



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Environmentální udržitelnost leteckých spojení

Environmental Sustainability of Air Connections

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: doc. Ing. Peter Vittek, Ph.D.

Ing. Tereza Dvořáková

Bc. Jakub Švub

Praha 2023



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jakub Švub

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Environmentální udržitelnost leteckých spojení**

Název tématu (anglicky): Environmental Sustainability of Air Connections

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je nalézt systém environmentální klasifikace a letecká spojení s Letištěm Praha, které by bylo možné označovat jako environmentálně udržitelné. Práce je zaměřena na analýzu leteckých linek z pohledu jejich environmentální udržitelnosti.
- Vývoj a současná situace objemu letecké dopravy a emisí z ní vznikajících.
- Přístupy k environmentálně udržitelnému letectví, atributy a struktura.
- Klíčové požadavky pro tvorbu zelených leteckých linek.
- Případová studie pro Letiště Václava Havla v Praze.
- Aplikace zelených linek v rámci cestovního ruchu.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: BAUMEISTER, Stefan. Carbon emissions of selected flights in three geographical markets, 2017
HUPE, Jane. ICAO Environmental Report 2019
BECKEN, Susanne; SHUKER, Jon. A framework to help destinations manage carbon risk from aviation emissions, 2019

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Peter Vittek, Ph.D.**
Ing. Tereza Dvořáková

Datum zadání diplomové práce: **16. července 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí Ústavu letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jakub Švub
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 17. května 2022



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním uhlíkové stopy z letectví s jinými druhy dopravy. Na základě tohoto porovnání je stanovena klasifikace leteckých spojení s Letištěm Václava Havla v Praze. Znamky z této klasifikace čtenáři řeknou, který dopravní prostředek je pro danou trasu vhodnější a kolikrát nižší uhlíková stopa bude vytvořena při jeho užití. Výsledkem práce je environmentální klasifikace leteckých spojení a přiložené podmínky, které musí letecký dopravce na dané lince splnit, aby dosáhl požadovaného ohodnocení. Tuto klasifikaci mohou využít, letečtí dopravci, letiště, provozovatelé portálu na vyhledávání a srovnávání letenek, či samotní cestující.

Klíčová slova: Emise z dopravy, Greenhouse gas protocol, udržitelné letecké palivo, udržitelné letectví, uhlíková stopa.

Abstract

This diploma thesis deals with the comparison of the carbon footprint of aviation with other kinds of transport. The classification of air connections with Václav Havel's airport is based on this comparison. Grades from this classification will tell a reader which vehicle is more suitable for a given route and how much less carbon footprint will be created by its use. The result of this thesis is an environmental classification of air connections and attached conditions that must be met by airlines on a given air route to accomplish the requested evaluation. Airlines, airports, and gateway operators for searching and comparing air tickets or passengers themselves are allowed to utilize this classification.

Keywords: Carbon footprint, Greenhouse gas protocol, sustainable aviation fuel, sustainable aviation

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu doc. Ing. Peteru Vittekovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní. Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30.11. 2022



Podpis



Obsah

Úvod	12
1. Vývoj a současná situace objemu letecké dopravy a emisí z ní vznikajících	14
1.1. Růst emisí v letecké dopravě	15
1.2. Složení emisí z letectví a jeho vliv na životní prostředí	18
1.3. Klimatické změny	19
1.4. Porovnání letecké, silniční a železniční dopravy z hlediska emisí CO ₂	19
2. Definice a přístupy k environmentálně udržitelnému letectví	22
2.1. Waypoint 2050.....	22
2.2. Bezemisní letectví	22
2.3. CORSIA	23
2.4. Odhad množství Emisí CO ₂ do roku 2050	23
2.5. Závěr z mezinárodní závazků	25
3. Atributy a klíčové požadavky k snižování emisí v letectví	26
3.1. Technologické vylepšení letadel	26
3.2. Udržitelné letecké palivo	28
3.3. Efektivnější řízení letecké dopravy	29
3.4. Vylepšení infrastruktury na zemi.....	30
3.5. Vyšší obsazenost letadla	31
3.6. Shrnutí	31
4. Metoda výpočtu emisí pro případovou studii	33
4.1. Metodika výpočtu emisí v dopravě.....	33
5. Případová studie pro Letiště Václava Havla v Praze	38
5.1. Základní parametry studie.....	38
5.2. Poměrový ukazatel pro návrh klasifikace	54
5.3. Atributy ovlivňující emise v letectví a scénáře jejich užití	57
5.4. Porovnání automobilové a letecké dopravy	64
5.5. Porovnání železniční a letecké dopravy	74
5.6. Porovnání autobusové a letecké dopravy.....	77



6. Návrh klasifikace	81
6.1. Klasifikace pro porovnání automobilové dopravy s leteckou.	81
6.2. Klasifikace pro porovnání autobusové a železniční dopravy s leteckou dopravou	85
6.3. Diskuse	85
Závěr	88
Seznam použité literatury.....	91



Seznam obrázků

Obrázek 1 Růst kapacity letecké dopravy [1]	15
Obrázek 2 Celosvětové emise CO ₂ v letectví [2].....	16
Obrázek 3 Složení emisí a jeho vliv na životní prostředí [6]	18
Obrázek 4 Světové emise z dopravy [3]	20
Obrázek 5 Analýza růstu emisí CO ₂ [15].....	24
Obrázek 6 Mapa letišť s možností natankování SAF [20]	29
Obrázek 7 GHG protocol schema [29].....	35
Obrázek 8 Emise CO ₂ dle dopravního prostředku [zdroj vlastní]	44
Obrázek 9 Energetický mix vybraných zemí [34]	45
Obrázek 10 Porovnání emisí z letectví pomocí kalkulaček [zdroj vlastní]	47
Obrázek 11 Emise CO ₂ e ICAO a GHG fuel based [zdroj vlastní]	50
Obrázek 12 Emise CO ₂ e dle dopravního prostředku [zdroj vlastní].....	52
Obrázek 13 CO ₂ e na pkm dle dopravního prostředku [zdroj vlastní]	53
Obrázek 14 Graf PU auto vs. vlak [zdroj vlastní].....	55
Obrázek 15 PU vlak/letadlo [zdroj vlastní]	56
Obrázek 16 Poměrový ukazatel auto/letadlo [zdroj vlastní]	67
Obrázek 17 Poměrové ukazatele budoucích scénářů [zdroj vlastní]	71
Obrázek 18 Poměrový ukazatel elektromobil/letadlo od roku 2035 [zdroj vlastní]	73
Obrázek 19 Poměrový ukazatel autobus/letadlo [zdroj vlastní]	79



Seznam tabulek

Tabulka 1 Dopravní výkony v EU v roce 2016	20
Tabulka 2 Podíl objemu a emisí dopravních prostředků v roce 2018	21
Tabulka 3 Emisní faktory letecké dopravy	36
Tabulka 4 Emisní faktory železniční dopravy	37
Tabulka 5 Emisní faktory automobilové dopravy	37
Tabulka 6 Výběr destinací pro případovou studii	40
Tabulka 7 Vzdálenosti cílových destinací dle dopravních prostředků	41
Tabulka 8 Emise uhlíkové stopy dle GHG protocolu	43
Tabulka 9 Porovnání dat s emisními kalkulačkami	46
Tabulka 10 Výpočet emisí cesty letadlem dle GHG protocol fuel based	49
Tabulka 11 Finální vstupní data emisí jednotlivých dopravních prostředků	51
Tabulka 12 Poměrový ukazatel auto/letadlo	54
Tabulka 13 Atributy a jejich dopady na provoz	59
Tabulka 14 Tabulka jednotlivých scénářů	62
Tabulka 15 Emise cesty letadlem dle aktuálně možných scénářů	64
Tabulka 16 PU auto/letadlo pro scénáře Low – cost a Low – cost S	66
Tabulka 17 Tabulka scénářů s implementací od roku 2035	69
Tabulka 18 Tabulka poměrových ukazatelů auto/letadlo budoucích scénářů.	70
Tabulka 19 Tabulka poměrových ukazatelů vlak/etadlo	74
Tabulka 20 Tabulka poměrových ukazatelů vlak/letadlo pro vnitrostátní železnici	75
Tabulka 21 Rozdíl hodnot pro vlak a letadlo	76



Tabulka 22 Tabulka poměrových ukazatelů autobus/letadlo	78
Tabulka 23 Návrh klasifikace dle typických skupin cestujících	82
Tabulka 24 Klasifikace linek dle scénářů letu	83
Tabulka 25 Podmínky pro získání klasifikace	85



Seznam symbolů a zkratk základních pojmů

ASK	Available seats km – je množství nabízených sedaček vynásobených překonanou vzdáleností – sedačkokilometry
CO ₂	Oxid uhličitý
CO _{2e}	Eviduje se celkem sedm skleníkových plynů, které jsou relevantní z hlediska uhlíkové stopy. Jedná se o plyny Oxid uhličitý CO ₂ , metan, oxid dusný, fluorované uhlovodíky, perfluoruhlovodíky, fluorid sírový a fluorid dusitý. Těchto 7 skleníkových plynů je vyjádřeno v jedné jednotce, takzvanému ekvivalentu CO ₂ – CO _{2e} .
EASA	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
GHG protocol	Metodika pro výpočet uhlíkové stopy
GPU	Ground power unit, což je zdroj elektrické energie, na který se letadlo po dobu handlingu připojí.
IATA	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	Mezinárodní organizace civilního letectví
PKM	Passenger seats km – je množství obsazených sedaček vynásobených překonanou vzdáleností neboli přepravní výkon nebo objem neboli passenger km – osobokilometr (pkm)
SAF	Sustainable aviation fuel – udržitelné letecké palivo



Úvod

Každým rokem je v České republice překonáno nespočet teplotních rekordů, globální oteplování bývá neustále zmiňováno v předních médiích a jako hlavní příčina bývá uváděna rostoucí uhlíková stopa z lidské činnosti. Internet je plný článků poukazujících na příklady typu kolikrát horší je cesta na dovolenou pro čtyřčlennou rodinu autem než letadlem z hlediska uhlíkové stopy. Na základě takových argumentů je letecká doprava často označována jako druh dopravy s nejvyšším dopadem na životní prostředí. Takový argument je sice založen na pravdivých hodnotách, je ale potřeba brát v potaz fakt, že auta nebývají vždy obsazena čtyřmi osobami.

Při cestě z Prahy do Londýna uvolní jeden automobil do ovzduší v průměru 216 kg CO₂, zatímco letadlo na této trase uvolní v průměru 110 kg CO₂ na osobu. Dvě osoby letící letadlem tak mají uhlíkovou stopu 220 kg CO₂, což přibližně odpovídá cestě automobilem. Jedna osoba, letící například na služební cestu do Londýna, má tedy poloviční uhlíkovou stopu, než kdyby jela automobilem. Pár, letící do stejné destinace, bude mít letadlem i autem přibližně stejnou uhlíkovou stopu. Až skupina tří osob bude mít v automobilu nižší uhlíkovou stopu a čtyřčlenná rodina bude mít v letadle dvojnásobnou stopu než v automobilu. Je tedy výrok, že je cestování letadlem nejhorší způsob dopravy vždy pravdivý? Nejnižší uhlíkovou stopu má samozřejmě taková cesta, která se vůbec neuskuteční, jenže společnost potřebuje cestovat a omezování není dlouhodobě udržitelné. Proto jsem se rozhodl tuto problematiku prozkoumat podrobněji a zjistit, jestli je opravdu letectví nejhorší způsob dopravy, jestli nenaleznu případy, kdy je ekologičtější využít leteckou dopravu oproti jiné, a zdali s příchodem nových technologií nemůžeme očekávat obrat tohoto trendu.

Při porovnávání letecké, automobilové a železniční dopravy je důležité se kromě absolutního množství vypuštěných emisí podívat i na dopravní výkon. V médiích se objevují zprávy, informující o nejrychlejším růstu množství emisí z letectví v porovnání s ostatními druhy dopravy, tyto články ovšem často vynechávají informace o ještě větším růstu dopravního výkonu. Od roku 1966 vzrostl v letectví počet přepravených osobokilometrů 36krát, emise vzrostly pouze 4krát. Letectví s nejvyšším růstem emisí zároveň zažívá i nejvyšší energetické zefektivnění dopravy a tento trend stále pokračuje.

Cílem práce je nalézt systém environmentální klasifikace a letecká spojení s Letištěm Václava Havla v Praze, které by bylo možné označovat jako environmentálně udržitelné a vytvořit systém environmentální klasifikace linek v rámci cestovního ruchu. Rozhodl jsem se porovnávat



uhlíkovou stopu pro stejné cesty letadlem, vlakem a automobilem. Většina práce bude porovnávat letectví s automobilovou dopravou, která je hlavním konkurentem letectví pro středně dlouhé cesty po Evropě a zároveň obsluhuje nejvyšší podíl celkového dopravního objemu (74 %). Porovnání s železniční dopravou, která je zatím environmentálně nejpříznivější, bude sloužit jako pomyslná laťka, které by bylo dobré jednou dosáhnout.

V práci jsem zkoumal historický růst objemu letecké dopravy a sním související růst emisí CO₂, složení emisí z letectví a jejich vliv na životní prostředí. Byl zkoumán přístup, jak se k tomuto problému staví Mezinárodní organizace civilního letectví a další letecké organizace. Byly prostudovány mezinárodní závazky a cíle civilního letectví a analyzovány způsoby, pomocí jakých technologií a opatření by bylo možné těchto závazků dosáhnout. Z těchto technologií a opatření byly sestaveny scénáře letů, při jejichž dodržování lze dosáhnout daného snížení uhlíkové stopy. Tyto scénáře pak byly porovnány s automobilovou i železniční dopravou a bylo stanoveno, za jakých podmínek bude letecká doprava šetrnější k životnímu prostředí než jiné druhy dopravy. Jako hlavní výsledek byl vytvořen systém environmentální klasifikace linek, který vychází z poměru uhlíkové stopy letu letadlem a stejnou cestou jiným dopravním prostředkem, která udává, v jakých případech je který dopravní prostředek vhodnější. Systém byl navržen tak, aby mohl sloužit nejen cestujícím před nákupem jízdního dokladu při rozhodování, jaký dopravní prostředek použijí, tak i provozovatelům letišť, kteří by pomocí klasifikace svých letů mohli stanovit podíl jejich linek, které budou vhodnější volbou než jiné druhy dopravy. Také by mohl sloužit pro dopravce, kteří by mohli být takto environmentálně hodnoceni a získat konkurenční výhody před ostatními. V poslední řadě by tuto klasifikaci mohli využít vyhledávače letů jako Kiwi či Googleflights, kteří by mohli tuto klasifikaci poskytovat jako další indikátor pro volbu nákupu letenek.



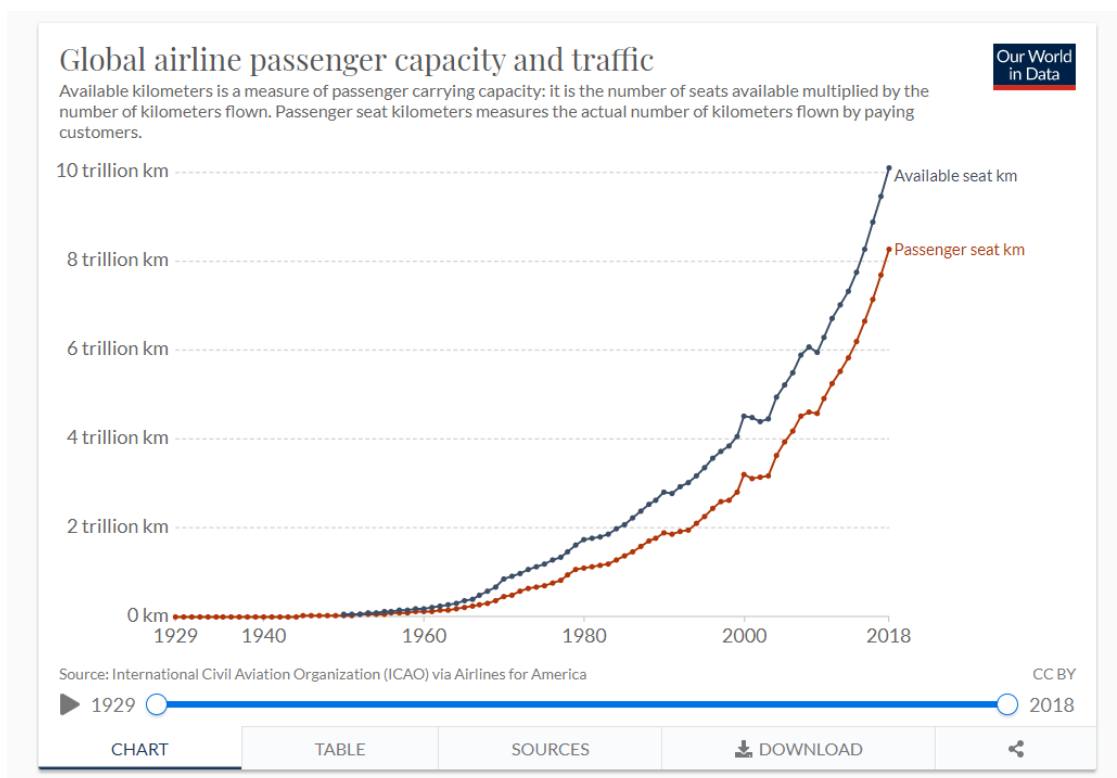
1. Vývoj a současná situace objemu letecké dopravy a emisí z ní vznikajících

S rostoucí světovou globalizací je letecká doprava dnes nedílnou součástí každého státu. Letectví představuje dosud nejrychlejší a nejkratší spojení s okolním světem. Letecká doprava ve většině případů nezná státní hranice a nemusí respektovat geografické ani terénní překážky jako je tomu u železniční, silniční či lodní dopravy. Kvalita těchto služeb tvoří často pýchu a prestiž daného státu. Pro expanzi tohoto druhu dopravy je potřeba vybudování podstatně méně infrastruktury, která nezabere tak rozsáhlé množství půdy, jako je tomu u dopravy silniční a železniční. Není proto divu, že objem letecké dopravy zažívá exponenciální růst.

Z interaktivního grafu (obrázek 1) dle zdroje Our world in data [1] je možné zjistit passenger seats km (pkm), česky osobokilometry, od roku 1929 až do roku 2018 a available seats km (ask), česky sedačkokilometry od roku 1950 do 2018. V leteckém průmyslu jsou dostupné kilometry základním měřítkem přepravní kapacity. Sedačkokilometry udávají množství dostupných sedaček vynásobené překonanou vzdáleností. Osobokilometry udávají, jaké množství sedaček vynásobené překonanou vzdáleností bylo obsazeno pasažéry. Sedačkokilometry udávají objem dopravní nabídky a osobokilometry množství využití nabídky neboli dopravní objem. Podílem osobokilometrů a sedačkokilometrů je možné spočítat takzvaný load factor (obsazenost letadla). Uvedená data odráží celosvětovou činnost osobních a nákladních leteckých společností, jak je uvádí International Civil Aviation Organization (ICAO).

V roce 1946, první rok po skončení Druhé světové války, kdy letectví zažilo největší technologický skok vpřed, bylo přepraveno 16 miliard pkm. O dvacet let později (1966) již objem letecké dopravy činil 229 miliard pkm, což je více než čtrnáctinásobný růst. V roce 1987 objem tvořil 1 590 miliard pkm a 2 370 miliard ask. Toto činilo téměř sedminásobný růst oproti předchozímu období. Procentuálně se sice tento růst snižuje, ale v absolutních hodnotách exponenciálně roste. V roce 2008 byl tento objem 4 610 miliard pkm a 6 060 miliard ask. V posledním roce měření (2018) byl objem 8 260 miliard pkm a 10 110 miliard ask. V posledních deseti letech se tedy objem letecké dopravy téměř zdvojnásobil.

Z průzkumu publikovaném na Our world in data [2] od roku 1966 tedy objem letecké dopravy vzrostl z 229 na 8 260 miliard pkm, což představuje **36násobný růst**.



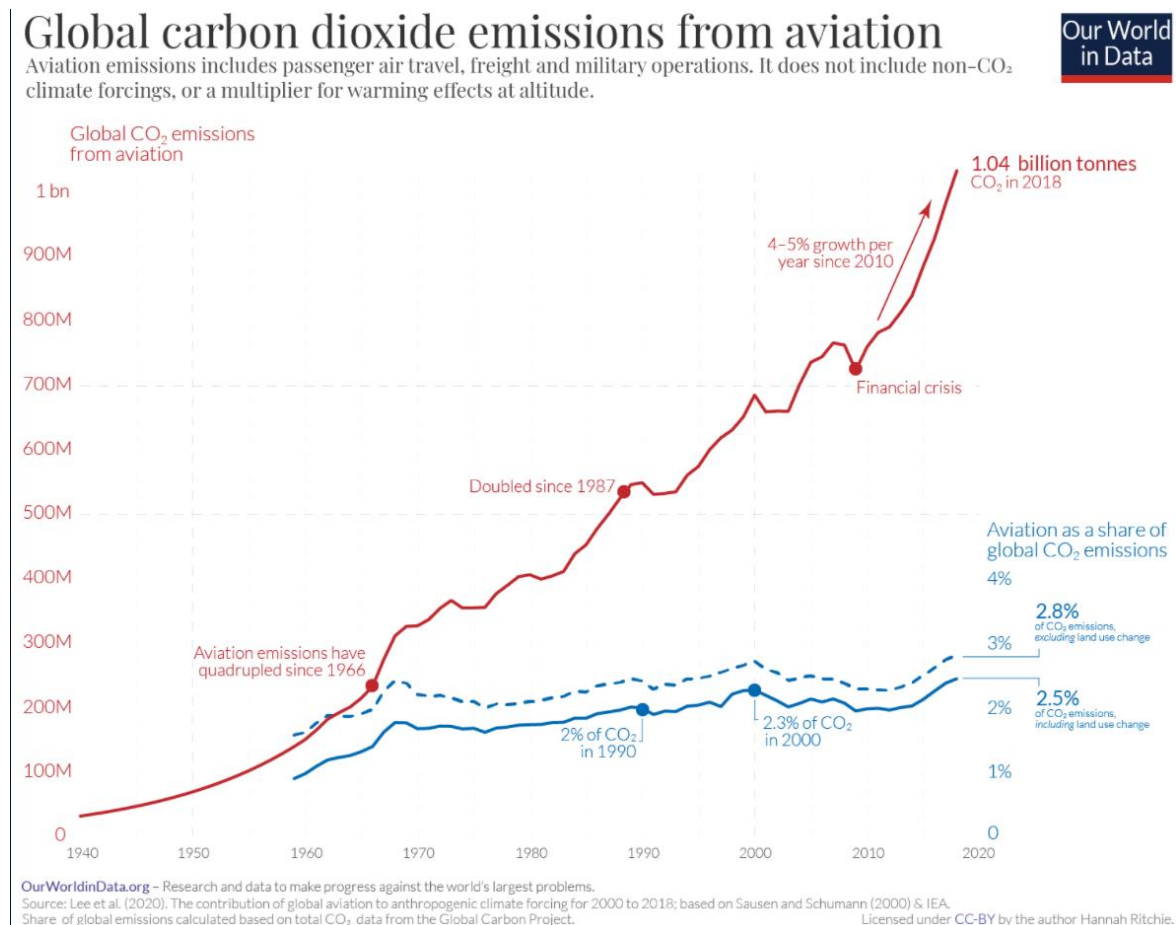
Obrázek 1 Růst kapacity letecké dopravy [1]

Osa X obrázku číslo 1 znázorňuje měřené časové období. Osa Y udává množství kilometrů v miliardách. Červená křivka vyjadřuje rostoucí dopravní objem (pkm) v čase. Modrá křivka udává růst nabízených osobokilometrů. Přesné hodnoty je možné vyčíst z interaktivního grafu pod odkazem. [1]

1.1. Růst emisí v letecké dopravě

S tak výrazným růstem ovšem musí přicházet i negativní dopady na životní prostředí. V dnešní době se čím dál častěji hovoří o tom, jakou hrozbu pro planetu představuje letecká doprava. Dle IATA Sustainable flying blog [4] letectví produkuje 2,5 % celosvětových emisí CO₂. Při uvážení produkce emisí CO₂ v dopravě, dle zdroje Our world in data [3], letectví vytváří 11,6 %, silniční 74,5 %, lodní 10,6 % a železniční 1 %. Samotná čísla jsou ovšem zavádějící, neboť nezahrnují objem, a naopak zahrnují i nákladní dopravu.

Zajímavé ovšem je porovnání růstu objemu letecké dopravy s růstem emisí CO₂.



Obrázek 2 Celosvětové emise CO₂ v letectví [2]

Osa X obrázku číslo 2 znázorňuje měřené časové období. Osa Y udává množství emisí CO₂ v letectví v milionech tun. Červená křivka vyjadřuje rostoucí emise v čase. Modrá křivka udává podíl emisí z letectví na celkových světových emisích.

Dle zdroje Our world in data, se **objem** letecké dopravy od roku 1966 **zvýšil 36krát** (obrázek 1) [1], ale **emise** se zvýšily **pouze 4krát** (obrázek 2 červená křivka) [2]. Modrá křivka ukazuje, že podíl letectví na celkových celosvětových emisích CO₂ již od roku 1970 tvořil přibližně 2 – 2,5 % a nijak výrazně nenarůstal.

Z tohoto nepoměru růstu objemu k emisím vyplývá, že letecká doprava se stává efektivnější a šetrnější k životnímu prostředí než dříve. Od roku 1960 se množství emisí CO₂ na nabízený sedačkakilometr snížil až 11krát, což představuje **zefektivnění o 91 %**. [2]



Toto zvýšení efektivity má hned několik příčin. Letadla mají vyšší kapacitu, úspornější motory, díky lepšímu tvaru nižší odpor, paliva obsahují méně škodlivých látek, řízení letového provozu funguje efektivněji, více se dbá na zkracování pojiždění letadel po plochách a taktéž plánování letů je zorganizováno lépe.

Přestože dokážeme létat o tolik úsporněji než dříve, exponenciální růst objemu dopravy to stále kompenzovat nedokáže, a tak od finanční krize v roce 2008 množství emisí CO₂ roste o 4-5 % ročně. Jelikož stejným tempem rostou i celosvětové emise, tak se tento roční nárůst neprojevuje zvyšováním podílu emisí z letectví na celkovém množství emisí.

