôže aktualizovať svoje situačné povedomie bez monitorovania špecifických prístrojov letu (napr. indikátora polohy, rýchlosti, výškomeru, parametrov motora) a vonkajšieho prostredia. Monitorovacia činnosť, ktorá je mimoriadne dôležitá počas dynamických letových fáz, ako je vzlet a pristátie, zahŕňa pozorovanie a interpretáciu údajov o dráhe letu, stave konfigurácie lietadla, automatizačných režimov a palubných systémov. Predpokladá sa v reálnom čase porovnanie údajov z prístrojov alebo režimov systému s očakávanými hodnotami podľa súčasnej letovej fázy. Prísne monitorovanie pilotnej kabíny umožňuje včasné nápravné opatrenia v prípade odchýlky parametrov, čím sa zabezpečí optimálna úroveň bezpečnosti. Táto monitorovacia činnosť je štruktúrovaná podľa sekvencií presunov pozornosti z nástroja na iný nástroj. [10]

### 3.2. Situačné povedomie (SA)

Povedomie o situácii (SA) je kľúčovým pojmom v zložitých prevádzkových prostrediach, ako je letectvo, kde sa vzťahuje na

znalosti jednotlivca a pochopenie relevantných udalostí a javov súvisiacich s jeho úlohami. Vzhľadom na to, že digitálne vybavený kokpit dokáže rozšíriť situačné povedomie pilota viac ako analógový kokpit, pretože dokáže poskytovať väčšie množstvo informácií ako konvenčné prístroje. Situačné povedomie zahŕňa uvedomenie si súčasného stavu a dynamiky systému, ako aj schopnosť predvídať budúce zmeny a vývoj. V kontexte letectva je situačné povedomie životne dôležité pre pilotov, riadiacich letovej prevádzky a iných leteckých zamestnancov, aby mohli efektívne riadiť a zmiernovať riziká, prijímať informované rozhodnutia a zabezpečovať bezpečnú a efektívnu prevádzku. Vzhľadom na to, že digitálne vybavený kokpit dokáže rozšíriť situačné povedomie pilota viac ako analógový kokpit. [11]

Pre pilota situačné povedomie znamená mať komplexné pochopenie rôznych aspektov, ako je stav vlastného lietadla, poloha a zámery iných lietadiel vo vzdušnom priestore, poveternostné podmienky, navigačné informácie a potenciálne hrozby alebo nebezpečenstvá. To zahŕňa monitorovanie a interpretáciu nástrojov, komunikáciu s riadiacimi letovej prevádzky, hodnotenie rizík a predvídanie zmien v prostredí s cieľom prijímať informované rozhodnutia počas rôznych fáz letu vrátane vzletu, na trati, priblíženia a pristátia.

## 4. CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Neustále vyvíjajúci sa sektor civilného letectva a vývoj nových lietadiel, vplyva na výcvik nových pilotov hlavne technológiou a vybavením kokpitu lietadiel na ktoré je potrebná dôkladná teoretická a praktická príprava. Sektor výcvikových programov začínajúcich pilotov preto rovnako potrebuje neustále aktualizovať svoje letové a teoretické osnovy aby boli schopné aby boli schopné pokrývať potrebné časti leteckého výcviku. Preto táto bakalárska práca bude zameraná optimalizáciou leteckého výcviku, ktorý je vykonávaný na lietadlách s rôznym vybavením kokpitu. Ako hlavný cieľ tejto práce bolo stanovené vytvoriť optimalizovanie využitia lietadiel a ich vybavenia kokpitu vzhľadom na ich použitie vo výcviku. Teda lietadlá, ktoré disponujú modernejším vybavením boli využívané rovnako ako lietadlá s vybavením analógovým.

Hlavné ciele :

- Vytvorenie návrhov optimalizácie leteckého výcviku
- Implementácia návrhov do leteckej osnovy
- Zahnúť voľne dostupné simulátory digitálnych prístrojov do teoretickej a pozemnej prípravy pilotov
- Rozdelenie letových hodín medzi lietadlá s analógovým a digitálnym vybavením

## 5. NÁVRH OPTIMALIZÁCIE VYUŽITIA LIETADLOVEJ TECHNIKY V ZÁVISLOSTI OD VYBAVENIA COM/NAV PRI VÝCVIKU

Výcviková osnova pozostáva zo štyroch fáz, ktoré budú rozdelené na VFR časť a IFR časť výcvikového integrovaného kurzu ATPL. V priebehu výcviku si pilot bude musieť prejsť každou fázou, ktorá bude obsahovať minimálny počet odlietanych hodín a úloh. Optimalizácia bude zameraná na rozdelenie jednotlivých úloh výcviku pre lietadlá s digitálnym a analógovým vybavením. Pri každej úlohe pribudol stĺpec s názvom Analog/Digital, ktorý predstavujú typ vybavenia lietadla

akým by sa mala daná úloha odlietať. Ak sa v danom riadku nachádza A/D tak v tom prípade by sa mala daná úloha odlietať polovicu času na digitálnom vybavení a polovicu času na analógovom vybavení.

### **5.1. Porovnanie výhod a nevýhod digitálnych a analógových prístrojov**

#### **5.1.1. Digitálne letové prístroje**

Výhody :

- Vysoká presnosť a spoľahlivosť - Digitálne letové prístroje používajú elektronické snímače na meranie rôznych letových parametrov, ako sú rýchlosť letu, výška a poloha. Tieto senzory sú veľmi presné a spoľahlivé a digitálne displeje poskytujú presnejšie údaje.
- Ľahké používanie - Digitálne prístroje na let sú často navrhnuté tak, aby boli intuitívne a užívateľsky priaznivé. Digitálne displeje pilotom uľahčujú rýchle a presné čítanie a interpretáciu letových informácií.
- Pokročilé vlastnosti - mnohé digitálne prístroje na let majú pokročilé vlastnosti, ako sú výstražné systémy a automatizované riadenie letu, ktoré môžu zlepšiť bezpečnosť a účinnosť letu.

Nevýhody :

- Cena – Digitálne letecké prístroje sú často drahšie ako ich analógový konkurenti. To môže spôsobiť, že budú menej dostupné pre menšie lietadlá alebo menej financované letecké činnosti.
- Vystavenie riziku voči elektromagnetickému rušeniu – Digitálne letecké prístroje môžu byť citlivé na elektromagnetické rušenie z iných elektronických zariadení, ktoré môže spôsobiť nepresné údaje alebo poruchy.
- Závislosť na elektrickom napájaní – Digitálne letové prístroje vyžadujú na fungovanie elektrickú energiu. V prípade výpadku prúdu môže pilot stratiť prístup ku kritickým informáciám za letu.

#### **5.1.2. Analógové letové prístroje**

Výhody :

- Jednoduchosť a spoľahlivosť - Analógové prístroje sú jednoduché mechanické zariadenia, ktoré na fungovanie nevyžadujú elektrickú energiu. Často sú veľmi spoľahlivé a používali sa v letectve desaťročia.
- Nízke náklady - Analógové prístroje sú spravidla lacnejšie ako digitálne prístroje. Vďaka tomu sú prístupnejšie pre menšie lietadlá alebo letecké prevádzky s obmedzeným rozpočtom.
- Znalosť - mnohí piloti sú vyškolení v oblasti analógových prístrojov a môžu uprednostňovať ich jednoduchosť a ľahkosť používania.

Nevýhody :

- Obmedzená presnosť - Analógové prístroje sú založené na mechanických komponentoch, ktoré môžu byť opotrebované. To môže viesť k nepresnému čítaniu informácií z prístroja.
- Obmedzené vlastnosti – analógové prístroje neponúkajú pokročilé vlastnosti digitálnych prístrojov, ako sú výstražné systémy alebo automatizované riadenie letu.
- Znížená čitateľnosť - Analógové nástroje môžu byť ťažšie čitateľné ako digitálne prístroje, najmä v situáciách slabého svetla alebo nadmerne stresujúcej situácie.

### **5.2. Optimalizácia základného výcviku vo fáze č.1**

V tejto fáze výcviku sa piloti začínajú oboznamovať s teoretickou prípravou pre začatie výcviku, technikou pilotáže a základným povedomím o núdzových situáciách. Vzhľadom na štúdiu, ktorá sa zaoberala skúmaním pozornosti pilota počas letu na digitálnom vybavení kokpitu a analógovom vybavení kokpitu môžeme odporúčať začať výcvik na lietadlách s analógovými prístrojmi, keďže pri analógových prístrojoch dokázala skúmaná vzorka pilotov pomerne rýchlejšie reagovať na zmeny v riadení. Rozdelenie nalietaných hodín na digitálnych a analógových prístrojoch by tvorilo aspoň 50% odlietaných na jednom type prístrojového vybavenia a naopak. Rovnako výhodou tohoto delenia je aj v tom, že v momentálnej chvíli prebieha základný výcvik LVVC na letúnoch type Zlín Z-142, Zlín Z-2421 a VIPER SD4. Lietadlá Viper SD4 disponujú síce digitálnym kokpitom, no je možnosť simulácie analógových prístrojov. Touto funkciou teda dosiahneme to, že piloti nebudú musieť byť preškolení na nový typ lietadla, ktorý by bol v tejto fáze pre nich zbytočne stresujúci a znižoval by ich výkonnosť. Teda odporúčame využiť možnosť simulácie analógových prístrojov u tohoto typu lietadla. Študenti by mali rovnako využívať dostupné príručky k daným prístrojom pre ich oboznámenia sa s funkciami, ktoré tieto prístroje ponúkajú.

### **5.3. Odporúčania pre optimalizáciu optimalizácie**

- Zahrnúť prvky výcviku týkajúce sa elektronických primárnych letových displejov do svojich počítačových a opakovaných požiadaviek na letovú spôsobilosť pre pilotov, ktoré riešia zmeny v konštrukcii a prevádzke zariadení takýchto displejov.
- Zahrnúť prvky odbornej prípravy týkajúce sa elektronických primárnych letových displejov do svojich výcvikových materiálov a požiadaviek na letecké vedomosti pre všetkých pilotov.
- Vykonať skúšky vedomostí pilotov tak, aby zahŕňali otázky týkajúce sa elektronických letových a navigačných displejov vrátane bežnej prevádzky, obmedzení a interpretácie chybných funkcií a postojov lietadiel.
- Vypracovať a uverejniť návod na používanie elektronických leteckých simulátorov a procesných inštruktorov špecifických pre dané zariadenie, ktoré nespĺňajú definíciu výcvikových zariadení na simuláciu letu.

- Využívať možnosť aplikácie Garmin Trainer pri prechode študentov z analógových prístrojov na digitálne prístroje a doplniť ich k pozemnej príprave študentov
- Vykonávanie výcviku zjednotiť tak aby študenti absolvovali približne 50% odlietaných na analógovom vybavení kokpitu a 50% odlietaných hodín na digitálnej forme kokpitu

## 6. ZÁVER

Zo štúdií údajov o nehodách lietadiel a ich činnosti vyplynulo, že došlo k poklesu celkovej miery nehôd, ale k zvýšeniu miery nehôd so smrteľným následkom pre vybranú skupinu lietadiel z digitálneho kokpitu v porovnaní s podobnými konvenčne vybavenými lietadlami. Piloti musia byť schopní preukázať minimálne vedomosti o primárnych letových prístrojoch a displejoch lietadla, aby boli pripravení na bezpečnú prevádzku lietadiel vybavených týmito systémami, čo je potrebné pre všetky lietadlá, ale v súčasnosti nie je predmetom znalostných testov pre digitálne prístroje kokpitu. Niektoré digitálne prístroje obsahujú záznamové schopnosti, ktoré významne pomohli pri vyšetrení nehôd a umožnili všeobecnému leteckému spoločenstvu zlepšiť spoľahlivosť vybavenia, bezpečnosť a účinnosť prevádzky lietadiel prostredníctvom analýz údajov. Pri leteckom výcviku by mala byť prioritou vykonania výcviku bezpečnosť a efektívnosť využitia vedomostí v praxi a za letu. Moderný vývoj lietadlových kokpitov aký sme zaznamenali za posledné roky dokázal v značnej kladnej miere ovplyvniť bezpečnosť letectva. No to, že pilot letí v modernom vybavenom lietadle nemusí automaticky znamenať, že tento let prebehne v poriadku. Každý pilot by mal vedieť čo za funkcie má jednotlivé vybavenie kokpitu aby ho dokázal využiť na plno a tak neustále počas letu budovať a aktualizovať svoje situačné povedomie. Odporúčaniami pre danú problematiku bude odlietanie 50% letových hodín na konvenčných prístrojoch a 50% na digitálnych prístrojoch. Toto odporúčanie je možné zdôvodniť na základe pokladaných požiadavkách na pilotov, ktorí by mali byť flexibilní a znalí v každom smere jeho povolania. Smerovanie leteckej dopravy a jej automatizácia je dnes prioritou každej leteckej spoločnosti. No takáto automatizácia nemusí vždy priniesť iba dobré výsledky. V posledných rokoch bolo možné pozorovať nehody Boeingu 737 MAX, ktorý mal problém s počítačovým softvérom MCAS, ktorý počas letu v hladine zahájil strmhlavé klesanie k zemi. Ak by posádka týchto letúnov bola dostatočne preškolená na tento typ systémov dalo by sa týmto nehodám jednoducho predísť. Preto je potreba aby sa každý letecký výcvik vykonával v plnom rozsahu a s dostatočnou teoretickou prípravou pilotov.

## Referencie

- [1] Nähler, Dahlstrom, Dekker 2006. Introduction of Technically Advanced Aircraft in Ab-Initio Flight Training [online] Dostupné na : [https://www.researchgate.net/publication/259997655\\_Introduction\\_of\\_Technically\\_Advanced\\_Aircraft\\_in\\_Ab-Initio\\_Flight\\_Training](https://www.researchgate.net/publication/259997655_Introduction_of_Technically_Advanced_Aircraft_in_Ab-Initio_Flight_Training)
- [2] S. Cassner 2003. Teaching Cockpit Automation in the Classroom [online] Dostupné na: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040031743/downloads/20040031743.pdf>
- [3] S. Cassner 2003. Learning About Cockpit Automation: From Piston Trainer to Jet Transport [online] mDostupné na : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030053042/downloads/20030053042.pdf?attachment=true>
- [4] Whitehurst, G., & Rantz, W. (2011). Transitioning from Digital to Analog Instrumentation. 16th International Symposium on Aviation Psychology [online] Dostupné na : [https://coresholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=isap\\_2011](https://coresholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=isap_2011)
- [5] Obrázok 1 - Systém syntetického videnia – Honeywell [online] Dostupné na : [https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2017/01/Honeywell-32528AKM\\_SyntheticVisionSystem\\_824x618-588x441.png](https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2017/01/Honeywell-32528AKM_SyntheticVisionSystem_824x618-588x441.png)
- [6] Obrázok 9 - Systém rozšíreného videnia Rockwell Collins [online] Dostupné na : <https://mms.businesswire.com/media/20131011005593/en/387004/4/EVS-3000.jpg?download=1>
- [7] Čornák, Lubomír. 2016. Systémy rozšíreného vidění, In: Flying Revue. 2018, č.07,s. 44-48. ISSN 1802-9027
- [8] National Transportation Safety Board, 2010. Introduction of Glass Cockpit Avionics into Light Aircraft [online] Dostupné na : <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Documents/SS1001.pdf>
- [9] V. Socha et al, 2020. Pilots' Performance and Workload Assessment: Transition from Analogue to Glass-Cockpit [online] Dostupné na : <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5211>
- [10] C. Lounis et al, 2020. Visual scanning strategies in the cockpit are modulated by pilots' expertise: A flight simulator study. [online] Dostupné na : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0247061>
- [11] EUROCONTROL, 2003. The Development of Situation Awareness Measures in ATM Systems. [online] Dostupné na: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5558.pdf>



## PUBLIC SUPPORT OF REGIONAL AIRPORTS IN EUROPEAN COUNTRIES

Filip Koreník  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

Tatiana Remencová  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*Nowadays, regional airports play several important roles. Their main benefit is the positive impact on the economy in many regions, and they also help to relieve the dense and congested air network in several European countries. However, one of the problems with regional airports is that they are not able to generate a profit. This problem is increasingly becoming a trend. The European Union try to provide public support and state aid to this type of airport, but in spite of this fact, their economic situation is not improving. This article is focused on the issue of providing public support and state aid to regional airports. One of the goals is to clarify in what form public support can be granted, for what purpose, who can grant it and also how much it can be granted. Another objective is to analyse and compare the provision of public support to regional airports in different countries before, during and after the COVID-19 pandemic. Based on the findings, there were evaluated the effectiveness of public support provision in terms of whether the amount of public support provided was sufficient for airports. The final section suggests options for the future direction of regional airports, taking into account current market conditions.*

### Keywords

*public support. state aid. regional airports. public funds introduction*

### 1. ÚVOD

Verejná podpora v oblasti dopravy ako takej je veľmi dôležitým, často spomínaným a v rôznych štúdiách a diskusiách riešeným pojmom. Veľmi často sa tento pojem vyskytuje aj v prepojení s odvetvím leteckej dopravy a vo viacerých prípadoch je spomínaná aj pri samotnom poskytovaní všetkým letiskám a najmä letiskám, ktoré sú klasifikované ako regionálne. Práve na poskytovanie verejnej podpory, alebo inak aj štátnej pomoci pre regionálne letiská v Slovenskej republike ale aj v celej Európe by sa malo dbať čoraz viac. Najmä z toho dôvodu, že viaceré veľké medzinárodné letiská začínajú mať v dnešnej dobe problémy s odbavovaním svojich pasažierov. Najmä z dôvodu nedostatku kapacity. Tak isto začínajú byť preťažované viaceré medzinárodné letové trasy v celej Európe. A práve podpora vo forme štátnej pomoci regionálnym letiskám v krajinách Európy vo veľkej miere pomáha ich rozvoju a tým pádom spomínané regionálne letiská odľahčujú preťažované medzinárodné letové trasy a rovnako aj preplnené veľké medzinárodné letiská, ktoré v častých prípadoch majú problém s kapacitami.

Cieľom tohto článku je charakterizovať a analyzovať poskytovanie verejnej podpory regionálnym letiskám v Slovenskej republike a rovnako aj vo viacerých krajinách Európy. Zároveň objasnenie súčasného stavu regionálnych letísk na Slovensku a v zahraničí, analýza legislatívy, ktorá hovorí o poskytovaní verejnej podpory a štátnej pomoci regionálnym letiskám v krajinách Európy a v neposlednom rade vplyv pandémie COVID-19 na fungovanie regionálnych letísk. Všetko pomocou metódy skúmania a porovnávania viacerých vybraných zahraničných a slovenských štúdií, ktoré riešia problematiku poskytovania verejnej podpory regionálnym letiskám v krajinách Európy.

Tento článok je zložený z viacerých častí. V prvej časti článku sa zameriavame na definovanie niekoľkých základných pojmov, ktoré sa v článku vyskytujú. Sú to pojmy ako verejná podpora, štátna pomoc a jej formy, verejné prostriedky a v neposlednom rade pojem regionálne letisko. V ďalšej časti je rozobratý súčasný stav regionálnych letísk na Slovensku a v zahraničí a vplyv pandémie COVID-19 v celkovom ponímaní na odvetvie leteckej dopravy a tak isto aj na jej dopade na fungovanie regionálnych letísk vo viacerých európskych krajinách. Poslednou časťou článku sú výsledky a zhodnotenie.

### 2. ZÁKLADNÉ POJMY

#### 2.1. Regionálne letiská

V súčasnosti zohrávajú regionálne letiská nenahraditeľnú úlohu vo viacerých krajinách naprieč celým svetom a sú neoddeliteľnou súčasťou dopravnej infraštruktúry v celej Európe. Tento článok je zameraný práve na regionálne letiská a poskytovanie verejnej podpory tomuto typu letísk, preto je veľmi dôležitá definícia regionálneho letiska. Pri definovaní tohto pojmu sa stretávame s viacerými rozličnými kritériami, podľa ktorých môžeme tento pojem definovať. Podľa Nariadenia komisie (EÚ) 2017/1084 zo 14. júna 2017, ktorým sa mení nariadenie (EÚ) č. 651/2014, pokiaľ ide o pomoc na prístavnú a letiskovú infraštruktúru, je regionálne letisko definované na základe kritéria, ktorým je počet cestujúcich, ktorí sú prepravený v jednom kalendárnom roku. Pričom tento počet nesmie presahovať 3 milióny cestujúcich [1].

Ďalej podľa informácií, ktoré publikovalo Medzinárodné združenie letísk Európy (ACI Europe) vyplýva definícia, ktorá hovorí o tom, že regionálne letisko je letisko, ktoré je určené a má za úlohu slúžiť pre obsluhu trás krátkeho a stredného dosahu. Zároveň je určené aj na obsluhu tzv. point-to-point

destinations (destinácie z bodu do bodu). V Európe sa takýchto letísk nachádza takmer 500 [2].

Do konca 90. rokov 20. storočia boli regionálne letiská „zatienené“ veľkými medzinárodnými letiskami a nezohrávali v letectve príliš dôležitú úlohu. Z väčšej časti bolo ich úlohou len poskytovanie služieb práve väčším medzinárodným letiskám. Vo väčšine prípadov sa jednalo o nasledovné druhy služieb:

- slúžili ako prestupové letiská, najmä kvôli odľahčovaniu zaťažených veľkých medzinárodných letísk, na ktorých sa vykonávalo príliš veľké množstvo pohybov lietadiel,
- využitie pre poskytovanie chartrových (dovolenkových) letov,
- využitie pre cargo (nákladnú) dopravu,
- využitie pre odlety a prílety malých obchodných alebo športových lietadiel.

V dnešnej dobe zohrávajú regionálne letiská množstvo dôležitých úloh. Nie sú to už len základné pohyby ako sú odlety alebo prílety, ktoré sú vykonávané na týchto letiskách. Nie je to ani ten faktor, že regionálne letiská slúžia na uľahčovanie prístupu do rôznych regiónov alebo vzdialených častí krajín, kde by pozemný presun trval niekoľkonásobne dlhšie a bolo by ho ťažké zabezpečiť pre veľké množstvo cestujúcich. V dnešnej dobe je hlavným prínosom regionálnych letísk práve to, že majú veľmi priaznivý dopad na ekonomiku vo veľkom množstve regiónov a rovnako pomáhajú aj pri odľahčovaní veľmi hustej a preťaženej leteckej siete vo viacerých Európskych krajinách. Čiže z tohto vyplýva, že v dnešnej dobe sú regionálne letiská neoddeliteľnou súčasťou dopravnej infraštruktúry vo všetkých krajinách Európy.

