

OPTIMISATION OF TURBOPROP AIRCRAFT OPERATIONS AS A MEANS TO REDUCE THEIR ENVIRONMENTAL FOOTPRINT

ENVIRONMENTÁLNE ASPEKTY PREVÁDZKY TURBOVRTUĽOVÝCH LIETADIEL

Lucia Števárová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
luckastevarova@email.com

Benedikt Badánik
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
benedikt.badanik@fpedas.uniza.sk

Abstract

This paper deals with the subject of optimisation of turboprop aircraft operations to decrease their environmental footprint. This aircraft category is not at the forefront of optimisation efforts of operators as it supplies lower volumes of traffic and is equipped with the most fuel-efficient technology for missions served on regional markets. The theoretical part of this paper details turboprop aircraft contributions to global CO₂ emissions and analyses aspects behind their efficient performance. Further, it provides a thorough assessment of the operational practices that can significantly reduce the environmental footprint of turboprop aircraft operations. For better illustration, some are exemplified in simple case studies. The practical part of this work aimed to quantify the effects of operational optimisation on turboprop aircraft. Based on the theoretical analysis, we established five operational adjustments whose effects can be determined using performance calculations. These calculations have been carried out using ATR 72-600 aircraft as a reference for a specified average turboprop flight. It was found that through operational adjustments, the fuel consumption on an average ATR 72-600 flight can be decreased on the order of 10%. The energy intensity of operations defined in CO₂ per revenue passenger kilometre could be nearly halved compared to actual values of the ATR 72-600 fleet.

Keywords

Optimisation, flight operations, efficiency, turboprop aircraft, CO₂ emissions

1. Úvod

Turbovrtuľové lietadlá sú súčasťou leteckej dopravy, ktorá je celkovo zodpovedná za 2% emisií oxidu uhličitého (CO₂) ročne vypustených do atmosféry [1]. Jej dopady však majú oveľa ďalekosiahlejšie účinky, keďže, okrem CO₂ je letectvo zdrojom ďalších skleníkových plynov, ktoré sa dostávajú do atmosféry v jej horných vrstvách. Keďže výrazný rast leteckej prepravy je očakávaný i v nasledujúcich rokoch (3% ročný rast po Covid-19 kríze do roku 2050 [2]) a v súčasnosti chýba alternatívny typ pohonu, znižovanie emisií z tohto odvetvia má kritickú úlohu v dosiahnutí globálnych klimatických cieľov [3].

V súlade s nutnosťou zamedzovania environmentálnych dopadov leteckej dopravy, sa v tejto diplomovej práci osobitne zameriavame na kategóriu turbovrtuľových lietadiel. Tento typ má zásadnú úlohu v komerčnej leteckej doprave, hlavne pri obsluhu regionálnych trhov. V súčasnosti je prevádzkovaných približne 2132 turbovrtuľových lietadiel, čo predstavuje 9% globálnej flotily [4].

Analýza dostupnej literatúry poukázala na to, že optimalizácia prevádzky turbovrtuľových lietadiel nie je predmetom rozsiahleho výskumu a z tohto dôvodu bola zvolená ako vhodná náplň tejto práce. Osobný záujem autorky ako aj odborná skúsenosť v tejto problematike motivovali rozšírenie poznatkov na túto tému v rámci diplomovej práce.

Hlavným účelom práce je definovať vhodné prevádzkové úpravy pre turbovrtuľové lietadlá, ktoré by priniesli vyššiu úspornosť a

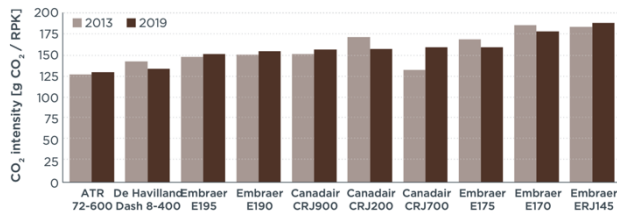
tým zníženie emisií CO₂. Táto forma znižovania emisií, je tiež jednou z iniciatív na zníženie emisií Medzinárodnej Organizácie Civilného Letectva (ICAO) [5]. V praktickej časti práce je cieľom určiť dosiahnuteľné úspory optimalizáciou vybraných prevádzkových parametrov. Na záver, porovnávame rozdiel medzi neoptimalizovaným a optimalizovaným letom a dosiahnuteľné úspory sú nasledovne vymedzené vzhľadom na ročnú prevádzku.

