



OPTIMALIZÁCIA LETOVÝCH TRATÍ S CIEĽOM ZNIŽOVANIA SPOTREBY PALIVA A EMISÍ

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

Frederik Chodelka
AirExplore
Krajná 29
821 04 Bratislava

Abstract

The main goal of this study outlines theoretical framework of air traffic routes with a particular focus on the Free Route Airspace (FRA) concept. In this paper we will examine the implementation and development of FRA within Europe, specific emphasis will be given on application of this concept in the Slovak Republic, as well as relevant national initiatives. The practical component presents a comparative analysis between conventional route planning and FRA based planning on theoretical basis. Methodology used in this paper evaluates the potential of FRA in fuel optimizing process. Preliminary findings show that even small reductions in fuel consumption can lead to a measurable positive impact on environmental sustainability.

Keywords

Airways, FRA, Free Route Airspace, optimalization, fuel efficiency

1. Úvod

Odvetvie leteckej dopravy patrí medzi najdynamickejšie sa rozvíjajúce odvetvia dopravy a od svojich počiatkov prešlo výrazným vývojom. Pôvodne bola letecká doprava využívaná najmä na prepravu zásielok, neskôr sa rozšírila o osobnú i nákladnú dopravu inú ako poštovú. Zvyšujúci dopyt po službách leteckej dopravy priniesol potrebu definovať pevné letové trate, ktoré by zabezpečovali bezpečnosť a plynulosť prevádzky. Tradičné trate boli viazané na pozemné rádiové zariadenia, neskôr boli nahradené trasami RNAV, ktoré využívajú satelitnú navigáciu.

Každoročný nárast leteckej prevádzky nad Európou, ako aj nad inými časťami sveta, hlavne počas letnej sezóny, prináša so sebou tlak na kapacitu vzdušného priestoru. Pevne stanovené trate nedokážu efektívne zvládnuť nárast prevádzky a preto bolo potrebné implementovať nové riešenie, akým je napríklad koncept voľných letových tratí FRA (Free Route Airspace). Tento koncept umožňuje lietadlám plánovať si trasu voľne, medzi definovanými vstupnými a výstupnými bodmi jednotlivých FIR regiónov, využívajúcich tento koncept. V Európe je tento koncept vo veľkej miere implementovaný, no v regiónoch na blízkom východe jeho uplatnenie absentuje.

Cieľom vedeckého článku je analyzovať prínosy konceptu FRA z hľadiska úspory paliva a zníženia emisií skleníkových plynov, a poukázať na potrebu implementácie tohoto konceptu aj mimo európskeho priestoru.

2. Letecké trate – história a súčasnosť

V počiatkoch letectva nebola potreba riadenia letovej prevádzky, lety boli zriedkavé a z hľadiska využitia kapacity vzdušného priestoru nenáročné. V 20. rokoch 20. storočia začali vznikať prvé letecké spoločnosti, ich existencia bola však krátkodobá. Počas prvej svetovej vojny sa lietadla stali rýchlejšími a spoľahlivejšími a do tohoto obdobia datujeme aj

potrebu organizácie leteckej dopravy. Vojnové obdobie prinieslo pokrok v technike, navigácií aj vo výcviku posádok. V tomto období začali vznikať prvé definované letové trate a kontrolné veže. Navigácia bola spočiatku vizuálna, porovnávaním známych navigačných prvkov na zemi a na mape, využíval sa aj princíp dead reckoning – určovanie polohy na základe smeru a rýchlosti. Zásadný pokrok nastal po druhej svetovej vojne zavedením rádiomajákov VOR, ktoré umožňovali definovanie tratí na základe kurzov. Od 60. rokov minulého storočia sa všesmerové rádiomajáky VOR stali základom pre navigáciu a letové trate sa začali postupne a systematicky budovať. [1] [2] [3]