Keď už máme pojem regionálne letisko viacerými definíciami pomenovaný, tak ďalej považujeme za vhodné popísať aj vlastnosti, funkcie, využitie a význam tohto typu letísk. Regionálne letiská sú základnými a veľmi dôležitými dopravnými uzlami, ktoré majú viacero dôležitých úloh a funkcií. Nie len to, že predovšetkým zabezpečujú plynulý chod jednotného európskeho trhu, tým, že spájajú ľudí, výrobky a služby. Taktiež umožňujú hospodársku činnosť a vysoký ekonomický rast v mnohých regiónoch Európy. Ďalej rozširujú obzor tradičných medzinárodných obchodných ciest a rovnako významne aj podporujú všetky mestá a regióny, ktorým tieto letiská slúžia, pretože vysoko zvyšujú ich dostupnosť. A v neposlednom rade posilňujú ich sociálnu súdržnosť a zabezpečujú ich rozvoj. Táto hustá sieť takmer 500 letísk je jedným z hlavných prvkov podpory efektívnej a dobre fungujúcej európskej dopravnej siete, ktorá uľahčuje medzinárodný obchod a v neposlednom rade, vďaka ktorej je zabezpečená mobilita pre obrovský počet ľudí. Všetky tieto výhody zabezpečuje spôsobom, ktorý je jednoducho bezkonkurenčný pre akýkoľvek druh dopravy. Tieto letiská zabezpečujú taktiež aj dostupnosť v najodľahlejších oblastiach Európy, a tým umožňujú každej regionálnej komunite spojenie so zvyškom sveta. Hlavný význam táto funkcia zohráva pri spájaní malých odľahlých ostrovov s pevninou. Či už sa to týka prepravy ľudí alebo aj nákladnej leteckej dopravy [3].

## 2.2. Verejná podpora

Verejná podpora je veľmi dôležitým pojmom v spojení s odvetvím leteckej dopravy a teda aj v spojení s regionálnymi letiskami, či už na území Slovenska alebo v mnohých európskych krajinách. Verejná podpora sa vzťahuje na finančnú alebo nefinančnú pomoc, ktorú vláda alebo verejné inštitúcie poskytujú jednotlivcom alebo rôznym organizáciám na dosiahnutie konkrétnych cieľov. Verejná podpora je v Európskej únii vo všeobecnosti zakázaná. Avšak boli definované určité výnimky, ktoré povoľujú jej legálne poskytovanie. Medzi tieto výnimky patria napríklad:

- regionálne podpory,
- vyrovnávacie platby za výkon verejnej služby [4].

Verejná podpora môže mať viaceré formy, v ktorých môže byť za splnených podmienok poskytovaná konkrétnym osobám alebo organizáciám, pričom niektoré z foriem sú:

- granty
- pôžičky
- rôzne dotácie alebo priame investície.

Cieľom verejnej podpory je často stimulovať hospodársky rast, podporovať sociálny blahobyt alebo presadzovať konkrétny politický cieľ, ako je napríklad enviromentálna udržateľnosť alebo rôzne inovácie. Rovnako môže byť verejná podpora zameraná aj na riešenie zlyhaní trhu alebo na nápravu nerovnosti, napríklad poskytovanie pomoci znevýhodneným komunitám, priemyselným odvetviam alebo rôznym organizáciám, ktoré majú problémy konkurovať na globálnom trhu. Práve toto platí aj v prípade poskytovania verejnej podpory pre regionálne letiská, ktoré vo väčšine prípadov nedokážu generovať zisk [5].

## 2.3. Štátna pomoc

Štátna pomoc je synonymom verejnej podpory. Rovnako ako pojem verejná podpora, tak aj štátna pomoc je veľmi často spomínaným pojmom práve v oblasti verejnej dopravy a predovšetkým v oblasti jej poskytovania letiskám [6].

Poskytovanie štátnej pomoci v leteckej doprave má veľmi nejasnú, zdĺhavú a predovšetkým zložitú históriu a veľmi chaotický výsledok, ktorý vychádzal zo stále sa meniacich pravidiel. Pravidlá poskytovania štátnej pomoci v letectve boli prvýkrát komunikované a následne zavedené v polovici 90. rokov 20. storočia. Ich hlavným cieľom bola predovšetkým regulácia pokusov na záchranu národných dopravcov vo všetkých členských štátoch Európskej únie, ktorí sa snažili finančne prežiť na plne liberalizovanom trhu. Ustanovenia pravidiel sa prijali aj z toho dôvodu, aby sa dokázalo zabezpečiť to, že aj nerentabilné letecké služby boli privedené do menej rozvinutých a zaostalejších regiónov. Táto myšlienka bola pretláčaná najmä z toho dôvodu, aby sa aj v týchto regiónoch zabezpečili nové pracovné miesta a aby trh leteckej dopravy bol zastúpený, v čo najväčšom možnom rozsahu.

Práve poskytovanie štátnej pomoci je pre mnohé regionálne a malé letiská vo väčšine európskych krajín veľmi dôležitým a potrebným zdrojom príjmu. Už aj s tým faktorom, že mnohé letiská žiadajú a za určitých podmienok aj inkasujú štátnu

pomoc, tak veľké množstvo z týchto letísk nedokáže generovať zisk. Práve preto je väčšina týchto letísk odkázaná na prijímanie štátnej pomoci v rozličných formách [7].

#### 2.4. Verejné prostriedky

Verejné prostriedky sú jedným z veľmi dôležitých pojmov práve pri poskytovaní verejnej podpory, alebo štátnej pomoci, či už v celkovom ponímaní alebo v konkrétnych prípadoch práve regionálnym letiskám a oblastiam, kde sú regionálne letiská nevyhnutným dopravným riešením.

V prípade menších miest alebo obcí je len zriedka možné využívať nadregionálnu leteckú dopravu. Je to najmä z toho dôvodu, že v riedko osídlených a teda z toho dôvodu aj v oblastiach so slabšie vybudovanou infraštruktúrou, ako sú napríklad už vyššie spomínané ostrovné oblasti, sa nenachádzajú väčšie medzinárodné letiská. Odpoveďou daných oblastí na tento vznikajúci problém je vo väčšine prípadov rovnaký. Všetky oblasti, ktorých sa tento problém týka sa dožadujú, aby sa v ich oblasti rozšírilo a do čo najväčšej možnej miery vybudovalo práve regionálne letectvo. S dobre navrhnutou podporou môže výrazne posunúť vpred miestny rozvoj, najmä po ekonomickej stránke. Výdavky sú relatívne nízke z pohľadu možnosti prepraveného množstva pasažierov v porovnaní s alternatívnymi investíciami do cestnej infraštruktúry, ako sú napríklad mosty alebo dlhšia a rozvinutejšia sieť diaľnic, ktoré by boli využívané len malým počtom ľudí. Všetky tieto okolnosti poukazujú na potrebu hĺbkovej analýzy možnosti využitia verejných prostriedkov z pohľadu miestnych orgánov v oblasti leteckej dopravy [8].

### 3. SÚČASNÝ STAV V SLOVENSKEJ REPUBLIKE A V ZAHRANIČÍ

Letecká doprava každým rokom viac a viac vykazuje známky rastúcich trendov. Či už je to po stránke ekonomiky, tým že každým rokom narastajú finančné zisky väčšiny leteckých spoločností po celom svete alebo je to z pohľadu počtu prepravených cestujúcich, ktorý tak isto každým rokom rastie. Dokonca je predpoklad, že za pár rokov niektoré letiská nebudú stíhať odbavovať svojich cestujúcich. To je aj hlavný dôvod toho, prečo by mali byť malé a regionálne letiská podporované vo väčšej finančnej miere.

Najnovšia správa od IATA, ktorá prognózuje rast cestujúcich v leteckej doprave najbližších 20 rokov, hovorí o tom, že sa v roku 2036 očakáva 7,8 miliardy cestujúcich ktorí by mali letieť, čo predstavuje takmer dvojnásobok oproti 4 miliardám cestujúcich, ktorí mali letieť v roku 2018. Táto predpoveď je založená na predpoklade, že bude dodržaná priemerná 3,6 % zložená ročná miera rastu (CAGR) (IATA 2018) [9].

Ďalej podľa správy, ktorú vydala organizácia Eurocontrol (E-C, 2018) sa v Európe uskutoční 16,2 milióna letov. Podľa ich predpokladu sa to skutoční do roku 2040. Predstavovalo by to nárast o takmer 53% oproti roku 2017 [10].

Všetky tieto publikované štatistiky a dlhodobé predpoklady poukazujú na to, akú obrovskú dôležitosť zohrávajú práve aj regionálne letiská, ktoré vo veľkej miere pomáhajú odľahčovať preťaženie veľkých letísk v celej Európe, ktoré nastáva práve vďaka stúpajúcemu záujmu o leteckú dopravu. Je to potvrdené aj v správe od organizácie Eurocontrol. Táto správa hovorí o

tom, že práve malé a regionálne letiská zaobstarávajú okolo 50% dopravy celej leteckej siete v krajinách Európy [11].

### 4. VPLYV PANDÉMIE COVID-19 NA ODVETVIE LETECKEJ DOPRAVY A NA REGIONÁLNE LETISKÁ

Pandémia COVID-19 mala obrovský a veľmi významný vplyv na odvetvie leteckej dopravy ako takej. Vlády po celom svete zaviedli množstvo opatrení, ako sú napríklad rôzne cestovné obmedzenia a uzatvorenia viacerých hraníc. Tieto opatrenia boli zavedené najmä preto, aby sa čo najlepším a najefektívnejším spôsobom kontrolovalo šírenie vírusu, čo viedlo k výraznému poklesu dopytu po leteckej doprave.

Vplyv pandémie COVID-19 na odvetvie leteckej dopravy mal niekoľko následkov, medzi, ktoré patrili napríklad:

- Pokles počtu cestujúcich: globálny dopyt po leteckej doprave výrazne klesol a to najmä v dôsledku viacerých cestovných obmedzení, karanténnych opatrení a predovšetkým kvôli strachu z nákazy vírusom. Medzinárodné združenie leteckých dopravcov (IATA) vo svojich správach odhadovala, že v roku 2020 sa celosvetová osobná letecká doprava v porovnaní s rokom 2019 znížila o takmer 66%.
- Finančné straty: viaceré letecké spoločnosti utrpeli v dôsledku poklesu počtu cestujúcich značné finančné straty. Opäť organizácia IATA odhadla, že straty leteckého priemyslu v roku 2020 dosiahli 126 miliárd USD. To však bol len začiatok tohto obrovského poklesu, pretože ďalšie straty sa opätovne očakávali aj v roku 2021 a tak isto aj v ďalších nasledujúcich rokoch.
- Straty pracovných miest: pokles počtu cestujúcich, ale najmä obrovské finančné straty, ktoré vykazovali takmer všetky letiská a rovnako aj letecké spoločnosti po celom svete znamenali obrovské ohrozenie pracovných miest, ktoré sú závislé na odvetví leteckej dopravy. IATA vo svojich správach odhadovala, že v dôsledku pandémie by mohlo byť po celom svete ohrozených až 44,6 milióna pracovných miest, ktoré sú závislé na leteckej doprave.
- Reštrukturalizácia a konsolidácia: niektoré letecké spoločnosti prešli reštrukturalizáciou a konsolidáciou, aby tým zmiernili dopad pandémie. Patrí sem predovšetkým znižovanie počtu leteckých liniek a vyradovanie lietadiel zo svojich flotíl.
- Zdravotné a bezpečnostné opatrenia: pandémia viedla k zavedeniu viacerých bezpečnostných opatrení zo strany leteckých spoločností a letísk. Medzi tieto opatrenia patrili napríklad zvýšená dezinfekcia a čistenie letísk alebo nosenie ochranných masiek. Aj tieto opatrenia mali vplyv na zvýšenie finančných investícií do letísk.

Podľa spomenutých správ a odhadov organizácie IATA môžeme konštatovať, že vzniknutá situácia, ktorá nastala v období pandémie bola a doposiaľ aj je naozaj vážna. A hlavne z toho dôvodu sa Európska únia generuje úsilie na pomoc pre celý sektor odvetvia leteckej dopravy. Európska komisia začala v marci roku 2020 schvaľovať niekoľko vypracovaných možností pre podporu letísk a leteckých dopravcov. Boli to schémy založené na poskytovaní štátnej pomoci. Aj po aplikovaní týchto schém a teda aj napriek poskytnutej štátnej pomoci takmer 200

letiskám v celej Európe, predovšetkým regionálnym letiskám riskuje stav platobnej neschopnosti. A mnohé z týchto letísk sa aj naďalej topia vo veľkých problémoch a ani po poskytnutej finančnej podpore nedokážu generovať žiadny zisk.

Dočasné zatvorenie alebo úplne skrachovanie týchto letísk by mal však oveľa negatívnejší vplyv na udržanie pracovných miest a rovnako aj na finančnú situáciu viacerých regiónov. Rovnako by to predstavovalo aj obrovský problém pre spájanie značného množstva regiónov v celej Európe. Hlavne tých regiónov, kde neexistuje žiadna alternatívna doprava, teda najmä spojenia medzi menšími ostrovmi a vzdialenou pevninou [12] [13] [14].

V celkovom ponímaní bol vplyv pandémie COVID-19 na odvetvie leteckého priemyslu vážny a odvetvie leteckej dopravy bolo jedným z najviac postihnutých odvetví pandemiou. Avšak najmä regionálne letiská boli tvrdo zasiahnuté pandemiou, keďže sa často spoliehajú na menšie letecké spoločnosti a tým pádom hlavne na sezónnu turistickú dopravu, ktorá bola pandemiou výrazne obmedzená a vysoko zredukovaná. Priamym dôkazom toho boli napríklad letisko Vaasa, ktoré sa nachádza na západe Fínska a dôsledkom pandémie COVID-19 zaznamenalo toto regionálne letisko pokles až 91% priamych leteckých spojení. Ďalším príkladom je Francúzske letisko Quimper, ktoré taktiež stratilo až 87% priamych leteckých spojení vplyvom pandémie. Avšak opačným smerom sa uberali regionálne letiská, ktorých hlavnými letmi boli lety, ktoré sprostredkujú nákladnú leteckú dopravu. Práve tento typ regionálnych letísk zaznamenal počas pandémie nárast odbavených nákladných letov. Priamym dôkazom bolo letisko v Belgickom meste Liège, ktoré počas pandémie zaznamenalo rast nákladných letov o 10,7% [15].

Rovnako ako pri dopade na celkové odvetvie leteckej dopravy mala pandémia vplyv aj na regionálne letiská vo viacerých smeroch, pričom niektoré z nich sú:

- **Zatvorenie letísk:** Niektoré regionálne letiská museli dočasne zatvoriť alebo do určitej miery obmedziť svoju prevádzku v dôsledku poklesu počtu cestujúcich, ktorí mali záujem o leteckú dopravu. To malo významný vplyv na miestne regionálne ekonomiky, ktoré sa spoliehali na tieto regionálne letiská v oblasti cestovného ruchu a obchodu [16].
- **Zmeny v letových poriadkoch viacerých leteckých spoločností:** Letecké spoločnosti museli v dôsledku pandémie upraviť svoje letové poriadky a trasy, čo malo vplyv na viaceré regionálne letiská a ich prevádzku. Niektoré letecké spoločnosti obmedzili alebo pozastavili svoje služby do určitých destinácií, čo malo reťazový účinok na regionálne letiská. Keďže regionálne letiská sú úzko späté práve s niektorými leteckými spoločnosťami, tak dopad to malo obrovský, najmä vtedy, keď niektoré letecké spoločnosti vyhlásili bankrot. Príkladom toho bola Britská regionálna letecká spoločnosť FlyBe [17].
- **Finančné problémy:** mnohé regionálne letiská mali počas obdobia pandémie, rovnako aj po nej viaceré finančné problémy, ktoré mali množstvo negatívnych následkov. Tieto dôsledky boli napríklad úplné zrušenie alebo odloženie plánovaných rozšírení letísk. Či už sa to týkalo stránky infraštruktúry, ako napríklad oprava alebo nové prístavby väčších terminálov alebo lepšie a inovatívnejšie bezpečnostné prvky letísk. Avšak rovnako sa to týkalo aj stránky rozširovania nových letových trás z daných

regionálnych letísk, ktoré museli byť v dôsledku pandémie odložené alebo v krajných prípadoch aj úplne zrušené. Ďalej museli viaceré regionálne letiská znížiť náklady, čo viedlo k znížovaniu plátov zamestnancov alebo skracovaniu prevádzkovej doby mnohých letísk. Rovnako mnohé z regionálnych letísk museli žiadať o finančnú pomoc vlády alebo iné zdroje vo formách štátnej pomoci alebo verejnej podpory [12].

## 5. METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

Hlavným cieľom tohto článku, ktorého názov je „Verejná podpora regionálnych letísk v krajinách Európy“, je vyhodnotenie efektívnosti poskytovania verejnej podpory, alebo inak aj štátnej pomoci regionálnym letiskám v európskych krajinách. Výsledky boli vyhodnotené pomocou hodnotenia a porovnávania získaných údajov o poskytovaní verejnej podpory v rôznych krajinách Európy.

## VI. VÝSLEDKY A ZHODNOTENIE

Poskytovanie štátnej pomoci v krajinách Európy sa odlišuje vo viacerých aspektoch. Vládne orgány každej krajiny majú svoj vlastný systém a rôzne schémy poskytovania štátnej pomoci regionálnym letiskám. Jednou z takýchto možností môže byť aj poskytnutie dotácií na nehospodárske činnosti, pričom týmito činnosťami sa rozumejú napríklad:

- služby polície a colných orgánov,
- hasičská služba,
- záchranárske a zdravotnícke služby,
- riadenie letovej prevádzky,
- investície do infraštruktúry a vybavenia.

Legálne je to vymedzené aj v usmerneniach, ktoré vydáva Európska Komisia, pretože nehospodárske činnosti nespádajú pod nariadenia o štátnej pomoci, ktoré umožňuje štátnym orgánom prevziať všetky tieto náklady od prevádzkovateľov vybraných letísk, a tým ich odbremeniť od týchto, často vysokých výdavkov. Všetky tieto činnosti, ktoré nemajú hospodársky charakter môžu byť teda dotované vládnymi orgánmi. Avšak táto forma verejného financovania regionálnych letísk sa nevyužíva vo všetkých krajinách Európy rovnako. Napríklad letiská v Nemecku si musia všetky tieto služby hrať sami. Respektíve sú donútené k vyberaniu viacerých poplatkov. Jedná sa o poplatky, ktoré dané letiská v Nemecku vyberajú od leteckých spoločností, ktoré využívajú tieto letiská na svoju činnosť. Druhým spôsobom to môže byť forma vyberania poplatkov od cestujúcich, ktorí sú nútení platiť rôzne letiskové poplatky za využívanie vyššie spomenutých leteckých služieb. Naopak v niektorých európskych krajinách, ako sú Belgicko, Grécko, Švajčiarsko alebo Luxembursko preberá plnú zodpovednosť za spomínané nehospodárske činnosti štát. To znamená, že v týchto krajinách využívajú štátne orgány formu verejného financovania regionálnych letísk pomocou finančných dotácií na nehospodárske činnosti [18].

Ďalšou z možností, pomocou ktorej môžu byť dotované regionálne letiská v Európe sú verejne financované stimulačné programy pre leteckých dopravcov. Pod touto možnosťou sa rozumie vyplácanie stimulov na podporu osobnej dopravy.



Dotácie sú vyplácané od štátnych orgánov daných krajín a smerujú k leteckým dopravcom, ktorí uzatvárajú bilaterálne zmluvy o začatí činnosti na daných letiskách. Túto formu verejného financovania taktiež využívajú viaceré európske krajiny. Osobitnými príkladmi sú Izrael a Macedónsko. Štátne orgány týchto krajín zaviedli systém stimulačných programov na regionálne letiská, aby dokázali motivovať viaceré letecké spoločnosti k začatiu prevádzky na daných regionálnych letiskách [18].

Ďalším spôsobom poskytovania verejnej podpory regionálnym letiskám môže byť uzatváranie marketingových dohôd medzi vládami orgánmi a leteckými spoločnosťami. V tomto spôsobe sa jedná o nepriamu verejnú podporu regionálnych letísk. Táto možnosť verejnej podpory letiskám je postavená na základe uzatvorenia dohody o začatí činnosti leteckých dopravcov na letiskách. Funguje to spôsobom, že vybraný letecký dopravca začne prevádzkovať novú leteckú linku na danom letisku, a na základe toho dostane určitú dotáciu od vládnych orgánov v krajine. Po spustení nových liniek leteckými spoločnosťami vo väčšine prípadov začne spomínané linky využívať väčší objem pasažierov, a tým pádom na vybrané letiská bude privádzaný väčší počet pasažierov. V tomto spôsobe poskytovania verejnej podpory dochádza k veľkej motivácii, či už zo strany leteckých spoločností, z dôvodu inkasovania podpory od štátnych orgánov na spúšťanie nových leteckých liniek, ale zároveň aj motivácii pre regionálne letiská, ktoré poskytnutím nepriamej verejnej podpory získavajú väčší počet cestujúcich na svoje letiská. Na základe toho môžu regionálne letiská inkasovať väčšie prevádzkové zisky. Obchodný model, ktorý je založený na uzatváraní dohôd medzi leteckými dopravcami a verejnými orgánmi, je do veľkej miery využívaný napríklad v Španielsku, kde po jeho zavedení začali regionálne vlády poskytovať značnú finančnú pomoc leteckým dopravcom na spúšťanie prevádzky nových liniek [19].

Na základe porovnania viacerých spôsobov poskytovania verejnej podpory regionálnym letiskám, môžeme v konečnom dôsledku konštatovať, že nie vždy je verejná podpora poskytovaná regionálnym letiskám efektívne. V prvej možnosti sme porovnávali verejnú podporu poskytovanú regionálnym letiskám spôsobom prevzatia úhrady poplatkov za činnosti, ktoré nemajú hospodársky charakter štátnymi orgánmi daných krajín. Pre porovnanie sme použili krajiny ako sú Belgicko, Grécko, Švajčiarsko a Luxembursko, kde sme zistili, že uhrádzanie poplatkov za činnosti neehospodárskeho charakteru plne uhrádzajú štátne orgány, čiže regionálne letiská v spomínaných krajinách sú odbremenené od poplatkov za tieto služby. Na základe týchto informácií určujeme, že tento spôsob poskytovania verejnej podpory je efektívny pri vyššie spomenutých krajinách. Naopak v Nemecku si regionálne letiská hradia tieto poplatky vo vlastnej réžii. V dôsledku toho sme zistili, že napríklad v Nemecku sa tento spôsob nevyužíva, a tak to znamená, že nie v každej krajine Európy sa tento spôsob poskytovania verejnej podpory regionálnym letiskám dá efektívne využiť [18].