2. Prehľad súčasného stavu

Emisie CO₂ pochádzajúce z regionálnej leteckej dopravy (zahŕňa turbovrtuľové ako aj regionálne prúdové lietadlá) zodpovedajú 6% z celkových emisií komerčnej leteckej prepravy [6]. Podľa analýzy International Council for Clean Transportation (ICCT) vzrástla úspornosť regionálnej prepravy medzi rokmi 2013 a 2019 iba o 3% [6], čo je štyrikrát menej ako pre lietadlá na krátkych a dlhých tratiach. To naznačuje, že táto kategória nie je nevyhnutne v popredí optimalizačného úsilia prevádzkovateľov.

V súčasnosti je trh turbovrtuľových regionálnych lietadiel zastúpený najmä dvomi modelmi - ATR 72-600 a De Havilland Canada DHC-8-400, obe v 70-miestnej sedacej kategórii. Z pomedzi regionálnych lietadiel tieto dva modely patria do prvej desiatky najviac znečisťujúcich regionálnych lietadiel (podľa celkového objemu vyprodukovaných emisií) [6] a v globálnom merítku boli zodpovedné za 0,36% (ATR 72-600) a 0,43% (DHC-8-400) emisií CO₂.

CO₂ intenzita prevádzky turbovrtuľových lietadiel (daná objemom emisií CO₂ (v gramoch) generovaných na výnosový osobokilometer (RPK)) je najnižšia spomedzi regionálnych lietadiel. ATR 72-600 v priemere vygenerovalo približne 127 g na výnosový osobokilometer, kým DHC-8-400 130 g, ako je možné pozorovať na Obrázok. Táto hodnota je priamo ovplyvnená mierou obsadenosti lietadla, keďže množstvo emisií je rozrátané na počet cestujúcich. Tento parameter zostáva ako významný aspekt optimalizácie.



Obrázok 1: CO₂ intenzita regionálnych lietadiel v rokoch 2013 a 2019. Zdroj: [6].

3. Technické špecifikácie turbovrtuľových lietadiel a ich dopad na prevádzku

Úspornosť prevádzky turbovrtuľových lietadiel je do významnej miery ovplyvnená parametrami ako hmotnosť lietadla, spotrebou pohonnej jednotky vzhľadom k dodanému ťahu alebo sile, a aerodynamikou. Tieto parametre sú definované najmä dizajnom a v teoretickej časti práce ich podrobnejšie analyzujeme pre turbovrtuľové lietadlá.

Je vhodné vyzdvihnúť že za efektívnym výkonom turbovrtuľových lietadiel stojí hlavne ich turbovrtuľový pohon. Jadro motora je založené na rovnakom princípe ako tryskový motor avšak turbovrtuľový motor využíva väčšinu ťahu na pohon kompresora a vrtule [7]. Vrtuľa, ktorá je umiestnená mimo krytu motora, umožňuje akcelerovať podstatne väčší objem vzduchu za menší tepelný výkon ako napríklad turbodúchadlový motor s veľkým obtokovým pomerom. Z tohto dôvodu je špecifická spotreba paliva nižšia rádovo o 10-30% ako u prúdových motorov [8].

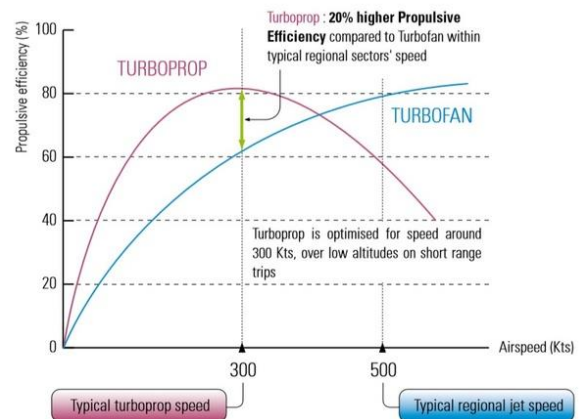
Účinnosť vrtule klesá s rýchlosťou letu a so zvyšovaním nadmorskej výšky, čo obmedzuje činnosť turbovrtuľového motora pod rýchlosť Mach 0,7 (450 uzlov) a nadmorskú výšku do 25 000 stôp [8]. Pri cestovných rýchlostiach okolo 300 uzlov sú turbovrtuľové lietadlá zhruba o 20% účinnejšie v porovnaní s prúdovými lietadlami na typických regionálnych letoch, ako vidieť na Obrázok [9].