Moderné letové trate nazývané ATS routes slúžia na usmerňovaní toku letovej prevádzky, pre potreby riadenia letovej prevádzky a pre poskytovanie letových prevádzkových služieb. Každá takáto trať je definovaná kurzom, dĺžkou a minimálnou výškou, tieto údaje sú publikované v Letovej informačnej príručke (AIP) daného štátu. Lety podľa pravidiel IFR (Instrument Flight Rules) začínajú SID (Standard Instrument Departure) odletovou traťou, pokračujú cez en-route segment až po STAR (Standard Terminal Arrival Route) príletovú trať na letisko priletu. Každá letová trať je definovaná preponou, číslom a príponou. Vysvetlenie prepony môžeme vidieť v tabuľke číslo 1, prípona pri označovaní sa využíva na identifikovanie poskytovaných služieb a úrovne výkonnosti potrebnej pre vykonanie letu po takejto trati. Najčastejšie sa ako prípony využívajú písmena F a G, kde F sa používa pre označenie trate, kde na celej jej dĺžke alebo jej časti je poskytovaná iba poradenská služba. (advisory service). Písmeno G sa používa na označenie letovej cesty na ktorej sa v celom jej rozsahu alebo na jej časti využíva letová informačná služba FIS (flight information service).

Systém letových tratí v SR je naviazaný na okolité krajiny, pričom niektoré z nich už využívajú koncept FRA. Každá trať má publikované hodnoty ako MEA (minimálna výška), MAA

(maximálna výška), MTCA (minimálna výška nad terénom) a iné, čo umožňuje bezpečný a efektívny let. [4] [5] [6]

	REGIONÁLNA TRATĚ	RNAV TRATĚ
A, B, G, R	áno	nie
L, M, N, P	áno	áno
H, J, V, W	nie	nie
Q, T, Y, Z	nie	áno

Tabuľka 7 Predpony pre označovanie letových tratí

3. Typy priletových a odletových tratí

Priletové a odletové trate slúžia na zabezpečenie bezpečnej, plynulej a efektívnej prevádzky lietadiel v okolí letísk. Návrh takýchto tratí musí byť v súlade s bezpečnostnými štandardami, berúc v úvahu okolitý terén, množstvo prevádzky na danom letisku, typ lietadiel využívajúci letisko či dostupné navigačné zariadenia. V súčasnosti je veľký dôraz pri konštrukcii takýchto tratí kladený na hlukové obmedzenie, nakoľko sa veľa letísk nachádza v tesnej blízkosti zásídených oblastí.

Odletové trate SID (Standard Instrument Departures) slúžia na vedie odlietajúcich lietadiel z dráhy vzletu až k prvému bodu letovej trasy. Delia sa na konvenčné trate, využívajúce zariadenia ako VOR alebo NDB a RNAV trate, využívajúce GPS signál. Konvenčné trate vyžadujú správne naladenia palubných prístrojov, orientáciu podľa kurzov, radiálov a vzdialeností od pozemných rádionavigačných staníc. RNAV trate využívajú body definované zemepisnými súradnicami, zadané do palubných počítačov. [7] [8] [9]

Priletové trate STAR (Standard Terminal Arrival Route) slúžia na bezpečné vedenie lietadiel z en-route segmentu až po bod počiatočného priblíženia. Rovnako ako SID aj STAR existujú vo forme konvenčných tratí alebo RNAV tratí, navyše pri STAR rozlišujeme otvorené a uzavreté trate. Uzavreté priletové trate sú trate, ktoré začínajú na rádionavigačnom zariadení alebo hlásnom bode a končia v bode FAF (final approach fix), bod konečného priblíženia, celá procedúra je tak neprerušovaná a lietadlo je z letovej cesty dovedené priamo do bodu konečného priblíženia. Otvorená priletová trať je trať, ktorá začína na rádionavigačnom zariadení alebo hlásnom bode a končí na bode, ktorý sa nachádza po vetre dráhy v používaní. Po tomto bode pilot pokračuje posledným kurzom, po ktorom je očakávané radarové navádzanie riadiacim letovej prevádzky do úseku konečného priblíženia. [8]

Na záver existujú špecifické prevádzkové postupy kedy nie je definovaná ani priletová ani odletová trať. Príkladom je egyptské letisko Mersa Matruh (HEMM), kde sú odlety aj prílety vykonávané spravidla pomocou radarového navádzania alebo tzv. vektorovania na priblíženie.

4. Typy priblížení na pristátie

Typy priblížení na pristátie závisia predovšetkým od aktuálnych meteorologických podmienok a podľa toho či sa letu vykonáva podľa pravidiel za viditeľnosti zeme VRF (Visual Flight Rules) alebo podľa pravidiel podľa prístrojov IFR (Instrument Flight

Rules). Základné kategórie priblížení sú následne dve, a to vizuálne priblíženie a prístrojové priblíženie.