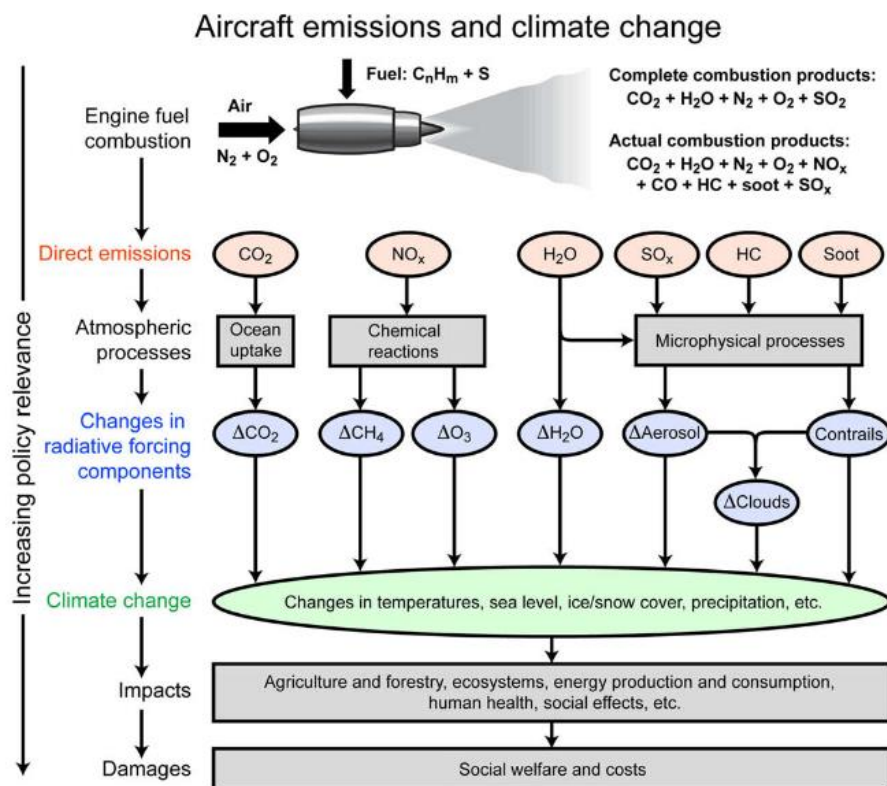
Dle IATA Sustainable flying blog [4] se v roce 2009 letectví zavázalo, vůbec jako první průmyslové odvětví, ke snížení uhlíkové stopy v celosvětovém měřítku. Dohoda požadovala, aby emise CO₂ byly do roku 2050 na polovičních hodnotách emisí z roku 2005. Některé regiony dokonce chtěly dosáhnout zero emission letectví (letectví s nulovou uhlíkovou stopou) do roku 2060. Dosavadní vylepšování ale zatím ke snížení celkového objemu emisí nevede, nicméně výrazný game-changer vedoucí k dosažení těchto cílů by mohla být letadla poháněná vodíkem nebo elektřinou nebo udržitelný letecký benzín (SAF – sustainable aviation fuel).

Dalším klíčovým faktorem k dosažení těchto cílů by mohlo být využívání letecké dopravy pouze pro efektivní lety. Letecké motory jsou vyvinuty tak, aby nejefektivněji fungovaly při rychlostech přibližně 800 km/h. Při cestovní rychlosti vypouští nejméně emisí v poměru s překonanou vzdáleností, zatímco při pojiždění po zemi, rozjezdu, vzletu, stoupání a přiblížování na přistání je množství vypuštěných emisí mnohonásobně vyšší. Proto lze říci, že čím je let delší, tím je zpravidla šetrnější pro životní prostředí.

Toto opatření už se začíná zavádět ve Francii nebo Rakousku, kde legislativně nařizují rušit vnitrostátní lety na krátké vzdálenosti. Příkladem může být francouzský zákon [5], který od jara 2022 zakázal vnitrostátní lety, pro které existuje stejné vlakové spojení s cestovní dobou nižší než 2,5 hodiny.

1.2. Složení emisí z letectví a jeho vliv na životní prostředí

Skleníkové plyny vypouštěné do ovzduší leteckou dopravou mají významný vliv na životní prostředí.



Obrázek 3 Složení emisí a jeho vliv na životní prostředí [6]

Z obrázku č. 3 si můžeme povšimnout, že letecká doprava produkuje velké množství skleníkových plynů. Mezi ně lze zařadit oxid uhličitý, vodní páru, a v některých případech oxidy dusíku (především oxid dusnatý a oxid dusičitý) a oxidy síry. Skleníkové plyny přispívají ke vzniku skleníkového jevu. Atmosféra způsobuje ohřívání planety tím, že absorbuje dopadající sluneční záření a současně zabraňuje jeho zpětnému odrazu do prostoru.

Skleníkové plyny, zkráceně GHG, jsou v letecké dopravě tvořeny nejvíce oxidem uhličitým. Mimo oteplování planety způsobuje okyselování oceánů.

Oxidy dusíku se společně s kyslíkem značně podílí na vzniku přízemního ozonu. Aerosoly v atmosféře snižují viditelnost a mají vliv na okyselování půdy a vodních zdrojů, produkují smog a mají negativní vliv na zdraví. [6], [7], [7], [8],



1.3. Klimatické změny

Ačkoliv mezinárodní letecká a lodní doprava tvoří jen 3,5 % celkových emisí GHG plynů v Evropské unii, jedná se o nejrychleji rostoucí zdroj těchto emisí. Projevy měnícího se klimatu lze pozorovat na všech místech nejen Evropy, ale celého světa.

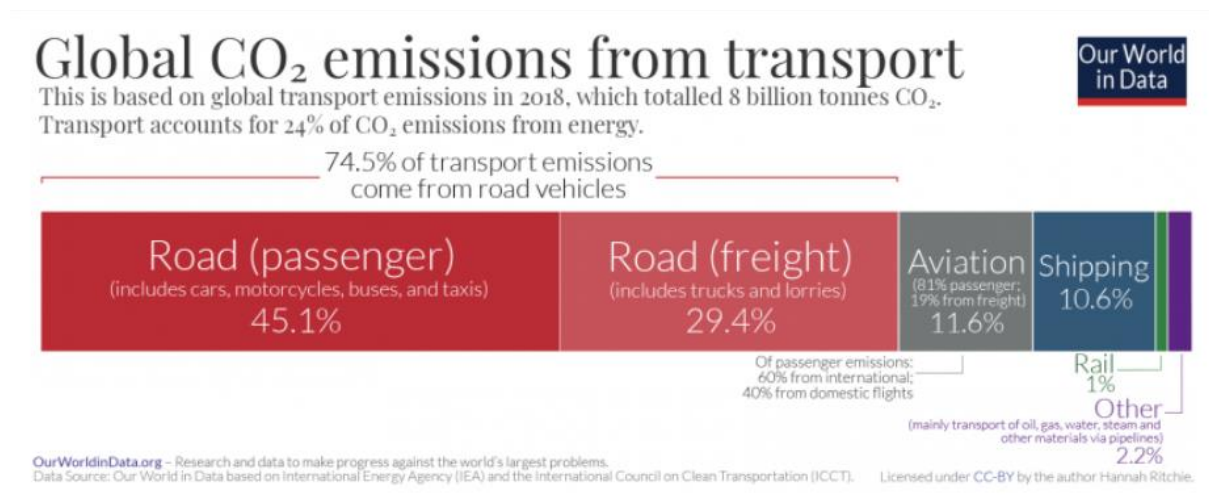
Z největších hrozeb je třeba vyzdvihnout dopad na přírodu a společnost.

Vysoké teploty, sucho, přírodní požáry, zmenšující se dostupnost sladké vody, povodně, vzestup mořské hladiny, ubývající biologická rozmanitost či okyselování půdy jsou jevy, které v případě další ignorace nutnosti snižovat emise, budou charakterizovat naši přírodu.

V důsledku ohrožení přírody nastává i ohrožení člověka, a to v podobě zdravotních obtíží, zaměstnanosti či změny kvality vzdělávání. Přicházející a sílící klimatické změny je potřeba dostat do povědomí široké veřejnosti, aby došlo ke změně. Nastávající problémy negativně ovlivní mnoho sektorů. Infrastrukturu a budovy, které nejsou připraveny na nastávající změny v podnebí a zvyšování se síly bouřek, větru nebo teplotním extrémům. Energetiku, která bude ovlivněna vlnou veder a obdobími sucha. Zemědělství a lesnictví, jehož produkce se bude značně snižovat. Pojištění – v závislosti na extrémních změnách klimatu se bude velkou měrou zvyšovat a stane se nedostupným pro určitou část obyvatelstva. V neposlední řadě také pro cestovní ruch, na němž je řada zemí závislá. Příčinou nepříznivé změny klimatu se cestovní ruch sníží. [10], [11]

1.4. Porovnání letecké, silniční a železniční dopravy z hlediska emisí CO₂

Z obrázku 4, publikovaném na Our world in data [3] můžeme vidět, že podíl emisí z dopravy na celkovém objemu emisí skleníkových plynů v roce 2018 byl 24 %. Z toho téměř tři čtvrtiny tvoří silniční doprava, 45,1 % osobní, 29,4 % nákladní, dále 11,6 % letecká, 10,6 % lodní a doprava železniční tvoří pouze 1 %.



Obrázek 4 Světové emise z dopravy [3]

Není možné porovnávat procentuální hodnoty jednotlivých dopravních prostředků, protože nemají všechny stejné dopravní výkony. Dle webu statista.com [13] v roce 2016 byly dopravní výkony následující:

Tabulka 1 Dopravní výkony v EU v roce 2016

Doprava	objem v EU [Miliardpkm]	podíl na objemu %
Železniční	450	6,9
Autobusová	555	8,5
Letecká	689	10,6
Automobilová	4824	74,0

Bohužel se nepodařilo dohledat data o objemu dopravy a množství emisí za stejné období. Podíl emisí (tabulka 2) udává data za rok 2018, kdežto objem dopravy (tabulka 1) za rok 2016.

Přestože silniční doprava, automobilová + autobusová, tvořila v roce 2016 82,5 % dopravního objemu, vyprodukovala pouze 45,1 % emisí CO₂. Železniční doprava tvořila 6,9 % dopravního objemu a vyprodukovala 1 % emisí a letecká doprava s objemem 10,6 % vyprodukovala 11,6 % emisí. Zbýlých 43 % emisí tvoří lodní, silniční nákladní a zbylé druhy dopravy.



Tabulka 2 Podíl objemu a emisí dopravních prostředků v roce 2018

Doprava	podíl na objemu %	podíl emisí %	emise/objem
Železniční	6,9	1	0,144
Letecká	10,6	11,6	1,09
Silniční (auto+bus)	74,0 + 8,5 = 82,5	45,1	0,55

Čím nižší je poměr emisí na objemu, tím má daná doprava nižší emise na pkm. Z toho vyplývá, že průměrně je letecká doprava přibližně 2x horší než silniční. V silniční dopravě je bohužel započítána autobusová i osobní automobilová doprava, což výsledek zkresluje.

Z takového porovnání lze říci, že podílem emisí ku podílu dopravního objemu má letecká doprava nejvyšší uhlíkovou stopu na pkm. Ekologické články odsuzující leteckou dopravu se tedy zakládají na pravdivých datech. Avšak platí tento výrok pro každý let? Toto tvrzení mě motivovalo k tomu, abych se tomuto problému detailněji věnoval a zjistil, zdali neexistují případy, kdy toto tvrzení není pravdivé a jestli jich v budoucnu nebude přibývat. V letectví budou existovat lety s extrémně vysokou uhlíkovou stopou na osobu, například privátní lety, ale zároveň i ty s nízkou uhlíkovou stopou, typicky lety low – cost dopravců.



2. Definice a přístupy k environmentálně udržitelnému letectví

Mezinárodní závazky

V roce 2009 se letectví stalo prvním průmyslovým odvětvím, které se zavázalo ke snížení uhlíkové stopy v globálním měřítku. Tato dohoda požadovala snížení CO₂ do roku 2050 na polovinu úrovně z roku 2005 i přes očekávaný růst objemu letecké dopravy.

Mnoho let byl tento cíl spíše otázkou víry, že toho lze dosáhnout, ale cesty k dosažení se stále rozcházejí. Publikace z roku 2020 Waypoint 2050 [4] ovšem ukázala, že je možné dosáhnout nulových emisí z letectví v 60. letech 21. století a některé regiony toho mohou dosáhnout i dříve.

2.1. Waypoint 2050

Waypoint 2050 je plán pro udržitelnou budoucnost letectví v souladu s Pařížskou dohodou o změně klimatu, která má za cíl omezit globální oteplování pod dva stupně Celsia ve srovnání s předindustriální úrovní. Ukazuje cesty ke snížení emisí CO₂ prostřednictvím technologií, provozní účinnosti, lepšího využívání infrastruktury a udržitelných leteckých paliv.

Závazek z roku 2009 měl tři cíle:

- Zvyšovat účinnost paliva o 1,5 % ročně v letech 2010–2020.
- Omezit zvyšování emisí z letectví do roku 2020.
- Dosáhnout snížení emisí o 50 % do roku 2050.

K roku 2021 se daří těchto cílů dosahovat. Zvyšování účinnosti paliv dokonce předčila očekávání a zvyšovala se o 2 % ročně. [4]

2.2. Bezemisní letectví

5. října 2021 Předseda a generální tajemník Rady ICAO představil ambiciózní cíl [12], který dnes přijal mezinárodní letecký průmysl, a to dosáhnout nulových emisí uhlíku do roku 2050. V prohlášení, které zveřejnila Air transportation group (ATAG), se odvětví leteckého průmyslu zavázalo, že „provozy globálního civilního letectví dosáhnou do roku 2050 nulových emisí uhlíku, podporované urychlenými opatřeními na zvýšení účinnosti, energetickou transformací a inovacemi v celém odvětví letectví a ve spolupráci s vládami po celém světě.“



2.3. CORSIA

Další možností, jak snižovat uhlíkovou stopu jsou projekty kompenzace emisí. Jedním z významných projektů v letectví ohledně kompenzace uhlíkové stopy je projekt CORSIA [14].

Program CORSIA je celosvětový mechanismus pro snižování emisí CO₂ v mezinárodním civilním letectví. Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) tento mechanismus přijala v roce 2018. CORSIA má za cíl kompenzovat emise financováním jiných projektů vedoucích ke snižování emisí. Pro příklad lze zmínit výstavbu udržitelných zdrojů energie, či výsadbu zeleně. Do tohoto projektu se zapojilo víc než 100 zemí a zbylé přislíbily účast do roku 2027.

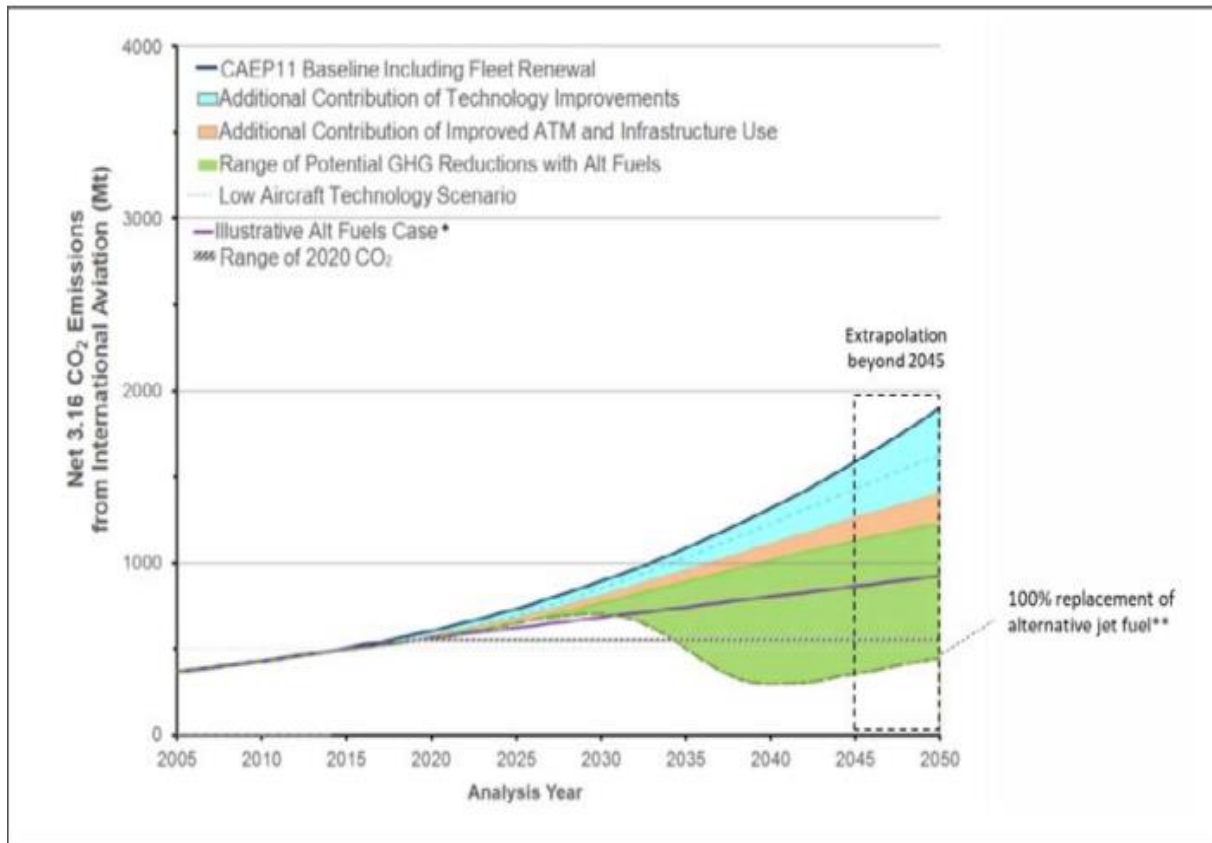
Corsia začala platit 1. ledna 2019, kdy měly všechny letecké společnosti každoročně reportovat své emise CO₂.

Od 2021 mělo dojít ke kompenzacím těch, kteří překračují limity naměřené z roku 2019.

Z důvodu pandemie covid-19 byl start těchto kompenzací posunut na rok 2022. K 1.1. 2022 se k tomuto projektu přihlásilo 107 členských států ICAO a zbylé přislíbily svou účast do roku 2027. Zapojením členské země do tohoto projektu umožňuje požadovat po leteckých společnostech reportovat uhlíkovou stopu a vymáhat kompenzace z nich vycházející.

2.4. Odhad množství Emisí CO₂ do roku 2050

Dle Environmental report z roku 2019 vydaného ICAO v roce 2015 mezinárodní letectví spálilo přibližně 160 Mtun paliva a tím vytvořilo 506 Mt emisí CO₂. Je odhadnuto, že do roku 2050 spotřeba paliva stoupne 2,4 až 3,8krát oproti hodnotám z roku 2015. Emise jsou odhadovány v rozmezí 400 Mtun CO₂ a 2 000 Mtun CO₂.



Obrázek 5 Analýza růstu emisí CO₂ [15]

Osa X obrázku číslo 5 znázorňuje měřené časové období. Osa Y udává množství emisí CO₂ v letectví v milionech tun. Z tohoto grafu, vydaným ICAO v Environmental report 2019, [15] lze pozorovat předpokládaný růst emisí CO₂ v civilním letectví. Modrá křivka, která se v roce 2050 přibližuje k hodnotě 2 000 Mtun CO₂, značí zvýšení emisí bez očekávaného snižování emisí CO₂ novými technologiemi, vylepšováním infrastruktury nebo alternativními palivy. Z grafu je zřejmé, v jakém poměru se očekává snižování emisí díky technologiím na letadlech (světlemodrá plocha), vylepšováním řízení letového provozu a infrastruktury na zemi (oranžová plocha) a využíváním alternativních paliv (zelená plocha). Lze vidět, že největší roli hrají alternativní paliva (sustainable aviation fuel – SAF). Dle odhadů ICAO mohlo v roce 2020 2,6 % letecké dopravy využívat alternativní paliva. Analýza také zvažovala dlouhodobou dostupnost udržitelných alternativních paliv a zjistila, že by bylo fyzicky možné uspokojit 100 % poptávky do roku 2050 z alternativních paliv. K významnému nahrazení klasických paliv alternativními dojde dle ICAO od roku 2035. SAF bude v následujících výpočtech hrát klíčovou roli.



Závěr Mezinárodní organizace civilního letectví zní, že emise z mezinárodního letectví se zvýší do roku 2050 na přibližně 2- 4násobek úrovní z roku 2015, pokud nedojde k technologickému zefektivňování letectví. Pokud technologie budou aplikovány a vyvíjeny dle odhadů ICAO, a především pokud dojde k 100% nahrazení klasického paliva alternativním, bude možné dosáhnout v roce 2050 hodnot emisí z roku 2005 i přes 4násobný růst objemu dopravy. [15]

2.5. Závěr z mezinárodní závazků

ICAO si plně uvědomuje závažnost růstu emisí z letectví a snaží se s tím bojovat. Nastavuje limity a požadavky na zlepšování efektivity, v roce 2009 se letectví zavázalo snížit uhlíkovou stopu na polovinu úrovně z roku 2005 do roku 2050. V roce 2021 dokonce tento cíl zvýšila na bezemisní letectví do roku 2050, nicméně z prognóz vychází, že druhého ambiciózního cíle nebude dosaženo. V následující kapitole je podrobněji rozebráno, pomocí čeho by bylo možné se k těmto cílům přiblížit.



3. Atributy a klíčové požadavky k snižování emisí v letectví

K dosažení závazků či cílů z kapitoly 2 a vytvoření udržitelně rostoucí letecké dopravy, ICAO stanovilo koš opatření obsahující technologické vylepšení letadel, operační zlepšení řízení letecké dopravy, udržitelné letecké palivo a tržní ekonomická opatření, například CORSIA.

3.1. Technologické vylepšení letadel

Pokrok ve zvyšování účinnosti spalování leteckého paliva je výsledkem neustálého zlepšování leteckých motorů, systémů, draku letadla (trup, křídlo, ocasní plochy, podvozek a soustava řízení), snižování celkové váhy konstrukce letadla a zlepšení aerodynamiky. Redukce váhy letadla je klíčový faktor při snižování spotřeby paliva. Vývoj nových technologií stále pokračuje a vede ke zvyšování podílu kompozitních materiálů v draku. Nové typy letadel také obsahují více a více elektronických systémů řízení na úkor mechanických či hydraulických, které jsou také výrazně těžší než elektrické.

Aerodynamika

Účinnost spalování leteckého paliva nejvíce ovlivňuje odpor letadla. Odpor vzniká při jakémkoli pohybu. Celkový odpor se skládá z více složek, z nichž nejvýznamnější roli hraje aerodynamický odpor, což je tření vzduchu o veškeré části letadla. V oblasti aerodynamiky už v historickém vývoji došlo k obrovskému posunu, hlavně díky zlepšování tvaru stroje. (viz kapitola 1 - díky tomu je účinnost o 80 % vyšší než před 50 lety). V článku *Improving Aircraft Fuel Efficiency by Using the Adaptive Wing and Winglets* [16] se odhaduje, že vylepšením povrchu letadla je možné ještě snížit tření až o 5 %.

Letecké motory

Nejvýznamnějším průlomem v oblasti leteckých motorů pro aktuální civilní dopravu jsou nové motory pro Boeing 737 Max a Airbus A 320 Neo. Letadla typu Boeing 737 a Airbus A 320 jsou zároveň nejpoužívanějšími letadly a vytváří většinu objemu letecké dopravy.

Výrobce letadel Boeing uvádí [17], že Boeing 737 Max snižuje množství paliva a emisí o 14 % oproti dnešním nejúspěšnějším letadlům s jednou uličkou (nejčastější letadla pro lety po Evropě) a až o 20 % oproti původní nejnovější verzi B737 v době, kdy byla poprvé uvedena do služby.



Výrobce letadel Airbus uvádí [18], že Airbus A320 Neo díky novým motorům snižuje množství paliva a emisí o 15 % proti dnešním nejúspornějším letadlům s jednou uličkou a díky novým Sharkletům (speciální zakončení křídla, které snižuje aerodynamické tření za letu) o další 4 %.

Kromě těchto příkladů budoucího vývoje leteckých pohonných jednotek, se výraznější průlom očekává ve vývoji elektrických, vodíkových či hybridních leteckých motorů. S těmi ovšem nebude pro klasifikaci leteckých linek počítáno, jelikož jejich hromadná implementace je nejistá.

Struktura a materiály

Klíčovým faktorem ke snižování množství spáleného paliva a CO₂ emisí vypuštěných do atmosféry je celkové snížení konstrukční hmotnosti letadel. Snižování hmotnosti ovšem nemůže negativně ovlivnit pevnost nebo tuhost konstrukcí a tím i bezpečnost.

Další způsoby ovlivnění hmotnosti jsou:

- optimalizace technologií a materiálů,
- zavedení nových materiálů a technologií,
- alternativní letecká architektura (tvary).

Technologii kompozitních materiálů můžeme vidět stále více v malých i velkých letadlech. Tyto materiály jsou dražší na výrobu, nicméně snižují hmotnost konstrukce a tím i provozní náklady na každý let. V této klíčové kategorii už ovšem došlo k takovému technologickému posunu, že není očekáván další průlom a případná vylepšení půjdou těžko vyčíslit do výpočtů pro případovou studii v této práci, proto s tímto atributem nebude počítáno. [16]

Shrnutí technologických vylepšení letadel

Dle EASA vydaném *European Aviation Environmental Report 2019* [19], lze díky technologickému vylepšování leteckých konstrukcí zvýšit účinnost spalování paliva, snížit celkový odpor letadla či snížit hmotnost, což výrazně ovlivňuje množství spáleného paliva při každém letu a tím i objem emisí vypuštěných do ovzduší. Nicméně v těchto faktorech se průmysl zabývá od začátku letectví, dosáhl obrovských úspěchů a vylepšení, proto je každé zlepšení v tomto směru velice náročné. Abychom zachovali stejnou úroveň bezpečnosti, není možné tyto vlastnosti vylepšovat do nekonečna, proto je důležité hledat i jiné způsoby zefektivnění letecké dopravy.



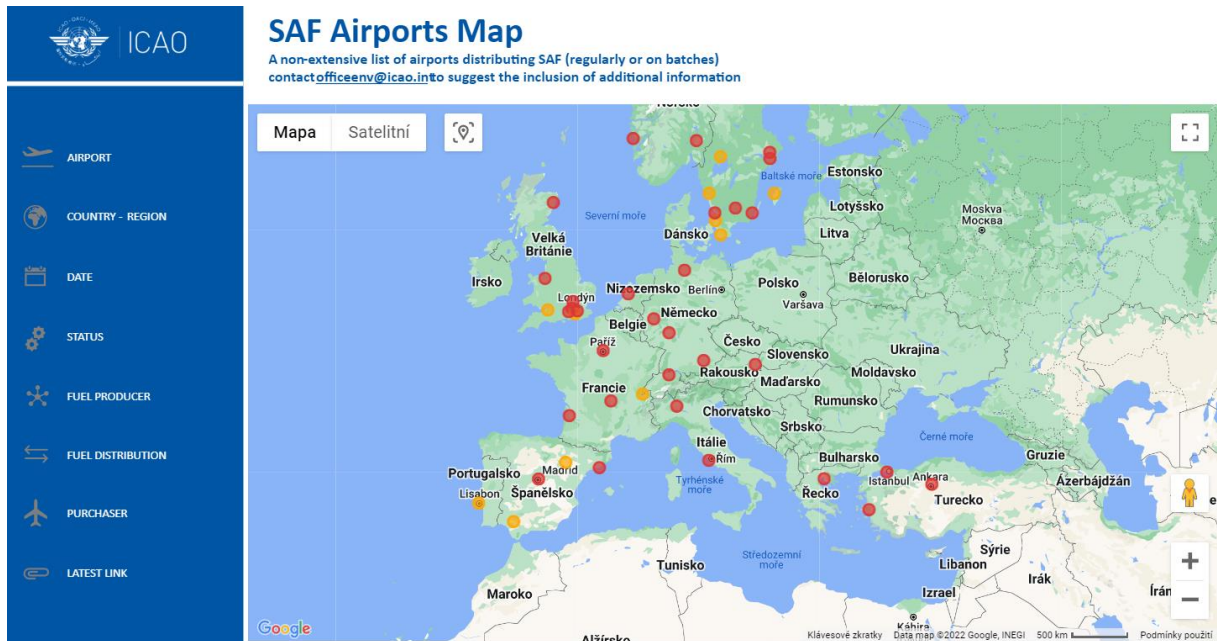
3.2. Udržitelné letecké palivo

Efektivní používání nízkoemisních technologií jako je vodíkový nebo elektrický pohon se očekává kolem roku 2040 nebo později. To znamená, že Sustainable aviation fuel (SAF) - udržitelné letecké palivo poskytuje jedinou uskutečnitelnou cestu, jak výrazně snížit emise v letectví v krátkém nebo středním časovém horizontu.