Po stránke konštrukčnej efektívnosti (ktorá je hodnotená na základe pomeru prázdnej prevádzkovej hmotnosti (OEW) a maximálnej vzletovej hmotnosti (MTOW)) môžeme konštatovať, že turbovrtuľové lietadlá sú menej efektívne ako lietadlá s úzkym trupom. Je to najmä z dôvodu hmotnosti pohonnej jednotky, ktorá je výrazne väčšia (kvôli prevodovke a mechanizmu zmeny sklonu vrtule) vzhľadom ku dodávanej sile [8]. Aerodynamická efektívnosť, ktorá je daná pomerom vztľaku ku odporu lietadla, je u turbovrtuľových lietadiel zrovnateľná s ostatnými typmi moderných lietadiel [8].

Turbovrtuľové lietadlá sú taktiež všestrannejšou voľbou, pretože sa lepšie hodia do náročných prevádzkových podmienok, ako sú horúce a vysoko umiestnené letiská, extrémne studené

podmienky alebo krátke a nespevnené dráhy [10]. Vďaka týmto vlastnostiam sa dajú použiť na menších regionálnych letiskách. Pre porovnanie, z viac ako 3 800 komerčných letísk sa 36% spolieha výlučne na turbovrtuľové lietadlá [11].

Napriek evidentnej efektívnosti turbovrtuľovej kategórie lietadiel na regionálnych tratiach, zámerom tejto práce bolo určiť, či sú dodatočné úspory dosiahnuteľné. V nasledujúcej časti práca skúmala prevádzkové postupy, ktoré by mohli prispieť k zvýšenej efektívnosti turbovrtuľových lietadiel.



Obrázok 2: Účinnosť turbovrtuľového lietadla v porovnaní s prúdovým lietadlom. Zdroj: [9].

4. Analýza vhodných operačných zlepšení pre turbovrtuľové lietadlá

Najefektívnejším spôsobom znižovania emisií CO₂ z prevádzky je minimalizáciou spotreby na danom lete, keďže emisie CO₂ sú generované proporcionálne k spotrebe paliva [12]. Dosiagnutá úspornosť je často výsledkom súčtu viacerých prevádzkových zmien s menším účinkom, ktoré sčítaním, majú za následok podstatné úspory pre prevádzkovateľov. Je dôležité poznamenať, že optimalizácia jednotlivých letových parametrov nemôže za žiadnych okolností ohroziť bezpečnosť letu [12].

V tejto časti sme sa zamerali na dva najvýznamnejšie modely turbovrtuľových lietadiel ATR 72-600 a DHC-8-400. Jednotlivé optimalizačné úsilie sme rozdelili do štyroch kategórií, ktoré sú stručne opísané v tejto časti.

4.1. Optimalizácia letového plánu a paliva

Fáza plánovania letu ponúka možnosť vyhodnotiť optimálnu letovú trasu, letovú hladinu, cestovnú rýchlosť, poveternostné podmienky a optimalizovať množstvo paliva potrebného pre let. V tejto fáze je tiež dôležité vziať do úvahy obmedzenia manažmentu letovej prevádzky, výkonové charakteristiky lietadla, dopady optimalizácie na dobu trvania letu a hospodárnosť jednotlivých úprav.

Ako príklad optimalizácie jedného z týchto faktorov uvádzame cestovnú letovú hladinu. Optimálna letová hladina je, podľa definície, nadmorská výška, ktorá poskytuje maximálny špecifický dolet pre danú hmotnosť lietadla [13].

Let vo vyšších letových hladinách má za následok nižší odpor vzduchu keďže hustota atmosféry klesá s nadmorskou výškou a tak poskytuje lepší špecifický dolet. Optimálna cestovná výška v prevádzke sa však môže líšiť v dôsledku rôznej hmotnosti

lietadla, dĺžky sektoru, rýchlosti letu, atmosférických podmienok (rýchlosti a smeru vetra, teploty okolitého vzduchu) a obmedzení ATC. Keďže turbovrtuľové lietadlá lietajú vo výškach okolo 20000 stôp, pravdepodobnosť stretnutia sa s nepriaznivými atmosférickými podmienkami (hmla, zrážky, mrznúce podmienky a nebezpečné typy oblakov), je výrazne väčšia, čo môže nepriaznivo ovplyvniť množstvo príležitostí na optimalizáciu ich prevádzky.