Vizuálne priblíženie je typ priblíženia, ktoré sa vykonáva za priaznivých meteorologických podmienok a podľa VFR pravidiel. Pilot má počas celého manévru vizuálny kontakt so zemou a nepotrebuje používať žiadne navigačné zariadenia. Vizuálne priblíženie môže byť priame alebo v podobe letového okruhu (circle to land), čo je časté najmä na menších letiskách.

Prístrojové priblíženie je typ priblíženia, ktoré sa používa za zhoršených meteorologických podmienok, bez vizuálneho kontaktu so zemou. Let je vykonávaný podľa pravidiel IFR, pričom posádka sa spolieha na palubné a pozemné navigačné systémy. Prístrojové priblíženia sa delia na:

- **2D priblíženia** – poskytuje len informácie o horizontálnej polohe. Vertikálna poloha sa určuje na základe vopred definovaných bodov (fixov) a tabuliek. Patria sem typy ako VOR, NDB, LOC a RNAV. Vzhľadom na obmedzenú možnosť okamžitej korekcie vertikálnych odchýlok ide o menej presnú metódu priblíženia v porovnaní s presnými priblíženiami, ktoré poskytujú nepretržité údaje o vertikálnej aj horizontálnej polohe. Takéto priblíženie zvyšuje pracovnú záťaž posádky a vyžaduje väčšiu mieru situačného povedomia.
- **3D priblíženia** – poskytuje kontinuálne informácie o horizontálnom aj vertikálnom navádzaní. Piloti môžu plynulo korigovať smer aj výšku letu. Medzi tieto typy patrí ILS, GBAS, MLS a PAR. Presné priblíženia sa ďalej delia na tri kategórie podľa výšky rozhodnutia (DH) a dohľadnosti (RVR):
 - Kategória I: DH \geq 200 ft, RVR \geq 550 m
 - Kategória II: DH 100–199 ft, RVR \geq 300 m
 - Kategória III: DH < 100 ft, RVR < 300 m

Výška rozhodnutia je výška, v ktorej musí posádka buď vizuálne identifikovať dráhu a pokračovať v priblížení, alebo zahájiť nezdarené priblíženie. [10] [11] [12] [13]

5. Free Route Airspace

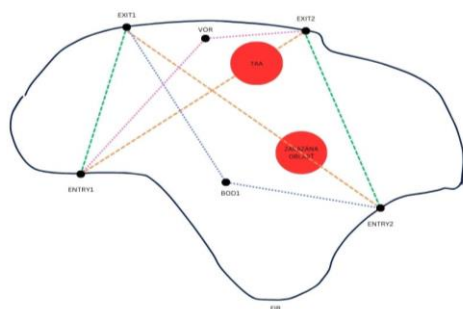
Letecká doprava zaznamenáva dlhodobý rastúci trend, čo kladie vysoké nároky na kapacitu vzdušného priestoru a jeho efektívne riadenie. Pre uľahčenie plánovania, zníženie nákladov a zvýšenie efektivity prevádzky bol v Európe zavedený koncept Free Route Airspace (FRA) – voľného vzdušného priestoru. Ten umožňuje lietadlám plánovať trasy nezávisle od tradičných, pevne stanovených letových ciest.

Koncept vznikol v roku 2007 ako iniciatíva niekoľkých štátov a poskytovateľov navigačných služieb. O rok neskôr bol začlenený do Flight Efficiency Planu, ktorý vypracovali IATA a Eurocontrol. Nariadenie Európskej komisie č. 716/2014 stanovilo cieľ zaviesť FRA vo všetkých európskych krajinách do 1. januára 2022.

Koncept FRA je navrhnutý tak, aby umožnil užívateľom plánovať letové trasy s využitím vstupných a výstupných bodov jednotlivých oblastí FIR, bez nutnosti dodržiavať pevne stanovené a definované letové cesty. Voľná trať však má určité obmedzenia, a to napríklad zákaz preletu cez zakázané oblasti,

oblasti TAA (Terminal Arrival Area), teda cez oblasti finálneho priblíženia, alebo oblasti uvedené v AUP (Airspace Use Plan). Ak by bol let plánovaný cez takéto zakázané alebo obmedzené oblasti, je nutné aby prevádzkovateľ zvolil medziľahlý bod, ktorým je možné sa takýmto oblastiam vyhnúť. Tieto body môžu byť definované pomocou navigačných zariadení ako VOR alebo RNAV súradníc.