Dle Shall aviation [21] je SAF vyráběn z obnovitelných zdrojů. Typicky to bývají již použité suroviny jako třeba kuchyňský olej a jiné nepalmové odpadní oleje ze zvířat nebo rostlin, pevný odpad z domácností a podniků jako jsou obaly, papír, textil a zbytky potravin, které by jinak putovaly na skládku či do spalovny. Mezi další zdroje patří lesní odpad a energetické plodiny (rychle rostoucí rostliny nebo řasy).

ICAO uvádí [22], že SAF je bezpečné, ověřené palivo, které má potenciál snížit množství emisí o 80 % v porovnání s konvenčním leteckým palivem. SAF je také možné smíchat v poměru až 50 % s konvenčním leteckým palivem v dnes používaných letadlech. Toto palivo bylo v leteckém průmyslu poprvé použito v roce 2008 a dodnes zajistilo přes 250 000 letů po celém světě. V současnosti však objemy využití zůstávají nízké. SAF v roce 2020 představoval zhruba 2,6 % trhu s leteckým palivem. [15]

Je to způsobeno více faktory, jako jsou například vysoké výrobní náklady a skutečností, že technologie SAF je ještě v počátcích vývoje. V důsledku toho jsou investice do vývoje efektivnější výroby a tím snížení ceny výroby stále nízké. Má-li se zvýšit a zlevnit objem výroby, je potřeba silnější tlak poptávky, což můžeme očekávat, vzhledem k stávajícím cílům a trendům. Dnes je možné natankovat SAF na 57 letištích po celém světě.



Obrázek 6 Mapa letišť s možností natankování SAF [20]

Na obrázku číslo 5 vydaném ICAO [20], je možné vidět, na kterých evropských letištích je možné natankovat SAF. Červené body označují letiště, kde je SAF k dispozici neustále, žluté body označují místo s nepravidelnou možností tankování SAF.

SAF, stejně jako technologické vylepšování konstrukcí letadel, nepovedou k úplnému bezuhlíkovému letectví, nicméně snížit emise CO₂ až o 80 % do doby, než dojde k masivnímu využívání elektrických či vodíkových pohonů. Také mohou sloužit jako určité alternativy k čistějším pohonům. Například letadla na elektrický pohon při současných technologiích budou vhodné na krátké nebo středně dlouhé tratě, zatímco na zaoceánské lety bude vhodnější využívat jiné druhy pohonů.

3.3. Efektivnější řízení letecké dopravy

Optimalizace řízení letového provozu je další významnou možností, jak snížit objem spáleného paliva za letu.

Letadla v dnešní době často nemohou létat nejkratší možnou trasou z bodu A do bodu B, což znamená delší letové trasy a vyšší emise. Iniciativa Single European Sky – Jednotné evropské nebe má za cíl sjednotit řízení letového provozu nad Evropou, a tím vytvořit přímé letové trasy. Nebude zohledňovat pozemní hranice států, které dnes často odpovídají hranicím jednotlivých okrsků řízení letového provozu a měla by tak zajistit něco jako „Schengenský prostor“ ve



vzduchu. Pro letectví to bude znamenat kratší lety, menší zpoždění a samozřejmě nižší emise. Přestože společný systém řízení letového provozu již existuje desetiletí, je rozdělen na okresy podle hranic států a přelety do jiných okresů jsou možné v určitých bodech, tudíž trasa není nejkratší možná úsečka. Projekty jako Single European Sky nebo americká obdoba Next Gen dle odhadů Centre de Documentación de Almería [23] sníží emise až o 10 %.

Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) je koncept pro provoz letiště založený na kvalitní výměně informací a efektivní spolupráci všech zúčastněných partnerů. Provozovatelé letišť, provozovatelé letadel, pozemní odbavovací služby, řízení letového provozu, všechny tyto subjekty mají dopředu daný čas, kdy má být letadlo připraveno na opuštění stojánky (parkovací stání pro letadlo), kdy má dojet na runway, kdy má vzlétnout. Systém CDM umožňuje těmto subjektům vyměnit si informace o zdržení v reálném čase a díky této spolupráci je možné zkrátit dobu, kdy má letadlo spuštěné motory, i dobu pojíždění. Například pařížskému letišti Charlese de Gaulla se podařilo dle Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires [24] snížit množství spotřebovaného taxi-time (čas pojíždění letadla po letištních plochách) o 8 % díky této změně v řízení.

Eurocontrol vydal report posouzení dopadu A-CDM za rok 2016. [25] Tento report porovnával úspory emisí, spáleného paliva, zpoždění letů a snížení taxi-time v 17 evropských letištích využívajících koncept CDM. Díky tomuto systému bylo sníženo množství spáleného paliva i vypuštěných emisí o 7,7 % na let, zpoždění bylo průměrně sníženo o 10,3 % a taxi-time (pojezdový čas letadla po letištních plochách) byl zkrácen o 7 %.

3.4. Vylepšení infrastruktury na zemi

Dalším významným faktorem, jak snížit emise z letecké dopravy je vytvoření takzvaných zelených letišť. Tento krok se zdá být snáze splnitelný, jelikož chod letiště je možné zajišťovat elektrickou energií namísto energií pocházející z fosilních paliv. Elektrická energie sice ještě není zero-emission energie, ale je považována za zelenou energii, protože je možné ji vyrábět z obnovitelných zdrojů a podíl výroby elektřiny z těchto zdrojů se každým rokem zvyšuje. Pokud bude letiště zásobováno energií z obnovitelných zdrojů, či samo vyrábět takto elektřinu, například pomocí fotovoltaických elektráren na střeších budov či v okolí letiště nebo větrných turbín, bude možno toto letiště považovat za zero-emission. Takové letiště se může podílet i na snížení emisí samotného letu například tím, že bude na každé stojánce nainstalováno GPU – ground power unit, což je zdroj elektrické energie, na který se letadlo po dobu handlingu připojí. Díky tomu nemusí letadlo mít nastartovanou APU – záložní pohonnou jednotku, která



napájí nezbytné letecké systémy, jako například osvětlení v letadle, klimatizaci po dobu odbavení letadla pro další let, která by jinak spalovala letecké palivo. [26]

3.5. Vyšší obsazenost letadla

Load factor, neboli obsazenost letadla, udává procentuální podíl obsazených sedaček z nabízených. ICAO udává [27], že průměrná hodnota load factor pro lety po Evropě byla v roce 2018 82,3 %. Zvýšením obsazenosti letadla se sice emise v absolutních hodnotách nesníží, naopak vzroste váha letadla, takže emise budou mírně vyšší (zanedbatelně), ale emise na dopravní výkon se sníží, jelikož bude přepraveno více osob.

Aerolinka Ryanair ve svém Sustainability report [36] udává, že v letech 2017–2020 měl load factor 94, 95, 96, 95 % a její cíl, ke kterému se zavazují do roku 2030 je dlouhodobě držet load factor na 96 %.

Aerolinka Wizzair ve svém Sustainability report [37] udává, že v letech 2019 a 2020 měla load factor 93,5 % a 92,7 % a její cíl je dostat load factor na hodnotu 95 %.

Z toho je usuzováno, že lze dlouhodobě udržovat load factor na 96 %.

3.6. Shrnutí

Možnosti, jak snižovat emise letecké dopravy převážně tvoří tyto atributy:

- aerodynamické vlastnosti a váha konstrukce,
- pohonná jednotka,
- druh paliva,
- efektivita řízení letecké dopravy,
- způsob napájení letiště.

U všech těchto atributů probíhá výzkum a vývoj. Některé už dosáhly takového vývoje, že u nich se už klíčový pokrok neočekává, jako například aerodynamické vlastnosti a váha letadla, naopak druh paliva by mohl hrát klíčovou roli k dosažení zero emission aviation.

Nejrychlejší cesta ke snižování emisí v letectví je kombinovat všechny atributy dohromady. Úplného uhlíkově neutrálního letectví dosáhneme ve chvíli, kdy budou letadla létat na vodíkový nebo elektrický pohon, zároveň letiště budou napájena bezemisní elektrickou energií (elektroletadlo se nabije bezemisní elektrickou energií) nebo vodík, který natankují, bude vyroben elektrolýzou, jež bude také poháněna bezemisní elektrickou energií. Tyto pohony sice



jsou považovány za uhlíkově neutrální, nicméně vývojem ostatních faktorů snížíme spotřebu energie, tím i provozní náklady a emise do doby, než tyto pohonné jednotky budou masivně rozšířeny. To se očekává nejdříve v roce 2040.

Z první kapitoly vyplývá, že obecně je letectví environmentálně nejhorší způsob dopravy. V druhé kapitole jsou popsány závazky civilního letectví a ve třetí atributy, jak těchto závazků dosáhnout. Některé je možné aplikovat ihned, některé později. Je proto výrok, že letectví je nejhorší způsob dopravy, vždy pravdivý? Proto je v následujících kapitolách vytvořena případová studie, ve které je porovnávána uhlíková stopa do zvolených destinací dle dopravních prostředků a důraz je kladen na nalezení případů, kdy bude cesta letadlem způsobovat nižší emise než cesta jiným dopravním prostředkem.



4. Metoda výpočtu emisí pro případovou studii

Pro případovou studii je nutné spočítat emise jednotlivých tras pro dané dopravní prostředky. V této kapitole je popsána metodika výpočtů. V kapitole 4.1 bude popsána metodika GHG protocol, která byla vybrána, protože je to světově nejpoužívanější metodika určování uhlíkové stopy veškerých procesů. Jako zdroj informací byly použity oficiální stránky GHG protocolu. [28], [29], [30]

4.1. Metodika výpočtu emisí v dopravě

Greenhouse gass protocol v překladu znamená protocol o skleníkových plynech. Jedná se o standardy, pokyny, nástroje a školení pro podniky a vládu k měření a výpočtům emisí skleníkových plynů způsobujících klimatické změny.

GHG protocol stanovil obsáhlý celosvětový rámec k měření a výpočtu emisí skleníkových plynů z činnosti v soukromém a veřejném sektoru. Tato metodika byla vytvořena 20letou spoluprací „*World Resources Institute (WRI), World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), GHG Protocol works with governments, industry associations, NGOs, businesses*“ a dalšími organizacemi.

GHG protocol touto spoluprací vytvořil světově nejširší program pro výpočet uhlíkové stopy společností pojmenovaný „Corporate Accounting and Reporting Standard“ Tento program poskytuje postupy pro výpočet uhlíkové stopy podniků téměř jakéhokoliv odvětví a zahrnuje jejich veškerou činnost.

GHG protocol rozděluje emise do tří kategorií podle původu:

Scope 1 (přímé emise) - jedná se o aktivity společnosti, které jsou společností kontrolovány a uvolňují emise přímo do ovzduší. Zahrnují emise ze stacionárního a mobilního spalování paliv, emise z průmyslových procesů a fugitivní emise.

Scope 2 (nepřímé emise z energie) - jde o emise z nakoupené elektrické energie, páry, tepla či chlazení, které jsou spojené s jejich výrobou, ale nevznikají přímo ve společnosti.

Scope 3 (ostatní nepřímé emise) - emise, které vznikají mimo hranice společnosti i mimo její kontrolu. Zahrnují 15 kategorií, do kterých je započítávání GHG emisí rozděleno tak, aby nedošlo ke dvojímu započítávání. Tyto kategorie jsou:

- nákup zboží a služeb,



- nákup kapitálových statků,
- nepřímé emise ze Scope 1 a Scope 2,
- doprava a distribuce externími dopravci (Upstream),
- odpady z činnosti společnosti,
- služební cesty zaměstnanců,
- dojíždění zaměstnanců do práce,
- leasing (Vy si pronajímáte),
- doprava a distribuce externími dopravci (Downstream),
- následné zpracování produktů společnosti,
- používání produktů společnosti,
- likvidace produktů společnosti,
- leasing (Vy pronajímáte),
- franšízy,
- investice.

V roce 2016 využívalo metodiku GHG protocol k stanovení své uhlíkové stopy 92 % společností z žebříčku Fortune 500, který každoročně řadí 500 amerických soukromých a veřejných korporací podle jejich hrubého obratu.

Pro výpočet uhlíkové stopy pro danou trasu je použita metodika dle GHG protocolu, Scope 3, kategorie služební cesty zaměstnanců.

GHG Protocol eviduje celkem sedm skleníkových plynů, které jsou relevantní z hlediska uhlíkové stopy podniku. Jedná se o plyny Oxid uhličitý CO₂, metan, oxid dusný, fluorované uhlovodíky, perfluoruhlovodíky, fluorid sírový a fluorid dusitý. Těchto 7 skleníkových plynů je vyjádřeno v jedné jednotce, takzvaném **ekvivalentu CO₂ – CO₂e**. V práci bude dále počítáno s hodnotami CO₂e, což znamená, že ve výpočtech nejsou zahrnuty pouze emise CO₂, ale všech 7 výše zmíněných plynů.

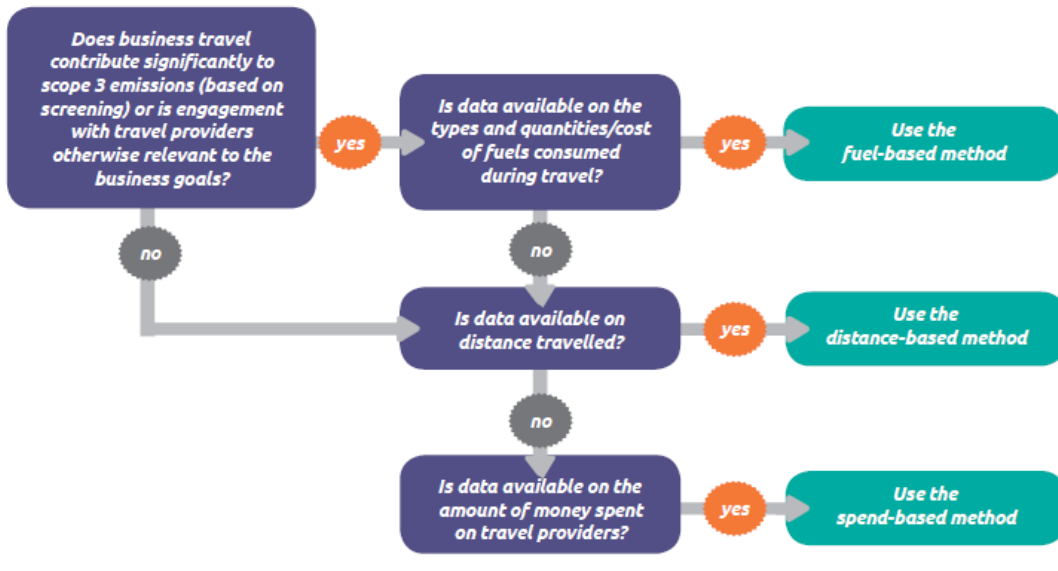
V dokumentu Technical Guidance for Calculating Scope 3 (version 1.0) na stránce 82 jsou popsány 3 typy výpočtů uhlíkové stopy služebních cest podle dat, které jsou k dispozici. Viz obrázek číslo 6.

Calculating emissions from business travel

Figure 6.1 gives a decision tree for selecting a calculation method for emissions from business travel. Companies may use one of the following methods to calculate scope 3 emissions from business travel:

- **Fuel-based method**, which involves determining the amount of fuel consumed during business travel (i.e., scope 1 and scope 2 emissions of transport providers) and applying the appropriate emission factor for that fuel
- **Distance-based method**, which involves determining the distance and mode of business trips, then applying the appropriate emission factor for the mode used
- **Spend-based method**, which involves determining the amount of money spent on each mode of business travel transport and applying secondary (EEIO) emission factors.

Figure [6.1] Decision tree for selecting a calculation method for emissions from business travel



Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions

[82]

Obrázek 7 GHG protocol schema [29]

V obrázku č. 7 lze pozorovat tři typy výpočtů:

- metoda na základě paliva,
- metoda na základě vzdálenosti,
- metoda na základě útraty.

Pokud jsou k dispozici data o spáleném palivu pro danou cestu, je vhodné použít metodu na základě paliva. Pokud taková data nejsou k dispozici, ale víme vzdálenost, která byla překonána při služební cestě, je nutné použít metodu na základě vzdálenosti. Pokud nejsou k dispozici data ani o palivu, ani o vzdálenosti, ale víme, kolik jsme za služební cestu zaplatili, je možné využít metodu na základě útraty.



Tato práce obsahuje případovou studii o zelených linkách z Letiště Václava Havla v Praze, ve které je porovnávána uhlíkovou stopu leteckých linek s cestou do stejných destinací vlakem nebo automobilem. Pro tuto studii je použita **metoda na základě vzdálenosti**, protože tato data jsou veřejně dostupná.

V GHG protocolu je tento výpočet dále rozšířen o výpočet uhlíkové stopy z pobytu v dané destinaci, ten ovšem není předmětem této práce. Tento výpočet se používá pro služební cesty, nicméně tato metodika lze použít pro jakékoliv cesty z bodu A do bodu B, proto je použita v této práci, nehledě na to, zda cestující cestují na služební cestu, na dovolenou nebo za rodinou. [28], [29], [30]

Výpočet samotné uhlíkové stopy pro danou cestu je součin vzdálenosti a emisního faktoru daného dopravního prostředku. Lze využít emisní faktory z databáze EPA (pro spojené státy americké) nebo DEFRA (vytvořené spoluprací Department for Environment Food & Rural Affairs a Department for Business, Energy & Industrial Strategy ve Spojeném království).

V této práci jsou použity emisní faktory z DEFRA 2021 Advanced, protože je počítána uhlíková stopa pro trasy v Evropě.

Emisní faktory dle jednotlivých dopravních prostředků:

DEFRA 2021 advanced [31] rozděluje emisní faktory letecké dopravy do následujících kategorií:

- **Letecká doprava**

Tabulka 3 Emisní faktory letecké dopravy

Typ letu	Třída	Jednotka	kg CO ₂ e
Domestic, to/from UK	Average passenger	passenger.km	0.24587
Short-haul, to/from UK	Average passenger	passenger.km	0.15353
	Economy class	passenger.km	0.15102
	Business class	passenger.km	0.22652
Long-haul, to/from UK	Average passenger	passenger.km	0.19309
	Economy class	passenger.km	0.14787
	Premium economy class	passenger.km	0.23659
	Business class	passenger.km	0.42882
	First class	passenger.km	0.59147
International, to/from non-UK	Average passenger	passenger.km	0.18362
	Economy class	passenger.km	0.140625
	Premium economy class	passenger.km	0.225



	Business class	passenger.km	0.40781
	First class	passenger.km	0.56251

Pro výpočty v této práci jsou použity faktory z International, to/from non-UK pro economy třídu. Bylo možné vybrat průměrného pasažéra, nicméně cílem této práce je nalézt případy, kdy bude letecká doprava mít co nejnižší uhlíkovou stopu a tyto vstupní údaje jsou následně upravovány o nové technologie a konfigurace v letadle, ve kterých business a first class nejsou uvažovány. Navíc většinu objemu letecké dopravy tvoří právě economy třída.

- **Železniční doprava**

Tabulka 4 Emisní faktory železniční dopravy

Activity	Type	Unit	kg CO ₂ e
Rail	National rail	passenger.km	0.03549
	International rail	passenger.km	0.00446
	Light rail and tram	passenger.km	0.02861
	London Underground	passenger.km	0.02781

Pro výpočty v této práci jsou použity faktory z International rail, protože linky jsou mezinárodní.

- **Automobilová doprava**

Tabulka 5 Emisní faktory automobilové dopravy

			Diesel	Petrol	Battery Electric Vehicle
Activity	Type	Unit	kg CO ₂ e	kg CO ₂ e	kg CO ₂ e
Cars(by size)	Small car	km	0.13758	0.14946	0.04565
		miles	0.22143	0.24052	0.07348
	Medium car	km	0.16496	0.18785	0.05254
		miles	0.26549	0.30231	0.08455
	Large car	km	0.20721	0.27909	0.06066
		miles	0.33348	0.44914	0.09762
	Average car	km	0.16843	0.17431	0.05477
		miles	0.27108	0.28053	0.08814

Pro výpočty emisí z automobilové dopravy je použit faktor z Average cars pro Diesel. Podíl dieslových a benzínových automobilů je v Evropě přibližně stejný. Diesel je vybrán, protože je vhodnější pro cesty na dlouhé vzdálenosti. Jelikož jsou výpočty emisí z letectví upravovány o moderní technologie, je v závěru zahrnuta i analýza porovnání cesty letadlem s cestou elektromobilem.

Hodnoty jsou udávány v jednotkách kg CO₂e viz základní pojmy a definice.



5. Případová studie pro Letiště Václava Havla v Praze

V této studii je porovnáno spojení Prahy s vybranými destinacemi z hlediska uhlíkové stopy, kterou vytvoří 1 pasažér pro čtyři formy dopravy – leteckou, osobní automobilovou, železniční a autobusovou. Dále je v práci častým výskytem fakt, že nějaký typ dopravy je lepší/vhodnější/výhodnější než jiný. V kontextu je to vždy myšleno lepší/vhodnější/výhodnější z hlediska emisí CO₂e. V práci nejsou porovnávány ostatní výhody, jako třeba časová či cenová úspora. Případová studie pro Letiště Václava Havla v Praze obsahuje tyto kapitoly:

- základní parametry studie,
- poměrový ukazatel pro návrh klasifikace,
- atributy ovlivňující emise v letectví a scénáře jejich užití,
- porovnání automobilové a letecké dopravy,
- porovnání železniční a letecké dopravy,
- porovnání autobusové a letecké dopravy.

5.1. Základní parametry studie

Kapitola základní parametry studie obsahuje následující podkapitoly:

- **výběr destinací,**
- **vstupní data** – spočítána dle metodiky GHG protocol viz. Kapitola 4.1.,
- **validace dat** – data jsou porovnána s daty získanými z emisních kalkulaček,
- **analýza dat,**
- **stanovení finálních vstupních dat.**

Výběr destinací

Ke dni 11.9. 2022 existovalo 120 přímých leteckých spojení z Letiště Václava Havla v Praze. K těmto 120 destinacím byly ještě přidány destinace Moskva, Sama, Novosibirsk, které sice aktuálně nejsou v provozu, ale v roce 2021 byly operovány.

Těmto 123 destinacím byly nejdříve přiděleny letecké vzdálenosti z Pražského letiště z webu Flightsfrom. [32]

Tyto destinace byly seřazeny podle vzdálenosti od nejnižší po největší. Poté ve sloupcích Porovnat byly vyřazeny některé destinace, pro které nemá smysl porovnávat různé druhy dopravy. Například ostrovní destinace, příliš vzdálené destinace jako Soul nebo Dubaj, či cíle, kam je cesta po souši výrazně delší



než letecká trasa, například Tunisko, Egypt. Ze zbytku bylo vybráno 35 destinací vhodných k porovnání. Byly vybrány na základě těchto kritérií:

- zastoupení ve většině geografických oblastech,
- v případě podobné vzdálenosti více destinací z nich byla vybrána pouze jedna (pokud bylo odhadnuto že vzdálenost autem nebo vlakem bude výrazně odlišná od druhé destinace s podobnou vzdáleností, bylo vybráno i více destinací se stejnými vzdálenostmi),
- nejčastěji navštěvované turistické destinace.

Vybrané destinace byly seřazeny na prvních 35 řádků podle vzdálenosti, nevybrané jsou od 36. řádku také seřazené podle vzdálenosti. Zdroj vzdáleností – flightsfrom [32].



Tabulka 6 Výběr destinací pro případovou studii

Destinace	Vzdálenost[km]	Porovnat	Vybráno	Destinace	Vzdálenost[km]	Porovnat
Vídeň	278		Ano	Neapol	1030	
Frankfurt nad Mohanem	407		Ano	Jasy	1036	
Varšava	523		Ano	Sofia	1084	
Benátky	533		Ano	Oliba	1093	
Miláno	648		Ano	Nottingham	1125	
Brusel	700		Ano	Kišinev	1141	
Amsterdam	708		Ano	Birmingham	1147	
Paris	856		Ano	Leeds	1170	
Řím	940		Ano	Manchester	1197	
Riga	996		Ano	Bristol	1205	
Marseille	1015		Ano	Newcastle	1212	
Bari	1020		Ano	Nantes	1215	
Londýn	1049		Ano	Toulouse	1218	
Tirana	1059		Ano	Korfu	1255	Ne
Bukurešť	1086		Ano	Lamezia	1260	Ne
Stockholm	1094		Ano	Cagliari	1281	Ne
Oslo	1146		Ano	Varna	1289	
Kyjev	1189		Ano	Palermo	1335	
Thessaloniki	1268		Ano	Preveza	1350	
Bordeaux	1273		Ano	Menorca	1390	Ne
Bourgas	1321		Ano	Glasgow	1406	
Helsinky	1327		Ano	Katánie	1413	Ne
Edinburg	1347		Ano	Kefalonia	1427	Ne
Barcelona	1364		Ano	Dublin	1463	Ne
Petrohrad	1485		Ano	Zakynthos	1477	Ne
Istanbul	1496		Ano	Belfast	1480	Ne
Athény	1564		Ano	Palma de Mallorca	1487	Ne
Moskva	1653		Ano	Valletta	1591	Ne
Valencia	1659		Ano	Monastir	1628	Ne
Madrid	1759		Ano	Mykonos	1670	Ne
Alicante	1770		Ano	Samos	1715	Ne
Antalya	1984		Ano	Théra	1778	Ne
Malaga	2127		Ano	Kos	1810	Ne
Lisabon	2240		Ano	Chania	1815	Ne
Faro	2304		Ano	Heraklion	1873	Ne
Mnichov	265			Rhodos	1894	Ne
Krakow	396			Karpathos	1945	Ne
Budapešť	471			Almeria	1995	
Kolín nad Rýnem	512			Porto	2035	
Zurich	513			Lamaka	2319	Ne
Treviso	520			Kutaisi	2346	Ne
Košice	533			Samara	2475	Ne
Düsseldorf	547			TelAviv	2648	Ne
Basilej	568			Keflavik	2666	Ne
Luxemburk	582			Ammán	2734	Ne
Milán	600			Baku	2978	Ne
Kodaň	626			Hurghada	3057	Ne
Eindhoven	644			Funchal	3212	Ne
Boloňa	661			Marsa Alam	3255	Ne
Billund	718			Lanzarote	3334	Ne
Turín	739			Fuerteventura	3393	Ne
Ženeva	743			Las Palmas	3530	Ne
Bělehrad	745			Tenerife	3591	Ne
Split	750			Kuwait	3670	Ne
Pisa	776			Riyadh	3963	Ne
Zadar	814			Dauhá	4241	Ne
Lyon	842			Novosibirsk	4480	Ne
Gothenburg	854			Dubaj	4488	Ne
Pescara	856			NewYork	6586	Ne
Paříž	879			Newark	6607	Ne
Nice	896			Seoul	8280	Ne



Parametry pro výpočet uhlíkové stopy

Pro výpočet uhlíkové stopy dle metody na základě vzdálenosti podle metody GHG protocol, je potřeba znát vzdálenost a příslušný emisní faktor.