Na ilustráciu Tabuľka zobrazuje zmenu špecifický dolet so zmenou letovej hladiny. Príklad berie do úvahy ATR 72-600 s hmotnosťou 21 000 kg (zmeny hmotnosti lietadla v priebehu celého letu nie sú vzaté do úvahy).

Tabuľka 1: Špecifický dolet pre ATR 72-600 (21 000 kg) Zdroj: Vytvorené autorom]

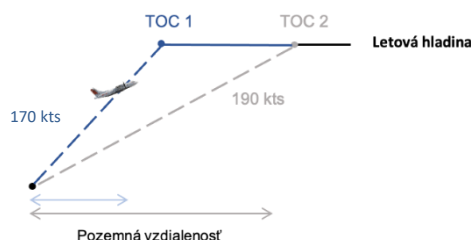
ATR 72-600	FL140	FL 160	FL 180	FL 200	FL 220
SAR (NM/kg)	0.3146	0.3270	0.3409	0.3572	0.3731

4.2. Optimalizácia za letu

Výkonové nastavenia v jednotlivých fázach letu poskytujú príležitosti k optimalizácii. Pre turbovrtuľové lietadlá to zahŕňa minimalizáciu použitia pomocnej pohonnej jednotky (APU) (DHC-8-400) alebo funkcie ‚Hotel Mode‘, ktorá nahrádza APU u ATR 72-600, možnosť rolovania po pristátí iba s jedným motorom (taxi-in), optimalizáciu rýchlosti stúpania, a tiež uhla a rýchlosti klesania. Ostatné parametre, ktoré boli zahrnuté v predchádzajúcej sekcii majú vplyv na optimalizáciu cestovnej časti letu v danej letovej hladine.

Na ilustráciu uvádzame možnosti na zvýšenie efektivity vo fáze stúpania. Táto fáza je energeticky najintenzívnejšia fáza letu a preto vhodné nastavenie rýchlosti stúpania môže priaznivo ovplyvniť spotrebu počas letu.

Vyššie nastavenie rýchlosti stúpania má za následok menej strmý profil a dlhšiu pozemnú vzdialenosť na dosiahnutie letovej hladiny (vrchol stúpania je označený bodom Top of Climb -TOC) a tiež celkovo rýchlejší letový výkon. Na druhej strane, nižšie nastavenie rýchlosti by malo za následok vyšší sklon stúpania a letová hladina je dosiahnutá v kratšej pozemnej vzdialenosti, čo je zobrazené na Obrázok.



Obrázok 3: Profily stúpania. Zdroj: Autori.

Napríklad operačný manuál ATR 72-600 uvádza výkony pre dve uvedené nastavenia rýchlosti - 170 a 190 uzlov [14]. Pre správne určenie výkonu pri rôznych rýchlostných nastaveniach je potrebné zhodnotiť výkony za rovnakú vzdialenosť, čo môže byť napríklad po spoločný bod TOC 2. Efekty týchto nastavení sú určené v praktickej časti práce.

4.3. Údržba lietadla

Dobrá stav motora, systémov a konštrukcie lietadla je dôležitým predpokladom dosiahnutia maximálnej palivovej účinnosti lietadla. V tejto časti zdôrazňujeme aspekty údržby lietadla, ktoré majú priamy vplyv na spotrebu paliva modelov ATR 72-600 a DHC-8-400.

- Odbavenie lietadla podľa Zoznamu Minimálneho Vybavenia a Zoznamu Odchýlok Konfigurácie
- Údržba draku lietadla
- Údržba motora

Na záver kapitoly diskutujeme doplnkové iniciatívy, ktoré môžu pomôcť prevádzkovateľom zvýšiť ich efektívnosť prostredníctvom vedomého zapojenia posádok do zvyšovania úspornosti a tiež prostredníctvom použitia metódy umývania lietadla, ktorá má výrazne menšie environmentálne dopady.