Ďalším spôsobom, ktorý sme porovnávali, bolo poskytovanie verejnej podpory pomocou zavedenia systému verejne financovaných stimulačných programov pre letecké spoločnosti. Tento spôsob bol využitý napríklad v Macedónsku a Izraeli, kde sa podľa získaných informácií podarilo zistiť, že tento systém poskytovania verejnej podpory je veľmi efektívny. Nakoľko sa ukázalo aj na príklade regionálnych letísk Skopje, Ohrid a Eilat /

Ovda, že financovanie prostredníctvom spomínaného systému prinieslo pozitívny vplyv na tieto letiská. Napríklad letisko v Izraeli zaznamenalo takmer dvojnásobný nárast cestujúcich v priebehu piatich mesiacov od zavedenia spomínaného systému. Rovnako aj letisko Skopje po prvýkrát od svojej existencie presiahlo hranicu milióna cestujúcich za rok [18] [20] [21].

Posledným hodnoteným systémom poskytovania verejnej podpory regionálnym letiskám bol systém založený na uzatváraní marketingových dohôd medzi vládami orgánmi a leteckými dopravcami. Na základe týchto zmlúv letecký dopravcovia začali s prevádzkou nových liniek v mnohých španielskych regiónoch. V tomto prípade dochádzalo k nepriamej verejnej podpore regionálnych letísk. Využívanie tohto systému sa dá brať aj za efektívne poskytovanie verejnej podpory, ale z druhej strany aj za neefektívne. Príkladom efektívneho využitia verejnej podpory boli napríklad regionálne letiská v Španielsku, ktoré sú predovšetkým zamerané na cestovný ruch. Ide najmä o letiská Santander, letiská na Baleárskych a Kanárskych ostrovoch. Práve tieto letiská dokázali na základe využitia tohto systému zaznamenať priaznivý vplyv a zvýšenie počtu cestujúcich, tým pádom zvýšenie prevádzkových príjmov týchto regionálnych letísk. Naopak letiská, ktoré nie sú zamerané na cestovný ruch, ale predovšetkým na nákladnú dopravu nezaznamenali výraznejší vplyv využitia spomínaného systému, v dôsledku čoho nebol pozorovaný zvýšený počet cestujúcich. V tomto prípade hovoríme napríklad o letiskách, ktoré sa nachádzajú v regiónoch Bilbao a Sevilla [19].

## 6. ZÁVER

Keďže každým rokom prichádzame viac a viac na to, že letecká doprava vykazuje enormne rastúce trendy najmä v počte očakávaných cestujúcich, ktorí majú o ňu záujem, tak zisťujeme aj to, že sa treba stále viac a viac zaoberať aj témou, ako je verejná podpora regionálnych letísk. V dnešnej dobe je to veľmi dôležité, pretože už teraz mnohé veľké medzinárodné letiská prichádzajú na to, že o pár rokov budú mať obrovské problémy práve s kapacitami a nebudú môcť kvôli tomu poskytovať svoje služby veľkému množstvu cestujúcich. A práve to je dôvod, prečo sa treba venovať problematike verejnej podpory regionálnych letísk. Pretože práve regionálne letiská majú tendenciu odľahčiť preťaženú leteckú sieť a preplnené veľké medzinárodné letiská. Vo výsledkoch môžeme vidieť, že nie vždy je verejná podpora regionálnym letiskám v krajinách Európy poskytovaná efektívne.

## Referencie

- [1] Európska únia. Úradný vestník Európskej únie: Nariadenie komisie (EÚ) 2017/1084 zo 14. júna 2017, ktorým sa mení nariadenie (EÚ) č. 651/2014, pokiaľ ide o pomoc na prístavnú a letiskovú infraštruktúru, stropy vymedzujúce notifikačnú povinnosť pri pomoci na kultúru a zachovanie kultúrneho dedičstva a pri pomoci na športovú a multifunkčnú rekreačnú infraštruktúru, ako aj schémy regionálnej prevádzkovej pomoci pre najvzdialenejšie regióny, a ktorým sa mení nariadenie (EÚ) č. 702/2014 z hľadiska výpočtu oprávnených nákladov. Eur-Lex [online]. Dostupné na internete: [NARIADENIE KOMISIE \(EÚ\) 2017/1084 - zo 14. júna 2017, - ktorým sa mení nariadenie \(EÚ\) č. 651/2014, pokiaľ ide o pomoc na prístavnú a letiskovú infraštruktúru, stropy vymedzujúce notifikačnú povinnosť](#)

- [pri pomoci na kultúru a zachovanie kultúrneho dedičstva a pri pomoci na športovú a multifunkčnú rekreačnú infraštruktúru, ako aj schémy regionálnej prevádzkovej pomoci pre najvzdialenejšie regióny, a ktorým sa mení nariadenie \(EÚ\) č. 702/ 2014 z hľadiska výpočtu oprávnených nákladov \(europa.eu\)](#) (citované 2023-02-06)
- [2] Regional Airports Forum. [online]. Dostupné na internete: [Airports Council International Europe | ACI EUROPE - Regional Airports Forum \(aci-europe.org\)](#) (citované 2023-02-06)
- [3] EUROPEAN REGIONAL AIRPORTS Connecting people, places & products. [online]. Dostupné na internete: [European Regional Airports - Connecting People Places Products.pdf \(aci-europe.org\)](#) (citované 2023-03-03)
- [4] Smlouva o fungování Evropské unie čl. 107 ods. 1. [online]. Dostupné na internete: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:12012E/TXT&from=FI](#) (citované 2023-02-06)
- [5] SINNAEVE, Adinda. The Report and Communication on Services of General Economic Interest: Stocktaking and Outlook for Reform. European State Aid Law Quarterly 2011, roč. 10, č. 2, s. 211 – 223. ISSN 1619-5272, str. 219. [online]. Dostupné na internete: [http://ec.europa.eu/competition/state\\_aid/register/ji/#by\\_sector](#) (citované 2023-02-19)
- [6] Definition and Characteristics of State Aid. [online]. Dostupné na internete: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813055055](#) (citované 2023-03-04)
- [7] State aid for airports & airlines. Transport and environment (2014-05). Dostupné na internete: [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2014%2005%20state%20aid%2023%20airports\\_final.pdf](#) (citované 2023-02-22-)
- [8] Regional aviation for local development in the context of public funds investment (2022). Dostupné na internete: [https://www.wir.ue.wroc.pl/info/article/UEWR69aaf5df469342d8ae52fb4582025dad/](#) (citované 2023-03-02)
- [9] 20 YEAR PASSENGER FORECAST [online]. Dostupné na internete: [https://www.iata.org/en/publications/store/20-year-passenger-forecast/](#) (citované 2023-03-22)
- [10] EUROPEAN AVIATION IN 2040 [online]. Dostupné na internete: [https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/challenges-of-growth-2018-annex1\\_0.pdf](#) (citované 2023-03-22)
- [11] New EUROCONTROL Network. [online]. Dostupné na internete: [New EUROCONTROL Network Manager programme to integrate small and regional airports into the network successfully kicks off | EUROCONTROL](#) (citované 2023-03-22)
- [12] COVID-19 impact on air transport (statistics). [online]. Dostupné na internete: [https://www.iata.org/](#) (citované 2023-03-22)
- [13] COVID-19 health and safety measures in air transport. [online]. Dostupné na internete: [https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/coronavirus-covid-19](#) (citované 2023-03-22)
- [14] LEE, V. 2020. Almost 200 European airports facing insolvency in coming months. [online]. Dostupné na internete: [Airports Council International Europe | ACI EUROPE - Media \(aci-europe.org\)](#) (citované 2023-03-22)
- [15] European Committee of the Regions. [online]. Dostupné na internete: [https://cor.europa.eu/en/news/Pages/cities-and-regions-want-more-support-for-regional-airports-struggling-from-pandemic.aspx](#) (citované 2023-03-24)
- [16] [16] COVID-19 and the aviation industry: Impact and policy responses. [online] Dostupné na internete: [https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/covid-19-and-the-aviation-industry-impact-and-policy-responses-26d521c1/](#) (citované 2023-03-24)
- [17] COVID-19 impact on regional airports and air companies. [online]. Dostupné na internete: [Flybe: all flights cancelled as airline ceases trading | Flybe | The Guardian](#) (citované 2023-03-24)
- [18] GRIMME, W. – MAERTENS, S. – SCHROPFER, A. 2018. Options for Traffic Growth at Smaller European Airports Under the European Commission's Guidelines on State Aid. In Transportation Research Procedia. 2018, vol. 35 [online]. Dostupné na internete: [<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518303600>](#). (citované 2023-04-08).
- [19] NÚNEZ-SÁNCHEZ, R. 2015. Regional public support to airlines and airports: An unsolved puzzle. In Transport Research Part E 2015, vol. 76 [online]. Dostupné na internete: [<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554515000381>](#). (citované 2023-04-08).
- [20] Macedonia Offers Incentives to Tourists From Region. Dostupné na internete: [<https://balkaninsight.com/2014/10/21/hopes-on-more-tourists-from-neighborhood/>](#). (citované 2023-04-19).
- [21] RPT-With new airport, Israel's Eilat competes for European tourists. . Dostupné na internete: [<https://www.reuters.com/article/israel-economy-tourism-eilat-idINL8N1UC4Z5>](#). (citované 2023-04-19).



# ANALYSIS OF TECHNICAL MODIFICATIONS TO ENABLE COMBUSTION OF GASEOUS FUEL IN A TURBOSHAFT ENGINE

**Matej Remšík**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Jozef Čerňan**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

## Abstract

*The aim of this article is to investigate the feasibility of modifying turboshaft engines for gaseous fuel combustion. With growing concern for environmental sustainability and oil price volatility, there has been an increase in need for alternative fuels with gaseous fuels emerging as a potential alternative for traditional hydrocarbon liquid fuels. This article examines the technical modifications required to enable combustion of gaseous fuels in a conventional turboshaft engine, including changes to the combustion chambers, importance of flame stabilization and also provides an insight into the potential benefits and challenges of such changes to the turboshaft engines.*

## Keywords

*turboshaft engine, gaseous fuels, modifications, technical changes*

## 1. Úvod

Letecká doprava, podľa Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo, sa podieľa 2% na celkovej produkcii emisií CO<sub>2</sub> spaľovaním leteckých palív v lietadlových pohonných jednotkách. Táto skutočnosť sa v posledných rokoch stáva opodstatnenou obavou o budúcnosť planéty a dôvodom, prečo spoločnosť volá po znížení emisií a zvýšení udržateľnosti leteckého priemyslu. Popri environmentálnych dopadoch na klímu, záujem o zníženie závislosti na fosílnych palivách od východných dodávateľov ako blízky východ a Rusko predstavuje ďalší z dôvodov pre potrebu alternatívnych zdrojov energie.

Alternatívne plynné palivá ponúkajú sľubné parametre pre náhradu konvenčných palív leteckých turbínových motorov. Jeden z predmetov tohto článku je preskúmať možnosti v odvetví plyných palív použiteľných v leteckej doprave. Pochopenie odlišných vlastností a parametrov rôznych palivových alternatív je potrebné pre samotné chápanie efektu, ktorý bude používaním takýchto palív pôsobiť na činnosť pohonných jednotiek. Od preskúmania účinkov alternatívnych plyných palív na časti pohonnej jednotky sa budú odvíjať aj potrebné technické modifikácie daných komponentov.

Cieľom tohto článku je analyzovať technické riešenia turbohriadeľových motorov, schopných práce s plynými alternatívami k tradičným JET palivám, používaných nielen v letectve. Nadobudnuté poznatky budú následne využité k návrhu modifikácií pre letecký turbohriadeľový motor.

## 2. Princíp činnosti turbínového motora

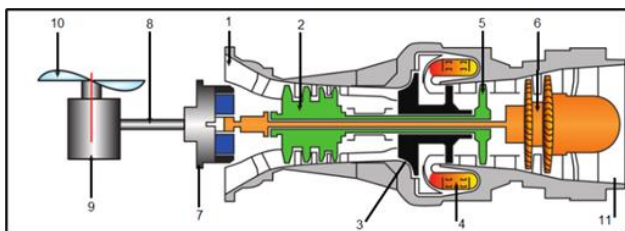
### 2.1. Princíp činnosti turbínového motora

Turbínový motor je tepelný stroj, ktorý premieňa chemickú energiu obsiahnutú v palive na ťahovú silu, využitú, napríklad, pre pohon letúnov. Premena chemickej energie paliva na energiu mechanickú či kinetickú prebieha spaľovaním palivo-

vzduchovej zmesi v spaľovacej komore. Využitie turbínového motora v letectve má základ v urýchľovaní prúdu vzduchu vstupujúceho do motora na jeho výstupe, avšak táto práca sa venuje najmä motoru turbohriadeľovému, pri ktorom má efekt urýchľovania vzduchu priamo vo vnútri motora minimálny podiel na tvorbe výsledného ťahu. Turbohriadeľový motor pre tvorbu ťahu spravidla roztáča vrtuľu cez reduktor otáčok (turbovrtuľový motor) alebo rotory vrtuľníka pomocou prevodovky, no princíp premeny energie paliva sa zachováva.

### 2.2. Základné časti turbohriadeľového motora

Prvou časťou turbohriadeľového motora je vstupné ústrojenstvo. Ako už aj názov napovedá, cez toto ústrojenstvo vstupuje vzduch do vnútra motora, odkiaľ postupuje ďalej do kompresora. V kompresore dochádza ku kompresii, teda stlačeniu, vzduchu na požadovanú hodnotu tlaku. Stlačený vzduch následne cez difúzor kompresora vstupuje do spaľovacej komory, kde sa zmiešava so vstrekovaným palivom a táto zmes sa následne kontinuálne spaľuje. Spaľovacia komora je pre potreby tohto článku najdôležitejšia časť turbohriadeľového motora. Ďalej sú horúce plyny privádzané do plynovej turbíny, kde expandujú a roztáčajú rotory jednotlivých stupňov turbíny. Plynová turbína spotrebúva energiu plynov na pohon kompresora, ako aj vrtule alebo rotora vrtuľníka cez voľnú plynovú turbínu. Prúd plynu postupuje k poslednej časti, ktorá sa nazýva výstupné ústrojenstvo, cez ktoré plyn opúšťa motor. [1]



Obrázok 1 - Základné komponenty turbohriadeľového motora (1 – Vstupné ústrojenstvo, 2 – Kompresor, 3 – Difúzor, 4 – Spaľovacia komora, 5 – Plynová turbína, 6 – Voľná plynová turbína, 7 – Reduktor otáčok, 8 – Výstupný hriadeľ, 9 – Prevodovka, 10 – Rotor, 11 – Výstupné ústrojenstvo) [2]

### 2.3. Konvenčné palivá turbínových motorov

Vo všeobecnosti sa v civilnom letectve ako palivá v turbínových motoroch používajú letecké petroleje (letecké kerozíny). Letecký kerozín sa získava ako produkt frakčnej destilácie ropy. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností a kvalít sa do paliva pridávajú vhodné aditíva. Palivové aditíva majú za úlohu, okrem iného, zabezpečiť zníženie obsahu vody v palive, antibakteriálne, antifungicídne či protikorózne účinky. V prevádzke sa bežne využívajú palivá s názvom JET A (pre americký trh) a JET A-1 (vyskytujúci sa skôr v európskych oblastiach). V špeciálnych prípadoch, najmä pre operácie v extrémne chladných podmienkach, sa pre svoje lepšie vlastnosti pri nízkych teplotách používa palivo JET B.

Tabuľka 1 sa zaoberá základnými vlastnosťami palív JET A-1 a JET A ako hustota, rýchlosť horenia a energetický obsah palív. Vlastnosti špecifikované v tabuľke budú neskôr dôležité v porovnaní s rovnakými charakteristikami alternatívnych plynných palív. [3]

Tabuľka 1 - porovnanie vlastností jet palív [4]

	JET A-1	JET A
Hustota [kg/L]	0,804	0,820
Špecifická energia [MJ/kg]	43,15	43,02
Energetická hustota [MJ/L]	34,7	35,3
Rýchlosť horenia [m/s]	0,44	

## 3. Potreba alternatívnych zdrojov energie

### 3.1. Ekonomické a sociologické dôvody

Letecký dopravný priemysel je výrazne závislý na pohonných hmotách na báze ropy, ktorá je predmetom volatility a vo výnimočných prípadoch výkyvom dodávok tejto suroviny. Globálna politická situácia dokáže negatívne ovplyvniť cenu a dostupnosť pohonných hmôt, respektíve ropy. Už v roku 1973 sa ukázalo, že napríklad vojnové konflikty môžu mať za následok celosvetovú, tzv. ropnú, krízu. V období ropnej krízy v roku 1973 sa ceny ropy za jeden barel zvýšili až o 400% a vývoz ropy do štátov západnej Európy ako aj do USA bol zakázaný. Závislosť na rope hlavne z blízkeho východu a Ruska a schopnosť nepredvídateľných udalostí ovplyvňovať svetovú ekonomiku by

sa teda dala považovať za riziko a za dôvod pre menej náchylnú alternatívu. Diverzifikácia zdrojov pohonných hmôt, napríklad o plynné palivá, môže znížiť celkovú závislosť na fosílnych palivách a rovnako aj podporiť domácu produkciu obnoviteľných zdrojov energie.

### 3.2. Ekologické dôvody

Popri dostupnosti a cene ropy je však jeden z najsilnejších argumentov pre rozvoj v odvetví alternatívnych palív ekologický dopad spaľovania fosílnych palív. Spaľovanie uhľovodíkových zlúčenín v motoroch dopravných prostriedkov, teda lietadiel, produkuje množstvo skleníkových plynov ako oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a oxidy dusíka (NO<sub>x</sub>). Z globálneho hľadiska je letecká doprava producentom až 2% celkových emisií CO<sub>2</sub> a značným podielom prispieva ku klimatickým zmenám. Táto skutočnosť sa v posledných rokoch stala opodstatnenou obavou o budúcnosť a dôvodom, prečo spoločnosť volá po znížení emisií a zvýšení udržateľnosti leteckého priemyslu.

Preto sa objavuje čoraz väčšia snaha nájsť „zelenú“ alternatívu k tradičným palivám. Jednou z možností môže byť aj cesta plynných palív.

### 3.3. Technologický pokrok

Vývoj nových technológií v palivovom odvetví môže viesť k zvýšenej účinnosti a celkovému zlepšeniu výkonu leteckých motorov. Takýto technologický pokrok by teoreticky mohol znížiť prevádzkové náklady ako aj zlepšiť celkovú udržateľnosť a ekologickosť prevádzky spaľovacích jednotiek. Navyše, alternatívne palivá otvárajú dvere novým technickým a konštrukčným riešeniam pohonných jednotiek a ich komponentov.

Hľadanie plynných alternatívnych palív je, v zhrnutí, pre letectvo dôležité z dôvodu znižovania emisií, závislosti na fosílnych palivách a podpory celkovej inovácie v priemysle.

## 4. Plynné alternatívy

Medzi palivá vhodné na použitie v leteckých turbohriadeľových motoroch je možné zaradiť množstvo plynov. Najväčší potenciál použitia v reálnej prevádzke však má iba niekoľko z nich. V posledných rokoch prebiehajú diskusie najmä o potenciáli stlačeného zemného plynu (CNG), skvapalneného zemného plynu (LNG), skvapalneného ropného plynu (LPG) a v neposlednom rade vodíka (H).

V Tabuľke 2 sa nachádzajú základné parametre vyššie spomenutých plynných palív. Pri porovnaní daných parametrov s vlastnosťami leteckých petrolejov je možné nájsť podobnosti. Špecifická energia obsiahnutá v 1 kilograme CNG, LPG a JET palivách je porovnateľná. Palivá ako LNG a LH sú z tohto pohľadu omnoho atraktívnejšie, keďže špecifická energia vodíka je až takmer 3-násobne vyššia ako pri kerozíne. Veľmi dôležitým parametrom pri porovnávaní je hustota paliva, ktorá je vo všeobecnosti pri plynch nižšia ako pri palivách kvapalného skupenstva. Hustota ovplyvňuje aj energetickú hustotu paliva, ktorá je pri každej alternatíve v porovnaní s JET palivom nižšia, no kompenzuje ju nižšia hmotnosť, ktorú majú plyny práve vďaka svojej nízkej hustote. Pre účely leteckej dopravy je výhodnejšie plynné palivá skladovať v skvapalnenej podobe. Skvapalnenie sa dá dosiahnuť privedením plynu pod určitý tlak

(LPG) alebo do veľmi nízkych teplôt, kedy hovoríme o kryogénnych palivách. Medzi kryogénne palivá patrí LNG alebo skvapalnený vodík - LH. Celkovo je vodík z pomedzi ostatných palív veľmi špecifický, keďže sa skladá iba z jedného prvku a neobsahuje žiaden uhlík. Jeho jedinečné zloženie má za následok veľmi rýchle horenie pri vysokých teplotách. Rýchlosť horenia ostatných alternatív je veľmi podobná, no teplota horenia sa v porovnaní s JET A/A-1 mierne líši.

Tabuľka 2 - Parametre plyných palív [5] [6]

	CNG	LNG
Hustota [kg/L]	0,75x10 <sup>-3</sup>	0,421
Špecifická energia [MJ/kg]	45,8	50
Energetická hustota [MJ/L]	9,2	21
Rýchlosť horenia [m/s]	0,4	0,45
	LPG	LH
Hustota [kg/L]	0,510	0,708x10 <sup>-1</sup>
Špecifická energia [MJ/kg]	46	120
Energetická hustota [MJ/L]	25	8
Rýchlosť horenia [m/s]	0,45	2,4

Chápanie odlišností v parametroch palív je dôležité pri návrhu konkrétnych riešení palivovej sústavy, spaľovacej komory a ostatných komponentov turbohriadeľového motora.