Pre lepšie pochopenie fungovania tvorby trate vo FRA slúži Obrázok 1. Každý FIR má určené vstupné a výstupné body, medzi ktorými sa väčšinou plánuje priama trať. Ak však takáto trať pretína zakázanú alebo inak obmedzenú oblasť, je potrebné použiť medziľahlý bod – RNAV bod definovaný súradnicami alebo navigačným zariadením (napr. VOR). Na obrázku je zobrazená trať z bodu ENTRY2 do EXIT1, ktorá pretína zakázanú oblasť, preto sa pridáva medziľahlý bod BOD1. Trate, ktoré takéto obmedzenia nerešpektujú (ako tie označené oranžovou na Obrázku 1), by boli systémom IFPUV zamietnuté (systém slúžiaci na validáciu letových plánov EUROCONTROLOM).



Obrázok 1 Tvorba trate v priestore FRA

Výhody konceptu FRA zahŕňajú skrátenie doby letu, zníženie spotreby paliva a emisií CO₂, zníženie konfliktných situácií vďaka využívaniu väčšej časti vzdušného priestoru, optimalizácia hmotnosti lietadla, pretože je možné vziať menej paliva, čím sa zvýši užitočný náklad. Napriek výzvam a technickým komplikáciám je Free Route Airspace vnímaný ako dôležitý krok k modernej, efektívnej a ekologickej leteckej doprave v rámci Európy. [14] [15] [16]

6. FRA v prostredí slovenského vzdušného priestoru

Koncept voľných letových tratí sa v posledných rokoch výrazne rozvinul aj vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky. Od apríla roku 2016 môžu užívatelia plánovať svoje lety vo FIR Bratislava bez viazanosti na pevné letové trate, ak sa takéto let vykonáva vo výške 7500 m a viac. Dôležitým míľnikom pre Slovensko bol 6. december 2018, kedy vstúpilo do iniciatívy SEEN FRA (South East Europe Night Free Route Airspace). Tento projekt vznikol spojením nasledovných voľných vzdušných priestorov: BULATSA (Bulharsko), HUNGAROCNTRON (Maďarska) a ROMATSA (Rumunsko). V rámci SEEN FRA bolo užívateľom umožnené plánovanie tratí bez ohľadu na štátne hranice.

V roku 2022 sa k tejto iniciatíve pripojila Moldavská republika, o rok neskôr aj Česká republika. Od roku 2023 je koncept poskytovaný na báze 24/7 a pokrýva vzdušné priestory

Bulharska, Maďarska, Slovenska, Česka, Rumunská a Moldavska. Spojením menovaných vzdušných priestorov vznikol jeden z najväčších blokov voľného vzdušného priestoru v Európe s názvom SEEFRA. Na obrázku číslo 2 môžeme vidieť aktuálnu oblasť SEEFRA a zároveň stále sa rozširujúcu iniciatívu BALTIC FRA. Ak by vzniklo prepojenie týchto dvoch iniciatív, plánovanie trati vo voľnom vzdušnom priestore bez rešpektovania štátnych hraníc by bol možný od Čierneho mora až po Baltské more. Rozvoj FRA konceptu tak podporuje efektívne využitie vzdušného priestoru v čase jeho kapacitného preťaženia. [17] [18] [19]



Obrázok 2 Oblasť SEEFRA v roku 2023

7. Palivová efektívnosť v letectve: prevádzková stratégia

Letecká doprava predstavuje jeden z pilierov moderného hospodárstva a globálnej konektivity – prepája krajiny, podporuje obchodné vzťahy, cestovný ruch aj medzinárodnú spoluprácu. S jej dynamickým rozvojom však narastajú aj výzvy, medzi ktoré patrí najmä vysoká spotreba paliva. Tá nepredstavuje len finančnú záťaž pre letecké spoločnosti, ale zároveň významne prispieva k emisiám skleníkových plynov, čím sa civilné letectvo podieľa na prehľbovaní klimatickej krízy.

Práve preto sa otázka zvyšovania palivovej efektívnosti dostáva do popredia záujmu odborníkov, výrobcov lietadiel aj prevádzkovateľov letov. Kým vývoj nových, úspornejších technológií je behom na dlhé trate, viaceré okamžité opatrenia možno realizovať už dnes – najmä prostredníctvom optimalizácie prevádzkových postupov. Táto kapitola sa zameriava na konkrétne stratégie a techniky, ktoré môžu prispieť k zníženiu spotreby paliva počas jednotlivých fáz letu.