Emisní faktory:

- **letadlo** – International, to/from non-UK economy class, jehož hodnota je **0.140625 kg CO_{2e}** na pkm,
- **vlak – International rail**, jehož hodnota je **0,00446 kg CO_{2e}** na pkm,
- **automobil** – Average car, jehož hodnota je **0.16843 kg CO_{2e}** na pkm.

Vzdálenost:

Vzdálenosti pro cestu do stejné destinace bude pro každý prostředek jiná, protože využívají rozdílnou infrastrukturu.

- Letecké vzdálenosti byly získány ze serveru flightsfrom.com.
- Železniční vzdálenosti byly spočítány z trasy ze Rome2rio [33], kde byla pro danou trasu vybrána možnost train a dále sečteny vzdálenosti jednotlivých úseků.
- Automobilní vzdálenosti byly získány z plánovače tras na serveru mapy.cz.

Tabulka 7 Vzdálenosti cílových destinací dle dopravních prostředků

Destinace	Vzdálenost letecká [km]	Vzdálenost silniční [km]	Vzdálenost železniční [km]
Vídeň	278	334	401
Frankfurt	407	511	566
Varšava	523	677	740
Benátky	533	822	1 013
Miláno	648	868	954
Brusel	700	902	958
Amsterdam	708	878	1 004
Paris	856	1 032	1 265
Řím	940	1 304	1 491
Riga	996	1 336	není spoj
Marseille	1 015	1 388	1 519
Bari	1 020	1 610	1 754
Londýn	1 049	1 280	1 329
Tirana	1 059	1 496	není spoj
Bukurešť	1 086	1 353	1 491



Stockholm	1 094	1 751	1 613
Oslo	1 146	1 704	1 814
Kyjev	1 189	1 397	1 481
Thessaloniki	1 268	1 521	není spoj
Bordeaux	1 273	1 605	1 801
Bourgas	1 321	1 677	1 950
Helsinki	1 327	1 732	není spoj
Edinburg	1 347	1 942	1 957
Barcelona	1 364	1 714	2 345
Sankt Petersburg	1 485	1 854	2 185
Istanbul	1 496	1 842	2 189
Athény	1 564	1 986	není spoj
Moskva	1 653	1 918	2 074
Valencia	1 659	2 055	2 710
Madrid	1 759	2 299	2 950
Alicante	1 770	2 234	2 888
Antalya	1 984	2 564	není spoj
Malaga	2 127	2 683	3 463
Lisabon	2 240	2 762	3 695
Faro	2 304	2 903	3 990

V tabulce číslo 7 můžeme vidět vzdálenosti do jednotlivých destinací dle typu dopravního prostředku. Jelikož nebylo nalezeno železniční spojení pro destinace, Riga, Tirana, Thesaloniki, Helsinki, Athény, Antalya, jsou z následujících výpočtů vyřazeny. Frankfurt nad Mohan od příštích tabulek už bude nazývan pouze Frankfurt, kvůli lepší přehlednosti grafů a tabulek. [31]



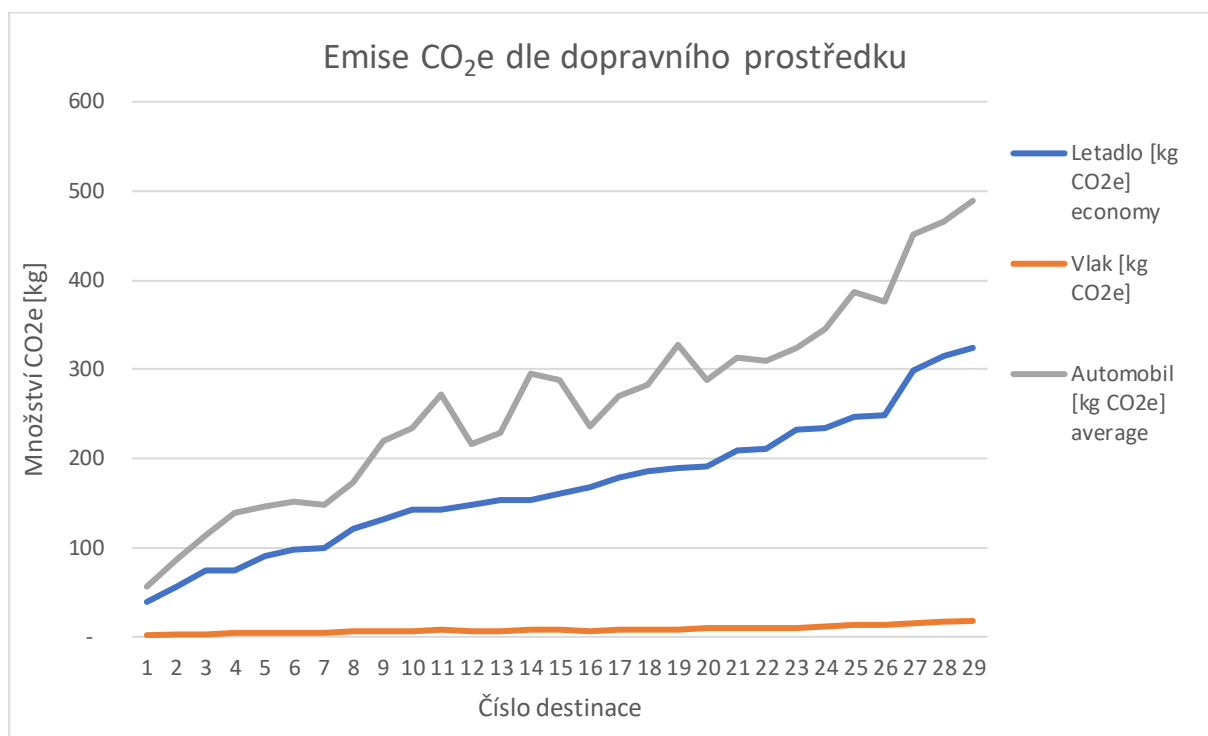
Uhlíková stopa výpočtem dle GHG protocolu

Součinem vzdáleností z tabulky číslo 7 a příslušným emisním faktorem byly získány následující hodnoty uhlíkové stopy pro dané trasy a dané dopravní prostředky.

Tabulka 8 Emise uhlíkové stopy dle GHG protocolu

Destinace	Letadlo [kg CO ₂ e]	Vlak [kg CO ₂ e]	Automobil [kg CO ₂ e]
Vídeň	39	1,79	56
Frankfurt	57	2,52	86
Varšava	74	3,30	114
Benátky	75	4,52	138
Miláno	91	4,25	146
Brusel	98	4,27	152
Amsterdam	100	4,48	148
Paris	120	5,64	174
Řím	132	6,65	220
Marseille	143	6,78	234
Bari	143	7,82	271
Londýn	148	5,93	216
Bukurešť	153	6,65	228
Stockholm	154	7,20	295
Oslo	161	8,09	287
Kyjev	167	6,61	235
Bordeaux	179	8,03	270
Bourgas	186	8,70	282
Edinburg	189	8,73	327
Barcelona	192	10,46	289
Sankt Petersburg	209	9,75	312
Istanbul	210	9,76	310
Moskva	232	9,25	323
Valencia	233	12,09	346
Madrid	247	13,16	387
Alicante	249	12,88	376
Malaga	299	15,44	452
Lisabon	315	16,48	465
Faro	324	17,79	489

Pro lepší vizuální čtení dat je tabulka převedena do grafu obrázku č. 8



Obrázek 8 Emise CO₂ dle dopravního prostředku [zdroj vlastní]

Křivky jsou vytvořeny na základě hodnot z tabulky č. 8

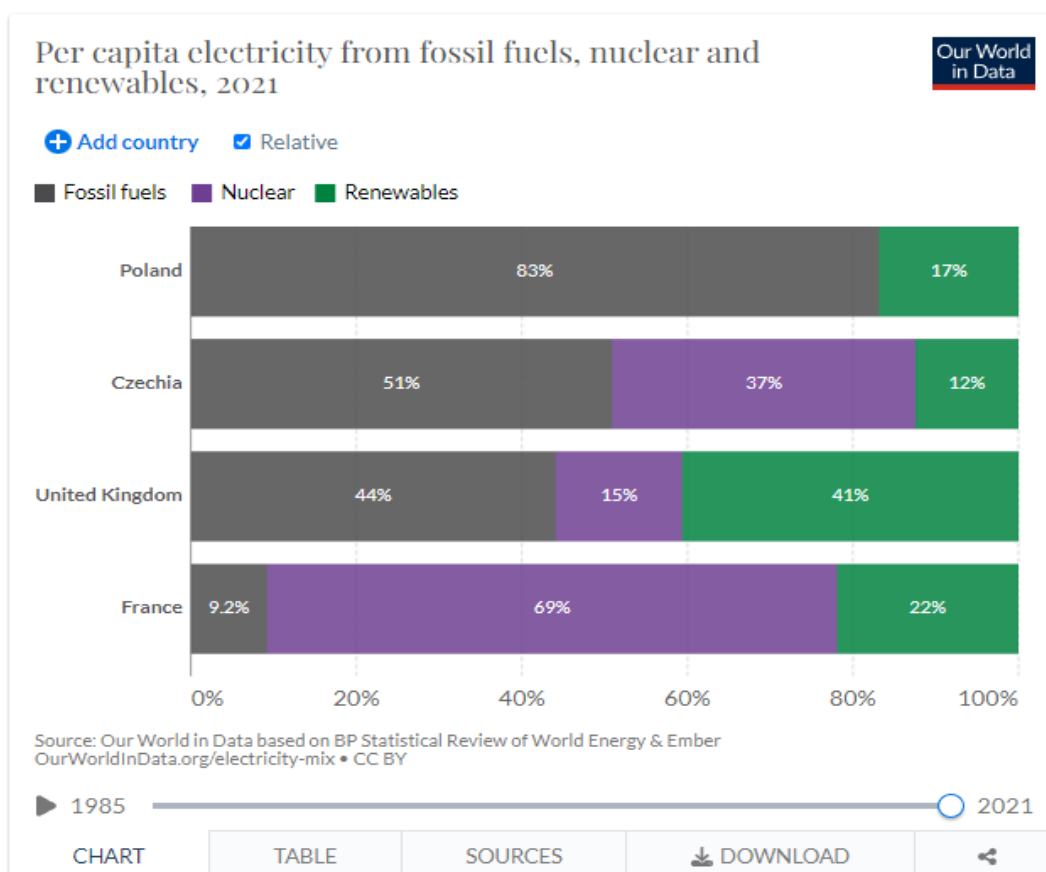
Pro lepší přehlednost grafu byly na ose x názvy destinací nahrazeny čísly. Destinace jsou seřazeny dle vzdálenosti, číslo 1 odpovídá Vídni, číslo 29 Faru.

Už ze vzorce lze předpokládat, že průběh množství emisí bude mít téměř lineární růst. Zuby na křivkách způsobují rozdílné vzdálenosti do stejné destinace pro automobilní, leteckou a železniční dopravu.

Tento způsob výpočtu emisí je sice mezinárodně uznávaný a slouží k uhlíkovým auditům firmám a k podkladům pro ESG reporty (**Environmental, Social, and Governance reporting**), nicméně z tohoto grafu lze vidět, že tento výpočet neodpovídá realitě. Tento výpočet slouží pro výpočet emisí ze služebních cest zaměstnanců, což u firem tvoří jen zlomek jejich emisí, tudíž je důležité tento výpočet zjednodušit, určit nějaké průměrné hodnoty, aby tento výpočet nebyl příliš složitý.

Je však zřejmé, že u některých forem dopravy toto zjednodušení zkreslí výsledky více než u jiných.

- Letecká doprava – Výpočet je součin vzdálenosti a emisního faktoru. Emisní faktor je zvolen stejný pro všechny lety mimo UK. Proto je stanoveno průměrné letadlo s průměrnou obsazeností. To zapříčiní velké nepřesnosti, jelikož v letectví je velký podíl paliva spálen při vzletu a stoupaní a cestovní rychlost je poté podstatně úspornější. Na krátkých linkách působí jiná letadla než na delších, některá letiště jsou vybavena lepšími navigačními prostředky a každý let je jinak obsazen.
- Železniční doprava – Emise z železniční dopravy jsou spočítány z emisí na výrobu elektřiny, kterou spotřebuje vlak na dané cestě, vyděleny počtem osob ve vlaku. Jelikož je zde též stanoven jediný emisní faktor pro International Rail, je počítáno, že výroba elektřiny ve Velké Británii či Francii má stejné emise, jako výroba elektřiny v České republice či Polsku.



Obrázek 9 Energetický mix vybraných zemí [34]

Z obrázku číslo 9, publikovaného zdrojem Our world in data [34] je vidět, že energetický mix těchto 4 zemí je velice odlišný. Z obrázku lze vidět, že počítat s jedním emisním faktorem pro všechny evropské státy je velice nepřesné a pro výpočet by bylo dobré zahrnout energetický mix dané země.



- Silniční doprava – Výpočet u silniční dopravy považují za dostatečně přesný, protože vzdálenost je možné přesně naměřit, emisní faktory paliva v rozdílných zemích se neliší.

Validace vypočítaných dat

Jelikož data spočítaná dle metody GHG protocol distance based se ukázala jako nepřesná pro leteckou dopravu, zkusíme tyto data zvalidovat pomocí kalkulaček uhlíkové stopy.

- Letecká doprava

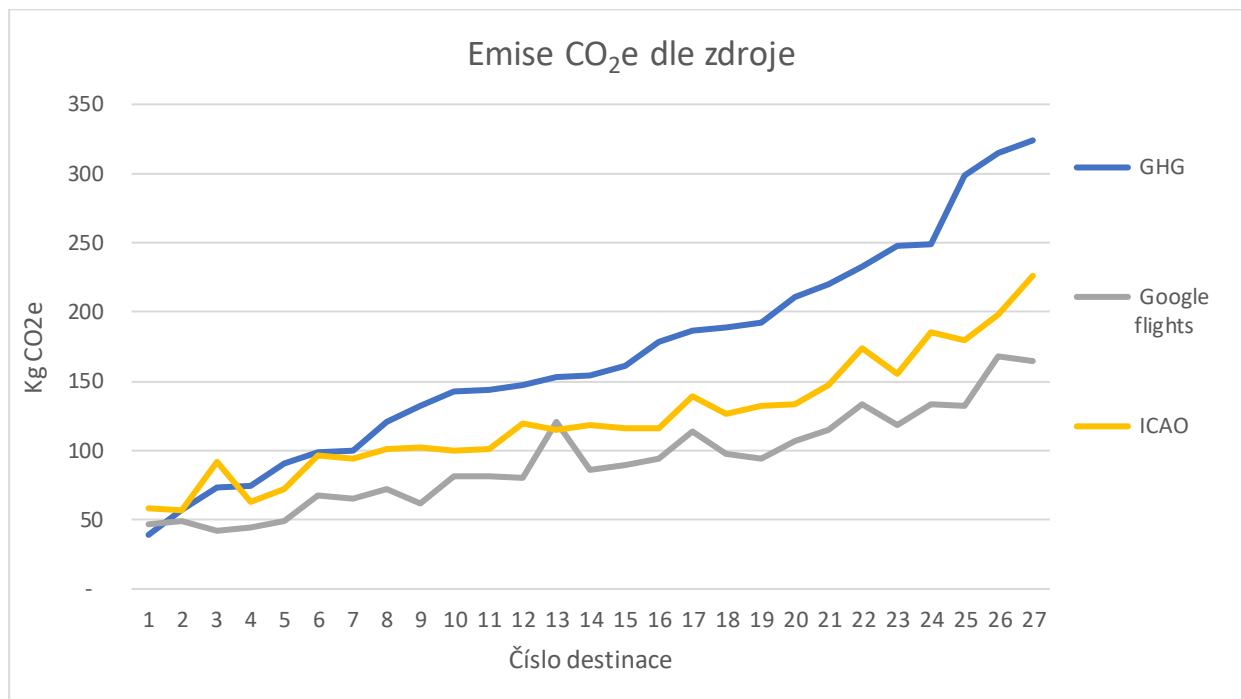
Vypočtená data emisí letecké dopravy byla porovnána s daty získanými z emisních kalkulaček ICAO carbon emissions calculator [42] a vyhledávače letenek Google flights [43].

Tabulka 9 Porovnání dat s emisními kalkulačkami

Destinace	GHG protocol [kg CO ₂ e]	Google flights [kg CO ₂ e]	ICAO carbon emissions calculator [kg CO ₂ e]
Vídeň	39	47	58,6
Frankfurt	57	49	56,8
Varšava	74	42	91,4
Benátky	75	44	63,4
Miláno	91	49	72,6
Brusel	98	67	96,4
Amsterdam	100	65	94,6
Paris	120	72	101,3
Řím	132	62	102,7
Marseille	143	81	100,3
Bari	143	81	100,6
Londýn	148	80	119
Bukurešť	153	121	115
Stockholm	154	86	118,7
Oslo	161	89	115,7
Bordeaux	179	94	116,6
Helsinky	187	114	138,8
Edinburg	189	98	126,7
Barcelona	192	94	132,4
Istanbul	210	107	132,9
Athény	220	115	146,9
Valencia	233	133	174,4
Madrid	247	118	155,1
Alicante	249	133	185,6
Malaga	299	132	179,3
Lisabon	315	168	198,6
Faro	324	165	226,2

V tabulce číslo 9 jsou porovnány emise CO₂e podle typu zdroje. Ze seznamu jsou následně odstraněny linky do Kyjev, Bourgas, Saint Petersburg a Moskva, protože ICAO emisní kalkulačka nemá data pro tyto destinace.

Pro lepší zobrazení je tabulka č. 9 převedena do grafu:



Obrázek 10 Porovnání emisí z letectví pomocí kalkulaček [zdroj vlastní]
Křivky jsou vytvořeny na základě hodnot z tabulky č. 9

Z grafu lze vidět, že kalkulačky neudávají stejné hodnoty, nicméně trend je podobný.

GHG distance based – výpočet obsahuje obecně nejvyšší hodnoty, nicméně u nejbližší destinace naopak nejnižší. S narůstající délkou trasy kalkulačky dohání a od 7. destinace (Amsterdam) jsou hodnoty nejvyšší. Je to způsobeno tím, že výpočet je zprůměrovaný a obsahuje jeden emisní faktor pro celou Evropu. Tato metoda nepočítá s tím, že letadla jsou na krátké vzdálenosti méně efektivní než na dlouhé.

Google flights – Vyhledávač letenek, který má funkci zobrazení uhlíkové stopy pro daný let. Zobrazuje uhlíkovou stopu daného spojení a průměrnou hodnotu uhlíkové stopy pro trasu. Průměrná hodnota není objektivní, protože je to převážně vyhledávač letenek a pro trasu například Praha – Paříž vyhledá klidně i 10 různých spojení v daný den, přímé lety, s jedním přestupem i se dvěma a poté zprůměruje hodnotu uhlíkových stop těchto spojení. Obsahuje



ale funkci seřadit vyhledání podle množství emisí a lze vyhledat spojení s minimálními emisemi, což bývá zpravidla přímé spojení. Tento let s nejnižší hodnotou se dá rozkliknout a zjistit typ letadla a konfiguraci letadla. Tato hodnota opět bývá pouze od low – cost dopravců, často obsahuje nižší koeficient letu s B737 max nebo A320 Neo a vyšší load factor. S těmito atributy je počítáno až dále v práci, proto tyto hodnoty také nejsou ideální.

ICAO – provozuje ICAO carbon emissions calculator. Tato kalkulačka kromě emisí CO_{2e} ukáže pro danou dvojici destinací i typ letadla, který na dané lince operuje a množství paliva, které letadlo spálí za letu. Počítá s průměrným load factor pro lety uvnitř Evropy 81,3 %.

Data z ICAO kalkulačky jsou vyhodnocena jako nejpřesnější, protože zohledňují typ letadla, který na trase operuje, mají data o obsazenosti letadel z eurostatu a data o přesném množství spáleného paliva.

Výsledkem této validace výpočtu emisí s kalkulačkami uhlíkových stop je vyhodnocení se závěrem, že ICAO carbon emission calculator obsahuje přesnější data než výpočet dle GHG protocolu.

Jelikož cílem práce je porovnat emise z těchto druhů doprav, není úplně objektivní pro každý typ použít jinou metodu výpočtů. Nicméně ICAO carbon emissions kalkulátor poskytuje i data o spáleném palivu pro daný let, je možné z této hodnoty spočítat celkové emise daného letu pomocí metody GHG fuel based. Poskytuje také data o typu letadla, takže je možné zjistit maximální počet sedadel v letadle a vynásobením tohoto čísla průměrným load factorem, v Evropě 81,3 %, získáme přesný počet osob v letadle. Podílem celkových emisí letadla a počtem osob v letadle jsou počítány emise na osobu touto metodou.

Výpočet dle metody GHG protocol fuel based

GHG protocol říká, že pokud jsou k dispozici data o spotřebě paliva, pak má metoda na základě paliva prioritu.

- Množství paliva pro daný let bylo získáno z ICAO carbon emission calculator.
- Typ letadla – ICAO carbon emission calculator, v některých případech udává více typů letadel. Daná linka byla následně vyhledána na flightera.net, kde je možné zjistit nejčastěji používaný model letadla pro danou linku.
- Maximální kapacita letadla – na webu flightera.net byla vyhledána daná linka a letadla která na ní operují. Byl vybrán vždy nejčastější model. V některých případech má stejný



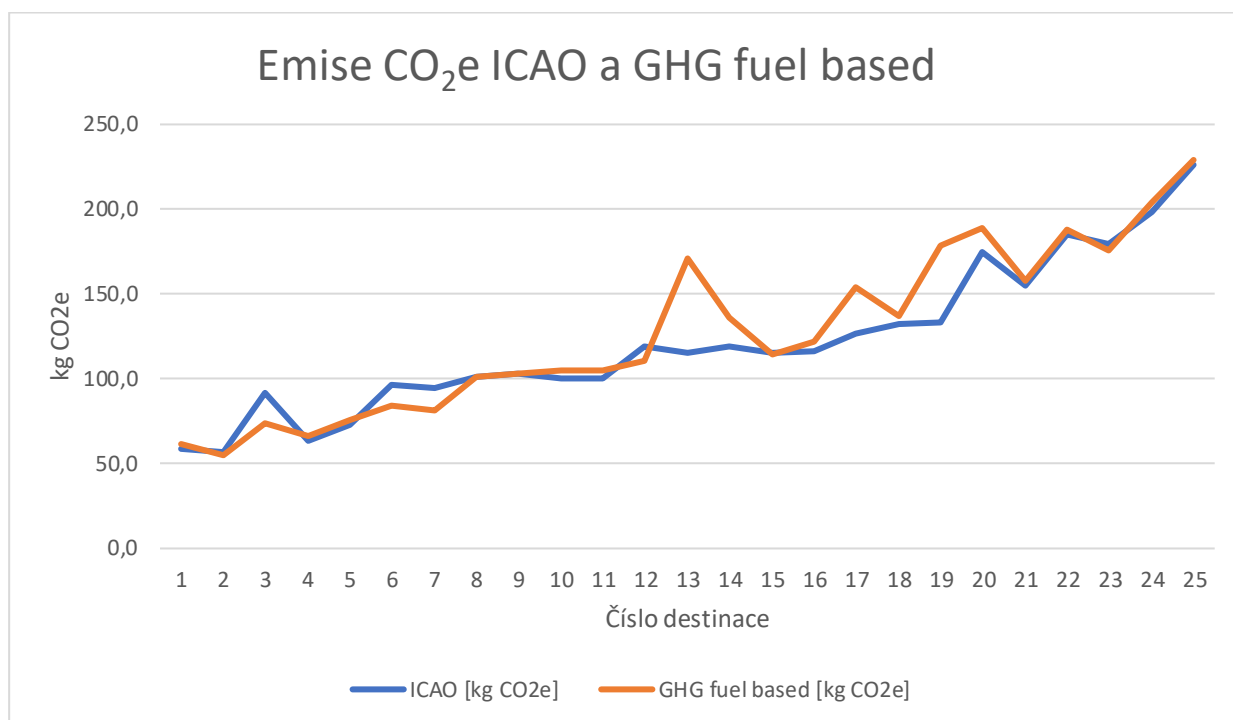
typ letadla trochu rozdílnou maximální kapacitu. Je to způsobeno tím, že každý dopravce má jinou konfiguraci sedadel.

- Počet osob v letadle – součin maximální kapacity letadla a průměrné obsazenosti na vnitroeurospkých linkách udávaných ICAO – 81,3 %.
- GHG fuel based – součin paliva na let s emisním faktorem pro letecké palivo (Aviation turbine fuel - 3,18143) vydělený počtem osob v letadle.
- ICAO calculator – data z ICAO carbon emission calculator.

Tabulka 10 Výpočet emisí cesty letadlem dle GHG protocol fuel based

Destinace	Palivo na let [kg]	Typ letadla	Maximální kapacita letadla	Počet osob v letadle	GHG fuel based [kg CO ₂ e]	ICAO calculator [kg CO ₂ e]
Vídeň	1936	E95	122	100	61,3	58,6
Frankfurt	2915	A321	205	169	55,0	56,8
Varšava	2317	E95	122	100	73,4	91,4
Benátky	3247	73H	189	156	66,4	63,4
Miláno	3716	73H	189	156	76,0	72,6
Brusel	3915	320	180	148	84,1	96,4
Amsterdam	3774	73H	180	148	81,0	94,6
Paris	4566	A320	174	143	101,4	101,3
Řím	4840	73H	181	149	103,4	102,7
Marseille	5134	73H	189	156	105,0	100,3
Bari	5151	73H	189	156	105,4	100,6
Londýn	5139	A320	180	148	110,4	119,0
Bukurešť	5131	737	116	95	171,0	115,0
Stockholm	5265	319	150	123	135,7	118,7
Oslo	5506	73H	186	153	114,4	115,7
Bordeaux	5969	73H	189	156	122,1	116,6
Edinburg	6231	319	156	128	154,4	126,7
Barcelona	6375	A320	180	148	136,9	132,4
Istanbul	8208	A321	178	146	178,2	132,9
Valencia	6885	319	141	116	188,7	174,4
Madrid	7692	73H	189	156	157,3	155,1
Alicante	7292	319	150	123	187,9	185,6
Malaga	8613	73H	189	156	176,2	179,3
Lisabon	9168	A320	174	143	203,7	198,6
Faro	8888	319	150	123	229,1	226,2

Pro lepší přehlednost jsou data zobrazena do grafu obrázku č. 11.