5. Aplikácia - Návrh na optimalizáciu prevádzky turbovrtuľových lietadiel vzhľadom na ich spotrebu paliva a emisií CO₂

5.1. Metodika

Z analýzy vykonanej v teoretickej časti, sme definovali päť prevádzkových úprav, ktorých efekt bolo možné určiť pomocou výkonnostných výpočtov. Praktická časť tejto práce sa zamerala na ich číselné vyjadrenie. Tieto úpravy sa týkali:

- Hmotnosti lietadla
- Rýchlosti stúpania
- Letovej hladiny
- Cestovnej rýchlosti
- Rýchlosti a sklonu zostupu

Na vykonanie výpočtov bolo nevyhnutné vytvoriť jednotný postup, ktorý by zabezpečil porovnateľnosť výsledkov. Z tohto dôvodu sme definovali tzv. štandardný let, ktorý reprezentuje typický let turbovrtuľového lietadla na regionálnej trase. Tento let slúžil ako referencia pre aplikáciu prevádzkových postupov s cieľom optimalizácie.

Pre analýzu sme zvolili jeden model lietadla, a to konkrétne ATR 72-600. Iné typy turbovrtuľových lietadiel (ako napríklad DHC-8-400) neboli zahrnuté najmä z dôvodu rozsahového obmedzenia práce. Informácie týkajúce sa výkonu ATR 72-600 použité v praktickej časti pochádzali zo zdrojov výrobcu (napr. Operačný manuál – FCOM [14]). Kapacita lietadla použitá v tejto štúdii bola 72 miest, čo predstavuje štandardné rozmiestnenie kabíny pre tento variant.

Na výpočty sme použili databázu Eurocontrol (BADA), verziu 3.14. BADA umožnila vykonanie výpočtov, ktoré odpovedajú výkonnostným údajom od výrobcu lietadla. Táto databáza bola sprístupnená akademickému personálu Žilinskej Univerzity. Výpočty boli vykonané v dvoch krokoch, v prvom rade ako čiastková analýza jednotlivých letových parametrov a následne ako celková optimalizácia letu. Výsledky z prvej časti pomohli identifikovať najúčinnejšie nastavenia, ktoré boli následne zvolené pre optimálny let.

5.1.1. Štandardný let – definícia

Dĺžka letu: 300 NM alebo 556 km zodpovedajúca priemernej dĺžke regionálnych letov [6].

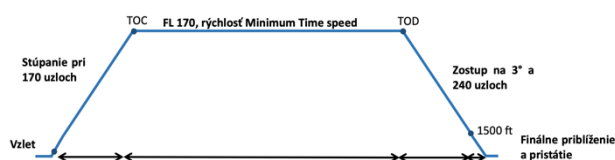
Vzletová hmotnosť lietadla: Užitočné zaťaženie bolo definované predpokladajúc váhu 97 kg na pasažiera podľa EASA AMC1 CAT.POL.MAB.100(e) (EASA, 2016) a faktor zaťaženia rovnajúci sa 100% a 78% pre dva rôzne varianty výpočtu. Množstvo celkového paliva bolo definované rešpektujúc požiadavky predpisov EASA AMC1CAT.OP.MPA.150(b) (EASA, 2016), a zahŕňalo palivo na vykonanie letu a požadované rezervy. Výsledná vzletová hmotnosť pre štandardný let s plnou obsadenosťou bola 21 940 kg, kým pre let so 78% obsadenosťou 20 368 kg.

Atmosférické podmienky: Štandardný let ako aj ostatné scenáre zahrnuté v analýze brali do úvahy podmienky medzinárodnej štandardnej atmosféry (ISA) s nulovou odchýlkou. Vietor ani mrznúce podmienky neboli súčasťou analýzy. Nadmorská výška pôvodného a cieľového letiská bola 0 ft.

Prevádzkové parametre: Prevádzkové parametre pre každú fázu štandardného letu boli definované pomocou predvolených hodnôt z operačného manuálu ATR 72-600:

- Vzletová hmotnosť = 21940 kg
- Stúpanie: začiatok pri 0 ft, rýchlosť 170 uzlov
- Let v hladine FL170 pri rýchlosti definovanej ako minimum time speed (najvyššie rýchlostné nastavenie v bežnej prevádzke)
- Rýchlosť a sklon zostupu: 240 uzlov pri 3°, od letovej hladiny až po 1500 ft

Fázy vzletu a tiež finálneho priblíženia a pristátia sú rátané do celkového trvania a dĺžky letu. Všetky fázy letu majú spolu 300 NM a spotreba paliva zahŕňa všetky tieto fázy letu. Ostatné časti letu (pred a po pristátí) neboli súčasťou optimalizácie. Profil definovaného štandardného letu je zobrazený na Obrázok.