Medzi základné prevádzkové stratégie patria nasledovné:

a) Optimalizácia extra paliva

Dodatočné palivo, známe ako „discretionary fuel“, je častým nástrojom pilotov pre zvládanie nepredvídateľných situácií. Avšak, bez primeranej kontroly vedie k nadmernej hmotnosti a tým aj k vyššej spotrebe paliva. Zavedenie limitov na maximálne povolené množstvo tohto paliva motivuje posádky optimalizovať plánovanie a zároveň znižuje zbytočnú záťaž lietadla.

b) Engine-Out Taxi (pred a po lete)

Jednoduchý, ale účinný spôsob úspory paliva spočíva vo vypnutí jedného z motorov počas rolovania – či už pred vzletom (taxi-out), alebo po pristátí (taxi-in). Pri dlhšom rolovaní môže tento postup ušetriť desiatky kilogramov paliva. V prípade pravidelného používania v rámci flotily predstavuje významný potenciál úspor.

c) Rolling take-off a optimalizácia vztlakových mechanizmov

Vykonanie vzletu bez zastavenia (tzv. rolling take-off) skracuje čas strávený na dráhe a zároveň znižuje spotrebu. Rovnako dôležité je aj použitie nižšieho stupňa klapiek pri vzlete, čím sa znižuje odpor a tým aj spotreba paliva.

d) Znížená akceleračná výška

Skoršie zatiahnutie vztlakovej mechanizácie a redukcia ťahu motorov po vzlete vedie k efektívnejšiemu prechodu do režimu stúpania. Táto technika je vhodná najmä mimo oblastí s prísnyimi hlukovými obmedzeniami a môže výrazne ovplyvniť spotrebu v počiatočnej fáze letu.

e) Optimalizácia letovej hladiny a trasy

Počas letu je možné na základe aktuálnych meteorologických údajov optimalizovať letovú hladinu alebo trať. Zmena letovej výšky kvôli výhodnejšiemu vetru alebo vyhnutiu sa turbulenciám, ako aj využitie priamych tratí, znižujú dĺžku letu a tým aj množstvo spáleného paliva.

f) Kontinuálne klesanie (CDA) a vizuálne priblíženia

Klesanie s ťahom motorov nastaveným na voľnobeh predstavuje palivovo najefektívnejší spôsob prípravy na pristátie. Skoré alebo oneskorené začatie klesania voči vypočítanému bodu (TOD) výrazne znižuje efektívnosť. Vhodným doplnkom je aj priame alebo vizuálne priblíženie, ktoré skracuje dĺžku trate.

g) Využitie pozemného zdroja a APU management

Po pristátí by sa mala pomocná pohonná jednotka (APU) využívať len v nevyhnutných prípadoch. Napojenie lietadla na pozemný zdroj elektrickej energie dokáže výrazne znížiť spotrebu paliva, keďže APU môže spotrebovať vyše 100 kg paliva za hodinu.

Efektívne využitie paliva teda nie je len ekonomickou, ale predovšetkým ekologickou výzvou, ktorej zvládnutie je nevyhnutným predpokladom pre udržateľný rozvoj letectva v 21. storočí. [14] [20] [21]

8. Metodológia pre optimalizačnú techniku

V rámci praktickej časti výskumu bola zvolená konkrétna letová trasa, ktorá poskytla vhodný základ pre analýzu existujúcich letových tratí v medzinárodnom vzdušnom priestore a pre simuláciu ich optimalizácie prostredníctvom konceptu Free Route Airspace (FRA). Výber trasy zohľadňoval potrebu preletu cez rôzne FIR oblasti, z ktorých niektoré už FRA implementujú (napr. krajiny EÚ), zatiaľ čo iné (napr. Turecko, Saudská Arábia) ešte stále využívajú prevažne konvenčné štruktúrované trate.

Vybraný let sa uskutočnil z medzinárodného letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave (LZIB) na medzinárodné letisko Salalah v Ománe (OOSA). Let bol realizovaný 18. januára 2025 leteckou spoločnosťou Smartwings pod číslom letu 6628. Ako dopravný prostriedok bol použitý moderný stroj typu Boeing 737-800 MAX, ktorý predstavuje technologicky pokročilé riešenie so zníženou spotrebou paliva, emisiami aj hlukovou stopou v porovnaní so svojimi predchodcami. Tento typ lietadla je vďaka vyššej palivovej efektívnosti a nižším prevádzkovým nákladom ideálnym kandidátom pre štúdie zamerané na ekologickú a ekonomickú udržateľnosť letectva.

