ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Posouzení efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě

Assessing the Efficiency and Sustainability of Flight Transfers

Diplomová práce

Studijní program: Provoz a řízení letecké dopravy

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

Bc. Damir Kuchkarov

Praha 2024

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Damir Kuchkarov

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterské – N_PL_CZ_spec – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Posouzení efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě**

Název tématu (anglicky): Assessing the Efficiency and Sustainability of Flight Transfers

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem této diplomové práce je popsat propojenost 10 největších leteckých uzlů a efektivity přestupů z hlediska udržitelnosti, identifikovat klíčové faktory, které ji ovlivňují a navrhnout doporučení pro optimalizaci přestupů a snížení emisí CO_2.
- Proveďte rešerši pro posouzení konektivity a potenciálu samostatného přestupu na letištích z pohledu udržitelnosti.
- Proveďte výběr zdrojů, sběr dat a jejich zpracování.
- Vytvořte metodiku posuzovaní efektivnosti přestupů založenou na atributech udržitelnosti.
- Identifikujte efektivní přestupové sítě deseti největších leteckých uzlů.
- Své výsledky validujte a srovnejte s výsledky externích zdrojů.

ČVUT
FD

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

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

Seznam odborné literatury:
Brueckner K., J. et al. A Market-DefinitionMethodology for the Airline Industry 2018
Postorinoa M. N., Mantecchinib L., Connectivity carbon and noise levels in the airport neighbourhood 2020
Cheunga K.Y. T., et al. Assessment of hub airports' connectivity and Self-Connection Potentials 2019

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

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2023**
(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: **15. května 2024**
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

L. S.

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

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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Damir Kuchkarov
jméno a podpis studenta

V Praze dne 15. července 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá posouzením efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě se zaměřením na evropský letecký trh. V práci jsou zkoumány klíčové faktory ovlivňující rozhodování cestujících a operace leteckých společností, jako jsou minimální časy na přestup (MCT), synchronizace letových řádů, infrastrukturní vybavenost letišť a emise CO2. Pomocí kombinace kvantitativních a kvalitativních metod, včetně analýzy dat z různých databází, kalkulačky emisí ICAO a webových stránek letišť, byl vyvinut model pro hodnocení efektivnosti a udržitelnosti leteckých přestupů. Zjištění ukazují, že optimalizace MCT a zlepšení synchronizace letových řádů mohou významně přispět k efektivnějšímu fungování leteckých přestupů a snížení celkového dopadu letecké dopravy na životní prostředí. Práce poskytuje nový pohled na komplexní problematiku leteckých přestupů z pohledu udržitelnosti a nabízí doporučení pro zlepšení služeb a operací v souladu s udržitelnými postupy.

Klíčová slova: Efektivnost leteckých přestupů, udržitelnost v letecké dopravě, minimální čas na přestup, emise CO2.

Abstract

This thesis assesses the efficiency and sustainability of flight transfers, focusing on the European aviation market. Key factors influencing passenger decision-making and airline operations, such as Minimum Connection Times (MCT), flight schedule synchronization, airport infrastructure, and CO2 emissions, are examined. Utilizing a combination of quantitative and qualitative methods, including data analysis from various databases, the ICAO emission calculator, and airport websites, a model was developed to evaluate the efficiency and sustainability of flight transfers. The findings indicate that optimizing MCT and improving flight schedule synchronization can significantly enhance the efficiency of flight transfers and reduce the overall environmental impact of air transport. The thesis provides a new perspective on the complex issue of flight transfers from the standpoint of sustainability and offers recommendations for improving services and operations in line with sustainable practices.

Keywords: Efficiency of air transfers, sustainability in air transport, minimum connection time, CO2 emissions.

Poděkování

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování všem, kteří přispěli k této diplomové práce. Nejprve bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, doc. Ing. Petru Vittekovi, Ph.D., za jeho cenné rady, odborné vedení a neustálou podporu během celého procesu výzkumu a psaní této práce. Moje poděkování patří také mé rodině a přátelům za jejich neochvějnou podporu a pochopení, které mi poskytovali během celého mého studia. Vaše pomoc a podněty byly neocenitelné.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Posouzení efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití 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).