Obrázek 11 Emise CO₂e ICAO a GHG fuel based [zdroj vlastní]

Křivky jsou vytvořeny na základě hodnot z tabulky č. 10

Z obrázku č. 11 lze vidět že data z ICAO kalkulačky jsou velice podobná datům spočítaným pomocí GHG fuel based. Sice to nebylo možné zjistit z metodiky ICAO kalkulačky a vzhledem ke shodě výsledků předpokládám, že také použili metodu GHG protocol fuel based.

Finální vstupní data pro výpočet emisí jednotlivých scénářů

Výsledkem validace spočítaných dat bylo stanoveno, že budou použity následující metody:

- Automobil – GHG metoda na základě vzdálenosti
GHG protocol sice upřednostňuje metodu na základě paliva, nicméně nejsou k dispozici přesné hodnoty spáleného paliva na dané trasy, zatímco vzdálenost se dá přesně změřit. Pro metodu na základě vzdálenosti jsou přesná data o vzdálenostech a emisní faktor z databáze DEFRA, který udává množství emisí na km jízdy pro průměrné auto. V případě použití fuel based metody by bylo spočítáno množství paliva průměrného auta a výsledek by byl následně vynásoben emisním faktorem pro spálený



litr paliva. V takovém případě by došlo k podobnému zkreslení výsledku jako při využití emisního faktoru pro průměrné auto.

Rozhodl jsem se použít emisní faktor pro průměrné auto, který je mezinárodně uznávaný, namísto výběru faktoru spotřeby průměrného vozidla.

- Letadlo – GHG fuel based metoda

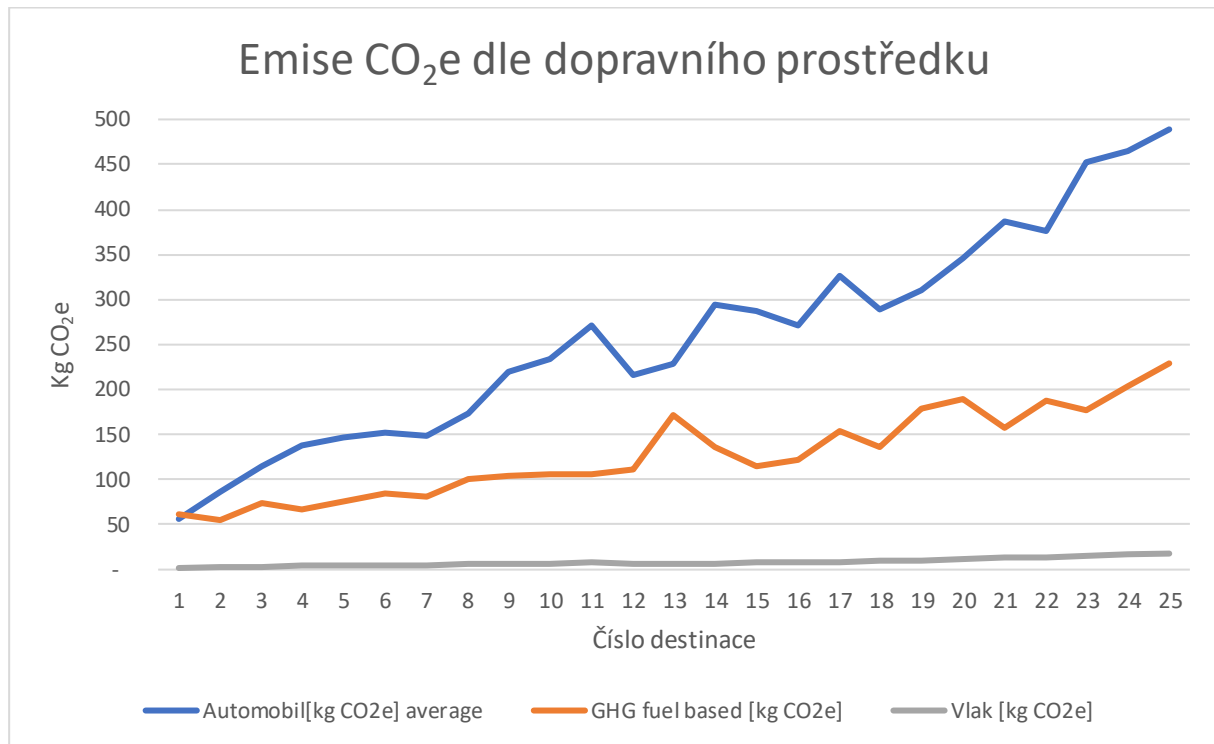
Jelikož ICAO poskytuje veškerá data potřebná pro výpočet emisí CO_{2e} na základě paliva, byla použita data GHG protokolem preferovaná metoda výpočtu.

- Vlak – GHG metoda na základě vzdálenosti

Tabulka 11 Finální vstupní data emisí jednotlivých dopravních prostředků

Destinace	letecká vzdálenost [km]	Automobil [kg CO _{2e}]	Letadlo [kg CO _{2e}]	Vlak [kg CO _{2e}]
Vídeň	278	56	61	1,79
Frankfurt	407	86	55	2,52
Varšava	523	114	73	3,30
Benátky	533	138	66	4,52
Miláno	648	146	76	4,25
Brusel	700	152	84	4,27
Amsterdam	708	148	81	4,48
Paris	856	174	101	5,64
Řím	940	220	103	6,65
Marseille	1 015	234	105	6,78
Bari	1 020	271	105	7,82
Londýn	1 049	216	110	5,93
Bukurešť	1 086	228	171	6,65
Stockholm	1 094	295	136	7,20
Oslo	1 146	287	114	8,09
Bordeaux	1 273	270	122	8,03
Edinburg	1 347	327	154	8,73
Barcelona	1 364	289	137	10,46
Istanbul	1 496	310	178	9,76
Valencia	1 659	346	189	12,09
Madrid	1 759	387	157	13,16
Alicante	1 770	376	188	12,88
Malaga	2 127	452	176	15,44
Lisabon	2 240	465	204	16,48
Faro	2 304	489	229	17,79

Finální vstupní data z tabulky 11 jsou zobrazena v následujícím grafu (obrázek 12)



Obrázek 12 Emise CO₂e dle dopravního prostředku [zdroj vlastní]

Křivky jsou vytvořeny na základě hodnot z tabulky č. 11

Analýza vstupních dat

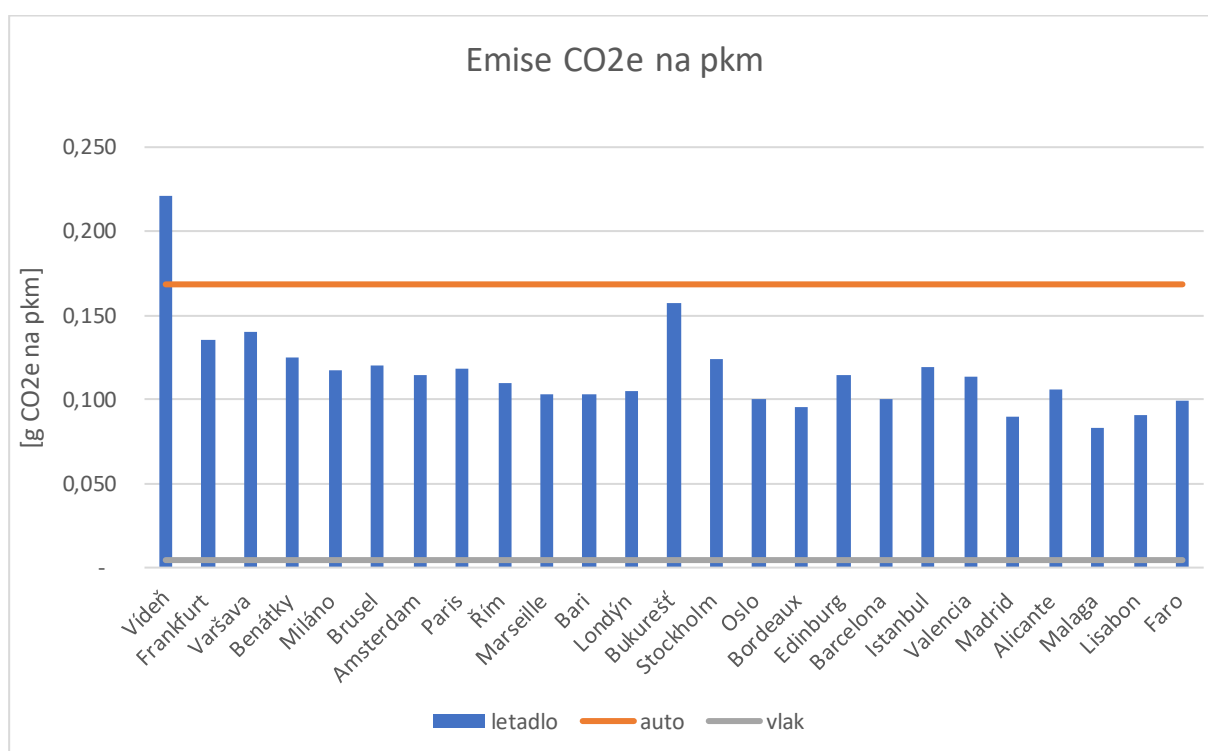
Automobilová a železniční doprava

Emise CO₂e u automobilové dopravy přímo úměrně rostou s rostoucí vzdáleností destinace. Destinace jsou seřazeny podle letecké vzdálenosti od nejnižší po nejvyšší, proto by se dalo očekávat, že modrá křivka v obrázku č. 12 bude neustále růst s rostoucí vzdáleností. Skoky dolů jsou způsobeny tím, že pro některé případy, například Bari (č.11 v obrázku č. 12), je letecky vzdáleno od Prahy 1020 km, po něm následuje Londýn (12) vzdálený letecky 1049 km. U vzdáleností silničních je cesta do Bari dlouhá 1 610 km a do Londýna 1 280 km. Proto je Bari umístěno před Londýnem a má pro silniční dopravu vyšší emise, po něm následuje Londýn s nižšími emisemi. Stejný příklad je i skok mezi bodem 17 a 18. Edinburgh je po silnici dál než Barcelona, ale letadlem to je naopak.

Emise CO_{2e} se u železniční dopravy zvyšují podobně jako u automobilové dopravy s rostoucí vzdáleností, nicméně má mnohonásobně nižší emisí faktor, 0,00446 g CO_{2e} na pkm, a tedy jsou hodnoty velice nízké.

Letecká doprava

U letecké dopravy samozřejmě emise taky s rostoucí vzdáleností rostou, ale ne přímo úměrně. Zatímco u automobilové a železniční dopravy jsou emise na osobo kilometr pořád stejné, automobil – 0,1683 g CO_{2e} na pkm, vlak - 0,00446 g CO_{2e} na pkm, u letecké dopravy je tento faktor proměnlivý.



Obrázek 13 CO_{2e} na pkm dle dopravního prostředku [zdroj vlastní]

Obrázek č. 13 Emise CO_{2e} na pkm dle dopravních prostředků. Data pro letadlo byla spočítána podílem letecké vzdálenosti do destinace a emisemi cestou letadlem. U auta a vlaku jsou konstantní a rovny emisnímu faktoru.

Z obrázku č. 13 lze vidět, že u cesty letadlem množství emisí s rostoucí délkou trasy mírně klesá. U kratších tras, jako je Vídeň a Varšava, jsou tyto hodnoty 0,221 g CO_{2e}/pkm a 0,140 g CO_{2e}/pkm, u delších tras do španělských destinací se dostáváme pod hodnotu



0,1 g CO_{2e}/pkm, zatímco u automobilové dopravy jsme stále na hodnotě 0,1683 g CO_{2e}/pkm a železniční dopravy činí emise 0,00446 g CO_{2e} na pkm.

Je to možná ovlivněno i metodou výpočtu, nicméně auta ani vlaky nepracují efektivněji se vzrůstající délkou trasy. Pro automobilovou dopravu by byl koeficient stále stejný i pokud by byla k dispozici data o spáleném palivu a bylo by množství emisí spočítáno na základě paliva. Tyto druhy dopravy není dobré porovnávat podle emisí na osobo km, nýbrž přímo na trasu do destinace, protože trasa do stejné destinace je pro každý dopravní prostředek jinak dlouhá.

5.2. Poměrový ukazatel pro návrh klasifikace

Pro enviromentální klasifikace spojů byl stanoven poměrový ukazatel PU. PU se spočítá podílem emisí CO_{2e} prvního dopravního prostředku s emisemi CO_{2e} druhého.

Auto/letadlo

Pro porovnání cesty jedné osoby byl zvolen takzvaný poměrový ukazatel – PU. PU je vypočten podílem emisí CO_{2e} prvního dopravního prostředku s emisemi CO_{2e} druhého.

PU auto vs. letadlo je tedy vypočten následovně:

Tabulka 12 Poměrový ukazatel auto/letadlo

Destinace	Letecká vzdálenost [km]	Emise automobil [kg CO _{2e}]	Emise letadlo [kg CO _{2e}]
Vídeň	278	56	61
Barcelona	1 364	289	137

Pro trasu do Vídně: $56/61 = 0,92$

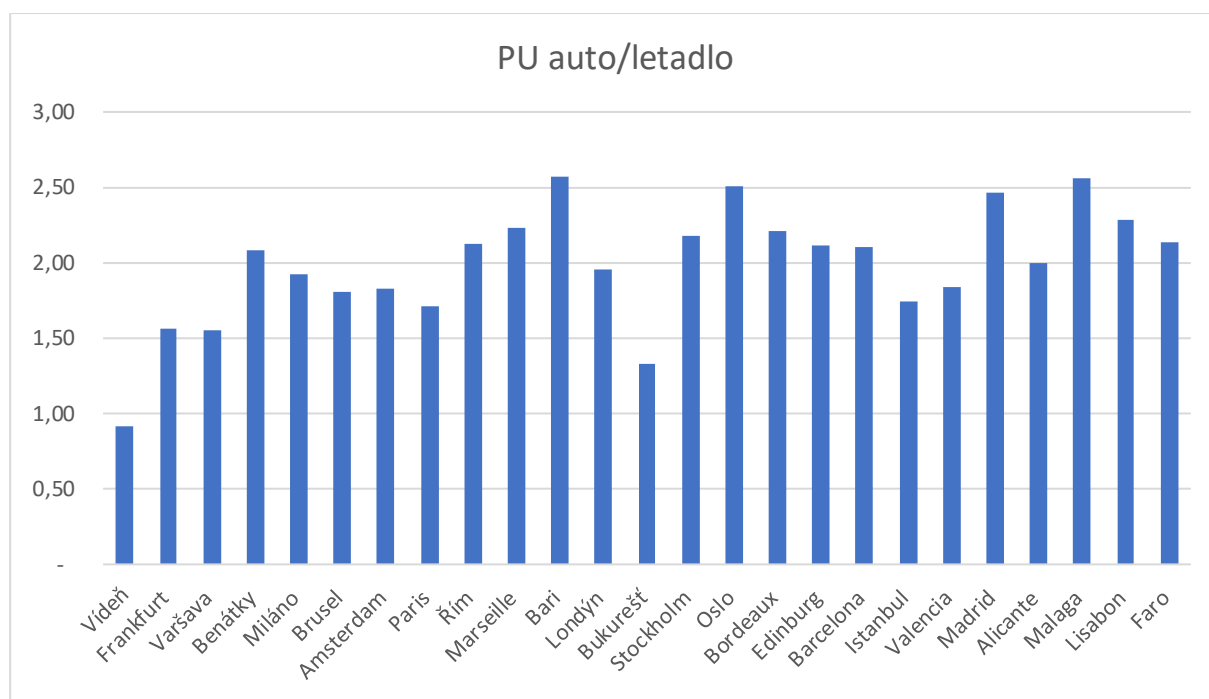
Pro trasu do Barcelony: $289/137 = 2,11$

PU určuje, kolik osob by muselo sedět v prvním dopravním prostředku, aby byly emise pro obě variantě stejné. V těchto případech pro trasu do Vídně činí 0,92 a do Barcelony 2,11. Jelikož pro trasu do Vídně je hodnota nižší než jedna, tak i jeden člověk jedoucí do Vídně autem vypustí do ovzduší méně emisí, než kdyby letěl letadlem. Pro trasu do Barcelony by v autě muselo cestovat 2,11 osoby, aby byly emise rovnocenné. Jinými slovy, pro skupinu dvou osob je z hlediska emisí lepší cestovat letadlem, pro skupinu tří osob už je výhodnější jet automobilem.

Pro hodnoty PU auto vs. letadlo mohou nastat 3 varianty výsledků:

- $PU < 1 \Rightarrow$ cesta autem bude mít pro všechny případy **nižší** emise,
- $PU > 1$ a $PU < 5 \Rightarrow$ cesta autem bude mít **nižší nebo vyšší** emise v závislosti na **počtu cestujících v autě**,
- $PU > 5 \Rightarrow$ cesta autem bude mít vždy **vyšší** emise než cesta letadlem.

Výsledky PU auto/letadlo jsou spočítány dle vysvětleného postupu z finálních vstupních dat (tabulka č. 11), a zobrazeny v následujícím grafu:



Obrázek 14 Graf PU auto vs. vlak [zdroj vlastní]

PU je definován v kapitole 5.2 na straně 54. Hodnoty PU jsou vypočteny dle postupu z kapitoly 5.2 z tabulky č. 11.

V grafu lze vidět, že pokud bude cestovat jedna osoba, tak pouze pro trasu do Vídně bude mít nižší uhlíkovou stopu než letadlem. Automobilem ovšem může jet až 5 osob a pokud se bude rozhodovat skupinka tří lidí, bude naopak pokaždé vhodnější využít automobil než letadlo. Takto vypadá PU ze vstupních dat, to znamená pro průměrný let do daných destinací.

Typické skupiny cestujících:

- 1 osoba – služební cesta,



- 2 osoby – pár letící na dovolenou,
- 4 osoby – skupina přátel či rodina s dětmi.

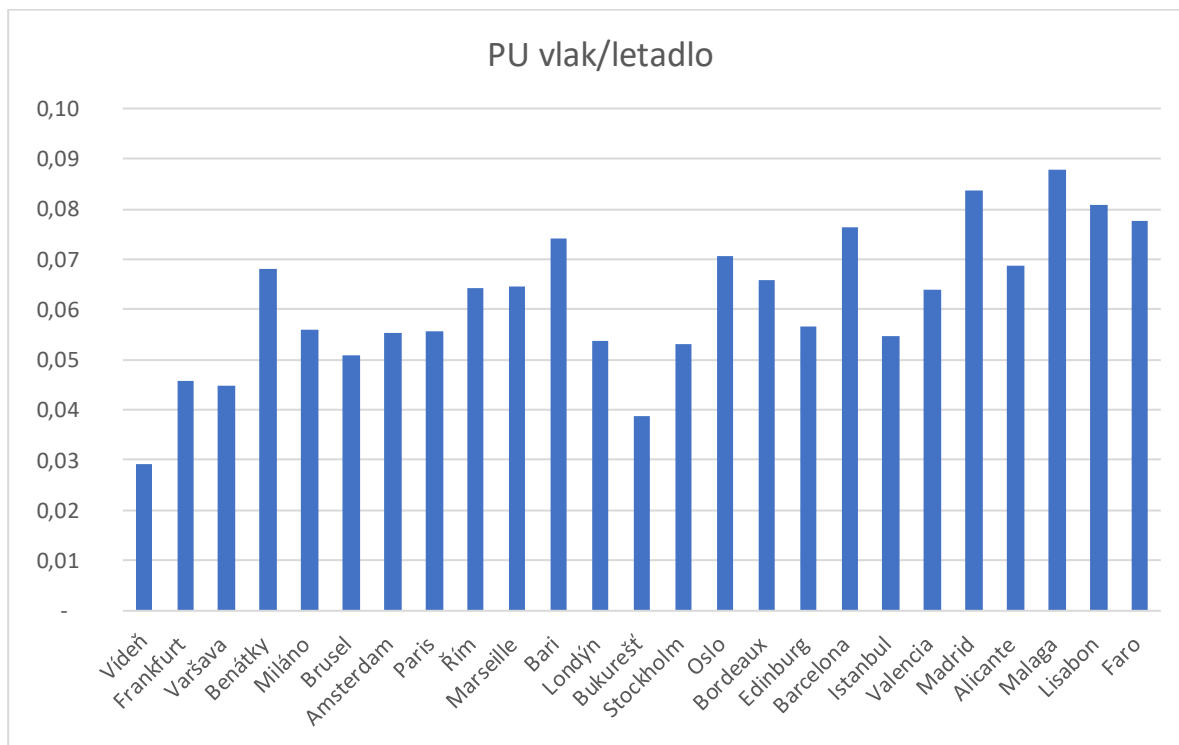
Už z poměrového ukazatele ze vstupních dat lze tvrdit, že není destinace, kam by bylo vhodnější pro jednu osobu použít auto oproti letadlu. Naopak pro skupinu 4 osob bude v každém případě vhodnější použít auto.

Vlak/letadlo

PU vlak/letadlo bude spočítán stejným způsobem jako PU auto vs. letadlo. Jelikož vlak i letadlo jsou oba hromadné dopravní prostředky, mohou nastat 3 možnosti výsledků:

- $PU < 1$ => cesta vlakem bude mít nižší emise,
- $PU = 1$ => cesta vlakem i letadlem má stejné emise,
- $PU > 1$ => cesta vlakem bude mít vyšší emise.

Výsledky PU vlak/letadlo jsou spočítány dle vysvětleného postupu z finálních vstupních dat a zobrazeny v následujícím grafu:



Obrázek 15 PU vlak/letadlo [zdroj vlastní]



PU je definován v kapitole 5.2 na straně 55. Hodnoty PU jsou vypočteny dle postupu z kapitoly 5.2 z tabulky č. 11.

Z grafu je možné vidět, že PU vlak/letadlo se s rostoucí vzdáleností zvyšuje, nicméně hodnoty jsou tak nízké, že i v nejhorších případech při cestě letadlem vznikne 10x vyšší uhlíková stopa.

V kapitole 3 jsou popsány atributy, díky kterým lze v letectví snižovat uhlíkovou stopu. Některé lze aplikovat pouze tím, že si cestující vybere jinou destinaci či aerolinky, jiné musí výrobce aplikovat na letadlo nebo dopravce nákupem jiného druhu paliva.

V následujících kapitolách je popsáno, jak moc tyto atributy ovlivní emise, jak se bude měnit PU a je navržena klasifikace linek.

5.3. Atributy ovlivňující emise v letectví a scénáře jejich užití

- Moderní pohon

V kapitole 3.1. Technologické vylepšení letadel – Letecké motory, bylo popsáno, jak mohou modernější pohony snížit emise.

V následujících výpočtech, kdy je počítáno se scénářem letu s moderním pohonem, je uvažováno, že cestující poletí Boeingem 737 max nebo Airbusem A320 Neo, a **množství emisí bude sníženo o 15 %**. [17], [18]

- SAF

Sustainable aviation fuel (SAF) dle BP [35] snižuje množství emisí až o 80 %. Aktuální letadla ovšem nejsou konstruována na použití SAF v plném objemu, nicméně všechna letadla certifikovaná na letecký benzín mohou použít směs SAF s leteckým benzínem v poměru 1:1 a tím snížit své emise o 40 %.

Airbus se zavázal [18], že do roku 2030 budou všechna jeho nově vyrobená letadla A320 Neo uzpůsobená k pohonu čistě na SAF a jejich emise tak budou sníženy o 80 %.

V následujících výpočtech, kdy je počítáno se scénářem, že cestující využije letadlo letící na SAF 50 % (SAF 0,5), je uvažováno, že cestující letí letadlem, které natankovalo směs SAF a letecký benzín v poměru 1:1 a jeho emise tedy **budou sníženy o 40 %**.



V následujících výpočtech, kdy je počítáno se scénářem, že cestující využije letadlo letící na SAF plně, je uvažováno, že cestující letí letadlem, které natankovalo pouze SAF a jeho emise **budou sníženy o 80 %**.

- Load factor

Load factor, neboli obsazenost letadla, udává procentuální podíl obsazených sedaček z nabízených. ICAO emisní kalkulačka počítá s load factorem pro lety vně Evropy 82,3 %.

V kapitole 3.5 bylo popsáno, jakých load faktorů low – cost aerolinky pravidelně dosahují a proč je možné dlouhodobě udržet hodnotu load factoru na 96 % v případě, že cestující si vybere takovou aerolinku, budou emise nižší o $96 - 82,3 = 13,7$ %.

V následujících výpočtech, kdy je počítáno se scénářem, že cestující využije aerolinku s vyšším load factorem, budou **emise sníženy o 13,7 %**.

- SESAR

Projekt SESAR (Single European Sky ATM Research), neboli jednotné evropské nebe, má konečný termín implementace 31. prosince 2027.

Implementací tohoto systému se dle odhadů sníží emise v letecké dopravě nad Evropou o 10 % díky zkrácení letových tras a snížením zpoždění a z toho vznikajícímu vyčkávání letadel ve vzduchu či na zemi se zapnutými motory.

V následujících výpočtech, kdy je počítáno se scénářem implementace SESAR, budou **emise sníženy o 10 %**.

- Aerodynamika

V článku Improving Aircraft Fuel Efficiency by Using the Adaptive Wing and Winglets [16] odhadují, že díky vylepšení aerodynamiky bude ještě možné snížit spotřebu paliva u letadel o 5 %.

Wizzair ve svém Sustainability reportu uvádí, že jejich letadla mají díky novým Sharklets nižší emise o 4 % na delších tratích. Zavázali se, že do roku 2024 bude jejich flotila kompletně obsahovat tyto Sharklets.



V následujících výpočtech, kdy bude počítáno se scénářem, že dopravce vylepší aerodynamiku své flotily, budou **emise sníženy o 3 %**.

Atributy, které nebudou ve scénářích použity:

- A-CDM

Eurocontrol vydal report posouzení dopadu A-CDM za rok 2016.[25] Díky tomuto systému bylo sníženo množství spáleného paliva i vypuštěných emisí o 7,7 % na let, viz kapitola 3.

Tento systém už ovšem na většině významných evropských letišť je implementován. Z vybraných destinací není pouze na letištích Marseille, Bari, Bukurešť, Stockholm, Bordeaux, Edinburg, Istanbul, Valencia, Alicante, Faro.

Jelikož nebylo možné zjistit, kdy bude tato technologie na letištích implementována, byl tento atribut z budoucích scénářů vyřazen.

- GPU – nelze měřit
- Struktura a materiály – nelze měřit

Pro přehlednost je přidána tabulka atributů a jejich dopadu na provoz.