Na analýzu a porovnanie letových tratí bol použitý operation flight plan (OFP) generovaný navigačným oddelením spoločnosti. OFP slúži ako kľúčový dokument pre plánovanie a priebeh letu – obsahuje detailné informácie o letovej trase, palive, váhach, čase a spotrebe na jednotlivých prelietavých bodoch. Plán je počas letu priebežne aktualizovaný posádkou a využívaný ako nástroj monitorovania reálneho priebehu letu.

Pre potreby optimalizácie a simulácie ideálnej trate bol použitý softvér SimBrief, ktorý umožňuje vytvárať digitálne letové plány na základe zadaných vstupných parametrov. Táto aplikácia je používateľsky prívetivá a zároveň dostatočne robustná na to, aby poskytla verný obraz o alternatívnej, potenciálne optimalizovanej letovej trati. Pomocou SimBrief bola vytvorená trať založená na predpoklade plnej implementácie konceptu FRA v celej prelietavanej trase, a to aj v oblastiach, kde v reálnych podmienkach tento koncept nie je zatiaľ zavedený. Simulácia porovnáva dve varianty letovej trasy:

- Originálna trať podľa reálneho OFP, ktorá reflektuje súčasný stav vzdušného priestoru, vrátane používania štandardných navigačných bodov (VOR/NDB) a konvenčných tratí;
- Optimalizovaná trať, vytvorená v SimBrief, predpokladajúca plnú implementáciu FRA vo všetkých FIR oblastiach, v ktorých by to bolo technicky a prevádzkovo možné.

V analytickej časti práce budú obe varianty porovnané z hľadiska troch hlavných parametrov: celková dĺžka trate (v NM), predpokladaná doba letu, spotreba paliva.

Porovnanie bude vykonané na úrovni jednotlivých FIR oblastí, cez ktoré let prechádzal. V každej z týchto oblastí sa bude skúmať, či bol v pôvodnom pláne uplatnený koncept FRA, a ak nie, aký by bol potenciálny prínos jeho aplikácie. V prípadoch, kde boli identifikované obmedzenia ako napr. zakázané vojenské zóny, nedostatočné radarové pokrytie alebo iné prevádzkové faktory, boli tieto skutočnosti zohľadnené v rámci simulácie a optimalizácie.

Výsledky z aplikácie SimBrief budú následne graficky a tabuľkovo spracované. Hlavným cieľom tejto analýzy je kvantifikovať prínosy plynúce z implementácie konceptu FRA – najmä v oblasti úspory paliva, zníženia emisií a časovej efektivity letu.

Je potrebné zdôrazniť, že táto optimalizácia má čisto teoretický charakter. Simulácia vychádza z predpokladu, že FRA by bolo možné uplatniť v každej prelietavanej oblasti, čo však v reálnej praxi nie je možné z dôvodu obmedzení spomenutých vyššie.

Napriek tomu takáto modelová situácia slúži ako dôležitý dôkazový rámec o potenciálnych výhodách, ktoré môže koncept FRA priniesť v budúcnosti.

Celkovým prínosom tejto metodológie je vytvorenie praktického modelu, na základe ktorého možno demonštrovať význam a efektívnosť FRA nielen v európskom vzdušnom priestore, ale aj v širšom globálnom kontexte. Vedecký článok si tak kladie za cieľ poukázať na potrebu rozširovania FRA konceptu, ktorý predstavuje krok smerom k udržateľnej, uhlíkovu neutrálnej a palivovo efektívnej leteckej doprave.

9. Východisková situácia a jednotlivé porovnania

Východiskom skúmania je reálny let z Bratislavy do Salalah, pričom v častiach trasy bola použitá sieť voľných letových tratí (Free Route Airspace – FRA) a inde štandardné RNAV trate. Pre účely optimalizácie bola vytvorená ideálna trať využívajúca FRA naprieč celou trasou. Cieľom je ukázať prínosy konceptu FRA v skrátaní trate, znížení spotreby paliva, emisií a letového času. Letový plán bol vytvorený v aplikácii SimBrief na základe reálnych údajov, pričom ďalšia analýza porovnáva pôvodnú a optimalizovanú trať v jednotlivých letových informačných oblastiach. Výstup z aplikácie môžeme vidieť na nasledovnom obrázku a predstavuje východiskovú situáciu dôležitú pre optimalizáciu letových tratí v jednotlivých prelietavaných FIR regiónoch.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	182 (15,528 kg)	60,987 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+49 kts	06:06:00	13,477 kg	4,763 kg	2,236 kg	20,500 kg	None
L2281/17	None	None	None	C130	-15 nm	+0 kts	00:02:13	-75 kg	+75 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 3 Východiskové údaje pre optimalizáciu - pôvodný OFP plán