Praze dne 15. května 2024 ……...

Podpis

Obsah

Úvod **11**

1. Koncepty udržitelnosti v letecké dopravě **13**
1.1 Úvod do udržitelnosti v letecké dopravě 13
1.2 Výzvy a cíle udržitelného rozvoje v letecké dopravě 14
1.3 Emisní systémy 16
1.3.1 EU ETS 17
1.3.2 Swiss ETS a UK ETS 18
1.3.3 CORSIA 19
1.3.4 SESAR 20
1.4 Alternativní paliva (SAF) 21
1.5 Problematika efektivnosti a udržitelnosti v letecké dopravě 23
1.6 Shrnutí kapitoly 24

2. Efektivnost přestupů v letecké dopravě **26**
2.1 Minimum Connection Time 27
2.2 Synchronizace letových řádů 29
2.3 Infrastrukturní vybavenost letiště 31
2.4 Faktory ovlivňující rozhodování cestujících 32
2.5 Konektivita 33
2.5.1 Konektivita a emise CO2 35
2.6 Porovnání časového přístupu a přístupu zaměřeného na CO2 36
2.6.1 Rozdíly v metodologickém přístupu 37
2.6.2 Praktické implikace metodologických rozdílů 37
2.7 Atributy efektivity a udržitelnosti přestupů 38
2.7.1 Hodnota času 39
2.7.2 Hodnota frekvence 40
2.7.3 Hodnota ceny 41
2.7.4 Hodnota vzdálenosti 42
2.7.5 Sumarizace podkapitoly 43
2.8 Shrnutí hlavních tezí 43

3. Metodologie modelu **45**
3.1 Databáze 45

3.1.1 Letiště odletu a příletu 46
3.1.2 Letiště přestupu 46
3.1.3 Přímý let 47
3.2 Výpočet atributů 48
3.2.1 Atribut 1.: Čas 48
3.2.2 Atribut 2.: Vzdálenost 50
3.2.3 Atribut 3.: Emise CO2 50
3.2.4 Výpočet CO2 z teoretických tras 52
3.3 Přehled související literatury 53

4. Aplikace metodologie 58
4.1 Výpočetní metody, algoritmy modelu a vizualizace výsledků 58
4.1.1 Letiště Schwechat jako klíčový přestupový uzel 64
4.1.2 Letiště Istanbul 65
4.2 Modifikace a aktualizace modelu 66
4.3 Platforma pro budoucí výzkum 66
4.4 Validace navrhovaného modelu 67

5. Diskuze 69

6. Závěr 74

Seznam použité literatury 76

Přílohy 12

A. Databáze modelu 12

B. Kód modelu 13

Seznam obrázků

Obrázek 1: Plán dekarbonizace do roku 2050 [10] 16

Obrázek 2: Fáze CORSIA [49] 20

Obrázek 3: Očekávaný SAF vyžadovaný pro Net Zero 2050 [24] 23

Obrázek 4: WCS a index synchronizace letových řádů 15 Evropských HUBu [28] 30

Obrázek 5: HUB konektivita 20 největších Evropských letišť [17] 34

Obrázek 6: Následky zvýšení konektivity z pohledu udržitelnosti....36

Obrázek 7: Vizualizace vzorce výpočtu času....49

Obrázek 8: Vizualizace výpočtu emise CO2....51

Obrázek 9: Výběr letiště příletu 58

Obrázek 10: Algoritmus výpočtu modelu 59

Obrázek 11: Všechny možné varianty přestupů....60

Obrázek 12: Roztříděná letiště odletu....61

Obrázek 13: Finální vizualizace výpočtů modelu a rozdělení na shluky....61

Obrázek 14: Textové zobrazení výsledků v prostředí Python 62

Obrázek 15: Simulované lety na západ 70

Obrázek 16: Simulované lety na východ....71

Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí 2. kapitoly 44

Tabulka 2: Přehled přestupových HUBů v databázi.....47

Tabulka 3: Shrnutí literatury 1.....54

Tabulka 4: Shrnutí literatury 2.....56

Tabulka 5: Shrnutí literatury 3.....57

Tabulka 6: Tabulková reprezentace výsledků modelů u simulovaného letu do Soulu 63