## 5. Spaľovacia komora

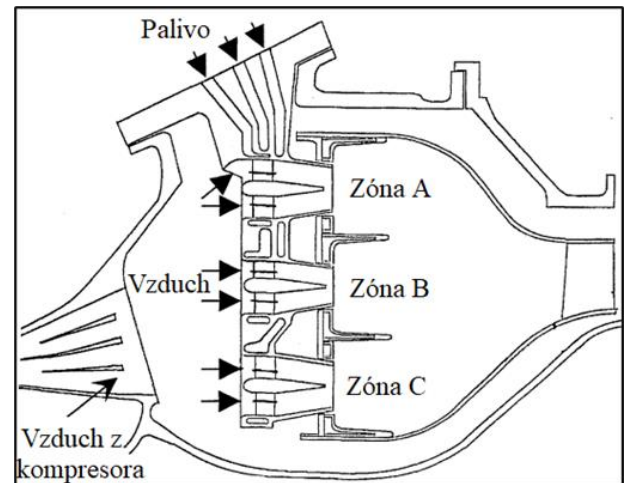
Pri výbere vhodnej spaľovacej komory je potrebné hľadiť najmä na rýchlosť a teplotu horenia daného paliva. Takmer všetky uhľovodíkové palivá, napríklad aj zemný či ropný plyn, pri horení neprekročia rýchlosť 0,45 m/s. Výnimkou je vodík, ktorého rýchlosť horenia je niekoľkonásobne vyššia s hodnotou 2,4 m/s. Keďže hlavným cieľom použitia plyných palív je zníženie emisií, je nutné hľadiť na teplotu horenia a dĺžku trvania spaľovacieho procesu v spaľovacej komore. Pre zníženie emisií (najmä NO<sub>x</sub>) je potrebné znížiť teplotu horenia a skrátiť čas horenia palivo-vzduchovej zmesi v komore. Vyššia rýchlosť horenia vodíka teoreticky umožňuje skrátenie dĺžky spaľovacej komory pre potreby znižovania emisií. Ako sekundárny efekt takéhoto riešenia je zníženie celkovej hmotnosti a rozmerov motora.

Široké rozmedzie pomerov palivo-vzduchovej zmesi, pri ktorých dokážu plyné palivá horieť, dovoľuje použitie špeciálnych spaľovacích komôr pre zníženie teploty horenia. Takéto komory sa nazývajú DLE (Dry Low Emission) alebo DLN (Dry Low Nox) a pracujú s vopred zmiešanou, ochudobnenou zmesou paliva so vzduchom, čím sa zníži teplota horenia a rovnako aj emisie. [7]

### 5.1. Technológia s viacerými spaľovačmi

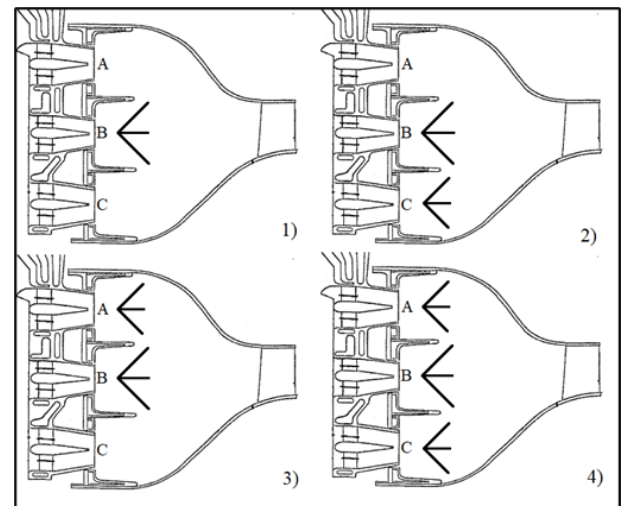
Technické riešenie, kde sa v spaľovacej komore nachádza viac spaľovačov (OBRÁZOK 2), funguje na princípe rozloženia jednej primárnej zóny horenia do viacerých menších zón, pričom každá

obsahuje svoj vlastný spaľovač. Každý z nich môže pracovať nezávisle na druhom, čo je výhodné, pretože turbohriadeľový motor pracuje v širokom rozmedzí pracovnej záťaže. Toto riešenie zabezpečuje nižšie teploty horenia v primárnych zónach horenia a tým zníženie emisií.



Obrázok 2 - Spaľovacia komora s viacerými zónami horenia [7]

Na OBRÁZKU 3 sú zobrazené rôzne pracovné módy spaľovacej komory s rozdelenou primárnou zónou horenia. Táto komora je schopná pracovať s každým spaľovačom zvlášť, nezávisle na ostatných. Pri nízkej záťaži je výhodné spaľovanie iba s jedným spaľovačom. Ak sa záťaž zvyšuje, postupne sa do chodu zapájajú aj ostatné. Pri použití takéhoto riešenia sa dosiahne zníženie emisií oxidov dusíka a oxidu uhoľnatého.



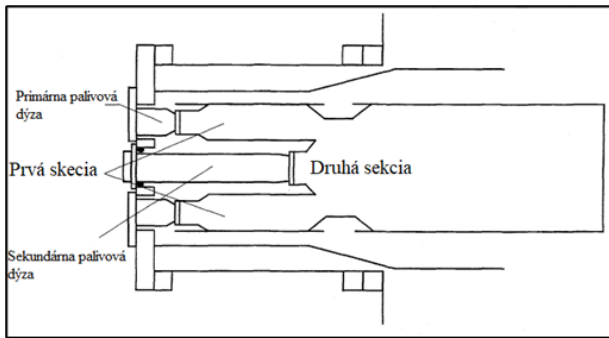
Obrázok 3 - Pracovné módy spaľovacej komory s viacerými zónami horenia [7]

### 5.2. Hybridné spaľovacie komory

Hybridné spaľovacie komory fungujú na princípe stupňovania spaľovania. OBRÁZOK 4 ukazuje zloženie spaľovacej komory z dvoch sekcií. Prvá sekcia zabezpečuje zmiešavanie paliva so vzduchom a spaľovanie tejto zmesi pri štartovaní alebo voľnobežných otáčkach motora. Nachádzajú sa v nej dva spaľovače. Ak sa záťaž motora zvýši, spaľovanie pokračuje aj v druhej sekcii s jedným spaľovačom, ktorá sa nachádza v smere



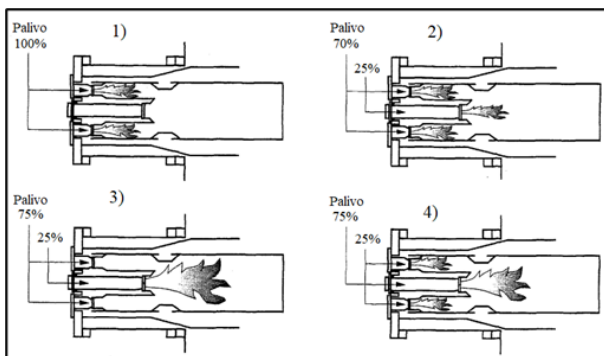
prúdenia z prvej sekcie. Použitie hybridnej spaľovacej komory znižuje emisie CO a NOx .



Obrázok 4 - Hybridná spaľovacia komora [7]

V OBRÁZKU 5 sú graficky znázornené pracovné módy hybridnej spaľovacej komory podľa pracovnej záťaže:

1. Primárny mód – Palivo-vzduchová zmes je spaľovaná iba v prvej sekcii a slúži na štart motora a chod pri voľnobežných otáčkach.
2. Lean-Lean mód – Palivo-vzduchová zmes je spaľovaná v primárnej aj sekundárnej sekcii. Slúži na chod motora do 70% max. zaťaženia.
3. Premixed mód – Zhruba 75% paliva je zmiešaných so vzduchom v primárnej sekcii, kde sa ale nezapáli a zmes prechádza ďalej k sekundárnej sekcii, kde prebieha spaľovanie ostatných 25% paliva. Celý proces horenia prebieha v sekundárnej sekcii. Používa sa pri záťaži motora od 70% do 100%.
4. Predĺžený Lean-Lean mód – Ak sa pri móde 3) plameň dostáva späť do primárnej sekcie, spaľovací proces sa stabilizuje podobným princípom ako v móde 2).



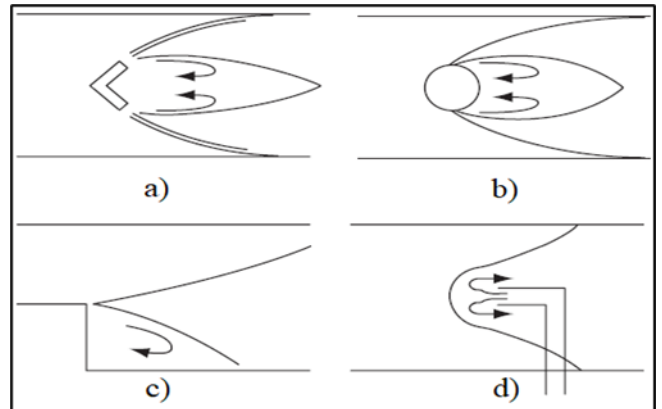
Obrázok 5 - Pracovné módy hybridnej spaľovacej komory [7]

## 6. STABILIZÁTORY PLAMEŇA

Ako už bolo spomenuté v predošlej kapitole, rýchlosť horenia uhľovodíkových palív je zriedkavo vyššia ako 0,45 m/s. V realite však plyny v spaľovacích komorách môžu dosiahnuť rýchlosti blížiacim sa 50 m/s. Pri spaľovaní palivo-vzduchovej zmesi v spaľovacích komorách turbínových motorov musí platiť, že rýchlosť prúdenia takejto zmesi je nižšia, ako rýchlosť horenia. Ak by toto pravidlo nebolo dodržané, plameň by mohol byť prúdiacimi plynmi doslova sfúknutý (blow-off).

Zníženie rýchlosti prúdenia sa v praxi zabezpečí donútením časti plynov recirkulovať, čím sa plameň stabilizuje. Stabilizácia plameňa môže byť dosiahnutá viacerými prostriedkami:

1. Vložením pevných prekážok rôznych tvarov priamo do prúdu plynov,
2. nasmerovaním časti prúdiacich plynov alebo vzduchu proti smeru prúdenia,
3. zapracovaním schodu do konštrukcie spaľovacej komory, kde dochádza k náhlej expanzii plynov.



Obrázok 6 - Metódy stabilizácie plameňa

Na OBRÁZKU 6 sú znázornené konkrétne riešenia stabilizácie horenia v spaľovacích komorách. Možnosť a) je pevná prekážka v tvare „V“. Možnosť b) je pevná prekážka s kruhovým prierezom (stabilizačná tyč). Oboje sú vložené priamo do prúdiacich plynov, ktoré sa po prejdení za prekážku vrtia. Možnosť c) znázorňuje riešenie s použitím schodu priamo v konštrukcii spaľovacej komory, za ktorým dochádza k náhlemu rozpínaniu plynov, čo sprevádza vírenie a zníženie ich rýchlosti. Ako posledná je na obrázku znázornená možnosť d), kde je proti smeru prúdiacich plynov nasmerovaná dýza, cez ktorú prúdi časť sekundárneho prúdu vzduchu, ktorý stabilizuje horenie. [6]

## 7. Záver

Článok sa zaoberal technickými modifikáciami, ktoré by v teórii dovoľovali turbohriadeľovému motoru spaľovať plyné palivá. Zdôraznené boli najmä ekologické dôvody hľadania alternatívnych palív pre letectvo, kde sa plyné palivá ukazujú ako atraktívna možnosť. Zároveň boli zhodnotené parametre niektorých palív, ktoré sú dôležité pri návrhu technického riešenia. Ďalej sa v článku nachádzajú návrhy konkrétnych modifikácií spaľovacích komôr a vysvetlenie ich činnosti. V poslednom rade sú spomenuté možnosti stabilizácie horenia v spaľovacích komorách.

Je však nutné podotknúť, že by bol potrebný ďalší výskum, ktorý by vyriešil problematiku ostatných komponentov turbohriadeľového motora, medzi ktoré sa dajú zaradiť palivové čerpadlá, potrubia a dýzy a turbínová sekcia motora.

## Referencie

- [1] KŘÍŽ, J. 2008. Pohonná jednotka. Žilina: EDIS –
- [2] vydavateľstvo, 2008. ISBN 978-80-8070-872-6

- [3] ResearchGate | Find and share research [online] Dostupné na: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-turbo-shaft-engine\\_fig1\\_337552918](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-turbo-shaft-engine_fig1_337552918)
- [4] ŠKULTÉTY, F. Katedra leteckej dopravy FPEDAS UNIZA, Univerzitná 8215/1, Žilina. Palivové systémy
- [5] Air BP. 2000. Handbook of Products. Hemel Hempstead. 2000.
- [6] Century Fuel Products. Fuel Characteristics. [online] Dostupné na: [https://www.centuryfuelproducts.com/media/schematics/Fuel\\_Characteristics.pdf](https://www.centuryfuelproducts.com/media/schematics/Fuel_Characteristics.pdf)
- [7] GLASSMAN, I. – YETTER, R. A. 2008. Combustion. 4. vyd. California: Elsevier, 2008. 773 s. ISBN 978-0-12-088573-2
- [8] STEINMANN. 1997. *Low NO<sub>x</sub> Burners for Major Gas Turbine Installations – Technology and Experience*. Bergen. 1997.



## FOREST MAPPING USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

Miroslav Kardoš  
Technical university in Zvolen  
Faculty of Forestry  
T. G. Masaryka 24  
96001 Zvolen

### Abstract

The use of airborne laser scanning technology is nowadays on the rise in Slovakia. The application of this technology in forestry is not lagging behind, and therefore it is important to examine and analyse the process of improvement and application of methods and their use in practice. Airborne laser scanning technology can penetrate under dense tree canopies and vegetation. We can map the terrain and the surface at the same time with relatively high accuracy. The main objective of this work is to validate the methodology of forest identification, comparison with the reference data of the Land Registry and identification of forests on non-forest land – so called white areas on the basis of freely available airborne laser scanning data. White areas are areas covered with forest trees that are registered in the land register for purposes other than forest functions. The survey plots were selected regarding parameters of structure of forest land, existence of white areas and non-forest land. The data were obtained from the Geodesy, Cartography and Cadastre Authority of the Slovak Republic. The forest classification method was evaluated using the criterion of minimum tree height of 5 m. By comparison with reference data, we identified 2.30 ha of white areas in the area of interest. In conclusion, we proposed solutions for their further management in Slovakia.

### Keywords

Airborne laser scanning, forest mapping, photogrammetry

### 1. ÚVOD

V lesníckom mapovaní sú využívané dve základné skupiny metód merania a vyhodnotenia:

- Geodetické terestrické merania využívajúce globálne navigačné satelitné systémy (GNSS)
- Fotogrametrické vyhodnotenia, využitím digitálnej fotogrametrie

GNSS zariadenia sú špeciálne prijímacie zariadenia prostredníctvom ktorých, dokážeme určiť polohu v reálnom čase. Využívaním GNSS zariadení v lesníctve získavame informácie o polohe jednotlivých prvkov lesníckeho mapovania s vysokou presnosťou a efektívnosťou, pričom súčasne dokážeme získavať informácie o polohe a výške jednotlivých prvkov. Výhodou využívania GNSS technológie je, že v rámci mapovania sa nevyžaduje vzájomná viditeľnosť medzi geodetickými bodmi na rozdiel od iných terestrických metód. Využívanie GNSS je výhodné pri lokalizovaní a mapovaní kalamitných plôch, ohnisk poškodenia lesných porastov a zameriavaní lesných ciest.

V posledných rokoch sa v lesníckom mapovaní dobre uplatňuje aj využívanie smartfónov [1], kde autori porovnávali hodnotenie polohovej presnosti údajov získaných využitím smartfónov s priestorovými údajmi získanými pomocou zariadení využívajúcimi GNSS.

Za najpoužívanejšiu metódu lesníckeho mapovania môžeme považovať fotogrametriu, ktorá je využívaná v prevažnej väčšine mapovacích prác [2].

Vo svojej podstate sa jedná o proces získavania ako kvalitatívnych, tak aj kvantitatívnych informácií pozorovaním

skúmaných predmetov a javov. Interpretácia predstavuje postup získavania informácií jednoduchým alebo stereoskopickým zobrazením [3].

Výrazný rozvoj nastal využívaním digitálneho snímkovania, ktoré umožňuje pomocou jedného snímkového letu získať záznam rôznych častí spektra elektromagnetického žiarenia. Proces interpretácie obrazu je ovplyvnený aj geometrickými a spektrálnymi vlastnosťami LMS. Tieto vlastnosti môžu byť upravované panchromatickým zaostrovaním, ktoré predstavuje proces kombinácie panchromatických (čiernobielych) obrazov s vyšším rozlíšením a multispektrálnych (farebných) obrazov s nižším rozlíšením.

Vo všeobecnosti môžeme hovoriť o fúzií dvoch alebo viacerých obrazov pre vytvorenie novej snímky, použitím určitého algoritmu [4].

Farebné syntézy vytvorené panchromatickým zaostrovaním ponúkajú možnosť získavať detailnejšie informácie z väčších území. Ich využívaním tak dokážeme čiastočne posúdiť zdravotný stav lesa, identifikovať miesta vzniku ťažbových kalamitných plôch, lokalizovať lesné cesty a sklady alebo aj identifikovať poškodenie jednotlivých stromov [5]. Autori uvádzajú, že zlepšením spektrálnych a geometrických vlastností digitálnych snímok procesom panchromatického zaostrovania sa zlepšil samotný proces fotogrametrického vyhodnotenia a interpretácie obrazu.

#### 1.1. Fotogrametria v lesníckom mapovaní

Fotogrametria umožňuje získanie geometrických informácií o objektoch nachádzajúcich sa na fotogrametrických snímkach. Charakteristickou črtou fotogrametrie je jej možnosť zachytiť



časovo úzko ohraničený stav. Umožňuje tak vyhodnotenie objektov nachádzajúcich sa na fotogrametrickej snímke a následne ich kvalitatívne popísanie a identifikáciu na zemskom povrchu [6].

Pri popisovaní kvantitatívnych charakteristík ide najmä o veľkosť, orientáciu a pozíciu objektov. Z lesníckeho hľadiska sa jedná o výšku stromov, zásobu a priestorové súradnice neznámych bodov [7].

Využívanie metód digitálnej fotogrametrie v lesníctve smeruje k využívaniu informácií zachytených a nesených na snímkových materiáloch (farebné, infračervené alebo multispektrálne snímky), vplyvom ktorých značne stúpa množstvo získaných špeciálnych lesníckych informácií pre rôzne účely v rámci lesníckej činnosti.

Digitálna fotogrametria predstavuje najvyššiu formu geometrického spracovania LMS s výraznými prvkami automatizácie. Za výrazný prvok môžeme považovať digitálnu obrazovú koreláciu, ktorá rieši problémy automatickej vzájomnej orientácie, priradovania obrazov v pásme trojnásobného a priechneho prekrytu [8].

Letecké snímky ako hlavný podklad pre tvorbu ortofotomozaiky sú vyhotovované snímkovaním zemského povrchu počas letovej dráhy lietadla [9].

Letecké snímky predstavujú rastrový obraz zemského povrchu so svojou geometrickou presnosťou a rádiometricou správnosťou. Pomocou orientácie a spájaním niekoľkých snímok môžeme vytvárať ortofotomozaiky, ktoré v porovnaní so satelitnými snímkami opisujú celé územia zo zvyčajne väčším rozlíšením a presnejším zachytením detailu. Za ďalší dôležitý produkt digitálnej fotogrametrie sú považované digitálne modely terénu. Pre ich tvorbu je nevyhnutné disponovať spoľahlivým stereomodelom. Z výsledného stereomodelu je tak možné okrem polohopisných extrahovať aj výškopisné údaje, ktoré sú potrebné pre tvorbu digitálneho modelu terénu [10].

### 1.2. Prvky lesníckeho mapovania

Lesnícke mapovanie si z dôvodu jeho tematického zamerania vyžaduje získavanie kvalitných a presných informácií rôznorodého charakteru. Meranie na základe požadovanej presnosti tak možno rozdeliť do dvoch skupín:

- vlastnícke hranice lesných pozemkov, vyžadujúce meranie s presnosťou na základe katastrálneho mapovania,
- lesnícky detail, ktorý je podkladom tvorby účelových lesníckych máp s nižšími požiadavkami na presnosť [11].

Presnosť máp vychádza z presnosti mapovania a geografického zobrazovania alebo aj presnosti mapového podkladu. Táto presnosť sa potvrdzuje na základe hodnôt strednej chyby a krajných odchýlok. Podľa Slovenskej technickej normy STN 01 3410 je presnosť mapovania rozdelená do tried presnosti 1. až 5. S ohľadom na potreby lesníckeho mapovania sa štandardne v rámci lesníckeho mapovania využíva 5. trieda presnosti ( $m_{xy} = 0,50$  m). V prípadoch ak je potrebná presnosť katastrálneho merania (meranie vlastníckych hraníc), je nevyhnutné zabezpečiť meranie vo vyššej triede presnosti. Medzi základné objekty a prvky lesníckeho mapovania zaraďujeme:

- hranice a plochy lesa, jednotiek priestorového rozdelenia lesa a lesných pozemkov,
- lesné cesty,
- vodné toky, vodné plochy, prírodné prvky vytvorené alebo ovplyvňované vodou,
- budovy a stavebné objekty na lesných pozemkoch, zastavané územia, stavebné objekty mimo lesných pozemkov, dôležité pre orientáciu v teréne,
- značky charakterizujúce spôsob využívania lesných pozemkov, značky schematické, zobrazujúce prírodné a umelé prvky v krajine,
- výškopis,
- miestopis v súlade so štandardizáciou geografického názvoslovía, označenie plošných jednotiek lesa a lesných pozemkov, ďalšie spresňujúce texty a skratky,
- bodové pole meraných bodov, výrazne vylíšené hraničné body stromov a výškové body,
- ostatné popisné a spresňujúce kartografické prvky [12]

### 1.3. Definícia lesa

Hranice a plochy lesa predstavujú dominantný objekt vrámci lesníckeho mapovania. Pri každom určení výmery lesa stojíme pred otázkami: „Čo je les? Aké sú kritériá lesa?“ Na určenie lesa existuje viacero rôznych pohľadov a preto aj viacero kritérií. Laicky možno povedať, že les je plocha, kde rastú dreviny a sú na určitej minimálnej výmere v primeranej vzdialenosti od seba. V praxi sa ale stretávame s rôznymi názormi a preto definície môžeme rozdeliť do dvoch typov: administratívno-právne a ekologické. Administratívno-právna definícia lesa je zaradenie plochy do lesného pôdneho fondu. Typickým príkladom tejto definície je Kataster nehnuteľností, ktorý rozdeľuje parcely podľa druhu pozemku. V prípade lesa sa eviduje s číselným kódom 10, t. j. „lesné pozemky“. Tieto parcely sú tak stále evidované ako „lesy“ bez ohľadu na to či sa tam les reálne nachádza alebo nie. Potrebné je však spomenúť, že les sa tam nemusí nachádzať nezávisle od vôle človeka, zvyčajne kvôli kalamite, ktorá musela byť spracovaná do takej miery, že vznikla holina, avšak s obnovou lesa sa spravidla počíta rovnako ako aj s jeho ďalším obhospodarovaním. V lesnom hospodárstve sa preto aj tieto plochy považujú za les. Ďalej lesnými pozemkami sú pozemky slúžiace lesnému hospodárstvu – lesné škôlky, semenné sady, lesné sklady, lesné cesty a priesečky a pozemky nad hornou hranicou lesa vrátane kosodreviny. Rovnako za les sa považujú pozemky, ktoré boli dočasne vyňaté z plnenia funkcií lesov.