Obrázok 4: Letový profil štandardného letu. Zdroj: Autori.

5.2. Výsledky analýzy optimalizácie jednotlivých parametrov

V tejto časti uvádzame dva konkrétne prípady optimalizácie jednotlivých letových parametrov.

5.2.1. Optimalizácia hmotnosti lietadla

V rámci tejto časti sme skúmali ako sa zníženie hmotnosti lietadla prejaví na celkovej spotrebe a následne sme výsledok porovnali so štandardným letom ako bol definovaný v 5.1.1. V tomto prípade išlo o optimalizáciu hmotnosti lietadla o 200 kg prostredníctvom výmeny sedadiel za novší, ľahší model. Ostatné parametre letu zostali nezmenené.

Na základe výsledkov prezentovaných v Tabuľka, je možné pozorovať, že 0.9% zníženie hmotnosti odpovedá 0.2% zníženiu

Tabuľka 2: Optimalizácia hmotnosti lietadla Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Vzletová hmotnosť (kg)	Letový čas	Spotrebované palivo (kg)	Vzdialenosť (NM)
Štandardný let	21940	1 hour 13 min	904	300
Let s optimalizovanou hmotnosťou	21740	1 hour 13 min	902	300
Rozdiel (%)	-0,9%	-	-0,2%	0,0%

spotreby po celej dĺžke letu. Toto naznačuje, že vplyv hmotnosti na spotrebu za letu je menej výrazný.

5.2.2. Optimalizácia stúpania

V tejto časti sme skúmali dopad na spotrebu celkového letu dvoch vyšších rýchlostných nastavení – 180 uzlov a 190 uzlov a porovnávali ich so štandardným nastavením 170 uzlov.

Najvyššie nastavenie rýchlosti (190 uzlov) sa odrazilo na najnižšej spotrebe paliva na celkovom lete ako je možné vidieť v Tabuľka. V porovnaní so štandardným nastavením dodalo 1,1% zníženie spotreby a 1-minútové zníženie času letu. Nastavenie rýchlosti na 180 uzlov malo tiež za následok nižšiu spotrebu paliva, avšak v menšej miere. Podľa výsledkov analýzy, rýchlosť 190 uzlov bola zvolená ako vhodné nastavenie pre optimalizáciu celkového letu.

Tabuľka 3: Optimalizácia rýchlosti stúpania Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Vzletová hmotnosť (kg)	Letový čas	Spotrebované palivo (kg)	Vzdialenosť (NM)
Štandardný let (170 uzlov)	21940	1 hour 13 min	904	300
180 kts	21940	1 hour 13 min	900	0
190 kts	21940	1 hour 12 min	894	0
Rozdiel 170 kts/190 kts (%)	0,0%	- 1 min	-1,1%	-100,0%

5.3. Výsledky celkovej optimalizácie letu

V tejto časti analýzy sme aplikovali všetky vhodné prevádzkové úpravy za účelom dosiahnutia najoptimálnejšieho letu. Tie zahŕňali:

- Zníženie hmotnosti o 200 kg
- Rýchlosť stúpania 190 uzlov
- Letová hladina FL 200
- Cestovná rýchlosť v nižšom nastavení
- Zostup pri 3°, a rýchlosti 220 uzlov

Tabuľka 4: Výsledky celkovej optimalizácie letu. Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Vzletová hmotnosť (kg)	Letový čas	Spotrebované palivo (kg)	Vzdialenosť (NM)
Štandardný let	21940	1 hour 13 min	904	300
Optimalizovaný let	21740	1 hour 17 min	801	300
Rozdiel	-200	4 min	-103	0
Rozdiel (%)	-0,9%	5,5%	-11,4%	0,0%

Optimalizovaný let sme následne porovnali so štandardným letom so 100% ako aj 78% faktorom zaťaženia z dôvodu presnejšieho porovnania s hodnotami v reálnej prevádzke.

Tabuľka predstavuje výsledky optimalizovaného prípadu v porovnaní so štandardným letom s LF = 100%. Aplikácia upravených parametrov na optimalizovanom lete viedla k zníženiu spotreby paliva až o 11,4%, čo je pomerne významná

hodnota. Optimalizovaný let je len o 4 minúty dlhší v porovnaní so štandardným letom.