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Anglický název	Český překlad
CO2	Carbon Dioxide	Oxid uhličitý
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation	Mezinárodní systém kompenzace a snižování emisí pro mezinárodní letectví
EU ETS	European Union Emission Trading Scheme	Evropský systém obchodování s emisemi
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace civilního letectví
MCT	Minimum Connection Time	Minimální čas na přestup
SAF	Sustainable Aviation Fuels	Udržitelná letecká paliva
SESAR	Single European Sky ATM Research	Výzkum jednotného evropského nebe ATM
UK ETS	United Kingdom Emission Trading Scheme	Britský systém obchodování s emisemi

Úvod

Letecká doprava v dnešním světě hraje zásadní roli, přičemž se stala nepostradatelnou součástí globálního obchodu a mobility. Nicméně, s rostoucími environmentálními výzvami a důrazem na udržitelnost se letecký průmysl nachází ve středu pozornosti. Snižování emisí CO2 a minimalizace vlivu letecké dopravy na životní prostředí se pro průmysl stávají klíčovými prioritami pro následující dekády. V kontextu udržitelnosti letecké dopravy je nezbytné řešit výzvy spojené s efektivitou a propojeností letišť. Zvýšená efektivita a propojenost obvykle vede k intenzivnějšímu provozu a zvýšené spotřebě paliva, což přímo ovlivňuje emise skleníkových plynů. Tyto aspekty jsou často v rozporu s cíli udržitelného rozvoje, které vyžadují snížení emisí a efektivní využívání zdrojů. Proto je klíčové hledat řešení, ja dosáhnout udržitelnosti bez kompromisů v efektivitě a propojenosti letištní infrastruktury.

Motivací pro výběr tohoto tématu je rostoucí důležitost udržitelného rozvoje v leteckém průmyslu, kde efektivní a ekologicky šetrné přestupy mohou hrát klíčovou roli ve snižování celkové uhlíkové stopy a zvyšování spokojenosti cestujících. Přes svůj význam byla tato oblast dosud poměrně málo prozkoumána, což představuje výzvu i příležitost pro akademický výzkum.

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu propojenosti letišť a hodnocení efektivity přestupů z hlediska udržitelnosti. Cílem této práce je nejen zkoumat vztah mezi propojeností letišť a snižováním emisí CO2, ale také identifikovat klíčové faktory, které ovlivňují efektivitu přestup. Je nezbytné navrhnout způsoby, jak lze efektivitu a propojenost v rámci letecké sítě deseti největších letišť využít k dosažení udržitelného rozvoje v sektoru letecké dopravy. Tento přístup by měl zahrnovat optimalizaci využití zdrojů a zlepšení operační efektivity, které byly identifikovány jako klíčové faktory ovlivňující udržitelnost.

Pro dosažení stanovených cílů bude použita kombinace kvantitativních a kvalitativních výzkumných metod, včetně analýzy sekundárních dat, modelování a případových studií. Tento přístup umožní komplexní pohled na problematiku a poskytne pevný základ nejen pro formulaci doporučení, ale také pro ovlivnění strategií leteckých společností, které se zaměřují na optimalizaci přestupních spojení. Tyto strategie budou klíčové pro zefektivnění provozu a snížení environmentálního dopadu v rámci letecké sítě deseti největších letišť.

Tato práce přispěje k lepšímu porozumění dynamiky efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě a nabídne cenné podněty pro akademické kruhy i praxi. Zároveň poskytne základ pro další výzkum v této stále se vyvíjející a aktuální oblasti.

1. Koncepty udržitelnosti v letecké dopravě

V průběhu posledních desetiletí se letecký průmysl stal jedním z hlavních hráčů světového obchodu a cestování. Růst letecké dopravy přinesl mnoho pozitivních efektů, jako je zvyšování globální konektivity a hospodářský růst. Nicméně tento růst přinesl také různé výzvy, včetně zvyšujících se emisí skleníkových plynů a negativního dopadu na životní prostředí. V reakci na tyto problémy začal letecký průmysl klást stále větší důraz na udržitelnost.