Ďalším príkladom administratívno-právnej definície lesa je zaradenie plochy do jednotky priestorového rozdelenia lesa (JPRL). Ako JPRL sú spravidla evidované lesné pozemky, no nie všetky lesné pozemky sú aj zaradené do JPRL. Pozemky evidované ako JPRL majú mimoriadny význam pre lesnícke disciplíny ako sú hospodárska úprava lesov, pestovanie lesa, ochrana lesa, lesná ťažba a pod. Evidujú sa po dielcoch v prvom rade podľa vekových tried. Každý dielec má svoje jedinečné číslo v rámci lesného celku (LC), ku ktorému sa ďalej eviduje drevinové zloženie, výmera, zakmenenie, zásoba, sklon,

približovacia vzdialenosť, lesný typ atď. Podobne ako lesné pozemky v katastri nehnuteľností (KN) aj JPRL sa môžu nachádzať v stave holiny nezávisle od vôle človeka, zvyčajne opäť kvôli kalamite.

Ekologických pohľadov na les existuje niekoľko. Jednou z ekologických definícií je, že „les je spoločenstvo organizmov žijúcich v lesnej pôde, stromov, bylín, húb a živočíchov, ktoré žijú vo vzájomných vzťahoch“. Dôležité sú však aj číselné kritériá – ekologické definície zvyknú stanovovať najnižšiu výšku stromov a minimálnu výmeru plochy, pri ktorej sa porast ešte považuje za les. Z výšok najčastejšie býva hranica 5 m, ale stále sa vedú diskusie, či sa má jednať o výšku dosiahnuteľnú v dospelosti alebo výšku aktuálnu. Minimálna výmera sa stanovuje tiež rôzne, zvyčajne 0,5 ha. Častejšie sa ale definujú aj menšie výmery. Pre vytvorenie klímy porastu je výmera 0,5 ha dostatočná [12].

Okrem kritéria minimálnej výmery sa pre dosiahnutie presnejších výsledkov klasifikácie lesa aplikujú aj ďalšie kritériá ako minimálna šírka plochy 20 m, minimálna pokryvnosť 10 %. Kľúčovým v tomto prípade je postup pre identifikáciu korún stromov, ktorá je predpokladom pre určenie zápoja. Ten je jedným z kritérií pre určenie lesa podľa Technickej príručky HÚL [13]. Existuje niekoľko postupov pre identifikáciu vrcholov stromov pri identifikácii hraníc lesa. Väčšina výskumných aktivít pri spomínanej problematike sa opiera o identifikáciu lokálnych maxím, napr. [14], [15], [16].

#### 1.4. Biele plochy

Problematika bielych plôch má v lesníctve osobitné postavenie a význam. Jedná sa o pozemky (parcely) evidované v katastri nehnuteľností (katastrálnom operáte) nie ako lesná pôda ale napr. orná pôda, trvalé trávne porasty (TTP) a i., napriek tomu sa tam nachádza reálny les spĺňajúci kritériá ekologickej definície lesa. Biele plochy majú príznačný charakter lesných porastov. Ich výmera v posledných rokoch až desaťročiach stále stúpa. Hlavnou príčinou zvyšovania výmery bielych plôch je zanedbaná starostlivosť alebo neobrábanie poľnohospodárskej pôdy, ktorej výmera tak klesá a jej údaje o výmere na Slovensku môžu byť nadhodnotené. Výraznejší nárast nastal po roku 1989 po ktorom nasledovala vlna prinavracania majetkov a pôdy pôvodným vlastníkom resp. ich dedičom. Tento proces je známy pod názvom „reštitúcie“. Títo vlastníci sa však o pozemky nestarali, štátne orgány nepracovali efektívne a nepostihovali tieto porušenia [17].

Podľa zákona č. 220/2004 Z. z. o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy „je vlastníkom, nájomcom alebo správcou pozemku povinný starať sa o poľnohospodársku pôdu tak, aby nedochádzalo k jej chemickej, fyzikálnej či biologickej degradácii“. Vo výnimočných prípadoch boli tieto plochy založené umelou obnovou, ale prevažne sú porasty založené hlavne prirodzenou obnovou z oficiálne evidovaných lesných porastov a rokmi až desaťročiami sa stále viac rozširujú na úkor poľnohospodárskej pôdy či TTP. Tieto zarastené pozemky je potrebné rekultivovať späť, aby spĺňali kritériá evidovaného pozemku alebo ich preklasifikovať na lesné pozemky čím sa odstráni nezrovnalosť s katastrom nehnuteľností [18].

Následne potom môžu byť zaradené do JPRL a programu starostlivosti o les (PSL).

Cieľom práce bolo posúdiť možnosť identifikácie lesných pozemkov a s tým súvisiacich bielych plôch, najmä prostredníctvom technológie leteckého laserového skenovania aplikovaním výškového kritéria na klasifikované mračno bodov.

## 2. MATERIÁL A METÓDY

Záujmové územie (obr. 1), dostatočne členité, za účelom skúmania a zisťovania veľkosti bielych plôch bolo vybrané na Vysokoškolskom lesníckom podniku (VŠLP) pri Technickej univerzite vo Zvolene v katastrálnom území obce Sielnica.



Obrázok 1 - Záujmové územie pre overenie metodiky na klasifikáciu lesa z údajov leteckého laserového skenovania

Územie sme vyberali expertným výberom tak, aby sa na ňom nenachádzal len súvislý lesný porast ale aj poľnohospodárska pôda, o ktorej sme vedeli, že nie je poľnohospodársky udržiavaná a viditeľne zarastená lesným porastom. Na lesných pozemkoch sme sa snažili nájsť územie, ktoré tiež nie je úplne lesnaté ale s dočasne sa vyskytujúcou holinou (po ťažbe alebo kalamite). Tretím, hoci menej významným kritériom bol výskyt remízok alebo menších skupín stromov.

Dátové zdroje tvorili existujúce letecké snímky a ortofotomapy a tiež údaje leteckého laserového skenovania [19]. Výmera záujmového územia predstavovala 1,25 km<sup>2</sup>.

### 2.1. Klasifikácia objektov

Prvým krokom pri klasifikácii lesa z údajov LLS bola klasifikácia bodového mračna (prvotné údaje z LLS) do tried definovaných štandardom LAS. Za týmto účelom sme využili klasifikačné stratégie implementované v softvéri SCOP++. Výsledná klasifikácia územia predstavovala bodové mračno rozdelené do tried terén (ground, posledný odraz) a vegetácia (nízka, stredná, vysoká). Ďalším krokom bol export klasifikovaných údajov vo vektorovom tvare do GIS prostredia.

V prostredí GIS (ArcGis) nasledovali kroky pozostávajúce z nastavenia parametrov prostredia (jednotky, súradnicový systém), vytvorenie údajovej databázy, import klasifikovaných bodových mračen a výpočet ich štatistických charakteristík.

Na vytvorenie rastrových modelov terénu (DMT) a povrchu (DMP) potrebných pre ďalšiu analýzu a najmä vytvorenie normalizovaného digitálneho modelu povrchu (nDMP) sme použili konverznú metódu s maximálnymi hodnotami výšok z bodového mračna. Samotný nDMP predstavuje rozdiel vysokej

vegetácie a terénu, čo nám v ďalších fázach aplikovaného postupu umožnilo získať výšky stromov. Ako kritérium výšky sme použili hranicu 5 m, pričom reklasifikáciou vytvoreného nDMP sme odfiltrovali vegetáciu s nižšou výškou.

Za účelom identifikácie bielych plôch bolo potrebné porovnať reálny stav lesa oproti evidencii lesných pozemkov v katastri nehnuteľností. Selekcii parciel z vektorovej katastrálnej mapy sme realizovali v programe Kokeš, previazaním s databázou a filtráciou parciel s iným kódom druhu pozemku ako 10.

Identifikácie bielych plôch prebehala v GIS prostredí preložením a odčítaním vektorových vrstiev reprezentujúcich skutočný les podľa klasifikácie z údajov LLS a vektorovej katastrálnej vrstvy.

### 3. VÝSLEDKY

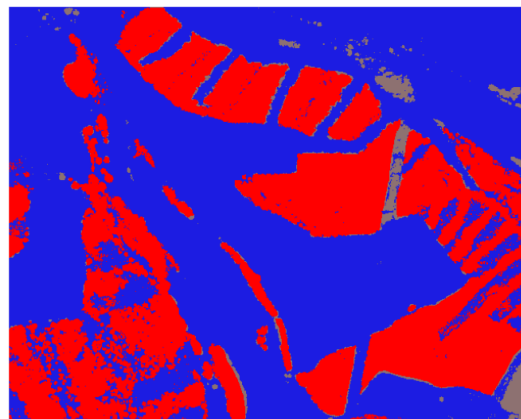
Výmery pozemkov na ktorých sa nachádza les, klasifikovaný podľa minimálneho výškového kritéria, stav lesných pozemkov podľa evidencie KN ako aj identifikovaný les nachádzajúci sa na nelesných pozemkoch podľa evidencie KN - tzv. biele plochy uvádzame v tabuľke č. 1. V tabuľke je okrem toho aj uvedená výmera celého záujmového územia.

Tabuľka 1 - Vyhodnotenie identifikácie lesa z údajov leteckého laserového skenovania a identifikácia bielych plôch

	Výmera (ha)	Percentuálny podiel (%)
Výmera celého územia	125,23	100,00
Skutočný les podľa klasifikácie LLS	47,91	38,26
Lesné pozemky podľa stavu KN	45,03	35,96
Biele plochy	2,88	2,30

Identifikované biele plochy predstavujú plochu o výmere 2,30 ha, čo je zvyčajne výmera niekoľkých dielcov (minimálna výmera dielca je definovaná na 0,5 ha). Podľa oficiálneho stavu KN je v tomto území lesnatosť cca 36 %, avšak v skutočnosti sa les podľa klasifikačného kritéria (5 m výška) nachádza na ploche takmer 48 ha, čo reprezentuje lesnatosť záujmového územia 38,26 % (obr. 2).

Je potrebné podotknúť, že do výmery identifikovaného lesa z údajov LLS sú zahrnuté aj plochy pokryté stromami (a ich korunami) aj mimo súvislých porastov, kde sa nachádzajú stromy jednotlivo alebo v hlúčkoch, avšak dosahujú minimálnu výšku 5 m. Celkovo sa nám ale potvrdila skutočnosť z národnej inventarizácie a monitoringu lesa, podľa ktorého je skutočná výmera lesov na Slovensku vyššia o 3 % ako oficiálne štatistiky (44 % namiesto 41% na celom Slovensku).



Obrázok 2 - Výstup klasifikácie lesa z údajov leteckého laserového skenovania po aplikácii minimálnej výšky stromov 5 m

### 4. Záver

Zisťovanie stromových resp., porastových charakteristík, výmer lesných pozemkov leteckým laserovým skenovaním má čoraz väčší zmysel, pretože nám umožňuje rýchle zmapovanie lesných porastov, zisťovanie objemu nadzemnej biomasy, ako aj nesúladov medzi evidenciami lesníckeho mapovania a katastra nehnuteľností. Keďže pri skenovaní dochádza k zachyteniu viacnásobného odrazu okrem samotného terénu, ľahko zistíme aj výšky stromov v poraste, resp. informácie o celkovej vertikálnej štruktúre stromov a porastov. Pri znalosti kritérií lesa a správnych postupov sa môžeme rýchlo dopracovať k výmere lesných pozemkov a ich skutočnému stavu, aktuálnemu k momentu zberu údajov laserového skenovania. Uvedené sú navyše dostupné prostredníctvom Úradu geodézie, kartografie a katastra SR [19], čím sa stáva aplikácia metodík na identifikáciu lesa dostupnejšou.

Lesy majú veľký význam pre krajinu a tiež pre lesné hospodárstvo. Keďže sa za posledné desaťročia zvyšuje ich výmera, treba zvýšiť pozornosť pri manažovaní lesných pozemkov v zmysle programov starostlivosti o lesy, pod ktoré však nespádajú tzv. biele plochy (les rastúci na nelesných pozemkoch podľa evidencie KN). Vhodným riešením problémov, ktoré sú spojené s manažmentom bielych plôch je vo väčšine prípadov ich preklasifikovanie do druhu lesných pozemkov (kód 10) v evidencii KN. Tento postup je jednoduchý v prípade, keď celá parcela je pokrytá lesom, dochádza tam k plneniu funkcií lesa, prípadne je plocha aj obhospodarovaná. Zložitejší je postup, keď je lesom porastená len časť parcely, vtedy je možným riešením jednu parcelu rozdeliť na dve nové parcely (s pôvodným a novým druhom pozemku).

### PodĎakovanie

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] Tomastik, J., Mokros, M., Salon, S., Chudy, F., Tunak, D., 2017. Accuracy of Photogrammetric UAV-Based Point Clouds under Conditions of Partially-Open Forest Canopy. *Forests* 8, UNSP 151. <https://doi.org/10.3390/f8050151>
- [2] Kardoš, M., Tuček, J., Chudý, F., Tomašík, J., Slatkovská, Z., 2017. Aplikácie laserového skenovania v lesníctve. *Slovenský geodet a kartograf (recenzovaný odborný časopis Komory geodetov a kartografov SR)*, Bratislava 2017, ročník XXII, č. 4, p. 11 – 17. ISSN-1335-4019.
- [3] Žíhľavník, Š., 2009. Geodézia, fotogrametria a mapovanie v lesníctve. Vysokoškolská učebnica. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 388 s. ISBN 978-80-228-1977-0
- [4] Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K., Schardt, M., 2014. Assessment of the mapping potential of Pléiades stereo and triplet data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3*, 103–109. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-103-2014>
- [5] Šadibol, J., Chudý, F., 2013. Panchromatické zaostrovanie multispektrálnych snímok na získavanie kvantitatívnych a kvalitatívnych informácií v oblasti lesníckeho mapovania. [online]. In *Sborník Gis Ostrava 2013*. Ostrava. 2013. [cit.2019.1.5]. Dostupné na internete: <[http://gisak.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2013/sbornik/papers/gis2013508affc97d081.pdf](http://gisak.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2013/sbornik/papers/gis2013508affc97d081.pdf)>
- [6] Schenk, T., 2005. *Introduction to Photogrammetry*, Columbus: The Ohio State University. 2005. 95 p.
- [7] Schroedel, J. 2002. *Engineering and Desing Photogrammetric mapping*. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.: 2002. 371 p.
- [8] Chudý, F., Kardoš, M., Šadibol, J., 2012. Digitálna fotogrametria neoddeliteľná súčasť lesníckeho mapovania. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2012. 81 s. ISBN: 9788022823142.
- [9] Fabrika, M., Pretzsch, H., 2011. *Analýza a modelovanie lesných ekosystémov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2011. 599 s. ISBN: 978-80-2281-0
- [10] Kardoš, M., 2006. *Nové trendy využitia fotogrametrie pri lesníckom mapovaní*. Dizertačná práca. Technická univerzita vo Zvolene, 2006. 130 s.
- [11] Halvoň, J. 2007. *Geodetický a kartografický obzor*. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální a Úřad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky. 2007. 121 -148 s.
- [12] Národné lesnícke centrum: [www.forestportal.sk](http://www.forestportal.sk)
- [13] [árodné lesnícke centrum, 2009. *Technická príručka HÚL I. Metodické pokyny*. Zvolen: Národné lesnícke centrum, 2009. Dostupné na internete: <<http://www.nlcsk.sk/files/1316.pdf>>
- [14] Sačkov, I., Kardoš, M., 2014. Forest delineation based on LiDAR data and vertical accuracy of the terrain model in forest and non-forest area. In *Annals of forest research: journal of forestry and environmental sciences*. 2014, vol. 57, s. 119--136. ISSN 1844-8135. ITMS 26220120069 ; HUSK/1101/1.2.1/014
- [15] Argamosa, R., Paringit, E., Quinton, K., Tandoc, F., Faelga, R., Ibanez, C., Posilero, M., Zaragosa, G., 2016. Fully automated gis-based individual tree crown delineation based on curvature values from a LiDAR derived canopy height model in a coniferous plantation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B8, 2016 XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic*
- [16] Eysn L., Hollaus, M., Schadauer, K., Pfeifer, N., 2012. *Forest delineation based on airborne LIDAR data*. *Remote Sensing* 4(3): 762-783. doi:10.3390/rs4030762
- [17] Pado, R., 2018. Biele plochy – slovenské Hic sunt leones. Dostupné online: <https://blog.sme.sk/pado/spolocnost/biele-plochy-slovenske-hic-sunt-leones>
- [18] Kurčíková, M., 2015. *Automatická identifikácia hraníc lesných porastov z materiálov digitálnej fotogrametrie a laserového skenovania: dizertačná práca*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Lesnícka fakulta. 2015. 122 s. 16 príloh.
- [19] Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, 2022. Dostupné na internete:
- [20] <https://www.geoportal.sk/sk/zbgis/lls-dmr/>



## ACCURACY OF DIGITAL TERRAIN MODEL ON FOREST ROADS USING AIRBORNE LIDAR AND UAV POINT CLOUDS

**Miroslav Kardoš**  
Technical university in Zvolen  
Faculty of Forestry  
T. G. Masaryka 24  
96001 Zvolen

**Michal Ferenčík**  
Technical university in Zvolen  
Faculty of Forestry  
T. G. Masaryka 24  
96001 Zvolen

### Abstract

*A sufficiently dense forest road network is a basic prerequisite for the professional management of forests on the basis of close to nature management. For the purposes of forest management, it is of great importance to determine the state of damage of forest roads, to plan their reconstruction and to calculate the costs of their repair. The dominant method for forest mapping is photogrammetry, which is currently combined with airborne laser scanning data. The combination of these two methods makes it possible to obtain up-to-date and representative forest and landscape information for the purpose of professional and sustainable forest management in the context of 'precision forestry', which is based on the use of detailed site-specific information for the planning, management and implementation of forestry activities. In this paper, we discuss the application of the mentioned remote sensing methods for modelling the surface of selected forest road sections and evaluating the elevation accuracy of the data used. From the point of view of the methods used, both appear to be very suitable for the purpose of detailed surface mapping, condition and damage assessment, or for the optimization and design of new roads.*

### Keywords

*Digital terrain model, forest road, airborne laser scanning, unmanned aerial vehicle*

### 1. ÚVOD

Základným predpokladom odborného manažmentu lesov na báze prírody blízkeho hospodárenia je dostatočne hustá lesná cestná sieť. Problematike lesnej dopravnej siete sa venovala v predchádzajúcom období značná pozornosť vzhľadom na ich dôležitosť pre lesnícku prevádzku a v súčasnosti aj pre verejnosť v spojitosti so zvýšenými požiadavkami na plnenie ďalších funkcií lesa pre spoločnosť. V oblasti využívania bezkontaktných systémov DPZ, pri porovnaní len s krajinami V4 je oproti podmienkam SR viditeľný rozdiel. Lesné cesty tvoria základný prostriedok pre sprístupňovanie lesných celkov [1].

V prípade mapovania lesných ciest je potrebné nájsť vhodné technológie merania, ktoré budú zároveň v sťažených lesných podmienkach, čo najhospodárnejšie [2].

Digitálny model terénu nachádza uplatnenie pri identifikácii prvkov lesníckeho mapovania, špeciálne lesných ciest [3], pri detekcii poškodení na povrchu lesných ciest [4], resp. pri identifikácii stavu lesnej cestnej siete využitím nástrojov GIS [5], [6]. Autori sa zhodujú nad nutnosťou vykonávania prieskumu ciest z dôvodu zhodnotenia existujúceho stavu sprístupnenia a kvality. Na hodnotenia kvality resp. poškodenia (výtlky, praskliny) lesných ciest sa v súčasnosti dostávajú do popredia metódy laserového skenovania. Jedná sa najmä o technológie mobilné, ktoré sú využívané najmä vo verejnom sektore [7]. Pre účely lesného hospodárstva má veľký význam zisťovanie stavu poškodenia lesných ciest, plánovanie ich rekonštrukcie a výpočet nákladov na ich opravu. Ako vhodná metóda pre tento účel sa preukázala technológia mobilného profilometrického skenovania [4].

Poškodzovanie povrchu vozovky vzniká pôsobením rôznych vonkajších mechanických a fyzikálnych procesov, ktoré následne ovplyvňujú jej prevádzkové funkcie a únosnosť jej konštrukcie [8].

Dominantnou metódou pri mapovaní lesov je však fotogrametria, ktorá sa v súčasnosti kombinuje s údajmi leteckého laserového skenovania (LLS). Kombinácia týchto dvoch metód umožňuje získanie aktuálnych a reprezentatívnych informácií o lese a krajine za účelom odborného a trvalo udržateľného hospodárenia v lese v kontexte tzv. precízneho lesníctva, ktoré je založené na využívaní podrobných informácií o konkrétnej lokalite na plánovanie, riadenie a vykonávanie lesníckych činností.

Ortofotomapy spolu s bodovým mračnom z laserového skenovania slúžia ako vhodný podklad pre mapovanie siete dočasných a trvalých ciest, ktoré sú prvkom lesníckych máp [9]. Za výrazný prvok automatizácie v spracovaní fotogrametrických snímkov môžeme považovať digitálnu obrazovú koreláciu, ktorá umožňuje riešenie problémov automatickej vzájomnej orientácie, priradovania obrazov v pásme trojnásobného a priečného prekrytu. Jednou z menej „tradičných“ metód získavania 3D bodových mračen, sú metódy spracovania snímkov najmä z diaľkovo pilotovaných leteckých systémov pomocou „structure from motion SFM“ technológie [10].