Druhý scenár porovnáva štandardný let so 78% obsadenosťou s optimalizovaným letom. Nižšia obsadenosť sa odrazila na menšej vzletovej hmotnosti (menšia o 1372 kg) a následne aj spotrebe (nižšia o 19 kg). V porovnaní s týmto scenárom, optimalizovaný let dosiahol o 9,5% lepšiu spotrebu paliva za 5 minútový nárast letového času ako je možné vidieť v Tabuľka.

Tabuľka 5: Výsledky celkovej optimalizácie letu Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Vzletová hmotnosť (kg)	Letový čas	Spotrebované palivo (kg)	Vzdialenosť (NM)
Štandardný let (LF = 78%)	20368	1 hour 12 min	885	300
Optimalizovaný let	21740	1 hour 17 min	801	300
Rozdiel	1372	5 min	-84	0
Rozdiel (%)	6,7%	6,9%	-9,5%	0,0%

Výsledky optimalizácie boli ďalej vyhodnotené vzhľadom na intenzitu prevádzky. V tejto časti bolo najdôležitejším porovnanie optimalizovaného letu s letom s nižšou obsadenosťou. **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** poskytuje hodnoty spotrebovaného paliva, emisií vyprodukovaných počas letu dĺžky 556 km ako aj emisií na pasažiera na jeden kilometer. Posledný indikátor poukazuje na to, že CO₂ intenzita prevádzky sa optimalizáciou znížila o 27 gramov na pasažiera na kilometer, čo predstavuje 30% zlepšenie v porovnaní so štandardným letom s LF=78%. Je vhodné poznamenať, že podľa informácií uvedených v časti 2, je CO₂ intenzita v prevádzke ešte vyššia (127 g/Pax/km). Výsledky tejto časti analýzy naznačujú, že faktor zaťaženia hrá významnú úlohu v optimalizácii energetickej intenzity prevádzky a mal by byť zohľadnený pri celkovej optimalizácii.

V poslednom kroku sme určili ročné úspory vzhľadom na spotrebu paliva ako aj CO₂ emisie za predpokladu 2000 vykonaných letov za rok. Porovnávajúc štandardný let so 78% obsadenosťou a optimalizovaný let, ročné úspory môžu dosiahnuť 168 ton paliva a zamedziť vypusteniu 531 ton CO₂ do atmosféry ako je zobrazené v Tabuľka.

Tabuľka 6: Efekty optimalizácie na emisie CO₂ a CO₂ intenzitu prevádzky Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Spotrebované palivo (kg)	CO ₂ emisie (kg)	Emisie/pax/km (g)
Štandardný let (LF = 78%)	885	2797	90
Optimalizovaný let	801	2531	63
Rozdiel	84	-266	-27
Rozdiel (%)	9,5%	-9,5%	-30,0%

Tabuľka 7: Výsledky optimalizácie letu na jeden rok. Zdroj: Vytvorené autorom s použitím databázy BADA.

ATR 72-600	Spotrebované palivo za rok (t)	Emisie za rok (t)
Štandardný let (LF = 78%)	1770	5593
Optimalizovaný let	1602	5062
Rozdiel	-168	-531
Rozdiel (%)	-9,5%	-9,5%

5.3.1. Diskusia

V praktickej časti tejto diplomovej práce navrhujeme úpravu piatich prevádzkových parametrov, ktoré môžu zaistiť až 11,4% pokles spotreby paliva a emisií CO₂. Okrem toho analýza ukazuje, že optimalizácia faktora zaťaženia zohráva významnú úlohu pri znížení CO₂ intenzity na jednotku výstupu (jeden cestujúci).

Podľa daných výsledkov vyvodzujeme, že najoptimálnejší výkon je zaručený úpravou letových parametrov ako aj maximalizáciou obsadenosti lietadla. Analýza úspešne preukázala, že optimalizácia prostredníctvom prevádzkových úprav je efektívna aj pre najúspornejšie lietadlo vo svojej kategórii.

Je vhodné poznamenať, že napriek tomu, že analýza prezentovaná v praktickej časti diplomovej práce bola vytvorená s cieľom, čo najbližšie reprezentovať typický let turbovrtulového lietadla, existujú možné rozdiely s reálnou prevádzkou. Aplikácia jednotlivých úprav prezentovaných v práci môže podliehať špecifickým podmienkam prevádzky jednotlivých operátorov, ale aj atmosférickým a environmentálnym podmienkam. Z tohto dôvodu sa rozsah uplatnenia jednotlivých úprav ako aj dosiahnutých úspor môže líšiť. To isté platí pre optimalizovaný faktor zaťaženia, keďže v prevádzke je náročné dosiahnuť priemernú hodnotou blížiacu sa k 100%.