1.1 Úvod do udržitelnosti v letecké dopravě

Udržitelnost v letecké dopravě je komplexním konceptem, který zahrnuje různé aspekty, od ekonomické udržitelnosti až po sociální a environmentální aspekty. IATA (International Air Transport Association) 4 Pillars of Sustainability [1] představují klíčový rámec pro dosažení udržitelnosti v letecké dopravě, který byl vyvinut Mezinárodní asociací letecké dopravy. Tyto čtyři pilíře jsou základními principy, na nichž je postavena snaha leteckého průmyslu o dosažení udržitelného rozvoje. Každý pilíř se zaměřuje na konkrétní aspekt udržitelnosti:

1 **Efektivnost letecké dopravy**: Prvním pilířem je zvýšení efektivity letecké dopravy. To zahrnuje snahu o snížení spotřeby paliva a emisí CO2 [1]. Průmysl se snaží dosáhnout tohoto cíle inovacemi v technologii letadel, modernizací leteckých flotil, a zlepšením leteckých tras a operací. Tím se zároveň snižuje negativní dopad letecké dopravy na životní prostředí.

2 **Infrastruktura a technologie**: Druhým pilířem je investice do modernizace infrastruktury a technologií v leteckém průmyslu. To zahrnuje modernizaci letišť, vývoj palivově efektivních letadel, používání obnovitelných zdrojů energie na letištích a vývoj nových technologií pro snížení emisí CO2. Tato investice do infrastruktury a technologie má za cíl zlepšit celkovou udržitelnost leteckého průmyslu.

3 **Operační efektivita**: Třetím pilířem je zvýšení operační efektivity v rámci letecké dopravy. To zahrnuje snahu o optimalizaci leteckých tras, provozních postupů a organizace práce na letištích. Tím se snižují zpoždění, zkracují trasy a minimalizují emise CO2 v rámci leteckého provozu.

4 **Ekonomické nástroje**: Technologický pokrok a operativní opatření společně s infrastrukturním zlepšením jsou považovány za klíčové dlouhodobé řešení pro udržitelný růst leteckého průmyslu. Důležitá je také spolupráce mezi průmyslem a vládou, která pomáhá dosahovat udržitelných cílů. Navíc je zdůrazněna potřeba globálního tržního mechanismu pro pokrytí zbytkových emisí [1].

1.2 Výzvy a cíle udržitelného rozvoje v letecké dopravě

Výzvy a cíle udržitelného rozvoje v letecké dopravě jsou nejen otázkou technického pokroku, ale také širšího sociálního a ekonomického kontextu. Přechod na udržitelnější paliva (SAF) je jedním z klíčových kroků k redukci emisí CO2 v leteckém sektoru. Podle práce Paula Kurzawska [2], která zkoumá různé typy surovin pro výrobu SAF, tento přechod nabízí nejen řešení komplexních výzev, ale zároveň otevírá nové možnosti, které mohou bio paliva pro letectví přinést. Tento přístup zahrnuje snížení emisí škodlivých plynů a částic z leteckých motorů, což je klíčové pro udržitelnost v globálním měřítku. Výzkum Corteze [3] poukazuje na komplexní výzvy, ale zároveň i na možnosti, které bio paliva pro letectví představují. Tento přístup může sloužit jako vzor pro vytváření nových odvětví bio paliv po celém světě, s důrazem na výzkum a vývoj, překonávání technologických bariér a zapojení všech relevantních stran.

V rámci této transformace je nezbytné zvýšit efektivitu operací letecké dopravy. Efektivní propojení letových operací a infrastruktur je zásadní pro zlepšení celkové udržitelnosti. Optimalizace letových tras a zlepšení koordinace mezi letišti mohou významně přispět ke snížení čekacích dob a celkové spotřeby paliva, což má přímý dopad na snížení emisí skleníkových plynů. Integrace systémů pro řízení letového provozu a využívání pokročilých technologií pro plánování a řízení letů může dále zvýšit efektivitu operací. Implementace inteligentních navigačních systémů a automatizace procesů na letištích nejen zlepšuje zážitek cestujících, ale také minimalizuje možné zpoždění a optimalizuje využití zdrojů. Toto propojení a efektivní využívání technologie jsou klíčové pro dosažení vyšší úrovně udržitelnosti v letecké dopravě. Výzvy spojené s implementací těchto systémů zahrnují technické a infrastrukturní bariéry, které vyžadují značné investice do výzkumu a vývoje. Zapojení všech relevantních stran, včetně vládních agentur, průmyslových a mezinárodních organizací, je nezbytné pro koordinaci a podporu těchto iniciativ.