Tabulka 13 Atributy a jejich dopady na provoz

Atribut	Snížení emisí CO_{2e} v %	Koeficient výpočtu
Let s moderním pohonem	15	0,85
SAF 0,5	40	0,60
SAF	80	0,20
Load factor	13,7	0,863
SESAAR	10	0,90
Aerodynamika	3	0,97

Zkratky atributů odpovídají atributům popsáným v kapitole 5.3 na straně 57 – 59

Scénáře užití atributů v letecké dopravě

V tabulce číslo 14 můžeme nalézt jednotlivé scénáře letu, jejich zkratku, která tento scénář identifikuje v následujících tabulkách hodnot emisí CO_{2e}, vzorec pro výpočet hodnot, rok očekávané implementace scénáře a v některých případech typický příklad letu.

Výpočet emisí pro následující scénáře vždy vychází ze vstupních dat spočítaných dle metody GHG protocol ponížených o procentuální hodnotu vylepšení. Při kombinaci více atributů



vylepšení jsou procentuální hodnoty mezi sebou násobeny a ne sčítány, protože druhé a třetí vylepšení už počítá s nižším základem.

Jednotlivé scénáře letu:

1. Scénář VD – Základní let. Výpočet emisí náhodného letu se rovná vstupním datům, tedy výpočtu dle GHG protocolu. Odpovídá hodnotám průměrného letu.
2. Scénář MAX – Let s moderním pohonem. Emise letu podle scénáře MAX jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85$$

Takový let může nastat, pokud cestující poletí buď Boeingem 737 Max nebo Airbusem A320, A321 Neo. Dle výrobců [38], [39] bylo Boeingů 737 Max doposud vyrobeno a dodáno 926, Airbusů A320 Neo 1570 a A321 Neo 836. Celkově těchto letadel létá 3 332 kusů.

3. Scénář FULL – Let s aerolinkou s vyšší obsazeností. Emise letu podle scénáře FULL jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,863$$

Takový let může nastat, pokud cestující zvolí pro dopravu aerolinku, která má průměrnou obsazenost 96 % a vyšší, například Ryanair, Wizzair.

4. Scénář Low – cost – Let s moderním pohonem a vyšším load faktorem. %. Emise letu podle scénáře Low – cost jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85 * 0,863$$

Takový let může nastat, pokud cestující zvolí pro dopravu aerolinku, která má průměrnou obsazenost 96 % a je operována buď Boeingem 737 max nebo Airbusem A320, A321 Neo.

Tento scénář je úmyslně označen značkou Low – cost, protože toho se snaží low – cost dopravci dosáhnout.

5. Scénář S – Let s využitím SAF z 50 %. Emise letu podle scénáře S jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,6$$

Takový let může nastat, pokud cestující zvolí, který byl poháněn směsí leteckého benzínu a SAF.

6. Scénář Low – cost S – Let s moderním pohonem, vyšším load faktorem a využitím SAF z 50 %. Emise letu podle scénáře Low – cost S jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85 * 0,863 * 0,6$$



7. Scénář A – Let letadlem se sníženou aerodynamikou. Emise letu podle scénáře A jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,97$$

8. Scénář SES – Let po implementaci technologie SESAR. Emise letu podle scénáře SES jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,9$$

9. Scénář Low – cost SS – Let s moderním pohonem, vyšším load faktorem, využitím SAF z 50 % a SESAR. Emise letu podle scénáře Low – cost SS jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85 * 0,863 * 0,6 * 0,9$$

10. Scénář Low – cost SSA – Let s moderním pohonem, vyšším load faktorem, využitím SAF z 50 %, SESAR a lepší aerodynamikou. Emise letu podle scénáře Low – cost SSA jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85 * 0,863 * 0,6 * 0,9 * 0,97$$

11. Scénář SAF – Let s využitím SAF + SES. Emise letu podle scénáře SAF jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,2 * 0,9$$

12. Scénář ALL – Let s moderním pohonem, vyšším load faktorem, využitím SAF, SESAR a lepší aerodynamika. Emise letu podle scénáře ALL jsou spočítány dle rovnice:

$$CO_2e = VD * 0,85 * 0,863 * 0,2 * 0,9 * 0,97$$

Ilustrační příklad výpočtu:

Pro cestu z bodu A do bodu B je zapotřebí 100 l paliva na osobu. Pro tuto cestu aplikujeme lepší motor, vyšší obsazenost a SAF 0,5.

- Aplikací lepšího motoru bude úspora 15 %, $100 * 0,15 = 15$ l
- Vyšší obsazeností prostředku se sníží spotřeba na osobu o 13,7 %. Základ už není 100 l, ale $100 - 15 = 85$ l, proto bude úspora $85 * 0,137 = 11,645$
- Využitím udržitelného paliva, se sníží spotřeba o 40 %. Úspora bude počítána 40 % ze $100 - 15 - 11,645 = 73,335$. Úspora 40 % ze 73,335 l se vypočítá $73,335 * 0,4 = 29,342$
- Celková spotřeba bude $100 - 15 - 11,645 - 29,342 = \mathbf{44,013}$



- Stejného čísla dosáhneme prostým vynásobením vstupní hodnoty x koeficienty (1-y), kde y je procentuální zlepšení z každého atributu.
- $100 * (1 - 0,15) * (1 - 0,137) * (1 - 0,4) = 100 * 0,85 * 0,863 * 0,6 = 44,013$

Kdybychom procentuální vylepšení pokaždé odčítali, dostaneme hodnoty $100 - 15 - 13,7 - 40 = 31,3 \%$, což by odpovídalo ze 100 litrů hodnotě **31,3 l**.

Atribut, který snižuje množství paliva o 15 % nebo emise o 15 %, má na výpočet stejný vliv, a to je 0,85, protože výpočet emisí vychází z množství paliva. Pokud palivo snížíme o 15 %, dostaneme stejné množství emisí, jako když výsledné emise snížíme o 15 %

Tabulka scénářů a jejich vzorců pro výpočet emisí.

Tabulka 14 Tabulka jednotlivých scénářů

Scénář	Vzorec pro výpočet emisí CO _{2e}	Zlepšení v %	Očekávána možnost implementace	Příklad typického letu
VD	vstupní data (VD)		aktuálně	
MAX	$VD * 0,85$	15	aktuálně	
FULL	$VD * 0,863$	13,7	aktuálně	
Low – cost	$VD * 0,85 * 0,863$	26,6	aktuálně	Low – cost dopravci
S	$VD * 0,6$	40	aktuálně	
Low – cost S	$VD * 0,85 * 0,863$	56	aktuálně	Low – cost dopravci
A	$VD * 0,97$	3	2024	Wizzair
SES	$VD * 0,9$	10	2028	Všechny lety
Low – cost SS	$VD * 0,85 * 0,863$	60,4	2028	
Low – cost SSA	$VD * 0,85 * 0,863$	61,6	2028	
SAF	$VD * 0,2 * 0,9$	82	2035+	
ALL	$VD * 0,85 * 0,863$	87,2	2035+	

Zkratky scénářů odpovídají zkratkám scénářů popsaných v kapitole Scénáře užití atributů v letecké dopravě na stranách 59 – 61

Následující tabulky obsahují zvolené trasy a hodnoty emisí CO_{2e} pro jednotlivé scénáře vypočtené dle vzorce z tabulky č. 14.

Z tabulky č. 14 lze vidět, že bylo vytvořeno 12 scénářů letů. Prvním scénářem je základní let (VD). Šest scénářů je podle atributů, to znamená moderní pohon, vyšší load factor, využití SAF z 50 %, let kompletně na SAF, let po implementaci SESAR a lepší aerodynamika. Další



5 scénářů jsou kombinace těchto atributů. Pro následné analýzy nejsou zobrazeny v grafech a tabulkách všechny scénáře, ale tyto vybrané:

1. Scénář low – cost. Podle tohoto scénáře poletí cestující, pokud bude letadlo s moderním pohonem a vyšším load factorem. Aktuálně je poměrně snadné tohoto scénáře dosáhnout, protože aerolinky jako Ryanair a Wizzair operují s velkým množstvím těchto letadel a zároveň před rokem 2020 dosahovaly těchto hodnot load factoru.
2. Scénář low – cost + SAF. Jedná se o scénář low – cost obohacený a to tak, že provozovatel na tento let natankuje směs leteckého paliva a SAF. Tohoto scénáře je technologicky také snadné dosáhnout, provozovatel musí pouze nakoupit dražší palivo. Zatím nebyla nalezena možnost, kdy by si mohl cestující před nákupem letenky zjistit, zda letadlo poletí na tento druh paliva nebo ne.
3. Scénář low – cost SSA. Jedná se o scénář low – cost + SAF obohacený o implementaci SESAR a snížení aerodynamiky pomocí nových Sharkletů. Po roce 2030, kdy bude implementován SESAR, bude možné tohoto scénáře dosáhnout.
4. Scénář SAF. Jedná se o scénář, ve kterém poletí letadlo čistě na SAF. Dále je do tohoto scénáře započítána i implementace SESAR, protože širší využití se očekává až po roce 2030.
5. Scénář ALL. Implementace všech atributů. Všechny atributy naráz bude možné aplikovat po roce 2030.



5.4. Porovnání automobilové a letecké dopravy

Porovnání automobilové a letecké dopravy bude rozděleno na dvě porovnání. První s aktuálně možnými scénářema letů a druhé s scénářema letů s očekávanou implementací od roku 2035+

Porovnání automobilové a letecké dopravy s využitím aktuálně možných scénářů

Tabulka 15 Emise cesty letadlem dle aktuálně možných scénářů

Destinace	letecká vzdálenost [km]	VD [kg CO ₂ e]	MAX [kg CO ₂ e]	FULL [kg CO ₂ e]	Low – cost [kg CO ₂ e]	S [kg CO ₂ e]	Low – cost S [kg CO ₂ e]
Vídeň	278	61	52,1	52,9	45,0	36,8	27,0
Frankfurt	407	55	46,7	47,4	40,3	33,0	24,2
Varšava	523	73	62,4	63,4	53,9	44,0	32,3
Benátky	533	66	56,4	57,3	48,7	39,8	29,2
Miláno	648	76	64,6	65,6	55,7	45,6	33,4
Brusel	700	84	71,5	72,6	61,7	50,5	37,0
Amsterdam	708	81	68,9	69,9	59,4	48,6	35,7
Paris	856	101	86,2	87,5	74,4	60,9	44,6
Řím	940	103	87,9	89,2	75,8	62,0	45,5
Marseille	1 015	105	89,3	90,6	77,0	63,0	46,2
Bari	1 020	105	89,5	90,9	77,3	63,2	46,4
Londýn	1 049	110	93,8	95,2	81,0	66,2	48,6
Bukurešť	1 086	171	145,3	147,6	125,4	102,6	75,3
Stockholm	1 094	136	115,3	117,1	99,5	81,4	59,7
Oslo	1 146	114	97,3	98,7	83,9	68,7	50,4
Bordeaux	1 273	122	103,8	105,4	89,6	73,3	53,7
Edinburg	1 347	154	131,3	133,3	113,3	92,6	68,0
Barcelona	1 364	137	116,4	118,2	100,4	82,1	60,3
Istanbul	1 496	178	151,5	153,8	130,8	106,9	78,5
Valencia	1 659	189	160,4	162,9	138,5	113,2	83,1
Madrid	1 759	157	133,7	135,8	115,4	94,4	69,2
Alicante	1 770	188	159,7	162,2	137,9	112,8	82,7
Malaga	2 127	176	149,7	152,0	129,2	105,7	77,5
Lisabon	2 240	204	173,1	175,8	149,4	122,2	89,6
Faro	2 304	229	194,7	197,7	168,0	137,4	100,8

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

V tabulce č. 16 můžeme vidět, jak klesají emise pro jednotlivé scénáře. Scénáře sloupce Low – cost může dnes cestující poměrně jednoduše dosáhnout. Když dnes cestující poletí do destinace se společností Wizzair nebo Ryanair, existuje šance, že jeho emise budou dle sloupce Low – cost tedy o 26,6 % nižší, než je základní hodnota. Jak již bylo zmíněno výše, dlouhodobě udržuje obsazenost letadel na 96 % a má ve své flotile 210 ks B737-8200 MAX, ve stavu delivered/ordered (dodáno/objednáno).



Ještě nižší emise má sloupec S, který odpovídá scénáři letu s využitím SAF.

Nejnižších hodnot emisí aktuálně může cestující dosáhnout, pokud poletí podle scénáře Low – cost S. V takovém případě už budou emise o 56 % nižší než původní let.

Bohužel cestující dopředu nemůže zjistit, jestli jeho let poletí na SAF a tím si případně vybrat daný let, nicméně podíl těchto letů se bude neustále zvyšovat. Ryanair se zavázal, že do roku 2030 bude provozovat 12,5 % letů na SAF. Některé země přímo nařizují, že aerolinky, které u nich operují, musí využívat SAF v určitém množství. Například v Norsku minimálně 0,5 %, ve Švédsku 1,7 % a ve Francii 1 %. To znamená, že pokud chce aerolinka provozovat trať z Prahy do Paříže, musí minimálně 1 % celkového množství nakoupeného paliva tvořit SAF. Jsou to sice zatím malé hodnoty, ale jelikož je SAF nová technologie, tak je vysoce pravděpodobné, že se budou tyto hodnoty zvyšovat.

Scénáře Low – cost a Low – cost S budou v následující tabulce porovnány s emisemi z cesty automobilem. Tyto dva scénáře byly vybrány, protože scénář low – cost je poměrně častý mezi běžnými cestujícími a Low – cost S je scénář, kterého chtějí aerolinky postupně dosáhnout. Tento scénář jim sníží množství spáleného paliva a poskytne marketingovou výhodu na trhu, díky které mohou lákat cestující na nízkou uhlíkovou stopu.

V tabulce č. 16 jsou proto destinace, vstupní data pro letadlo a auto, emise scénáře Low – cost, poměrový ukazatel auto/letadlo Low – cost, emise scénáře Low – cost S a poměrový ukazatel auto/letadlo Low – cost S.



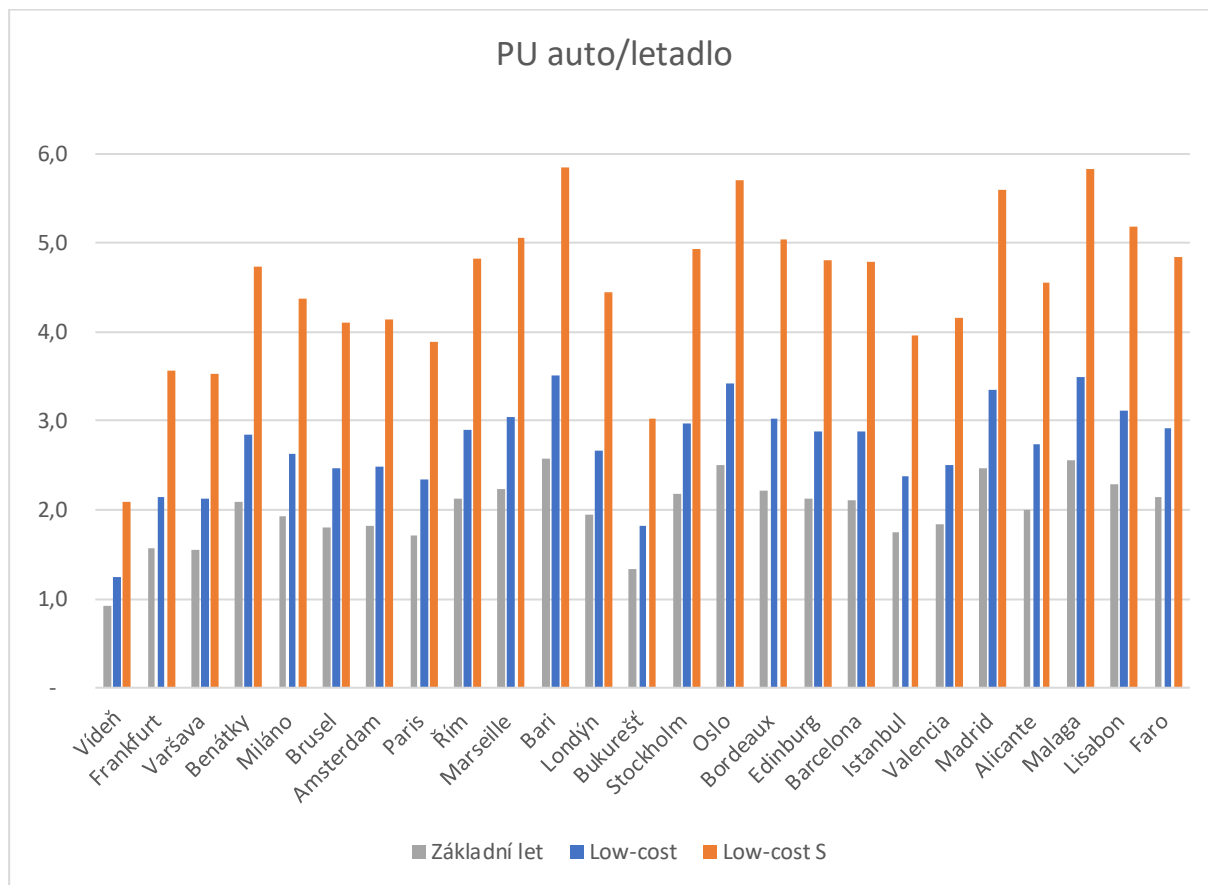
Tabulka 16 PU auto/letadlo pro scénáře Low – cost a Low – cost S

Destinace	Letadlo [kg CO ₂ e]	Automobil [kg CO ₂ e]	Scénář Low-cost [kg CO ₂ e]	PU Low-cost	Scénář Low-cost S [kg CO ₂ e]	PU Low-cost S
Vídeň	61	56	45,0	1,2	27,0	2,1
Frankfurt	55	86	40,3	2,1	24,2	3,6
Varšava	73	114	53,9	2,1	32,3	3,5
Benátky	66	138	48,7	2,8	29,2	4,7
Miláno	76	146	55,7	2,6	33,4	4,4
Brusel	84	152	61,7	2,5	37,0	4,1
Amsterdam	81	148	59,4	2,5	35,7	4,1
Paris	101	174	74,4	2,3	44,6	3,9
Řím	103	220	75,8	2,9	45,5	4,8
Marseille	105	234	77,0	3,0	46,2	5,1
Bari	105	271	77,3	3,5	46,4	5,8
Londýn	110	216	81,0	2,7	48,6	4,4
Bukurešť	171	228	125,4	1,8	75,3	3,0
Stockholm	136	295	99,5	3,0	59,7	4,9
Oslo	114	287	83,9	3,4	50,4	5,7
Bordeaux	122	270	89,6	3,0	53,7	5,0
Edinburg	154	327	113,3	2,9	68,0	4,8
Barcelona	137	289	100,4	2,9	60,3	4,8
Istanbul	178	310	130,8	2,4	78,5	4,0
Valencia	189	346	138,5	2,5	83,1	4,2
Madrid	157	387	115,4	3,4	69,2	5,6
Alicante	188	376	137,9	2,7	82,7	4,5
Malaga	176	452	129,2	3,5	77,5	5,8
Lisabon	204	465	149,4	3,1	89,6	5,2
Faro	229	489	168,0	2,9	100,8	4,8

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

Hodnoty z tabulky č. 16 jsou převedeny do grafu (obrázek 16).



Obrázek 16 Poměrový ukazatel auto/letadlo [zdroj vlastní]

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54.

Hodnoty PU jsou z tabulky č. 16

Z obrázku č. 16 můžeme vidět, jak se mění poměrový ukazatel auto/letadlo pro dané destinace a vybrané scénáře.

Šedé sloupce – základní let vyjadřují poměrový ukazatel automobilu a letadla (vstupní data), neboli náhodného letu. Z výsledků lze vidět, že pro 1 osobu je auto vhodnější pouze pro cestu do Vídně a pro více než polovinu destinací je letadlo vhodnější i pro 2 osoby. Pro skupiny 3 a více lidí bude vždy lepší cesta automobilem.

Modré sloupce – Low – cost ukazují poměrový ukazatel automobilu a letu podle scénáře Low – cost. Z výsledků lze vidět, že pro jednu osobu bude pro všechny destinace, vyjma Vídně a Bukurešti, výhodnější letět letadlem než jet automobilem, totéž platí i pro skupinu dvou osob.



Pro destinace Bari, Oslo, Madrid, Malaga a Faro je dokonce výhodnější let letadlem i pro skupiny tří osob.

Oranžové sloupce – Low – cost S ukazují PU auto/letadlo scénáře Low – cost S. Z výsledků lze pozorovat, že pro jednu i dvě osoby bude pro všechny destinace výhodnější letět letadlem než jet automobilem. Pro skupinu tří osob bude auto vhodnější pouze pro cesty do Vídně a Bukurešti. Pro destinace Marseille, Bari, Oslo, Madrid, Malaga a Faro je dokonce výhodnější let letadlem i pro skupiny pěti osob, a to už se dostáváme na maximální kapacitu auta. Zároveň do takto vzdálených destinací bude cesta pěti osob v autě výrazně nekomfortní a bude absolvována jen velice zřídka.

V grafu dále také nalezneme lineární trend oranžových sloupců, který nám říká, že tento scénář se vyrovná 4–5 lidem v autě téměř ve všech případech.

Lze tedy tvrdit, že i v tuto dobu existují scénáře letů, kdy pro všechny skupiny osob bude lepší letět letadlem než autem. Scénář Low – cost S, kde je PU vyšší než 5, tedy Marseille, Bari, Oslo, Madrid, Malaga a Faro.

Takových letů sice v tuto chvíli nebude mnoho, nicméně dopravce, který vlastní letadla s moderním pohonem, má load factor vyšší než 96 % a natankuje do svých letadel pro tyto cesty SAF, bude moci prohlásit, že taková cesta bude vždy mít pro jakoukoliv skupinu lidí nižší emise CO_{2e} než průměrným automobilem.



Porovnání automobilové a letecké dopravy s využitím scénářů s očekávanou implementací v letech 2024-2035+

V tabulce 15 jsou další možné scénáře. Tyto scénáře ovšem nejsou aktuálně možné, ale mají předpokládaný termín implementace mezi lety 2024 a 2030. V kapitole 2.4 Odhad množství emisí CO₂ do roku 2050 je popsáno odhadované nahrazení klasických paliv palivem SAF. Masivní rozšíření je očekáváno od roku 2035. Tyto scénáře sice budou možné implementovat od roku 2024-2030, nicméně nebude moc obvyklé, aby cestující narazil na let podle tohoto scénáře, proto bude počítáno s využíváním těchto scénářů až od roku 2035.

Jedná se o scénáře:

- A – nižší spotřeba díky novým sharklets (2024),
- SES s nižšími emisemi díky zkrácení letových tras a zpoždění (2028),
- Low – cost SS, což je Low – cost S po implementaci SES,
- Low – cost SSA– kombinace Low – cost SS a A
- SAF – letadla s pohonem čistě na SAF
- ALL – což je kombinace všech možných atributů. Tedy moderní pohon, vysoká obsazenost, let čistě na SAF, implementován SES, i nižší aerodynamika.

Hodnoty emisí pro tyto scénáře jsou zobrazeny v tabulce č. 18.

Tabulka 17 Tabulka scénářů s implementací od roku 2035

Destinace	Letadlo [kg CO ₂ e]	Automobil [kg CO ₂ e]	Scénář A [kg CO ₂ e]	Scénář SES [kg CO ₂ e]	Scénář Low-cost SS [kg CO ₂ e]	Scénář Low- cost SSA [kg CO ₂ e]	Scénář SAF [kg CO ₂ e]	Scénář ALL [kg CO ₂ e]
Vídeň	61	56	59,5	55,2	24,3	23,6	11,0	7,9
Frankfurt	55	86	53,3	49,5	21,8	21,1	9,9	7,0
Varšava	73	114	71,2	66,1	29,1	28,2	13,2	9,4
Benátky	66	138	64,4	59,8	26,3	25,5	12,0	8,5
Miláno	76	146	73,7	68,4	30,1	29,2	13,7	9,7
Brusel	84	152	81,6	75,7	33,3	32,3	15,1	10,8
Amsterdam	81	148	78,6	72,9	32,1	31,1	14,6	10,4
Paris	101	174	98,4	91,3	40,2	39,0	18,3	13,0
Řím	103	220	100,3	93,0	40,9	39,7	18,6	13,2
Marseille	105	234	101,9	94,5	41,6	40,3	18,9	13,4
Bari	105	271	102,2	94,8	41,7	40,5	19,0	13,5
Londýn	110	216	107,1	99,3	43,7	42,4	19,9	14,1
Bukurešť	171	228	165,9	153,9	67,7	65,7	30,8	21,9
Stockholm	136	295	131,6	122,1	53,7	52,1	24,4	17,4
Oslo	114	287	111,0	103,0	45,3	44,0	20,6	14,7
Bordeaux	122	270	118,4	109,9	48,4	46,9	22,0	15,6
Edinburg	154	327	149,8	139,0	61,2	59,3	27,8	19,8
Barcelona	137	289	132,8	123,2	54,2	52,6	24,6	17,5
Istanbul	178	310	172,9	160,4	70,6	68,5	32,1	22,8



Valencia	189	346	183,1	169,9	74,8	72,5	34,0	24,2
Madrid	157	387	152,6	141,6	62,3	60,5	28,3	20,2
Alicante	188	376	182,3	169,1	74,4	72,2	33,8	24,1
Malaga	176	452	170,9	158,5	69,8	67,7	31,7	22,6
Lisabon	204	465	197,6	183,3	80,7	78,3	36,7	26,1
Faro	229	489	222,2	206,2	90,7	88,0	41,2	29,3

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

V tabulce č. 17 lze vidět, jak klesají hodnoty emisí pro budoucí scénáře.

Pro porovnání poměrových ukazatelů jsou vybrány tyto scénáře:

- Low – cost SS – po implementaci SES bude velké množství dopravců mít snahu létat s těmito atributy.
- SAF – let kompletně na SAF. K většímu množství letů dojde nejspíš až po implementaci SES, tudíž samotný let na čistě na SAF nebude běžný, proto je ve výpočtu zahrnuto i snížení emisí díky SES. Tento scénář je vybrán pro ukázkou, jak velký gamechanger v této oblasti je let pouze na SAF.
- ALL neboli implementace všech atributů. Tento scénář je vybrán pro ukázkou, na jaké hodnoty může letectví dosáhnout.

Tabulka poměrových ukazatelů budoucích scénářů.

Tabulka 18 Tabulka poměrových ukazatelů auto/letadlo budoucích scénářů.