V lesníckej praxi boli doposiaľ zaužívané postupy merania poškodenia lesných ciest prostredníctvom zdĺhavého terestrického merania s použitím meračských lát. LLS s dostatočnou hustotou bodov resp. mobilné laserové skenovanie poskytujú nové možnosti efektívneho zisťovania presných informácií o povrchu vozovky. Mobilné terestrické a letecké systémy zberu údajov poskytujú oproti terestrickému meraniu efektívny zber dát (rýchlosť skenovania je závislá od povrchu vozovky a požadovanej presnosti a hustoty bodového mračna). Mobilné mapovacie systémy poskytujú údaje na tvorbu 3D modelov, presné, aktuálne informácie špeciálne vhodné pre navigáciu chodcov, automobilov a poskytovanie služieb [11]. Doposiaľ boli mapovacie systémy využívané najmä pre skenovanie a vyhodnotenie ciest v urbánnych oblastiach, pričom



sa jedná o rýchlu metódu umožňujúcu získanie veľmi hustého realistického bodového mračna [12].

V oblasti identifikácie lesnej cestnej siete sú najčastejšie aplikované metódy založené na klasifikácii obrazu [13].

Využívanie LiDAR údajov ponúka možnosti klasifikácie a techniky detekcie ciest realizované pomocou bodového mračna. Klasifikačné techniky využívajúce kombináciu snímok a bodových mračen sú do istej miery účinné aj v zalesnenom prostredí [14].

### Lesná cestná sieť

Pre plnenie cieľov lesného hospodárstva (ekologických, prevádzkových, ekonomických) je potrebné kombinovať niekoľko prístupov pre sprístupňovanie lesa. Lesné cesty tvoria základný prostriedok pre sprístupňovanie lesných celkov [1].

Z hľadiska sprístupnenia zalesnených oblastí je dôležité dodržanie optimálnej hustoty lesných ciest. Práve dodržanie optimálnej hustoty lesnej cestnej siete môže byť značne ovplyvnené rôznymi faktormi. Predovšetkým sa jedná o topografické pomery, sklon, hodnotu dreva, druh ťažbovej metódy, a iné [15].

Lesná cesta sa radí najmä k zariadeniam, ktoré slúžia na sprístupňovanie a prepájanie viacerých lesných komplexov a dopravu dreva [1].

Na základe normy STN 73 6108 „Lesná dopravná sieť“ sa lesné cesty delia do tried 1L, 2L, 3L a technologické komunikačné zariadenia. Uvedené triedy ciest musia spĺňať základné parametre uvedené v STN. V prípade, ak lesná cesta nespĺňa niektorú z podmienok, je automaticky zaradená do nižšej kategórie lesnej cestnej siete. Správnym naplánovaním a následným vybudovaním lesnej cestnej siete tak dokážeme dlhodobo ovplyvniť ako ekonomickú a prevádzkovú funkčnosť lesov, tak aj ich ekologickú a estetickú hodnotu. Kvantitatívne a kvalitatívne nevhodne vybudovaná cestná sieť, môže zapríčiniť devastáciu krajiny a nižšiu efektívnosť hospodárenia [1].

Cieľom príspevku je vytvorenie a porovnanie modelov terénu na povrchu lesnej cesty z bodového mračna získaného technológiou UAV a leteckého laserového skenovania poskytnutého Geodetickým a kartografickým ústavom (GKÚ). Posúdenie možností uvedených technológií pre účely spravovania a projektovania lesnej cestnej siete v lesnom hospodárstve.

## 2. MATERIÁL A METÓDY

Experiment sa realizoval na území Vysokoškolského lesníckeho podniku (VŠLP) Technickej univerzity vo Zvolene, ktorý tvorí prírodné laboratórium so širokou databázou údajov o lesných porastoch v našom prípade lesných cestách, ktorých hustota je 47,5 m/ha, čo predstavuje viac ako 2-násobok oproti priemernej hustote lesnej cestnej siete na území Slovenska. Výskumná referenčná plocha pre tvorbu modelov terénu, analýzu výškovej presnosti, predstavuje úsek lesnej cesty s názvom „Štagiar“ o celkovej dĺžke 1044 m, ktorá pozostáva zo šiestich samostatných úsekov s rôznym povrchom vozovky (v závislosti od typu konštrukcie a použitých materiálov), pričom sa jedná o úsek lesnej cesty kategórie 1 L (odvozná lesná cesta najvyššej kategórie). Pre náš experiment sme vybrali 3 typy povrchov, ktoré sa medzi sebou líšia najviac z pohľadu použitého stavebného materiálu.

Charakteristika jednotlivých úsekov lesných ciest:

4. úsek cesty č. 1 (obr. 1): 15 cm podkladová vrstva štrková vrstva ( $\varnothing$  32 – 63 mm) prekrytá 5 cm vrstvou štrku ( $\varnothing$  4 – 8 mm), spevnená **cementom** (30 kg.m-2) a zavalcovaná (190 m).
5. úsek cesty č. 2 (obr. 2): na vyrovnané zemné teleso bola uložená 10 cm podkladová vrstva kameniva ( $\varnothing$  0 – 32 mm), na nej je 10 cm rozomletého **asfaltu (73 m)**.
6. úsek cesty č. 3 (obr. 3): 10 cm hrubá vrstva kameniva ( $\varnothing$  32 – 63 mm) prekrytá 10 cm vrstvou jemnejšieho kameniva ( $\varnothing$  0 – 32 mm) – **štrk** (414 m)



Obrázok 1 - lesná cesta kategórie 1L – cementom spevnený povrch



Obrázok 2 - lesná cesta kategórie 1L – asfaltový povrch



Obrázok 3 - lesná cesta kategórie 1L – štrkový povrch

Na každom úseku lesnej cesty v dĺžke 100 m boli zabezpečené údaje leteckého laserového skenovania aktuálne poskytovaného bezodplatne prostredníctvom Goedetického a kartografického ústavu (GKÚ) pre výskumné účely. Od roku 2017 Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR) zabezpečuje dodávateľským spôsobom nový DMR 5.0 – digitálny model reliéfu, ktorý je vytvorený pre celé územie Slovenska, z údajov LLS. Predpokladá sa, že tento projekt bude ukončený v roku 2023. Celé územie, ktoré zachytáva v Slovenskej republike sa rozdeľuje na 42 lokalít. Skenovanie jednotlivých lokalít postupuje smerom od západu na východ Slovenska. Údaje, ktoré majú menší rozsah (teda výrezy) môžeme sťahovať prostredníctvom aplikácie Mapový klient ZBGIS (ÚGKK SR, 2022). Tento model vzniká interpoláciou z klasifikovaného mračna bodov. Trieda, ktorá je použitá na vstupnú klasifikáciu je trieda č. 02 Reliéf (Ground). ESRI GRID alebo ASC je vstupným rastrom v rozlíšení 1 x 1 m [16].

Druhý údajový dataset predstavovali snímky z fotogrametrického snímkovania diaľkovo pilotovaným leteckým systémom, resp. dronom. Digitálne fotogrametrické vyhodnotenie snímok s vysokým prekrytom (až 80 x 80%) zahŕňa výpočet a spresnenie parametrov vonkajšej orientácie snímok metódou structure from motion, generovanie bodových mračien, výpočet digitálneho modelu terénu, tvorba digitálnej farebnej ortofotomapy. Spracovanie a vyhodnotenie materiálov z terestrického merania zahŕňa postprocessing, výpočet súradníc bodov, generovanie bodových mračien. Za týmto účelom bol použitý softvér Photoscan. Fotogrametrický zber údajov bol realizovaný prostredníctvom dronu Phantom 4 PRO s nízkou výškou letu (4-6m) nad povrchom vozovky pod clonou lesného porastu. Jedná sa o kvadroptéru s 4K Ultra HD kamerou umiestnenou na trojosom stabilizovanom závесе s integrovaným systémom Lightbridge pre prenos obrazu a mnohými ďalšími funkciami, ktorej konštrukcia je zhotovená zo zliatin titánu a horčíka, čo zvyšuje tuhosť trupu a znižuje hmotnosť. Fotografie sú vyhotovované kamerou, ktorá je osadená jednopalcovým 20 megapixelovým snímačom, ktorý je schopný natáčať video v 4K/60 fps alebo dokáže vyhotoviť až 14 fotiek za sekundu s rozlíšením 12 MPx. Optika má širokouhlé ohnisko 20 mm, kvalitu fotiek zabezpečuje trojosá stabilizácia. Dron je možné ovládať ručne alebo tiež môžeme zvoliť niektorý z automatických režimov. V režime TapFly alebo ActiveTrack je dron schopný sa bezpečne vyhnúť prekážke. Elektronika v ňom je nastavená tak, že automaticky stráži stav batérie a zabezpečí návrat v prípade, keď klesne na určitú hodnotu. Prvým zdrojom údajov bolo bodové mračno vygenerované zo snímok

vyhotovených kamerou nesnenou na nízko letiacom drone nad povrchom testovacieho úseku lesnej cesty. V procese spracovania snímok boli tieto transformované do súradnicového systému na základe vlícovacích bodov. Tieto boli zamerané terestrickým meraním totálnou stanicou a GNSS technológiou priamo pred snímkovaním.

Za účelom vyhodnotenia presnosti digitálneho modelu terénu vytvoreného fotogrametricky, na 3 typoch povrchov lesnej cesty sme zvolili uvedené 2 typy zdrojových údajov. V oboch prípadoch sa jednalo o bodové mračno, z ktorého sa následne generoval digitálny model terénu, ktorý postupoval do procesu tvorby rozdielového modelu a výpočtu diferencií medzi modelmi (DMT UAV – DMT ZBGIS, postup v programe ArcGis).

Evaluáciu modelov terénu sme realizovali v programe ArcGis, nakoľko umožňuje import, spracovanie bodových mračien, generovanie DMT aj jeho analýzu a vyhodnotenie. Prvým krokom v procese vyhodnotenia bol import bodových mračien z fotogrametrického spracovania snímok ako aj leteckého laserového skenovania. V ďalšom kroku bolo potrebné zjednotiť a definovať súradnicový systém importovaným údajom (fotogrametrické dáta v súradnicovom systéme ETRS89 UTM 34N, dáta ZBGIS v JTSK). Nasledujúcim krokom bolo generovanie modelov terénu (interpolácia LAS súborov z minimálnych hodnôt s jednotným rozlíšením 0,20 m). Vytvorené rastre sme ďalej od seba odčítali funkciou zonálnej štatistiky (raster z údajov ZBGIS – raster z údajov fotogrametricky vytvorených). Týmto spôsobom sme dostali 3 rozdielové rastre pre každý povrch cesty. Pre štatistické vyhodnotenie diferencií sme tieto previedli na vektorový tvar. Následne sme dostali k dispozícii atribútovú tabuľku, kde pre každý bod pôvodného rastra obsahovala diferenciu medzi modelmi terénu. Štatistické zhodnotenie tak predstavovalo zistenie veľkosti jednotlivých diferencií (strednej diferencie, minimálnej, maximálnej odchýlky a strednej chyby) pri určitej spoľahlivosti (tabuľka č. 1).

### 3. VÝSLEDKY

Výsledky porovnania digitálneho modelu terénu zo snímok získaných fotogrametricky systémom UAV a z bodových mračien získaných prostredníctvom ZBGIS (letecké skenovanie pre vyhotovenie DMR 5.0) uvádzame v tabuľke č. 1.

Tabuľka 1 - Štatistické charakteristiky vypočítané z diferencií medzi DMT z LLS a fotogrametricky získaným DMT (jednotky v metroch)

Typ povrchu	Počet párových hodnôt	Min	Max	Priemer (ē)	Stredná chyba (m <sub>z</sub> )
Cement	3077	-0,11	0,16	0,028	0,035
Asfalt	2487	-0,16	0,11	0,011	0,038
Štrk	1886	-0,14	0,43	0,041	0,053

Celková početnosť diferencií súvisí s dĺžkou úseku cesty, pričom pre oba porovnávané digitálne modely terénu bolo zvolené jednotné rozlíšenie (0,20 m). Treba poznamenať, že digitálne modely terénu vstupujúce do výpočtu rozdielového modelu boli pre každý povrch cesty orezané zhodne podľa vlícovacích bodov, ktoré boli rozmiestnené po okrajoch vozovky (za účelom získania jednotného porovnávacieho základu). Minimálne a maximálne hodnoty diferencií dosiahli úroveň od - 16 cm (úsek č. 2) do +43 cm (úsek č. 3), čo mohlo byť spôsobené miestami vyrastajúcou trávou najmä v stredových častiach telesa cesty. Najlepšia

priemerná diferencia bola dosiahnutá na úseku cesty č. 2 (1,1 cm), najvyššia na úseku cesty č. 3 (4,1 cm). Presnosť charakterizovaná strednou chybou dosiahla hodnoty od  $\pm 3,5$  cm na úseku č. 1 až po  $\pm 5,3$  cm na úseku cesty č. 3. Z pohľadu rozdielov medzi modelmi terénu najnižšiu priemernú diferenciu  $\bar{e} = 1,1$  cm sme zaznamenali na povrchu vytvorenom z drveného asfaltu. Uvedený typ povrchu obsahoval aj najmenej lokálnych poškodení na vozovke. Pri cementovom type povrchu sme zaznamenali najnižšiu hodnotu dosiahnutej strednej chyby  $m_z = \pm 3,5$  cm, čo je takmer identický výsledok s typom povrchu asfalt. Hodnota priemernej odchýlky však bola mierne vyššia  $\bar{e} = 2,8$  cm (predpokladáme súvis s drsnejším typom povrchu s väčším počtom poškodení). Najmenej presné výsledky z pohľadu dosiahnutej strednej chyby sme zaznamenali na štrkovom povrchu lesnej cesty s hodnotou  $m_z = \pm 5,3$  cm, čo bolo s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené lokálnymi miestami s nízkou trávnu vegetáciou v strede telesa cesty, ktorú automatický klasifikačný algoritmus ponechal v triede terén. Oba dátové zdroje pochádzali z vegetačného obdobia. Z pohľadu celkového zhodnotenia môžeme charakterizovať model terénu generovaný z fotogrametricky získaných dát ako mierne nadhodnotený oproti DMT ZBGIS (kladné priemerné odchýlky diferencií). Štatistickú významnosť tohto predpokladu by však bolo potrebné preukázať štatistickým testom.

#### 4. ZÁVER

Významným prínosom použitej metódy je overenie technológie nízko nákladovej fotogrametrie (diaľkovo pilotovaného leteckého systému) na snímkanie úseku lesnej cesty, ktoré je možné aj pod clonou lesného porastu. Týmto spôsobom môžeme získať veľmi rýchlo a efektívne precízne údaje napr. pri havarijných situáciách, pri monitorovaní poškodenia ciest apod. Hlavnú úlohu pri spracovaní hrajú vlčovicové body, kde sme overili ich vhodnosť rozmiestnenia (optimálne po okrajoch vozovky a doplnujúce body aj stredom vozovky s rozstupom cca 10-15 m) čo viedlo k veľmi presným výsledkom transformácie (na úrovni do 3 cm polohovej a výškovej chyby). Rozmiestnenie vlčovicových bodov týmto spôsobom je nevyhnutné aj z dôvodu, že teleso cesty predstavuje relatívne úzku a dlhú líniu bodov, ktoré je z nízkym počtom vlčovicových bodov obťažné transformovať. Porovnanie dvoch technológií získania bodových mračien za účelom vyhodnotenia presnosti zachytenia povrchu vozovky lesnej cesty poukázalo na vysokú kvalitu oboch typov údajov. Rozdiel medzi digitálnymi modelmi terénu získaných z oboch typov bodových mračien (ZBGIS aj fotogrametria) bol v rozsahu strednej chyby od 3,5 do 5,3 cm. Takto získané výsledky sú v rámci presnosti samotnej technológie terestrického merania bodov prostredníctvom GNSS resp. totálnej stanice, pričom navyše poskytujú veľmi rýchly a efektívny spôsob získania údajov (údaje ZBGIS sú pre užívateľa prístupné online). Jedinou nevýhodou údajov leteckého laserového skenovania je ich aktuálnosť vzťahnutá k určitému obdobiu kedy boli vyhotovené (dynamika dopravy a meteorologických javov značne vplýva na zmeny povrchu vozovky). Za tým účelom sa javí fotogrametria s použitím diaľkovo pilotovaného leteckého systému ako vhodná technológia pre častejšie monitorovanie záujmových lokalít v menšom rozsahu. Z pohľadu presnosti poskytovaných výsledkov sú obe technológie relevantné pre akýkoľvek účel, či už z pohľadu plánovania opráv, projekčnej činnosti, mapovania cestnej siete pre lesnícke mapy a pod.

#### PodĎakovanie

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] Smreček, R., Sedliak, M. 2012. Lesná cestná sieť a účelové objekty – mapovanie a tvorba databázy. In Sborník Gis Ostrava 2012.
- [2] Tuček, J., Kardoš, M., Koreň, M., Smreček, R., 2013. Lesné cesty ako objekt lesníckeho tematického mapovania a súčasť informačných systémov. In Karto. listy. Zvolen. 2013. vol. 21, no. 1 60 -72 s.
- [3] Sačkov, I., Kardoš, M. 2014. Forest delineation based on LiDAR data and vertical accuracy of the terrain model in forest and non-forest area. *Annals of Forest Research*. vol. 57, no. 1, p. 119-136.
- [4] Ferenčík, M., Kardoš, M., Allman, M., Slatkovská, Z., 2019. Detection of forest road damage using mobile laser profilometry. *Computers and Electronics in Agriculture* 166, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105010>
- [5] Tománek, J., Volný, C., Klíč, P., 2010. Výskum súčasného stavu poručnosti sítě odvodních cest ve flyšovém území lesní správy Ostravice. In *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 2010, vol. 53, no. 1, 47-57 pp.
- [6] Klíč, P., Bránka, L., Žáček, J., 2010. Výskum struktury lesní dopravní sítě ve vybranem modelovém území. *Lesnícky časopis- Forestry Journal*. 2010, vol. 56, no.3, 295 -304 pp.
- [7] Wu, B., Yu, B., Yue, W., Shu, S., Tan, W., Hu, chunling, Huang, Y., Wu, J., Liu, H., 2013. A Voxel-Based Method for Automated Identification and Morphological Parameters Estimation of Individual Street Trees from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 5. <https://doi.org/10.3390/rs5020584>
- [8] Ferenčík, M., Kardoš, M., Slatkovská, Z., Allman, M., Messingerová, V., 2017. Application of Vhicle-borne Laser scannig for evaluation of damage of the forest roads (case study). In *Uzytkowanie maszyn rolniczych i leśnych badania naukowej dydaktyka* . Zakopane: 2017, s. 48.
- [9] Kardoš, M., Tuček, J., Chudý, F., Tomašík, J., Slatkovská, Z., 2017. Aplikácie laserového skenovania v lesníctve. *Slovenský geodet a kartograf (recenzovaný odborný časopis Komory geodetov a kartografov SR)*, Bratislava 2017, ročník XXII, č. 4, p. 11 – 17. ISSN-1335-4019.
- [10] Mathavan, S., Kamal, K., Rahman, M., 2015. A Review of Three-Dimensional Imaging Technologies for Pavement Distress Detection and Measurements. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 16, 2353–2362.



- [11] Kaartinen, H., Hyypä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., Hyypä, H., 2012. Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors* 12, 12814–12835. <https://doi.org/10.3390/s120912814>
- [12] Hruža, P., Mikita, T., Tyagur, N., Krejza, Z., Cibulka, M., Procházková, A., Patočka, Z., 2018. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing. *Remote Sensing* 10, 492. <https://doi.org/10.3390/rs10040492>
- [13] Wang, Jianhua, Qin, Q., Yang, X., Wang, Jun, Ye, X., Qin, X., 2014. Automated road extraction from multi-resolution images using spectral information and texture. Presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 533–536. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946477>
- [14] Ferraz, A., Mallet, C., Chehata, N., 2016. Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 112, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.002>
- [15] Najafi, A., Sobhani, H., Saeed, A., Makhdoum, M., Mohajer, M., 2008. Planning and Assessment of Alternative Forest Road and Skidding Networks. *Croatian Journal of Forest Engineering* (crojfe@sumfak.hr); Vol.29 No.1 29.
- [16] Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, 2022. Dostupné na internete: <https://www.geoportal.sk/sk/zbgis/lis-dmr/>



## EFFECT OF WING SURFACE CONTAMINATION ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

**Filip Gego**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Martin Bugaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

The article is focused on determining the influence of wing surface contamination on aerodynamic characteristics. This work describes the description of the BL 215 airfoil on which the measurements were made, the factors affecting the change in aerodynamic characteristics, the method of obtaining the values necessary to draw a conclusion, and finally the comparison and evaluation of the resulting values. Through the geometric functions in the Inventor program, a wing model with a laminar airfoil BL 215 was created, the aerodynamic characteristics of which were calculated in the Ansys Fluent program.

### Keywords

*laminar airfoil, contamination, CFD, aerodynamic characteristics, simulations*

### 1. Úvod

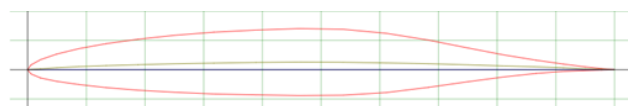
Účelom tohto článku je zhrnúť dosiahnuté výsledky bakalárskej práce ktorej účelom je určiť vplyv rôznych druhov kontaminácie na aerodynamické charakteristiky laminárneho profilu. Charakteristiky boli zisťované sériou simulácií v CFD programe Ansys Fluent. V tejto práci sme sa zamerali na pozorovanie súčiniteľa vzlaku a odporu pri rôznych uhloch nábehu. Výsledné hodnoty boli spracované do grafov, ktoré sú dostupné v nižšej časti tohto článku.

### 2. Laminárny profil BL215

Pre pozorovanie vplyvov kontaminácie bol zvolený laminárny profil BL 215.

Rozmery krídla:

- Hĺbka profilu: 170mm
- Šírka krídla: 320mm
- Maximálna hrúbka: 11,4% pri 46,3% tetivy
- Maximálne prehnutie: 1,3% pri 46,3% tetivy



Obrázok 1 - Laminárny profil BL 215 [1]

Laminárny profil využíva svojim dizajnom na väčšinej časti svojho povrchu laminárne prúdenie aby sa predišlo vytváraniu nežiadúceho odporu. Keďže laminárne prúdenie vytvára menší odpor ako turbulentné prúdenie. S turbulentným prúdením rastie aj hrúbka medznej vrstvy a tým sa navyšuje odpor.

### 3. Kontaminácia

Kontaminácia je narušenie pôvodného tvaru krídla cudzím predmetom. Počas prevádzky môže krídlo letúňa za určitých podmienok podliehať určitej kontaminácii jeho povrchu. Jeho kontaminácia nie je priaznivým javom práve kvôli zhoršeniu aerodynamických vlastností krídla.