Důležitým aspektem efektivního propojení je také schopnost letištních a leteckých operátorů rychle reagovat na měnící se podmínky a udržovat operace v souladu s nejnovějšími udržitelnými postupy. Toto vyžaduje flexibilní přístup k plánování a adaptaci technologií, které mohou efektivně reagovat na krátkodobé i dlouhodobé změny v provozním prostředí.

Integrace technologických inovací je dalším rozhodujícím aspektem udržitelného rozvoje v leteckém sektoru. Jak uvádí práce Davida Rapsona a Ericha Muehleggera [4], která se zaměřuje na globální strategie dekarbonizace dopravy, struktura inovačních sítí a

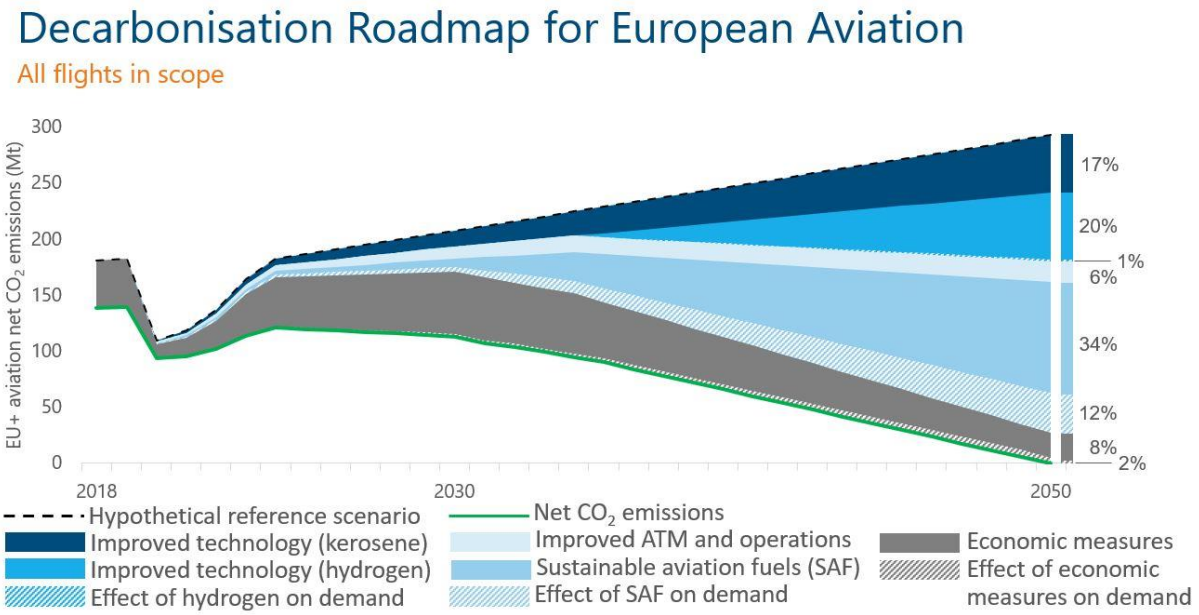
technologický vývoj v leteckém průmyslu poskytují cenný vhled do možností, které mohou přispět k dosažení ambiciózních cílů v oblasti udržitelnosti do roku 2050. Tyto inovace zahrnují vývoj a implementaci pokročilých bio paliv a hybridně-elektrických pohonných systémů, které mohou významně snížit závislost na fosilních palivech. Práce Arnaldo Valdés [5] poskytuje cenný vhled do struktury inovačních sítí a technologického vývoje v leteckém průmyslu. Analýza „postoru leteckých technologií“ nabízí konkrétní doporučení pro budoucí inovační politiky, které by mohly přispět k dosažení ambiciózních cílů v oblasti udržitelnosti do roku 2050.