Destinace	Letadlo [kg CO ₂ e]	Automobil [kg CO ₂ e]	Low-cost SS	PU Auto/letadlo Low-cost SS	SAF	PU Auto/letadlo SAF	ALL	PU Auto/letadlo ALL
Vídeň	61	56	24,3	2,3	12,3	4,6	7,9	7,2
Frankfurt	55	86	21,8	4,0	11,0	7,8	7,0	12,2
Varšava	73	114	29,1	3,9	14,7	7,8	9,4	12,1
Benátky	66	138	26,3	5,3	13,3	10,4	8,5	16,3
Miláno	76	146	30,1	4,9	15,2	9,6	9,7	15,0
Brusel	84	152	33,3	4,6	16,8	9,0	10,8	14,1
Amsterdam	81	148	32,1	4,6	16,2	9,1	10,4	14,2
Paris	101	174	40,2	4,3	20,3	8,6	13,0	13,4
Řím	103	220	40,9	5,4	20,7	10,6	13,2	16,6
Marseille	105	234	41,6	5,6	21,0	11,1	13,4	17,4
Bari	105	271	41,7	6,5	21,1	12,9	13,5	20,1
Londýn	110	216	43,7	4,9	22,1	9,8	14,1	15,3
Bukurešť	171	228	67,7	3,4	34,2	6,7	21,9	10,4
Stockholm	136	295	53,7	5,5	27,1	10,9	17,4	17,0
Oslo	114	287	45,3	6,3	22,9	12,5	14,7	19,6
Bordeaux	122	270	48,4	5,6	24,4	11,1	15,6	17,3
Edinburg	154	327	61,2	5,3	30,9	10,6	19,8	16,5
Barcelona	137	289	54,2	5,3	27,4	10,5	17,5	16,5
Istanbul	178	310	70,6	4,4	35,6	8,7	22,8	13,6

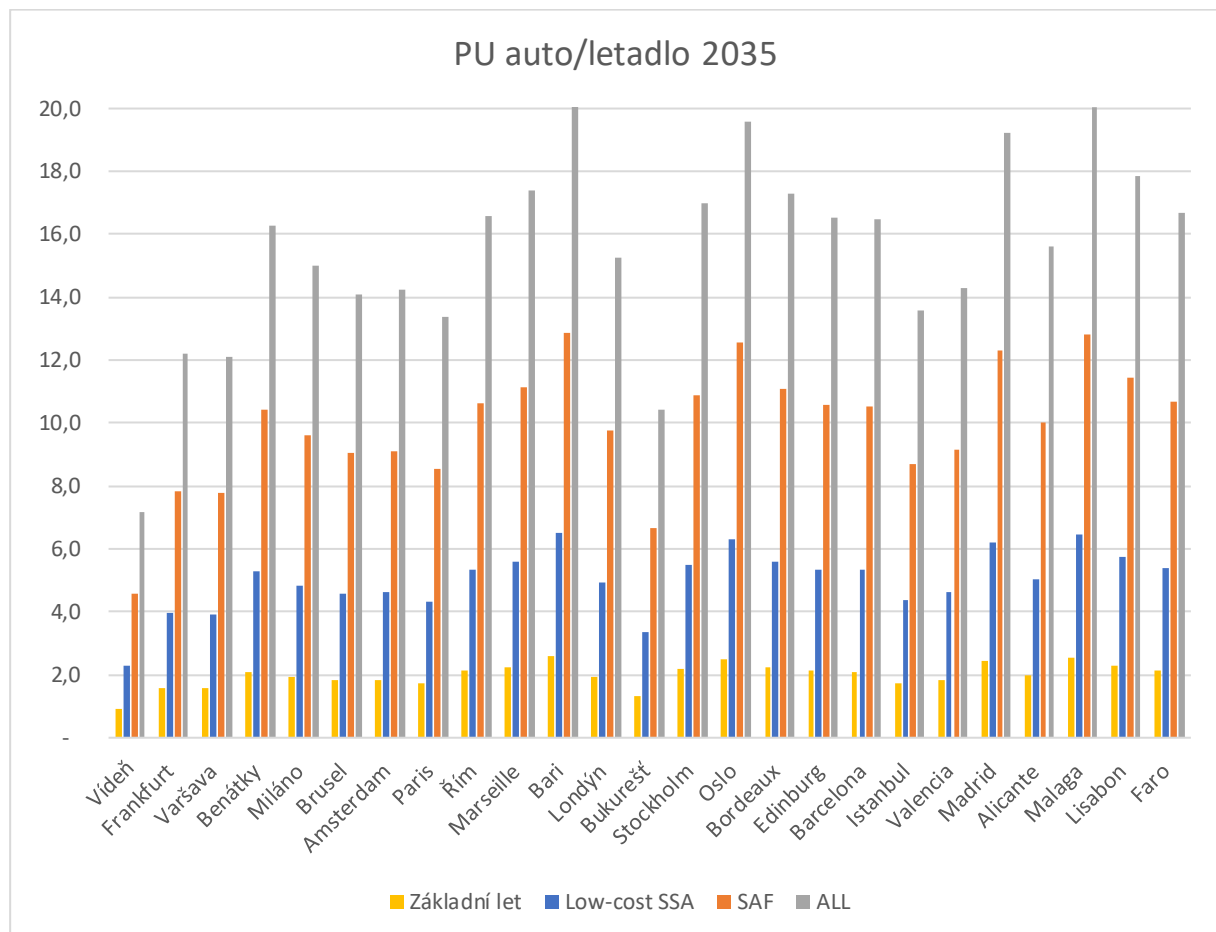


Valencia	189	346	74,8	4,6	37,7	9,2	24,2	14,3
Madrid	157	387	62,3	6,2	31,5	12,3	20,2	19,2
Alicante	188	376	74,4	5,1	37,6	10,0	24,1	15,6
Malaga	176	452	69,8	6,5	35,2	12,8	22,6	20,0
Lisabon	204	465	80,7	5,8	40,7	11,4	26,1	17,8
Faro	229	489	90,7	5,4	45,8	10,7	29,3	16,7

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

Hodnoty z tabulky 18 jsou převedeny do následujícího grafu, pro lepší vizualizaci výsledných hodnot.



Obrázek 17 Poměrové ukazatele budoucích scénářů [zdroj vlastní]

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

Hodnoty PU jsou z tabulky č. 18



Žluté sloupce – základní let vychází ze vstupních dat, stejně jako PU auto/letadlo pro aktuálně možné scénáře.

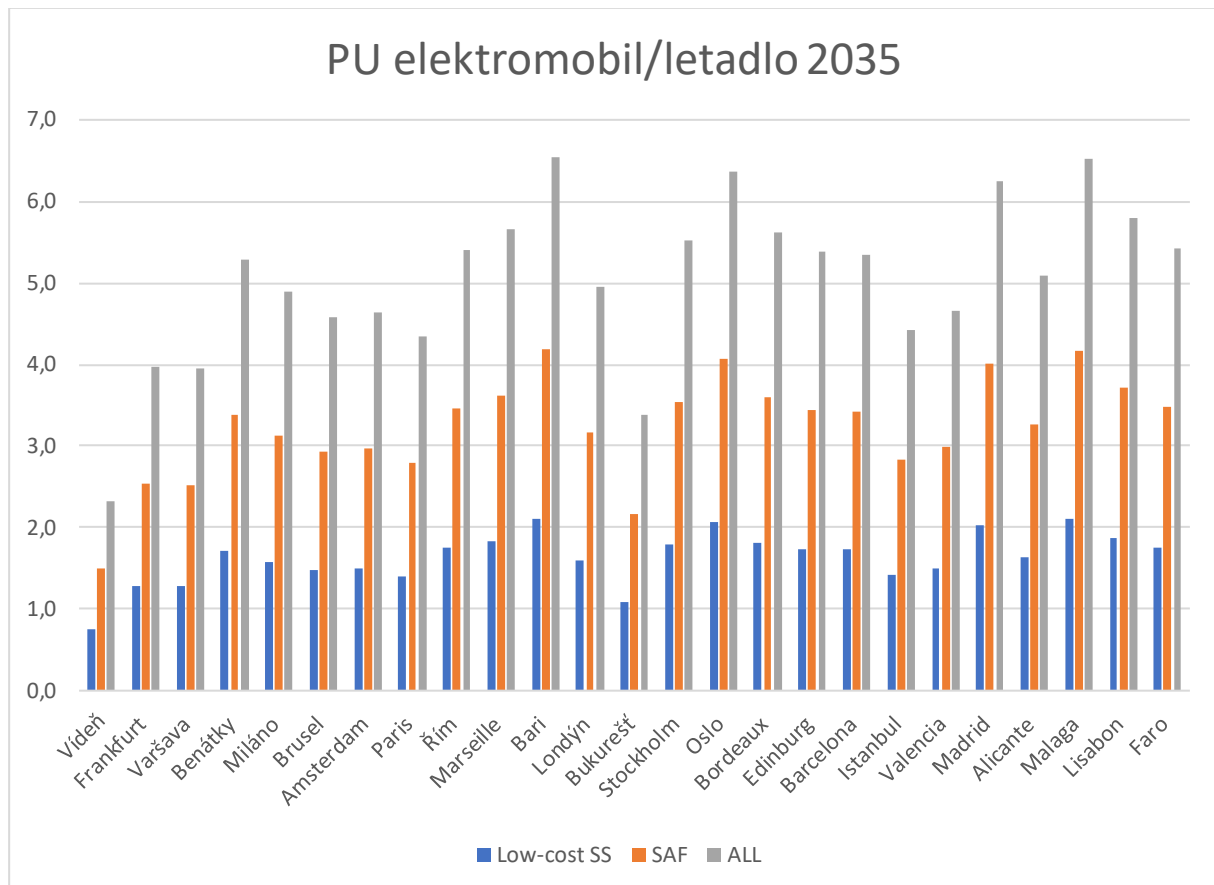
Modré sloupce – Low – cost SS. Low – cost dopravce, využití SAF z 50 % při implementaci SES. V tomto scénáři už většina destinací má PU auto/letadlo hodnotu vyšší než 4. V takovém případě, pokud jedna osoba pojede sama, například na služební cestu a použije průměrné auto místo letadla, tak vytvoří více než 4x vyšší emise CO_{2e}. Toto tvrzení platí pro všechny destinace kromě Vídně a Bukurešti.

Oranžové sloupce – SAF – v tomto scénáři se PU dostane u všech destinací kromě Vídně nad kapacitu auta. Ve vzdálených destinacích, jako jsou ty španělské, se PU dostává do hodnot 10-12, což převyšuje kapacitu auta dvojnásobně.

Šedé sloupce – Implementace všech atributů. V tomto scénáři se i pro nejkratší let do Vídně dostáváme na hodnotu 7, což je vyšší než kapacita automobilu. Většina zbylých destinací dosahuje hodnot mezi 12 a 18. Například pro cestu do Malagy dosahuje hodnota 20 a lze říct, že kdyby jedna osoba jela na služební cestu autem, místo využití letadla s tímto scénářem, vytvořila by 20x vyšší uhlíkovou stopu. Dokonce i skupina 20 přátel, pokud by chtěla jet do Malagy na dovolenou autem, by se musela rozdělit do 4 aut a vytvořila by tím 4x vyšší uhlíkovou stopu.

Jelikož automobilová doprava bude také podléhat vývoji a snižování emisí v čase, byly spočítány i poměrové ukazatele elektromobil/letadlo pro scénáře Low – cost SS, SAF a ALL.

Tabulka hodnot již není přiložena, neboť je totožná s tabulkou číslo 19, jen ve sloupci automobil budou hodnoty pro elektromobil a poměrové hodnoty se tím upraví, viz následující graf.



Obrázek 18 Poměrový ukazatel elektromobil/letadlo od roku 2035 [zdroj vlastní]
PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

V obrázku číslo 18 můžeme vidět, že ačkoli jsou hodnoty automobilu upraveny o moderní technologie, letectví nezaostává a při aplikaci všech atributů v letectví se lineární trend pohybuje okolo plné kapacity elektroautomobilu.

Nepřesnosti porovnání

Pro scénáře s možnou aplikací od roku 2035 je počítáno s budoucími technologiemi, které budou snižovat emise. U automobilové dopravy je ovšem stále počítáno se stejnou hodnotou emisí, která je vypočítána z emisního faktoru pro průměrné auto z roku 2021.

Tento emisní faktor byl v roce 2020 0,16637 kg CO_{2e}/km a v roce 2021 0,16496 kg CO_{2e}/km. Za rok tedy klesl o 0,00141 kg CO_{2e}/km, což činí přibližně 0,85 %. Lze tedy očekávat, že i u automobilové dopravy dojde ke snižování uhlíkové stopy. Tímto tempem průměrné emise automobilové dopravy od roku 2022 do roku 2035 klesnou o 13 * 0,85 %, což se rovná 11,05 %. U letecké dopravy u scénářů Low – cost SSA, SAF a ALL, bude pokles o 61,6 %,



80 % a 87,2 %. Proto technologický vývoj v automobilové dopravě nebude mít výrazný význam na klasifikaci.

5.5. Porovnání železniční a letecké dopravy

V této kapitole budou porovnávány jednotlivé scénáře letecké dopravy s železniční dopravou. Scénáře jsou stejné jako v porovnání s automobilovou dopravou, proto již nejsou nadále popisovány výpočty hodnot.

Vstupní data opět tvoří emise CO_{2e} spočítané dle metody GHG protocol, viz předchozí kapitoly. V tabulce č. 19 již nejsou uváděny hodnoty emisí dle jednotlivých scénářů, protože jsou stejné jako v kapitole Porovnání automobilové a letecké dopravy. V následující tabulce můžeme vidět rovnou poměrový ukazatel jednotlivých scénářů.

Jelikož hodnoty cesty vlakem jsou velice nízké, tak nemá cenu porovnávat všechny scénáře. Proto byly pro porovnání vybrány pouze tyto tři scénáře:

- Základní let – Vstupní data. Vybraná pro všeobecnou představu aktuální situace.
- PU Low – cost S – V tomto scénáři dochází ke snížení emisí v letecké dopravě o 56 %, nicméně i tak se PU pohybuje v hodnotách 0,07 až 0,18.
- Implementace všech atributů – I při implementaci všech atributů se hodnoty PU dostávají k hodnotám 0,5 až u vzdálených španělských destinací. V takových případech cesta letadlem vytvoří „pouze“ dvojnásobnou uhlíkovou stopu než cesta vlakem.

Tabulka 19 Tabulka poměrových ukazatelů vlak/etadlo

Destinace	Letadlo [kg CO _{2e}]	Vlak [kg CO _{2e}]	PU základní let	PU Low-cost S	PU ALL
Vídeň	61	1,79	0,03	0,07	0,23
Frankfurt	55	2,52	0,05	0,10	0,36
Varšava	73	3,30	0,04	0,10	0,35
Benátky	66	4,52	0,07	0,15	0,53
Miláno	76	4,25	0,06	0,13	0,44
Brusel	84	4,27	0,05	0,12	0,40
Amsterdam	81	4,48	0,06	0,13	0,43
Paris	101	5,64	0,06	0,13	0,43
Řím	103	6,65	0,06	0,15	0,50
Marseille	105	6,78	0,06	0,15	0,50
Bari	105	7,82	0,07	0,17	0,58
Londýn	110	5,93	0,05	0,12	0,42
Bukurešť	171	6,65	0,04	0,09	0,30
Stockholm	136	7,20	0,05	0,12	0,41
Oslo	114	8,09	0,07	0,16	0,55



Bordeaux	122	8,03	0,07	0,15	0,51
Edinburg	154	8,73	0,06	0,13	0,44
Barcelona	137	10,46	0,08	0,17	0,60
Istanbul	178	9,76	0,05	0,12	0,43
Valencia	189	12,09	0,06	0,15	0,50
Madrid	157	13,16	0,08	0,19	0,65
Alicante	188	12,88	0,07	0,16	0,54
Malaga	176	15,44	0,09	0,20	0,68
Lisabon	204	16,48	0,08	0,18	0,63
Faro	229	17,79	0,08	0,18	0,61

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

Hodnoty emisí CO_{2e} pro železniční dopravu sice jsou nápadně nízké, nicméně metodika GHG protocol je mezinárodně uznávaná a využívá ji většina velkých korporátních firem, které musí vykazovat uhlíkovou stopu například aby mohly být zalistovány na burze.

Emisní faktor na pkm pro mezinárodní vlak je 0,00446, zatímco pro let v economy class je 0,140625, což je 31 x vyšší hodnota.

V případě použití emisního faktoru pro vnitrostátní železnici, který činí 0,03549, už v některých scénářích letadlo porazí i vlak. Tabulka by pak vypadala následovně:

Tabulka 20 Tabulka poměrových ukazatelů vlak/letadlo pro vnitrostátní železnici

Destinace	Letadlo [kg CO _{2e}]	Vlak [kg CO _{2e}]	PU základní let	PU Low-cost S	PU ALL
Vídeň	61	14	0,23	0,53	1,81
Frankfurt	55	20	0,37	0,83	2,85
Varšava	73	26	0,36	0,81	2,79
Benátky	66	36	0,54	1,23	4,23
Miláno	76	34	0,45	1,01	3,48
Brusel	84	34	0,40	0,92	3,16
Amsterdam	81	36	0,44	1,00	3,43
Paris	101	45	0,44	1,01	3,46
Řím	103	53	0,51	1,16	4,00
Marseille	105	54	0,51	1,17	4,01
Bari	105	62	0,59	1,34	4,61
Londýn	110	47	0,43	0,97	3,34
Bukurešť	171	53	0,31	0,70	2,42
Stockholm	136	57	0,42	0,96	3,29
Oslo	114	64	0,56	1,28	4,39
Bordeaux	122	64	0,52	1,19	4,09
Edinburg	154	69	0,45	1,02	3,51
Barcelona	137	83	0,61	1,38	4,75
Istanbul	178	78	0,44	0,99	3,40
Valencia	189	96	0,51	1,16	3,98
Madrid	157	105	0,67	1,51	5,20
Alicante	188	103	0,55	1,24	4,26
Malaga	176	123	0,70	1,59	5,45
Lisabon	204	131	0,64	1,46	5,03
Faro	229	142	0,62	1,40	4,83

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54



V takovém případě by při aplikaci všech atributů bylo vhodnější letět letadlem než jet vlakem.

Nicméně dle metodiky GHG tohle není správný postup, protože linky jsou mezinárodní.

Zároveň takový let bude možné až po roce 2030 a uhlíková stopa z železniční dopravy se odvíjí od uhlíkové stopy výroby elektrické energie v dané zemi, která se neustále snižuje. Uhelné elektrárny jsou nahrazovány bezemisními elektrárnami, či v České republice je plánováno rozšířit jaderné elektrárny.

Závěr porovnání železniční a letecké dopravy

Cestování vlakem bude mít vždy nižší uhlíkovou stopu než letadlem.

Scénář ALL dosahuje snížení uhlíkové stopy oproti průměrnému letu o 87,2 %. Ani s tak vysokým snížením se letecká doprava nevyrovná té železniční v absolutních hodnotách. PU dosahuje hodnot od 0,23 po 0,68. To znamená, že cestující ve vlaku i tak udělá nižší uhlíkovou stopu, a to 1,47 až 4,3 x. Jsou to sice vysoké násobky, ale v absolutních hodnotách jsou to nízké hodnoty. Ty jsou vidět v tabulce číslo 21.

Tabulka 21 Rozdíl hodnot pro vlak a letadlo

Destinace	Letadlo [kg CO _{2e}]	Vlak [kg CO _{2e}]	Letadlo ALL [kg CO _{2e}]	PU ALL	Rozdíl vlak a letadlo ALL
Vídeň	61	1,79	7,9	0,23	6,11
Londýn	110	5,93	14,1	0,42	8,17
Malaga	176	15,44	22,6	0,68	7,16

ALL = scénář z tabulky č. 14 na straně 62,

PU = poměrový ukazatel je definován v kapitole 5.2 na straně 54

V tabulce č. 21 můžeme vidět 3 vybrané trasy, krátkou, střední a dlouhou, se vstupními hodnotami emisí pro cestu letadlem a vlakem, emise při letu podle Scénáře ALL, poměrový ukazatel a rozdíl v absolutních hodnotách. Dle poměrového ukazatele to vypadá, že se letecká doprava k té železniční stále nepřibližuje, ale z výsledku absolutních hodnot lze vidět, že rozdíly pro všechny cesty jsou přibližně 7 kg CO_{2e}.

Pro představu dle zdroje Greenqueen [40] uhlíková stopa nejoblíbenějšího hamburgeru, BigMac je 2,35 kg CO_{2e}. „Rozdíl emisí CO_{2e} mezi 4hodinovým letem do Malagy a 30hodinovou cestou vlakem by tedy šel vykompenzovat odřeknutím si 3 BigMaců z McDonalds“



Závěrem tedy lze říci, že letecká doprava se té železniční poměrově nevyrovná, ale v absolutních číslech se dostane na podobné řády hodnot, kde již lze tento rozdíl kompenzovat.

Nepřesnosti v porovnání dopravy železniční s leteckou

Pro scénáře s možnou aplikací od roku 2024–2030 je počítáno s budoucími technologiemi, které budou snižovat emise. Emise z železniční dopravy jsou tvořeny emisemi vytvořenými při výrobě elektrické energie, která je spotřebována pro provoz železnice. Proto se snižujícím emisním faktorem pro výrobu elektrické energie se bude snižovat i množství emisí za pkm. Dle Ministerstva průmyslu a obchodu [41] Mezi lety 2012 a 2020 se emisní faktor vyrobené elektřiny v České republice snížil z 0,506 t CO₂e/MWh na 0,384 t CO₂e/MWh, což představuje snížení přibližně o 25 %. Proto lze očekávat, že i mezi lety 2022 a 2035 se emise z železniční dopravy též sníží minimálně o 40 % a PU letadlo/vlak bude tudíž ještě nižší. Jak již bylo zmíněno v kapitole Závěr porovnání železniční a letecké dopravy, jsou hodnoty v železniční dopravě tak nízké, že ač bude ještě o 40 % lepší, tak v absolutních číslech to až tak výrazný rozdíl nevytvoří a budou tedy existovat případy, kdy tento rozdíl nebude hrát významnou roli.

5.6. Porovnání autobusové a letecké dopravy

V této kapitole jsou porovnávány jednotlivé scénáře letecké dopravy s autobusovou dálkovou dopravou. Scénáře jsou stejné jako v porovnání s automobilovou dopravou, proto již nejsou opakovaně vysvětlovány výpočty hodnot.

Vstupní data opět tvoří emise CO₂e spočítané dle metody GHG protocol, viz předchozí kapitoly. V obrázku č.19 již nejsou uváděny hodnoty emisí dle jednotlivých scénářů, protože jsou stejné jako v kapitole porovnání automobilové a letecké dopravy. V následující tabulce můžeme vidět rovnou poměrové ukazatele jednotlivých scénářů.



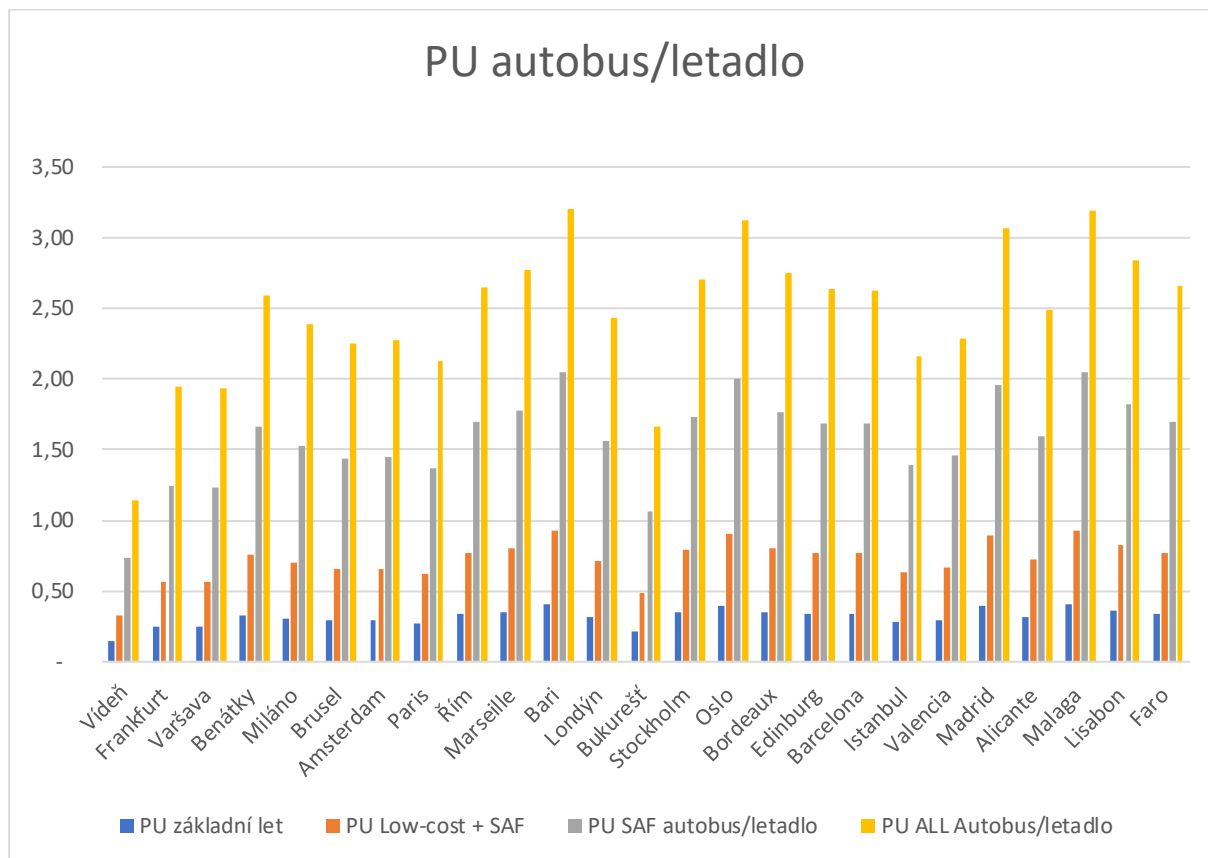
Tabulka 22 Tabulka poměrových ukazatelů autobus/letadlo

Destinace	Letadlo [kg CO ₂ e]	Autobus [kg CO ₂ e]	PU základní let	PU Low-cost S	PU SAF	PU ALL
Vídeň	61	8,96	0,15	0,33	0,73	1,14
Frankfurt	55	13,72	0,25	0,57	1,25	1,95
Varšava	73	18,17	0,25	0,56	1,24	1,93
Benátky	66	22,07	0,33	0,76	1,66	2,59
Miláno	76	23,29	0,31	0,70	1,53	2,39
Brusel	84	24,21	0,29	0,65	1,44	2,25
Amsterdam	81	23,55	0,29	0,66	1,45	2,27
Paris	101	27,70	0,27	0,62	1,37	2,13
Řím	103	35,00	0,34	0,77	1,69	2,64
Marseille	105	37,25	0,35	0,81	1,77	2,77
Bari	105	43,21	0,41	0,93	2,05	3,20
Londýn	110	34,36	0,31	0,71	1,56	2,43
Bukurešť	171	36,31	0,21	0,48	1,06	1,66
Stockholm	136	47,00	0,35	0,79	1,73	2,70
Oslo	114	45,74	0,40	0,91	2,00	3,12
Bordeaux	122	43,08	0,35	0,80	1,76	2,75
Edinburg	154	52,12	0,34	0,77	1,69	2,64
Barcelona	137	46,00	0,34	0,76	1,68	2,62
Istanbul	178	49,44	0,28	0,63	1,39	2,17
Valencia	189	55,16	0,29	0,66	1,46	2,28
Madrid	157	61,71	0,39	0,89	1,96	3,06
Alicante	188	59,97	0,32	0,72	1,60	2,49
Malaga	176	72,01	0,41	0,93	2,04	3,19
Lisabon	204	74,13	0,36	0,83	1,82	2,84

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54

Hodnoty z tabulky číslo 22 vytvoří následující graf.