Táto analýza bola limitovaná, použitým softvérom ako aj obmedzeným rozsahom, ktorý zahŕňal iba jeden typ lietadla.

6. Záver

Predmetom skúmania tejto práce boli environmentálne aspekty prevádzky turbovrtulových lietadiel. Táto kategória lietadiel nie je v popredí optimalizačného úsilia operátorov, pretože je zodpovedná za menšie prepravné objemy, a zároveň je vybavená najefektívnejšou technológiou vzhľadom na svoje určenie pre regionálny trh.

Ako vyplýva z analýzy vykonanej v rámci tejto diplomovej práce, environmentálna stopa turbovrtulového lietadla môže byť minimalizovaná starostlivým vyhodnotením vhodných prevádzkových postupov a optimalizáciou ich prevádzky, kde rozsah dosiahnuteľných úspor je rádovo 10%. V súvislosti s naliehavou potrebou obmedziť emisie CO₂ leteckej dopravy, takéto úspory poskytujú dôležitý prínos k cieľom stanovených samotným odvetvím.

Autori veria, že výskum vykonaný v tejto diplomovej práci objasnil možnosti optimalizácie prevádzky turbovrtulových lietadiel. Optimalizačné príležitosti sú významné a pohybujú sa od plánovania letu až po údržbu lietadla. Dodatočný výskum ich použitia u prevádzkovateľov by mohol poskytnúť cenný prehľad o reálnych úsporách v prevádzke. Výskum má ďalší potenciál, byť rozšírený aj o iné typy lietadiel.

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] ICAO: Aircraft Engine Emissions [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/aircraft-engine-emissions.aspx>. [Cit. 16 March 2021].
- [2] ATAG: Waypoint 2050 [Online]. Available: https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf. [Cit. 22 March 2021].
- [3] NLR, SEO: Destination 2050; A Route To Net Zero European Aviation 2021.
- [4] Oliver Wyman: Global fleet and MRO market forecast 2021-2031 [Online]. Available: <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2021/jan/global-fleet-and-mro-market-forecast-2021-2031.html>. [Cit. 7 April 2021].
- [5] ICAO: Introduction to the ICAO Basket of Measures to Mitigate Climate Change [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg111-115.pdf. [Cit. 16 March 2021].
- [6] GRAVER, B.; RUTHERFORD, D.; ZHENG, S.: CO2 emissions from commercial aviation 2013, 2018, and 2019 [Online]. Available: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf>. [Cit. 24 March 2021].
- [7] NASA: Turboprop Engine, [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/Animation/turbtyp/etpm.html>. [Cit. 21 April 2021].
- [8] BABIKIAN, R. The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives. In *Journal of Air Transport Management*, ISSN 0969-6997, 2002. p. 389-400
- [9] CASCONI, L.: L'evoluzione nel tempo dei sistemi Propulsivi [Online]. Available: http://www.aeropolis.it/workshop2018/Seminario%202018%20-9%20giugno/DocumentazionePresentazioni/Evoluzione%20dei%20sistemi%20propulsivi%2009_06_18.pdf. [Cit. May 7 2021].
- [10] FORMICA, M. 2019. *Regional Marketing ENAC - study materials*, Toulouse, 2019.
- [11] ATR: Connecting the future, turboprop market forecast 2018-2037 [Online]. Available: https://1tr779ud5r1jg938wedppw-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2020/09/2018-MarketForecast_Digital.pdf. [Cit. 31 March 2021].
- [12] ICAO: Doc 10013 - Operational Opportunities to Reduce Fuel Burn and Emissions [Online]. Available: <http://www.icssc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.10013-EN%20Operational%20Opportunities%20to%20Reduce%20Fuel%20Burn%20and%20Emissions.pdf>. [Cit. 28 March 2021].
- [13] MARCHAND B., *IATOM 18 - Flight Operations*, Toulouse : ENAC, 2019.
- [14] ATR: ATR Flight Crew Operating Manual [Online]. Available: <http://www.737ng.co.uk/atrf2fcom.pdf>. [Cit. 3 May 2021].
- [15] EASA: Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex IV - Part-CAT [Online]. Available: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Consolidated%20unofficial%20AMC%26GM_Annex%20IV%20Part-CAT.pdf. [Cit. 17 May 2021].