LHCC FIR (Maďarsko): Optimalizáciou trasy zrušením bodu SIRDU sa podarilo skrátiť trať o 15 NM, čo viedlo k úspore paliva približne 75 kg a skrátaniu letu o 2 minúty.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	182 (15,528 kg)	60,987 kg	81,367 kg	C130	2,919 nm	+49 kts	06:06:00	13,477 kg	4,763 kg	2,236 kg	20,500 kg	None
L2281/17	None	None	None	C130	-15 nm	+0 kts	00:02:13	-75 kg	+75 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 4 Pôvodná a optimalizovaná trať v LHCC

LYBA a LBSR FIR (Srbsko a Bulharsko): V týchto vzdušných priestoroch bol FRA koncept využiteľný, neexistoval priestor pre optimalizáciu, a preto nebola dosiahnutá žiadna úspora paliva.

LGGG FIR (Grécko): Aj keď sa vzdialenosť trasy nezmenila (77 NM), aplikácia FRA konceptu priniesla malú úsporu 3 kg paliva



Obrázok 5 Pôvodná a optimalizovaná trať v LGGG

bez zmeny času.

LTBB FIR (Turecko – Istanbul): Hoci FRA zatiaľ nie je implementovaný, modelová optimalizácia by skrátila trať o 2

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	-2 nm	+0 kts	00:00:11	-7 kg	+7 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 6 Optimalizovaná letová trať v LTBB- výstup zo SimBrief NM a ušetrila 7 kg paliva, čo naznačuje potenciál úspor po zavedení FRA.

LTAA FIR (Turecko – Ankara): Optimalizácia nepriniesla zmenu v dĺžke trate, ale mierna úspora paliva o 1 kg bola zaznamenaná, zrejme vďaka efektívnejšiemu vetru.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	+0 nm	+0 kts	00:00:00	-1 kg	+1 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 7 Optimalizovaná letová trať v LTAA- výstup zo SimBrief

LCCC FIR (Cyprus): Po zavedení druhej fázy FRA (NICFRA) od 20. februára 2025 bude možné trasu skrátiť o 1 NM, čo predstavuje úsporu 3 až 5 kg paliva.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	-1 nm	+0 kts	00:00:00	-3 kg	+3 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 8 Optimalizovaná letová trať v LCCC- výstup zo SimBrief

LLLL FIR (Izrael a Palestína): Vzhľadom na obmedzenia a konflikt nie je FRA povolený. Trasa zostáva fixná (78 NM) a SimBrief evidoval mierne zvýšenie spotreby paliva o 1 kg.

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	+0 nm	+0 kts	00:00:02	+1 kg	-1 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 9 Optimalizovaná letová trať v LLLL- výstup zo SimBrief

OJAC FIR (Jordánsko): Let prebiehal po fixnej RNAV trati bez

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	+0 nm	+0 kts	00:00:00	-1 kg	+1 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 10 Optimalizovaná letová trať v OJAC- výstup z aplikácie SimBrief

možnosti optimalizácie. FRA koncept nie je v krajine implementovaný ani plánovaný.

OEJD FIR (Saudská Arábia): Koncept FRA je dostupný len v juhovýchodnej časti Jeddah FIR. Pôvodná trať merala dĺžku 1151 NM, 380 NM z toho bolo plánovaných v súlade s konceptom FRA. Po optimalizovaní trate sa dĺžka skrátila na 1137 NM, čo činí úsporu 14 NM. Podľa softvéru SimBrief je

Altitude	Passengers (Payload)	ETOW	ETOW	Cruise	Distance	Wind Component	Air Time	Trip Fuel	Landing Fuel	Extra Fuel	Block Fuel	Remarks
CKDWA (BRNO)	+0 (0 kg)	+0 kg	+0 kg	C130	-14 nm	+1 kts	00:02:29	-87 kg	+87 kg	+0 kg	+0 kg	None

Obrázok 11 Optimalizovaná letová trať v OEJD- výstup z aplikácie SimBrief

úspora na tomto úseku 87 kilogramov paliva a skrátanie dĺžky letu o 2,5 minúty.