Obrázek 19 Poměrový ukazatel autobus/letadlo [zdroj vlastní]
PU je poměrový ukazatel definován v kapitole 5.2 na straně 54
Hodnoty PU jsou z tabulky č. 22

Z grafu lze vidět, že u autobusové dopravy už PU nedosahuje tak nízkých hodnot jako u železniční. PU základního letu a letadla se pohybuje mezi 0,15 a 0,41 pro všechny destinace. Proto lze říct, že v tuto chvíli je let letadlem 6,6x – 2,43x horší než stejná cesta autobusem pro všechny měřené destinace. Nad hodnotu 1 se PU dostává až při aplikaci scénářů SAF nebo ALL. Při těchto hodnotách se lineární trendy pohybují v rozmezí hodnot 1,2 až 3 a za takových podmínek bude letadlo vhodnější než autobus.

Závěr porovnání autobusové a letecké dopravy

Autobusová doprava je obecně z hlediska uhlíkové stopy vhodnější dopravní prostředek než letadlo. Hlavní faktor, který dokáže změnit tento nepoměr bude masové využití SAF. Tím se sníží uhlíková stopa letů o 80 % a PU se dostane nad 1. V kombinaci s ostatními



atributy bude možné dosáhnout případu, kdy bude mít cesta autobusem 3x větší uhlíkovou stopu než cesta letadlem. Například cesty do destinací Bari, Oslo, Alicante a Malaga.

Nepřesnosti v porovnání autobusové a letecké dopravy budou podobné jako u porovnání automobilové s leteckou. Také je očekáváno, že emisní faktor jízdy dálkovým autobusem bude klesat o 0,85 % ročně (11,05 % do roku 2035) a jelikož je v letectví počítáno s technologiemi (SAF, SESAR, atd.) od roku 2035, tak mohou být výsledné poměrové ukazatele o 11,05 % horší v neprospěch letecké dopravy.



6. Návrh klasifikace

Z případové studie vychází, že pro autobusovou a automobilovou dopravu budou muset být rozdílné klasifikace, jelikož autobusová doprava je stejně jako letecká doprava hromadná, a tím pádem je rozhodující pouze pokud je PU vyšší nebo nižší než 1. V případě porovnávání automobilové dopravy s leteckou by taková klasifikace nebyla relevantní, protože by odpovídala skutečnosti pouze v případech, kdy v automobilu jede pouze jedna osoba.

Dále ze studie vychází, že nedává smysl vytvořit klasifikaci pro porovnávání železniční s leteckou dopravou, protože nebyl nalezen případ, kdy by PU dosáhl hodnoty 1.

6.1. Klasifikace pro porovnání automobilové dopravy s leteckou.

Pro vytvoření klasifikace je proto vhodné se zaměřit na typické skupiny cestujících. Je třeba, aby výsledná klasifikace brala v potaz i možnosti, kdy bude v autě sedět více cestujících.

Typické skupiny cestujících:

- 1 osoba – služební cesta,
- 2 osoby – pár letící na dovolenou,
- 3 osoby – skupina přátel,
- 4 – 5 osob – skupina přátel či rodina s dětmi.

Maximální kapacita průměrného auta je 5 lidí. Pokud je PU auto/letadlo vyšší než 5, pak pro rovnost přepravního objemu by musely být vyslány 2 automobily, a tím by se uhlíková stopa automobilu zdvojnásobila.



Tabulka 23 Návrh klasifikace dle typických skupin cestujících

PU	Klasifikace	Typická skupina cestujících
>15	A+	
5-15	A	
4-5	B	Skupina přátel či rodina s dětmi.
3-3,9	C	Skupina přátel.
2-2,9	D	Pár letců na dovolenou.
1-1,9	E	Služební cesta.
<1	F	

PU = poměrový ukazatel je definován v kapitole 5.2 na straně 54

Výsledkem porovnání cesty letadlem a automobilem je teda klasifikace, která nám říká, pro jakou skupinu osob je cesta letadlem vhodnější. Pro vyobrazení výsledků bylo vybráno pět scénářů:

- Základní let – aktuálně možný scénář,
- low-cost – aktuálně možný scénář,
- low-cost S – aktuálně možný scénář,
- low-cost SSA – očekávaná implementace od roku 2035,
- ALL – očekávaná implementace od roku 2035.

Výsledky vyobrazím v tabulce číslo 24.

Známky klasifikace vychází z hodnot PU z tabulky 16 PU auto/letadlo pro scénáře Low – cost a Low – cost S, z tabulky 18 tabulka poměrových ukazatelů auto/letadlo budoucích scénářů a tabulky 23 Návrh klasifikace dle typických skupin cestujících.



Tabulka 24 Klasifikace linek dle scénářů letu

Destinace	Základní let	Low-cost	Low-cost S	Low-cost SSA	ALL
Vídeň	F	E	D	D	A
Frankfurt	E	D	C	B	A
Varšava	E	D	C	B	A
Benátky	D	D	B	A	A+
Miláno	E	D	B	A	A+
Brusel	E	D	B	B	A
Amsterdam	E	D	B	B	A
Paris	E	D	C	B	A
Řím	D	D	B	A	A+
Marseille	D	C	A	A	A+
Bari	D	C	A	A	A+
Londýn	D	D	B	A	A+
Bukurešť	E	E	C	C	A
Stockholm	D	C	B	A	A+
Oslo	D	C	A	A	A+
Bordeaux	D	C	A	A	A+
Edinburg	D	D	B	A	A+
Barcelona	D	D	B	A	A+
Istanbul	E	D	B	B	A
Valencia	E	D	B	B	A
Madrid	D	C	A	A	A+
Alicante	D	D	B	A	A+
Malaga	D	C	A	A	A+
Lisabon	D	C	A	A	A+
Faro	D	D	B	A	A+

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

Tabulka 24 zobrazuje letecká spojení s Letištěm Václava Havla v Praze a jejich hodnocení dle jednotlivých scénářů letů.

Klasifikace leteckých spojení je navržena dle tabulky 23. Z klasifikace vychází tyto závěry:

- pro jednu osobu je vhodnější let letadlem u známek A+ až E,
- pro dvě osoby je vhodnější let letadlem u známek A+ až D
- pro tři osoby je vhodnější let letadlem u známek A+ až C
- pro čtyři až pět osob je vhodnější let letadlem u známek A+ až B



- pokud je let ohodnocen známkou A nebo A+, tak bude pro jakoukoliv skupinu cestujících vhodnější let letadlem

Čtenář klasifikace tedy vidí, za jakých podmínek neboli scénářů dosáhne potřebné známky. Znamky odpovídají skupinám cestujících, takže ví, jakou minimální známku musí hledat, aby dosáhl nižší uhlíkové stopy než při cestě autem. Klasifikace tedy nestanovuje pevnou známku pro destinaci, ale pro let do dané destinace za daného scénáře. Cestující si uvědomí například: „cestuji sám, musím hledat známky A+ až E, cestujeme ve třech, hledáme známku A+ až C“.

Závěrem případové studie je, že na množství uhlíkové stopy nehraje takovou roli cílová destinace, jako technologie, které jsou v průběhu letu použity neboli scénář letu. Kratší lety jsou sice obecně méně efektivnější, ale rozdíly nejsou tak velké, jako při využití zvolených atributů. Z tabulky číslo 28 by šlo jednotlivým scénářům přidat klasifikaci podle nejhorší známky jakou dosáhl. Pokud vynecháme destinaci Vídeň, tak by pro scénáře vycházely následující známky:

- základní let – E,
- Low-cost – D,
- Low-cost S – C,
- Low-cost SSA – B,
- SAF – B (není v tabulce č. 24 z důvodu přehlednosti, ale dle tabulky č. 18 PU klesá na nejnižší hodnotu 4,6, což odpovídá klasifikaci B)
- All – A.

Takhle přiřazené známky k jednotlivým scénářům sice zkreslují výsledky, ale výrazně zjednoduší aplikaci klasifikace. Dopravcům nebo letištím by stačilo získat informaci, zda na daném spoji splněny podmínky scénářů a nemusela by být počítána uhlíková stopa každého letu. Nemuseli by pro každý let sbírat data o spotřebovaném palivu, obsazenosti typu letadla, a další data pro výpočet uhlíkové stopy na dané lince. Stačilo by jim prokázat pouze tato fakta:



Tabulka 25 Podmínky pro získání klasifikace

Klasifikace	Scénář	Podmínky
E	Základní let	Žádné.
D	Low – cost	Obsazenost nad 96 % + operuje letadlo s moderním pohonem
D	S	Využití SAF v poměru 1:1
C	Low – cost S,	Obsazenost nad 96 % + operuje letadlo s moderním pohonem + využití SAF 0,5.
C	Low – cost SS	Obsazenost nad 96 % + operuje letadlo s moderním pohonem + využití SAF v poměru 1:1 + aplikace SESAR,
B	Low – cost SSA	Obsazenost nad 96 % + operuje letadlo s moderním pohonem + využití SAF 0,5 + aplikace SESAR + aerodynamické vylepšení letadel
B	SAF	Let čistě na SAF
A	ALL	Aplikace všech atributů

Zkratky v prvním řádku odpovídají zkratkám scénářů z tabulky č. 14 na straně 62

6.2. Klasifikace pro porovnání autobusové a železniční dopravy s leteckou dopravou

Na základě výsledků PU autobus/letadlo a vlak/letadlo jsem se rozhodl nevytvářet klasifikaci pro porovnání těchto doprav.

Ze studie vychází, že nedává smysl vytvořit klasifikaci pro porovnávání železniční s leteckou dopravou, protože nebyl nalezen případ, kdy by PU dosáhl hodnoty 1.

Při porovnání autobusové dopravy s leteckou se PU dostává nad hodnotu 1 až při aplikaci scénářů SAF nebo ALL. Tyto scénáře jsou očekávány až od roku 2035. Je proto nutné říci, že aktuálně bude autobusová doprava vždy vhodnější než letecká.

6.3. Diskuse

Tato klasifikace by mohla najít uplatnění na internetových **vyhledávacích letenek jako je Kiwi.com, Google flights či jiné**. Svoji službu by mohly rozšířit o enviromentální klasifikaci a pomoci tak zákazníkům k výběru vhodného typu dopravy. Již dnes je možné na Google



flights nalézt uhlíkovou stopu daného letu. Tato klasifikace by tuto hodnotu mohla jednak doplnit, nebo úplně zastoupit. Výhody této klasifikace jsou vysvětleny na následujícím příkladě:

Cestující hledá let z Prahy do Londýna. Na Google flights nalezne více než 10 možných spojení. Přímé lety, s přestupem, levné lety, drahé, různé časy odletů atd. U každého spoje vidí i hodnoty uhlíkové stopy. Rozmezí je 70–150 kg CO₂. Většina lidí nemá přehled o takových hodnotách a tato informace mu řekne pouze skutečnost, který let má nižší uhlíkovou stopu. Zatímco kdyby byla k letu přiřazena klasifikace například E, tak by dotyčný věděl, že udělá přibližně stejnou uhlíkovou stopu jako kdyby jel autem. Skupina pěti lidí by pak musela vyhledávat lety s hodnocením C nebo vyšší, aby vytvořila stejnou, nebo nižší uhlíkovou stopu.

Stejným principem by mohli **letečtí dopravci** vést své reklamní kampaně. „Naše aerolinka má hodnocení všech linek vyšší než C, tudíž letem s námi nikdy neuděláte vyšší uhlíkovou stopu než cestou autem.“

Letiště by také mohla využít tuto klasifikaci například k těmto kampaním:

- Mohla by tvrdit že: „máme x % letů klasifikace A+, y % klasifikace A, z % klasifikace B“,
- a nebo: „žádným letem z našeho letiště neuděláte vyšší uhlíkovou stopu než autem“,
- Zvýhodnit nebo znevýhodnit letecké dopravce podle klasifikace jejich letů.
- Rychlejší cesta k dosažení zero emission airport.

Klasifikace má hlavní výhodu ve srozumitelnosti pro zákazníka. I neznalému člověku, vybírajícímu si letenku, může s krátkou vysvětlivkou říct, zda udělá nižší uhlíkovou stopu, než kdyby jel autem. Zároveň pro dopravce nebude obtížné doložit splnění podmínek pro získání dané známky. Auditovatelnost a vymahatelnost by pro takovou klasifikaci byla poměrně snadná a levná. Každý dopravce i letiště shromažďují data o množství cestujících, ověření typu letadla pro danou linku je také snadné, letiště si ověří i typ paliva.



Shrnutí výsledků práce

Cílem práce bylo nalézt systém environmentální klasifikace a letecká spojení s Letištěm Václava Havla v Praze, které by bylo možné označovat jako environmentálně udržitelné a vytvořit systém environmentální klasifikace linek v rámci cestovního ruchu.

Systém klasifikace byl nalezen a vytvořen pro porovnání automobilové a letecké dopravy.

Podmínka pro označení leteckého spojení jako environmentálně udržitelné byla, aby existoval dopravní prostředek, který bude mít vyšší uhlíkovou stopu. Dle tabulky 24 Klasifikace linek dle jednotlivých scénářů známky pro scénáře: základní let, Low – cost a Low – cost S lze vidět, že i za aktuálních podmínek existují případy, kdy je letadlo vhodnější než automobil. Pro cesty jedné osoby dle scénáře základní let toto tvrzení dokonce platí pro všechny destinace kromě Vídně. Při letu podle scénáře Low – cost je známka vždy E nebo lepší, tudíž pro cestu jedné osoby bude mít cesta letadlem vždy nižší emise. I pro cestu dvou osob je letadlo lepší varianta pro více než polovinu měřených destinací dle scénáře základního letu. U vzdálenějších destinací dosahuje známka u letu dle scénáře Low-cost hodnot C, tedy i skupiny 3 osob budou mít nižší emise, než kdyby jely autem. Takových letů i dnes provozuje Ryanair a Wizzair poměrně dost. Pro skupinu 4 lidí je environmentálně udržitelná linka až od hodnocení B. Takovou linku nalezneme až u Scénáře Low-cost. Příkladem může být cesta do Amsterdamu, kde třetina linek Ryanairu tankuje směs paliva s SAF [44], před pandemií koronaviru dosahovali obsazenosti 96 % a mají ve své flotile velké množství B 737 Max (bohužel se mi nepodařilo zjistit na kterých linkách je pravidelně používají), tudíž lze říci že aktuálně existuje i linka klasifikace B.

S přibývajícimi atributy a rozšiřováním využívání udržitelného leteckého paliva v letectví se budou objevovat scénáře letů, které pro všechny destinace budou mít známku A, a tak budou vždy vhodnější než cesta automobilem pro jakoukoliv skupinu cestujících.



Závěr

Cílem práce je nalézt systém environmentální klasifikace a letecká spojení s Letištěm Václava Havla v Praze, které je možné označovat jako environmentálně udržitelné a vytvořit systém environmentální klasifikace linek v rámci cestovního ruchu. Environmentálně udržitelná letecká spojení jsou taková, která mají cestou letadlem nižší uhlíkovou stopu než jiným dopravním prostředkem.

Analyzoval jsem historický růst objemu letecké dopravy a emisí z ní vycházejících. Stanovil jsem základní jednotky, v kterých se objemy a emise letecké dopravy měří. Zjistil jsem, že přestože za posledních 50 let vzrostl objem letecké dopravy 36krát, uhlíková stopa vzrostla pouze 4krát, z důvodu vysokého technologického posunu a vývoje efektivity paliv. I přes takový technologický pokrok tvoří emise z letecké dopravy v posledních letech přibližně 3 % veškerých světových emisí, a proto je ve společnosti velký tlak na jejich snižování. Popsal jsem složení emisí z letectví, jeho vlivy na životní prostředí a klimatické změny z nich vznikající.

Dále jsem popsal přístupy k environmentálně udržitelnému letectví. Zjistil jsem, že letectví se stalo prvním průmyslovým odvětvím, které se zavázalo k snížení uhlíkové stopy v globálním měřítku. Popsal jsem závazky o snižování emisí i cíle, jak dosáhnout bezemisního letectví. Představil jsem prognózy na růst a analýzy, zdali je možné těchto cílů dosáhnout.

Nalezl jsem atributy a klíčové požadavky ke snižování uhlíkové stopy v letectví. Zjistil jsem, že hlavním atributem pro snížení emisí je udržitelné letecké palivo. Mezi další atributy patří úspornější motory, aplikace tzn. Jednotného evropského nebe, snížení aerodynamiky či udržování vyššího obsazenosti letadla. Nejrychlejší cesta k dosažení cílů z druhé kapitoly povede aplikací všech atributů naráz.

Jako metodiku výpočtu emisí pro případovou studii jsem zvolil mezinárodně uznávanou metodu výpočtů emisí GHG protocol. Dále jsem popsal výpočet uhlíkové stopy určené trasy cestujícího, které pro svou cestu využije automobil, vlak nebo letadlo.

Pro případovou studii, jejímž cílem bylo stanovit environmentálně udržitelné letecké spojení s Letištěm Václava Havla v Praze jsem vybral 25 evropských destinací a vstupní hodnoty jsem spočítal dle metodiky GHG protocol. Tyto hodnoty jsem porovnal s hodnotami z internetových emisních kalkulaček a analyzoval odchylky. Vstupní hodnoty pro cesty letadlem jsem dále



upravoval o atributy z třetí kapitoly a tím jsem vytvořil scénáře, za jakých podmínek a jak moc se sníží uhlíková stopa dané cesty.

Definoval jsem poměrový ukazatel, který porovnává cestu do zvolené destinace podle jednotlivých dopravních prostředků. Největší část případové studie jsem věnoval porovnání letecké dopravy s automobilovou. Zjistil jsem, jaké atributy musí být aplikovány, aby měl let letadlem nižší uhlíkovou stopu než cesta automobilem pro jednu osobu i pro pět osob, tedy maximální kapacitu automobilu. Nalezl jsem spojení, kde s technologiemi očekávanými od roku 2035 bude možné dosáhnout až 20krát nižších hodnot uhlíkové stopy než při stejné cestě jedné osoby automobilem. Jelikož technologická vylepšení budou přicházet i do automobilové dopravy, tak scénář, kdy při cestě letadlem budou využity všechny atributy jsem porovnal i s cestou elektromobilem a zjistil jsem, že i tak bude uhlíková cesta letadlem nižší. Při porovnání leteckých spojení s železničními jsem zjistil, že cesta letadlem v žádném případě ani s aplikací všech technologií nebude mít nižší uhlíkovou stopu. Na základě tohoto zjištění jsem studii rozšířil o porovnání letecké dopravy s autobusovou. V tomto porovnání byly nalezeny případy, kdy se letecká doprava vyrovná té autobusové, a s aplikací všech atributů byly dokonce nalezeny destinace, kam bude uhlíková stopa cesty autobusem 3x vyšší než pro cestu letadlem.

Podle hodnot poměrových ukazatelů jsem navrhl klasifikaci. Ta nebyla stanovena pro porovnání letecké dopravy s železniční, jelikož jsem nenalezl případ, kdy by se hodnoty z letecké dopravy dorovnaly té železniční. Při porovnání automobilové dopravy s leteckou jsem zjistil, že významnější roli než vzdálenost destinace, hraje scénář letu, který odpovídá využitým atributům. Navrhl jsem klasifikaci, která uvádí, zda je vhodnější dopravní prostředek automobil nebo letadlo, ve které je zohledněna obsazenost automobilu. Výsledná klasifikace je tedy tabulka, ve které se v řádcích nachází destinace, ve sloupcích scénáře letu a uvnitř jsou uděleny známky. Čtenář klasifikace tedy vidí, za jakých podmínek neboli scénářů dosáhne potřebné známky. Známky odpovídají skupinám cestujících, takže ví, jakou minimální známku musí hledat, aby dosáhl nižší uhlíkové stopy než při cestě autem.

Pokud by taková klasifikace, byla aplikována na vyhledávač letenek jako je například Kiwi, pak by zároveň zákazníkovi jedním znakem řekla, jestli jeho cestou letadlem udělá nižší uhlíkovou stopu, než kdyby do cílové destinace jel autem.



V práci jsem také navrhl, pro jaké případy a komu by tato klasifikace mohla sloužit. Uplatnění by našla jak pro cestující, které zajímá dopad na životní prostředí a chtějí vědět, jestli neudělají vyšší uhlíkovou stopu než jiným dopravním prostředkem, tak pro letiště, která by mohla tato data marketingově využít, nebo dopravcům upravovat letištní poplatky podle klasifikace jejich letů. Rovněž dopravci, kteří zaměřují svoji obchodní strategii na udržitelnost, například Ryanair a Wizzair, by tuto klasifikaci mohli využít pro svůj marketing.

Výsledkem práce jsou tato zjištění:

- Nalezl jsem podmínky, za kterých bude cesta letadlem pro všechny měřené destinace environmentálně přijatelnější než cesta automobilem, i když se využije jeho maximální kapacita.
- S očekávanými technologiemi po roce 2035 bude letecká doprava environmentálně konkurenceschopná autobusové dopravě i osobní automobilové s využitím elektromobilů.
- Letecká doprava se z environmentálního hlediska železniční dopravě nevyrovná.

Cíl práce byl splněn vytvořením klasifikace leteckých spojení. Nalezl jsem linky, pro které bude cesta letadlem přijatelnější než cesta autem, a proto by je bylo možné označovat za environmentálně udržitelné. Způsoby aplikace klasifikace v rámci cestovního ruchu jsou navrženy pro letiště, letecké dopravce i webové vyhledávače letenek.



Seznam použité literatury

1. *Global airline passenger capacity and traffic* [online]. Oxford: Global Change Data Lab, 2019 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/airline-capacity-and-traffic>
2. *Ourworldindata: Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?* [online]. Oxford: Global Change Data Lab [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>
3. RITCHIE, Hannah. *Our world in data: Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?* [online]. 2020. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
4. STEVENS, Andrew. *IATA Sustainable Flying Blog* [online]. 2021. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-flying-blog/waypoint-2050/>
5. BOUNFOUR, Agathe. *Climat : que vaut le plan du gouvernement pour l'aérien ?* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2020/05/que-vaut-le-plan-gouvernement-aerien-reseau-action-climat.pdf>
6. LEE, David S. *Aviation and global climate change in the 21st century* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003574>
7. SOUKUPOVÁ, Šárka. *Studentsummit - Letecká doprava* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://www.studentsummit.cz/wp-content/uploads/2021/02/Letecka_doprava_compressed.pdf
8. MIKUŠKA, Pavel. ÚSTAV ANALYTICKÉ CHEMIE AV ČR. *Atmosférické aerosoly* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/podzim2015/C5150/um/Mikuska.pdf>
9. *Onlineschool - Skleníkový efekt* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/ekologie/sklenikovy-efekt/>



10. *Europarl.europa: Změny klimatu v Evropě: fakta a čísla* [online]. 2018 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20180703STO07123/zmeny-klimatu-v-evrope-fakta-a-cisla>
11. *Climate.ec.europa - Důsledky změny klimatu* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_cs
12. RAILLANT-CLARK, William. *ICAO welcomes new net-zero 2050 air industry commitment* [online]. 2021. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ICAO-welcomes-new-netzero-2050-air-industry-commitment.aspx>
13. *Statistics about Transportation & Logistics in EU* [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://www.statista.com/map/eu/branch/transportation-logistics>
14. *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)* [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Pages/default.aspx>
15. , ICAO. *ICAO 2019 Environmental Report* [online]. 2020. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20%281%29.pdf>
16. POPOV, Viktor. *Improving Aircraft Fuel Efficiency by Using the Adaptive Wing and Winglets* [online]. 2020. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3707079
17. *Boeing 737 MAX* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/en/products-and-services/commercial-airplanes/737-MAX.page>
18. *A320neo | Creating higher customer value* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320/a320neo-creating-higher-customer-value>
19. *EASA European Aviation Environmental Report 2019* [online]. 2020 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/eco/sites/default/files/2021-09/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf



20. ICAO - *SAF Airports Map* [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
<https://datastudio.google.com/u/0/reporting/d05ece8b-4366-456c-b438-9a67c4d37674/page/f3OcC>
21. Shell *SUSTAINABLE AVIATION FUEL* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
<https://www.shell.com/business-customers/aviation/the-future-of-energy/sustainable-aviation-fuel.html>
22. ICAO *Sustainable Aviation Fuels (SAF)* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
<https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>
23. CDE Almería. *Single European Sky: lowering emissions and reducing delays* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.cde.ual.es/en/single-european-sky-lowering-emissions-and-reducing-delays/>
24. Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. *Airport-CDM* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/CDM.pdf>
25. eurocontrol. *A-CDM Impact Assessment* [online]. 2016 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf>
26. GILL, Michael. *Aviationbenefits Waypoint 2050* [online]. 2020 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf
27. Organization, International Civil Aviation. *Methodology ICAO Carbon Calculator* [online]. 2018 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Documents/Methodology%20ICAO%20Carbon%20Calculator_v11-2018.pdf
28. HUCKINS, Sarah. *Greenhouse gas protocol* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
<https://ghgprotocol.org/about-us>
29. GHG Protocol. *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope3_Calculation_Guidance_0.pdf



30. GHG protocol. *GHG Protocol Guidance* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://ghgprotocol.org/guidance-0>
31. Department for Business, Energy & Industrial Strategy UK. *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2021* [online]. 2021 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2021>
32. *Flightsfrom* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.flightsfrom.com/PRG>
33. *Rome2rio* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.rome2rio.com/>
34. RITCHIE, Hannah. *Electricity Mix* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
35. *What is sustainable aviation fuel (SAF)?* [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/what-is-sustainable-aviation-fuel-saf-and-why-is-it-important.html>
36. Ryanair. *Ryanair Group annual report 2021* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://investor.ryanair.com/wp-content/uploads/2021/08/FINAL_Ryanair-Holdings-plc-Annual-Report-FY21.pdf
37. *Wizz Air Holdings Plc Annual report and accounts 2022* [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: https://wizzair.com/static/docs/default-source/downloadable-documents/corporate-website-transfer-documents/annual-reports/wizz_air-annual-report-and-accounts-f22_final---pwc-confirmed_061d7bd2.pdf
38. *Airbus Orders and deliveries* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/orders-and-deliveries>
39. *BOEING 737 MAX* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries>
40. HO, Sally. *McDonald's Double Big Mac Has The Same Climate Cost As Driving 24 Kilometres* [online]. 2021. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.greenqueen.com.hk/mcdonalds-double-big-mac-climate-change/>



41. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. *Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2021* [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z:
https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2021--260559/
42. ICAO. *ICAO Carbon Emissions Calculator* [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z:
<https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx>
43. *Google flights* [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z:
<https://www.google.com/travel/flights>
44. *Airways.cz* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z:
<https://www.airways.cz/zprava/ryanair-bude-odebirat-udrzitelne-palivo-saf-od-neste-holland>