V našom výskume boli skúmané vplyvy znečistenia krídla s laminárnym profilom na aerodynamické charakteristiky. V leteckej prevádzke sa stretne s viacerými druhmi znečistenia krídla. Najčastejšie ide o kontamináciu:

- námrazou
- poškodenie povrchovej úpravy krídla
- vodou
- tenkou vrstvou prachu
- hmyzom

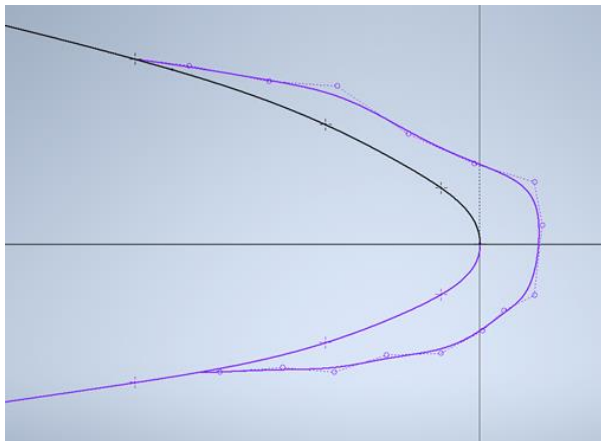
#### 3.1. Kontaminácia námrazou

Námraza je zrnitá usadenina, ktorá sa skladá z ľadových kryštálikov a zrníek. Vzniká pri teplote od 0 do -10°C a jej hustota sa pohybuje od 200 do 500kg/m<sup>3</sup>. Námraza sa usadzuje na povrchu letúňa počas státia na letisku alebo taktiež aj vo fáze letu. Nebezpečenstvo predstavuje najmä narušením aerodynamických vlastností nosných plôch. Nepriaznivo ovplyvňuje letové vlastnosti a riaditeľnosť letúňa zvýšením hmotnosti a odporu, znížením súčiniteľa vzlaku a mení rozloženie pôsobiacich síl. Tvorí sa na nábežných hranách krídel ale môže pokryť aj celú plochu krídel s tým, že hustota znečistenia je rozsiahlejšia na nábežnej ako na odtokovej hrane[3]. Na jej bezpečné odstránenie sa používajú systémy odstraňovania námrazy.

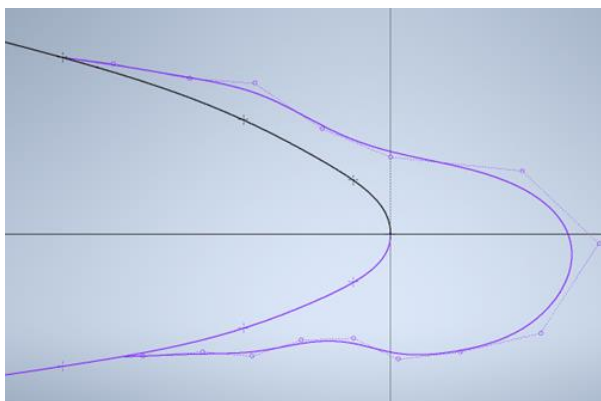
V reálnej prevádzke sa môžeme stretnúť s rôznymi tvarmi námrazy ako napríklad:

- Profilová
- Žliabková
- Nepravidelná

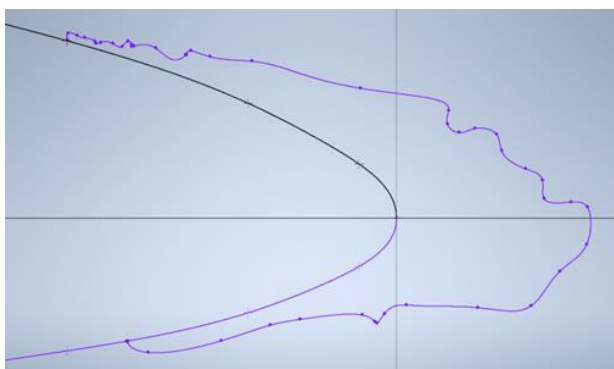
V našej práci boli sledované vplyvy viacerých druhov námrazy. Tvary námraz boli vymodelované podľa predlohy a bola umiestnená prevažne na nábežnej hrane. Ide o 4 typy námrazy



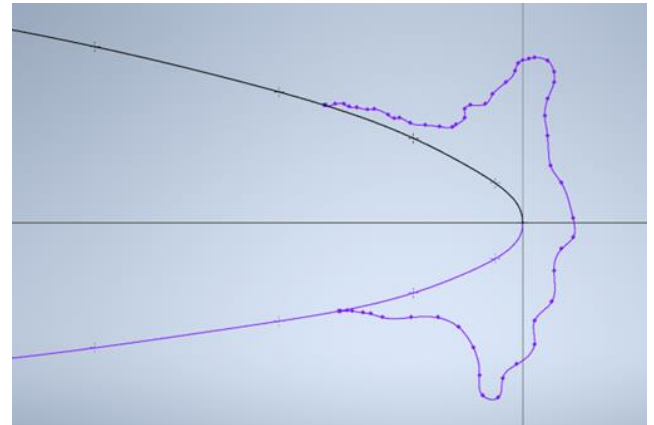
Obrázok 2 - Profil námrazy typu A



Obrázok 3 - Profil námrazy typu B



Obrázok 4 - Profil námrazy typu C



Obrázok 5 - Profil námrazy typu D

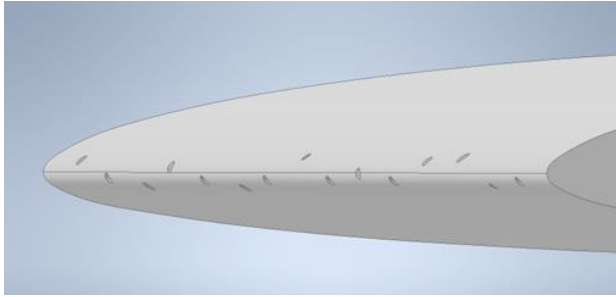
Všetky druhy skúmanej námrazy boli namodelovaná v programe Autodesk Inventor cez geometrické a 3D funkcie programu. Zvolené námrazy dosahovali hrúbku 1,5 - 5mm. Model laminárneho profilu s námrazou bol neskôr použitý na simuláciu v programe Ansys Fluent, kde prebehlo zisťovanie aerodynamických charakteristík.

### 3.2. Poškodenie

Do úvahy musíme brať aj poškodenie, ako určitý spôsob kontaminácie. K poškodeniu môže dôjsť veľmi jednoducho pri strete s cudzím predmetom, najčastejšie s vtákom alebo malými kamienkami, čo je v letectve bežným javom. Teda ide o narušenie pôvodného tvaru profilu cudzím predmetom. Aj minimálnym narušením pôvodného tvaru profilu môže dôjsť k zmene aerodynamických charakteristík. Deformáciou nábežnej hrany profilu sa mení charakter prúdenia. To má samozrejme dopad na rozloženie pôsobiacich síl, odpor a vztlak.

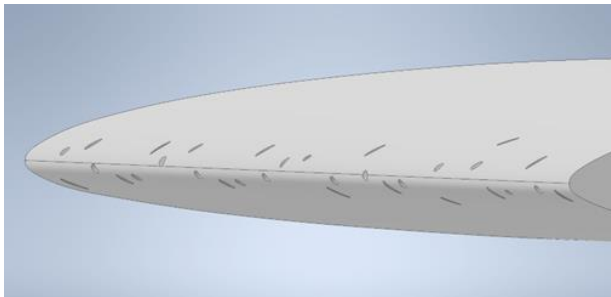
Poškodenie profilu BL215 bolo zvolené na čisto náhodných miestach. Ide iba o povrchové poškodenie spôsobené malými kamienkami zo vzletovej dráhy. Je to druh poškodenia nábežnej hrany s ktorým sa stretneme v bežnej prevádzke lietadiel. Modelovanie poškodenia prebehlo v programe Autodesk Inventor pomocou geometrických funkcií, ktoré program v študentskej verzii ponúkal. Boli zvolené jamky pravidelného tvaru najmä kvôli následnej simulácii v programe Ansys Fluent. Ak by bolo poškodenie zložené zo zložitých tvarov, limitovaný počet buniek siete programu CFD by nemusel stačiť pre potrebnú kvalitu výsledkov.

V tejto práci boli skúmané vplyvy dvoch poškodení, ktoré sa od seba líšia v intenzite poškodenia. Na menej intenzívnom poškodení (typ A) bolo vymodelovaných 10 jamiek kruhového tvaru s rozmermi od 0,6 do 1mm



Obrázok 6 - Poškodenie Typ A

Pri intenzívnejšom poškodení (typ B) ide o 20 jamiek v rozmedzí 0,5 do 0,9mm s elipsoidným a kruhovým tvarom.



Obrázok 7 - Poškodenie Typ B

### 3.3. Kontaminácia vodou

Kontaminácia tenkou vrstvou vody je bežným javom v leteckej prevádzke pri nevhodných meteorologických podmienkach ako je dážď. Vplyvy kontaminácie tohto druhu neboli odsledované v našej práci kvôli obtiažnemu namodelovaniu tohto javu.

### 3.4. Kontaminácia prachom

V prevádzke sa stretávame aj s takýmto druhom kontaminácie. Avšak má minimálny vplyv pre aerodynamické charakteristiky. Obdobný problém so sieťou sa nachádza aj pri tomto druhu kontaminácie. Kontúry neboli vykreslené v dostatočnom rozlíšení a teda model bol pre ďalšie výpočty nevhodný.

### 3.5. Kontaminácia hmyzom

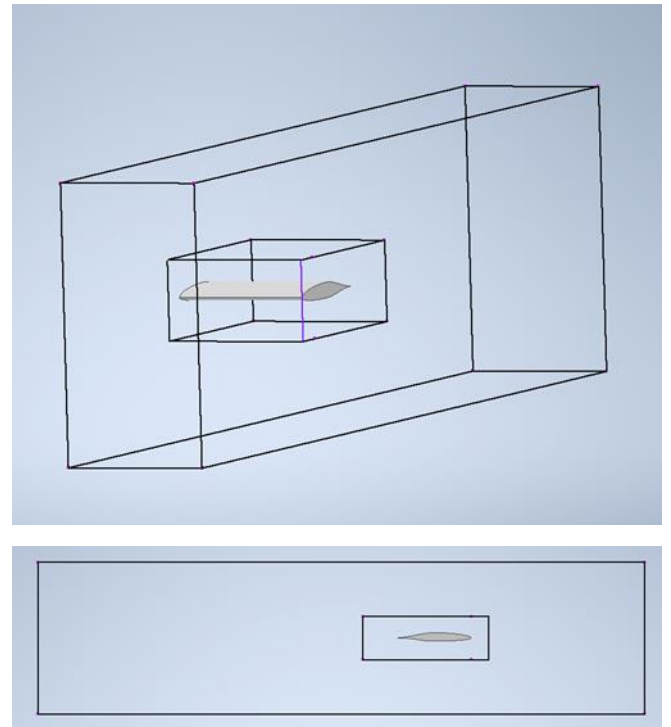
Znečistenie povrchu krídla hmyzom je pri prevádzke lietadiel bežným javom, ktorému sa nedá predísť. Aj to najmenšie znečistenie pri krídlach s laminárnym profilom môže zohrať veľkú úlohu pri udržaní laminárneho prúdenia. Negatívnym dôsledkom tohto typu znečistenia je rozrušenie laminárneho prúdenia na nábežnej hrane a to priamo ovplyvňuje prúdenie okolo celého profilu. Teda prúdenie okolo profilu sa stáva turbulentným a tým sa zvyšuje trecí odpor. Samozrejme záleží na hustote znečistenia nábežnej hrany hmyzom. Na odstránenie tohto typu kontaminácie sú používané čističe nábežných hrán.

Vplyv tohto druhu kontaminácie nemohol byť otestovaný, kvôli limitáciám na počet buniek zo strany študentskej licencie program Ansys Fluent. Pri použití siete s maximálnym počtom povolených buniek, kontúry tohto znečistenia neboli v dostatočnom rozlíšení, tak ako aj v predošlom prípade.

## 4. CFD

### 4.1. Geometria

Rozmery skúmaného krídla a domény boli prispôbené pre rozmery testovacej sekcie univerzitného aerodynamického tunela. Rozmery testovacej sekcie tunela sú prispôbené na tvar ležiaceho kvádra so štvorcovým vstupom s rozmermi 600mm x 350mm x 350mm [2]. Skúmané krídlo s rozmermi v hĺbke profilu 170mm a s rozpätím krídla 160mm bolo navrhnuté pre neskoršie skúmanie v aerodynamickom tuneli. Stred otáčania bol zvolený v  $\frac{1}{4}$  tetivy, v aerodynamickom strede krídla. V programe Ansys Fluent bola vytvorená doména s rozmermi 1400mm x 350mm x 175mm. Vytvorená doména vhodná pre meranie aerodynamických charakteristik zvoleného krídla sa líši v dĺžke od testovacej sekcie kvôli potrebe umiestnenia okrajových podmienok vstupu a výstupu v dostatočnej vzdialenosti od krídla, pre zabránenie vzájomnej interferencie krídla so vstupom a výstupom. Doména je zobrazená na obr. 8 (väčší kváder).

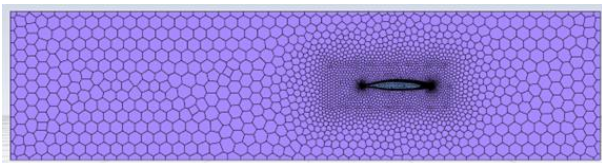


Obrázok 8 - Doména

### 4.2. Parametre siete

Sieť samotného krídla bola zjemnená primárne na nábežnej hrane z dôvodu významného vplyvu tejto časti geometrie na celkové prúdenie a taktiež z dôvodu prítomnosti kontaminácie v tejto oblasti. Okrem nábežnej hrany je oproti zvyšku krídla zjemnená aj vrchná časť krídla. Zjemnená bola aj oblasť v blízkosti okolia krídla, nazývaná v anglosaskej terminológii BOI (viditeľná na obr. 8 ako menší kváder), z dôvodu výskytu vyšších tlakových a rýchlostných gradientov. Oblasť v okolí krídla slúži aj na zachytenie prúdenia v úplave tvoreného za krídlom. Rozmery siete na krídle sa pohybujú od 0,6 mm do 4,5 mm. Bunky v oblasti zjemnenia majú veľkosť maximálne 7 mm. Bunky vo zvyšku domény sú limitované na hodnotu maximálne 30 mm. Pre dobré zachytenie medznej vrstvy sa používajú v blízkosti

povrchov stien takzvané prizmatické vrstvy. Veľkosť a počet prizmatických vrstiev sa odvíja od charakteristiky medznej vrstvy v danej oblasti. Prizmatické vrstvy by mali pokrývať celú medznú vrstvu a zároveň by mali mať dostatočné rozlíšenie na zachytenie rýchlostných gradientov v medznej vrstve. Výška prvej prizmatickej vrstvy sa volí na základe hodnoty  $y^+$ , ktorá sa pre nami zvolený turbulentný model  $k-\omega$  SST odporúča, aby bola menšia než 5. Z tohto dôvodu bola veľkosť prvej prizmatickej vrstvy stanovená na hodnotu 0,05 mm, pričom celkovo je prizmatických vrstiev 15, s rastom 1,25 na vrstvu. Z dôvodu obmedzenia celkového počtu buniek študentskou licenciou, boli prizmatické vrstvy aplikované len na krídlo, trenie na stenách domény bolo zanedbané. Typ použitých buniek je poly-hexcore. Tento typ ponúka najlepší pomer medzi kvalitou výpočtu a výpočtovou náročnosťou, taktiež je odporúčaná spoločnosťou Ansys. Výpočtová sieť v ploche symetrie je vyobrazená na obr. 9.



Obrázok 9 - Sieť

#### 4.3. Nastavenia simulácie

Na vstupe do domény je aplikovaná podmienka „velocity inlet“ s rýchlosťou 55 km/h. Na výstupe z domény je definovaná podmienka „pressure outlet“ 0 atmosferického tlaku. Na styčnej stene je aplikovaná podmienka symetrie a na zvyšných stenách domény je definované nulové trenie.

Bol použitý turbulentný model  $k-\omega$  SST. Model  $k-\omega$  SST kombinuje výhody základných modelov  $k-\epsilon$  a  $k-\omega$ , tak že využíva  $k-\epsilon$  v oblasti voľného prúdenia a model  $k-\omega$  v oblasti blízko stien. Model  $k-\omega$  SST poskytuje lepšiu predpoveď separácie prúdenia ako väčšina modelov RANS a tiež zodpovedá za jeho dobré správanie pri nepriaznivých tlakových gradientoch. Je to najbežnejšie používaný model v priemysle vzhľadom na jeho vysoký pomer presnosti a nákladov. Ponúka presné výsledky pri prípadoch s výskytom nepriaznivých tlakových gradientov [4].

Počet iterácií použitých pri simuláciách bolo v rozmedzí od 300 do 500. Na niektoré simulácie pri kritických uhloch nábehu bolo nutné použiť vyšší počet iterácií, v niektorých prípadoch až 1000.

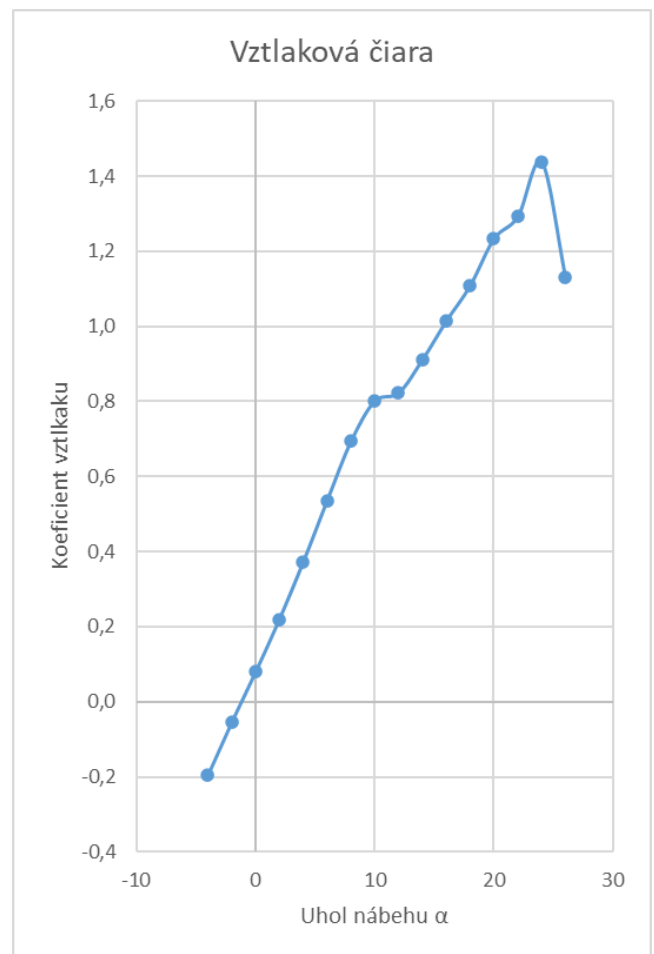
#### 4.4. Nedostatky CFD

Čo sa týka nedostatkov CFD programu pre naše konkrétne merania, ktoré v ňom boli vykonané, ide najmä o:

- Nedostatočnú simuláciu laminárnej medznej vrstvy
- Nižšia presnosť výsledkov v porovnaní s aerodynamickým tunelom
- Nutná určitá výpočtová kapacita
- Limitácie pri tvorbe siete študentskou licenciou

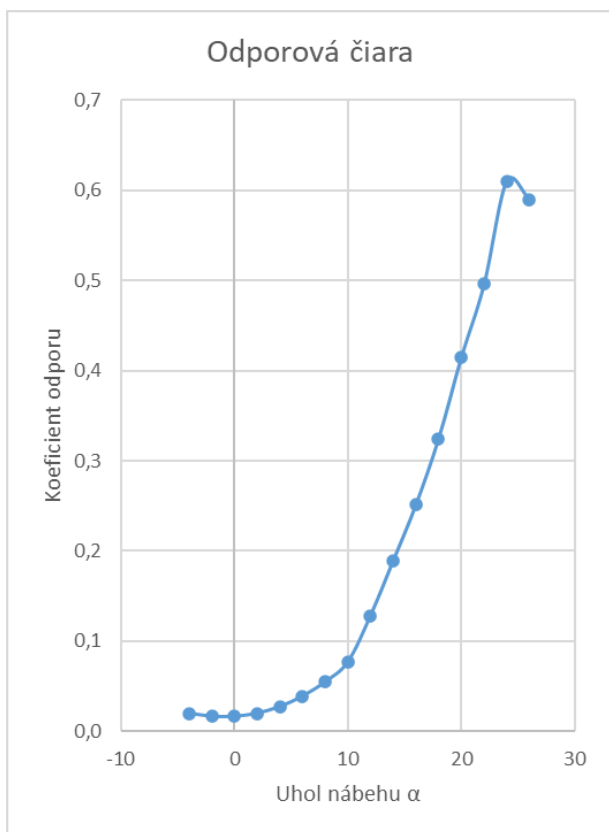
## 5. Aerodynamické charakteristiky

Aerodynamické charakteristiky boli skúmané v programe Ansys Fluent súborom viacerých simulácií. Na každom profile bolo vykonaných 16 simulácií v rozmedzí  $\alpha = -4$  až  $26^\circ$ .