OOMM FIR (Omán): FRA koncept v ománskom vzdušnom priestore nie je aplikovaný, pôvodná trať merala dĺžku 177 NM, optimalizovaná trať by merala 117 NM, nie je možné túto trať použiť z dôvodu aktivovaného obmedzeného priestoru z dôvodu prebiehajúcich vojenských cvičení. Úspora paliva je v tomto úseku teda nulová.

10. Záverečné výsledky meraní

Optimalizáciou letovej trate medzi bodmi VAMOG a ASTUN pomocou konceptu voľných letových tratí sa dosiahla úspora 32

námorných míľ, čo predstavuje zníženie spotreby paliva o 163 kg a emisií CO₂ o 515 kg na jeden let. Pri ôsmich letoch mesačne ide o mesačnú úsporu 1 304 kg paliva a 4 121 kg CO₂. Výsledky ukazujú, že aj malé zmeny v jednotlivých FIR môžu viesť k významným ekologickým prínosom a potvrdiť prínos konceptu FRA k efektívnejšiemu a udržateľnejšiemu letectvu. Aj keď sa úspora paliva a skrátenie dĺžky trate mohla zdať na prvý pohľad v jednotlivých oblastiach malá, celková úspora paliva a emisií je v konečnom výsledku markantná.

Referencie

[1] History of air traffic control. [Online] Dostupné na: <https://www.highlander.io/post/history-of-air-traffic-control>.

[2] Navigation: From Dead Reckoning to Navstar GPS. [Online] Dostupné na: <https://www.airandspaceforces.com/article/1284navigation/>.

[3] Very High Frequency Omni-directional Ranging. [Online] Dostupné na: <https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept--Unpacked/PBN-Infrastructure/Ground-based-NAVAIDs/VOR.html>.

[4] ATS Route. [Online] Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/ats-route>.

[5] HAŇO, T. Návrh tratí letových prevádzkových služieb. [bakalárska práca]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Katedra letovej prípravy, 2020.

[6] Identification of ATS routes [Online] Dostupné na: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/identification_of_ATS_routes.

[7] SID-Standard Instrument Departure. [Online] Dostupné na: <https://knowledgebase.vatsim-germany.org/books/ifr-lhx/page/sid-standard-instrument-departure>.

[8] NOVÁK, D. Návrh a optimalizace RNAV SID a STAR tratí na letišti Leoše Janáčka Ostrava. [diplomová práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy, 2013.

[9] Conventional vs RNAV SIDs. [Online] Dostupné na: <https://aviationsim.uk/conventional-vs-rnav-sids/>.

[10] SLUK, T. Možnosti riešenia postupov prístrojového priblíženia na malé letisko s využitím satelitných navigačných systémov. [diplomová práca]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Katedra letovej prípravy, 2014.

[11] TYMOVČAK, M. Priblíženie na pristátie s využitím družicových navigačných systémov. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta Košice, 2023.

[12] KONTRA, L. Analýza využitia pozemných rádionavigačných zariadení v civilnom letectve. [bakalárska práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov, Katedra leteckej dopravy, 2024.

[13] Guide to Aviation Approaches: Types and Technologies Explained. [Online] Dostupné na: <https://www.aviationhunt.com/aviation-approaches/>.

[14] Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. [Online] Dostupné na: <https://etrr.springeropen.com/articles/10.1007/s12544-015-0160-x>.

[15] Free Route Airspace (FRA). [Online] Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/free-route-airspace-fra>.

[16] Free route airspace. [Online] Dostupné na: <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace>.

[17] Flying over Slovakia is getting greener. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[18] Republic of Moldova joins SEE FRA. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[19] Czech Republic joins SEE FRA. [Online] Dostupné na: <https://www.lps.sk/en/press-centre/news>.

[20] 22 eco-flying practices for flight ops. [Online] Dostupné na: <https://blog.openairlines.com/22-fuel-efficiency-procedures-for-flight-ops>.

[21] Pilot discretionary fuel... justified extra fuel or unjustified extra cost? [Online] Dostupné na: <https://www.navblue.aero/pilot-discretionary-fuel-justified-extra-fuel-or-unjustified-extra-cost/>.