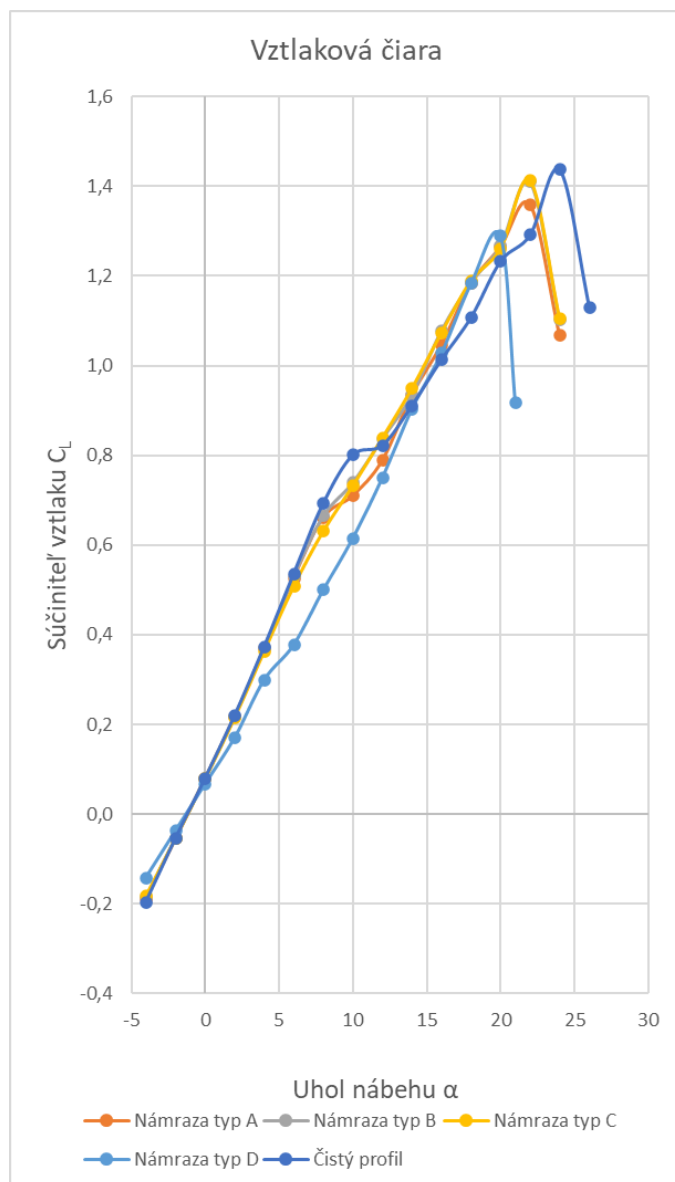
Obrázok 10 - Vztlaková čiara čistého profilu

Kvôli nízkej štíhlosti krídla môžeme spozorovať vysoký kritický uhol nábehu pri  $\alpha=24^\circ$ . Pri nízkej štíhlosti krídla sa výraznejšie prejavujú účinky postranných vírov a je znížený gradient rastu vztlakovej čiary. K poklesu koeficientu vztlaku pri kritickom uhle nábehu  $\alpha=24^\circ$  dôjde vďaka kompletnému odtrhnutiu prúdenia od nábežnej hrany.



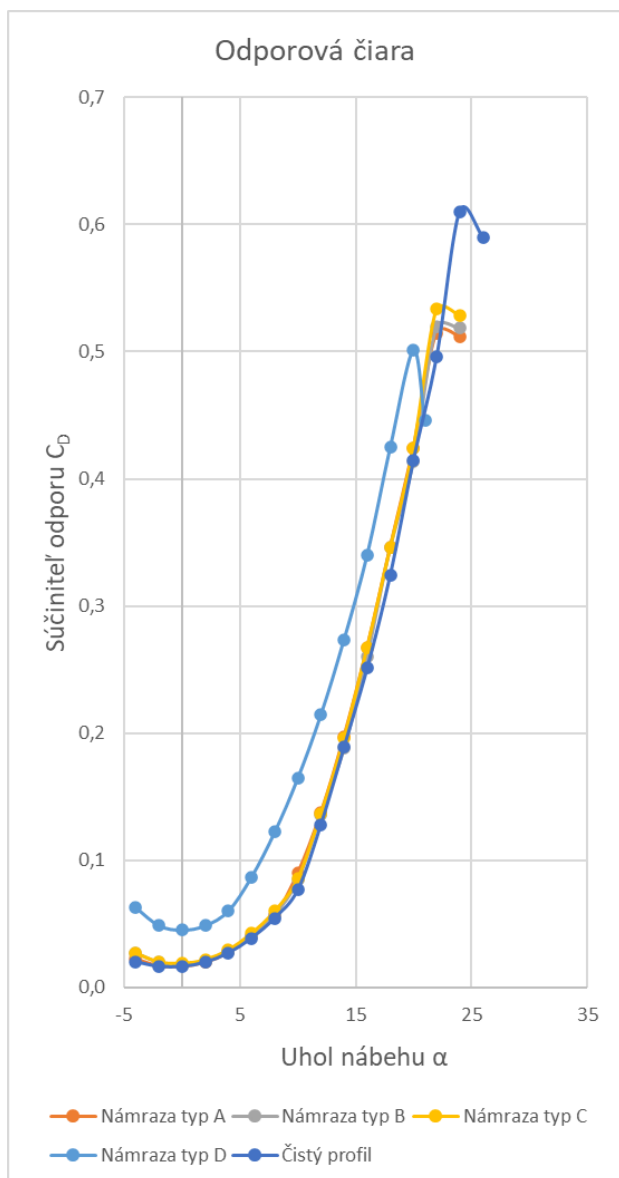
Obrázok 11 - Odporová čiara čistého profilu

Rýchlosť zvyšovania koeficientu odporu rastie so zvyšujúcim uhlom nábehu až do maxima. Pri kompletom odtrhnutí prúdu pri dosiahnutí kritického uhla nábehu  $\alpha=24^\circ$  dochádza k zníženiu koeficientu odporu. Maximum koeficientu odporu sa nachádza pri  $\alpha=24^\circ$  a minimum koeficientu odporu sa nachádza pri  $\alpha=0^\circ$ .



Obrázok 12 - Porovnanie vztlakových čiar profilov s námrazou s čistým profilom

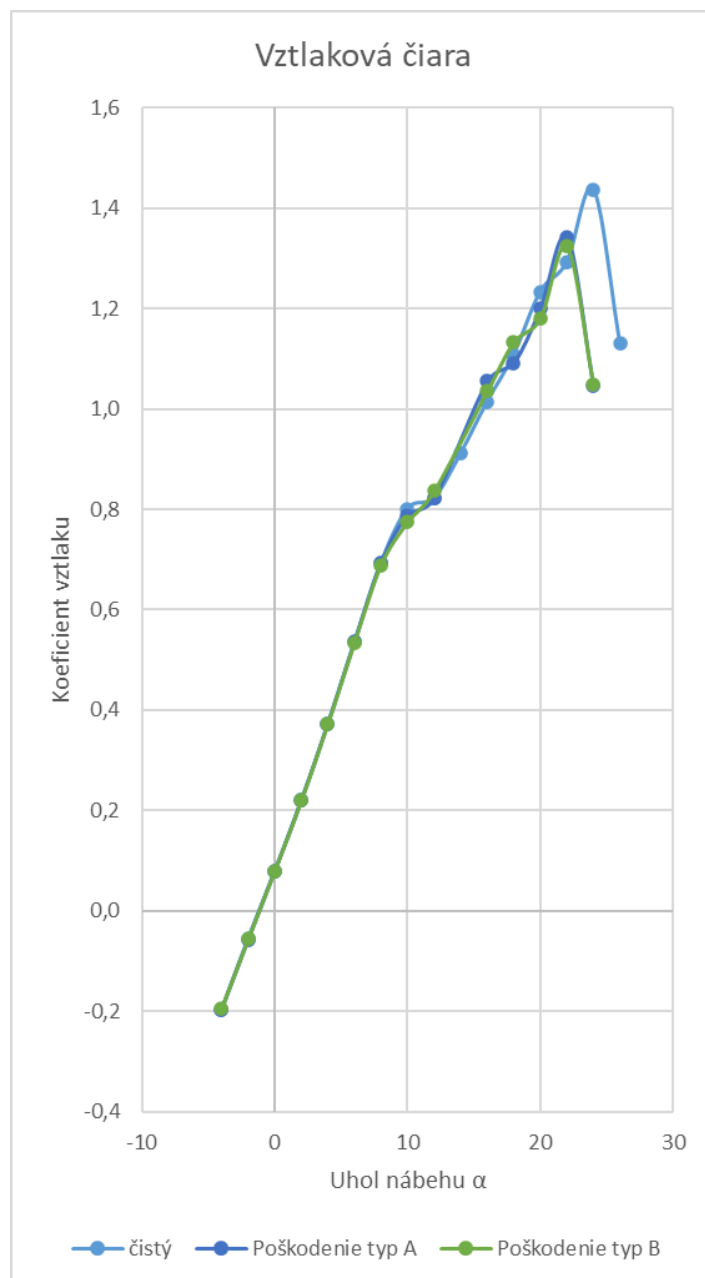
Z obr. 12 môžeme vidieť, že námraza typu B a typu C vyšla takmer identicky vo vyšších uhloch nábehu. Možný dôvod, prečo väčšie typy námrazy vykazujú väčší súčiniteľ vztlaku je preto, lebo predlžujú nábežnú hranu. Priebeh vztlakových čiar je obdobný pri všetkých druhoch profilov námrazy typu A-C. Najväčší vplyv na vztlakovej čiare sa preukázal pre námrazu typu D, ktorého  $\alpha_{krit} = 20^\circ$  je znížený o  $2^\circ$  pri porovnaní s ostatnými kontaminovanými námrazami. Pri porovnaní s čistým krídlom je tento rozdiel až  $4^\circ$ . Najvýraznejší rozdiel pri generovaní vztlaku sa nachádza medzi  $\alpha 5^\circ-12^\circ$ .



Obrázok 13 - Porovnanie odporových čiar profilov s námrazou s čistým profilom

Z obr. 13 vyplýva, že súčiniteľ odporu rastie exponenciálne až po  $\alpha_{krit} = 22^\circ$ . Maximum súčiniteľa odporu profilov s námrazou typu A-C sa nachádza pri  $\alpha = 22^\circ$ . Najväčší vplyv na odporovej čiare sa preukázal pre typ D, ktorý generuje výrazne vyššie hodnoty odporu na celej škále uhlov nábehu. Maximálny súčiniteľ odporu pre typ D sa nachádza pri  $\alpha_{krit} = 20^\circ$ . Minimum súčiniteľa odporu sa nachádza pre všetky druhy námrazy pri  $\alpha = 0^\circ$ .

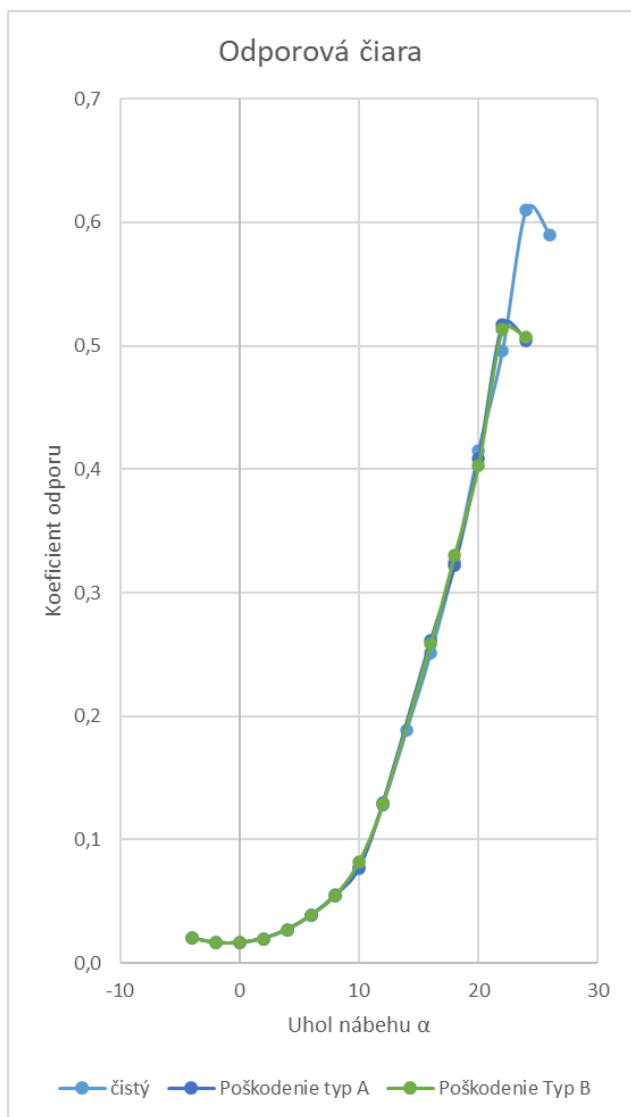
Odchýlka vztlaku námrazou znečistených profilov sa líši od čistého profilu v rozmedzí od -10 do +10%. Odchýlka pri odpore sa pohybuje v rozmedzí od 5 do 15% v závislosti od uhle nábehu.



Obrázok 14 - Porovnanie vztlakových čiar poškodených profilov s čistým profilom

Rýchlosť zvyšovania koeficientu vztlaku rastie so zvyšujúcim uhlom nábehu až do maxima. Pri kompletom odtrhnutí prúdu pri dosiahnutí kritického uhla nábehu profilov s poškodením  $\alpha=22^\circ$  dochádza k zníženiu koeficientu vztlaku. Maximum koeficientu vztlaku poškodených profilov sa nachádza pri  $\alpha=22^\circ$ .

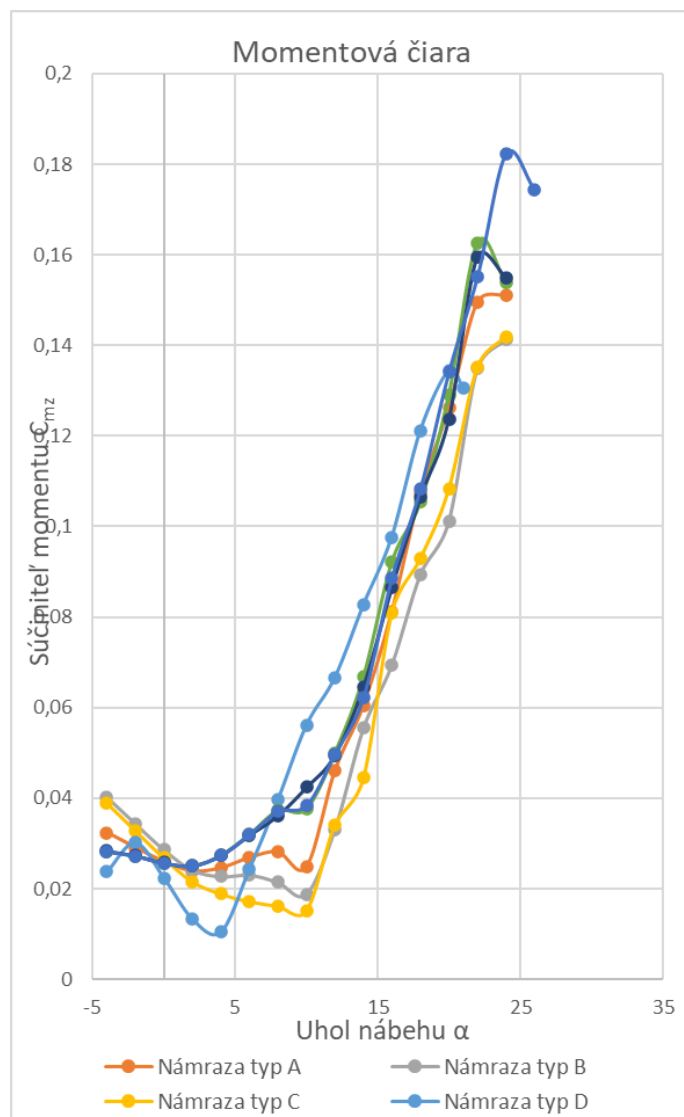




Obrázok 15 - Porovnanie odporových čiar poškodených profilov s čistým profilom

Koefficient odporu rastie exponenciálne až po kritický uhol nábehu  $\alpha=22^\circ$ . Maximum koefficientu odporu profilov s poškodením sa nachádza pri  $\alpha=22^\circ$  a minimum koefficientu odporu sa nachádza pre oba druhy poškodenia pri  $\alpha=0^\circ$ .

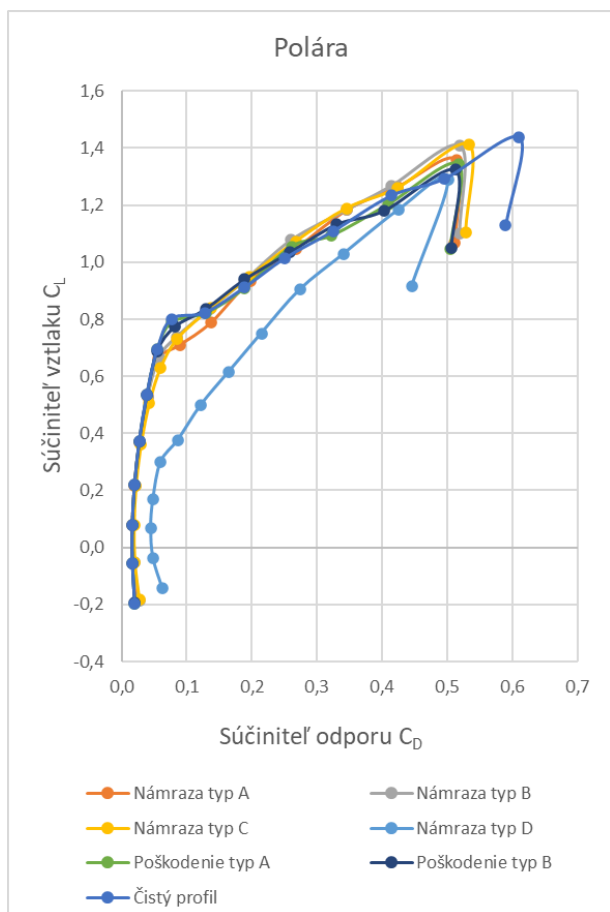
Odchýlka vztaku poškodených profilov sa líši od čistého profilu v rozmedzí od -5 do +3%. Odchýlka pri odpore sa pohybuje do 5% v závislosti od uhla nábehu.



Obrázok 16 - Momentová čiara

Na grafe znázornenom na obr. 16 je možné sledovať priebeh súčiniteľa momentu  $C_{mz}$  k jednotlivým uhlom nábehu  $\alpha$  všetkých skúmaných krídel. Zvyšujúce sa hodnoty súčiniteľa momentu so zvyšujúcim uhlom nábehu sú odôvodnené posunutím pôsobiska vztaku smerom dopredu k nábežnej hrane. Tým bude výsledná aerodynamická sila pôsobiť na väčšom ramene od vzťažného bodu otáčania, ktorý je umiestnený v  $\frac{1}{4}$  tetivy. Výrazne sa líši námraza typu D vo všetkých uhlom nábehu. Ostatné druhy námrazy (typ A-C) vykazujú menší súčiniteľ momentu v intervale od  $0^\circ$  do  $15^\circ$  uhla nábehu ako krídlo s čistým profilom. Poškodenie nemá výrazný vplyv na súčiniteľ momentu vo vztahu k čistému profilu. Napriek tomu, že bol bod otáčania zvolený v  $\frac{1}{4}$  tetivy teda  $x = 0,0425m$ . Môžeme pozorovať, že momenty k tomuto bodu nie sú konštantné. Zdôvodnené je to tým, že aerodynamický stred, ku ktorému je súčiniteľ momentu konštantný, je posunutý dozadu smerom k odtokovej hrane, kvôli geometrickým vlastnostiam profilu BL 215.





Obrázok 17 - Poláry skúmaných profilov

Poláry znázornené na obr. 17 vyobrazujú závislosť súčiniteľa vztlaku na súčiniteli odporu. Najvýraznejší druh kontaminácie, ktorý vplyva na tieto dva už spomenuté súčinitele je námraza typu D. Vykazuje najmenšiu hodnotu maximálneho pomeru súčiniteľov vztlaku a odporu. Spočiatku je viditeľné, že tento druh námrazy produkuje vo všetkých hodnotách súčiniteľa vztlaku výrazne vyššie hodnoty súčiniteľa odporu. Všetky ostatné druhy kontaminácie, či už poškodenia, alebo námrazy (typu A-C) nevykazujú veľký rozdiel v rozmedzí malých hodnôt súčiniteľa odporu. Výraznejšie rozdiely sa začínajú objavovať od  $CL = 0,6$ .

## 6. Zaver

Zámerom tejto práce bolo vyhodnotiť a určiť závažnosť vplyvov kontaminácie na aerodynamické charakteristiky. Na získanie potrebných údajov bolo nutné vykonať 106 simulácií pre 7 rôznych druhov kontaminácií. V programe CFD v ktorom prebehli simulácie boli vybrané vhodné nastavenia parametrov geometrie, siete a okrajových podmienok za účelom čo najpresnejších výsledkov.

Pri spracovaní výsledkov bola použitá komparačná metóda na určenie vplyvu kontaminácie na aerodynamické charakteristiky krídla. Vplyv všetkých druhov kontaminácie je vo výsledku preukázateľný. Z výsledkov vyplýva, že rozsah skúmaného poškodenia nemá výrazný vplyv na bezpečnosť v leteckej prevádzke. Môže vplývať minimálne na riaditeľnosť letúňa. Tento vplyv môže byť odstránený správnym vyvážením pomocou vyvažovacích plôch. Ako nebezpečným javom pre

leteckú prevádzku sa preukázala námraza. Jej všetky druhy vykázali výrazné zníženie kritického uhla nábehu, zníženie súčiniteľa vztlaku a zvýšenie súčiniteľa odporu v takmer všetkých uhloch nábehu. Najvýraznejší vplyv vykazuje námraza typu D v celom priebehu vztlakovej a odporovej čiary.

Z hľadiska relevantnosti výsledkov sa odporúča ich neskoršie overenie v reálnych podmienkach v aerodynamickom tuneli alebo dostupným programom Ansys Fluent v plnej licencií, kde bude možné použiť výrazne hustejšiu výpočtovú sieť a komplexnejší turbulentný model. Odporúčané overenia výsledkov sa vzťahujú na všetky skúmané modely krídel, predovšetkým pre modely s poškodením, pri ktorých je miera neistoty správnosti výsledkov vysoká.

Táto práca môže slúžiť pre ďalší výskum v oblasti skúmania vplyvu implementácie trecieho koeficientu v prípade námrazy a pre zvýšenie povedomia nebezpečenstva kontaminácie pri výcviku pilotov.

## PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky **KEGA 024ŽU-4/2023** s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu *Letecká doprava*".

## Referencie

- [1] P-51D TIP (BL215) AIRFOIL (p51dtip-il). Airfoil tools [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=p51dtip-il>
- [2] VEĽKÝ, Patrik a Pavol PECHO Systém merania aerodynamických síl v demonštračnom veternom tuneli [online]. In: . s. 4 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: [https://drepo.uniza.sk/bitstream/handle/hdluniza/149/1\\_0.26552\\_pas.Z.2020.1-227-230.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://drepo.uniza.sk/bitstream/handle/hdluniza/149/1_0.26552_pas.Z.2020.1-227-230.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [3] SWAYNE, Martin. How Ice Affects Your Wings, And Why It Leads To An Early Stall. *Boldmethod* [online]. 2022 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-aircraft-icing->
- [4] *K-Omega and K-Omega SST* [online]. 25.5.2021 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>