Sociální a ekonomický rozměr udržitelnosti je stejně důležitý. Sociální a ekonomický rozměr udržitelnosti je stejně důležitý jako technické inovace. Jak zdůrazňuje studie Stiebe [6], pro klíčové aktéry v oblasti všeobecného letectví je klíčové pochopit obavy a očekávání různých skupin, s ohledem na vliv sociodemografických faktorů a osobních zkušeností na vnímání udržitelných technologií, jako jsou elektrická letadla. Gössling, Cohen a Hares ve své práci [7] upozorňují na komplexní výzvy spojené s přechodem na udržitelnější formy transportu a zdůrazňují potřebu politického vedení a mezinárodní spolupráce v rámci politik změny klimatu, aby bylo možné dosáhnout zásadních změn v emisích z leteckého průmyslu. V knize 'Tourism in the Green Economy' [8] je zdůrazněn význam turismu jako motoru ekonomického růstu a jeho vliv na životní prostředí, což poukazuje na nutnost vyváženého přístupu k ekonomickým a environmentálním cílům. Andrew Hares ve své práci [9] rozpracovává témata ekonomické udržitelnosti v kontextu leteckého průmyslu, kde poukazuje na potřebu integrace ekologických principů do ekonomického rozhodování, aby bylo možné řešit klimatické změny efektivním a udržitelným způsobem. Tento pohled dále rozšiřuje studie Oktal et al. [10], která se zabývá sociálními a ekonomickými dopady letecké dopravy obecně, zdůrazňující její klíčový význam pro socioekonomický rozvoj a integraci společností na makroúrovni. Studie [10] zdůrazňuje, jak je letecká doprava nezbytná pro dosahování vyšších úrovní sociálního a ekonomického rozvoje, zejména v odlehlých nebo méně rozvinutých oblastech. Vysoká dostupnost a frekvence letecké dopravy mohou zlepšit přístup k mezinárodním trhům, což vede ke zvýšení životní úrovně a podporuje sociální a ekonomické propojení v rámci i mezi národy. Toto má přímý dopad na udržitelnost, jelikož zlepšení sociálních a ekonomických podmínek může vést k lepší ochraně životního prostředí a vyšší míře adopce udržitelných technologií.

Dále studie [10] uvádí, že rozvoj a implementace nových technologií a udržitelných paliv v leteckém průmyslu může přinést významné snížení emisí skleníkových plynů. To je nezbytné pro další rozvoj tohoto odvětví, které hraje klíčovou roli ve světové ekonomice a má významný vliv na globalizaci. Z těchto důvodů je klíčová nejen technologická inovace, ale také udržení a

optimalizace frekvence letů, aby se minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí, zatímco se udržuje nezbytná úroveň služeb potřebných pro sociální a ekonomickou integraci.

Tuto komplexní problematiku ilustruje Obrázek č. 1, který ukazuje dekarbonizační mapu letectví v Evropě. Tento obrázek poskytuje vizuální přehled o různých iniciativách a technologiích zaměřených na snižování uhlíkové stopy leteckého průmyslu v evropském kontextu, což podporuje argumenty uvedené v předchozích studiích.



Obrázek 1: Plán dekarbonizace do roku 2050 [10]

Všechny tyto aspekty zdůrazňují potřebu multidisciplinárního přístupu k řešení problému udržitelnosti v letecké dopravě. Je zřejmé, že technologický pokrok musí být doprovázen strategickým plánováním, politickou podporou a angažovaností veřejnosti. Pouze tak lze dosáhnout synergie, která povede k významným a trvalým zlepšením v oblasti udržitelného rozvoje v leteckém sektoru.

1.3 Emisní systémy

Environmentální udržitelnost je stěžejním tématem v leteckém průmyslu a současně klíčovým faktorem pro snižování dopadu letecké dopravy na globální životní prostředí. Jak bylo zjištěno v práci [11], růst letecké dopravy vedl k zvýšeným emisím skleníkových plynů, což má dalekosáhlé dopady na klimatické změny a kvalitu ovzduší. Výzkum Gösslinga, Cohena a Haresa [7] dále poukazuje na to, že letecký průmysl je globální průmysl, jehož environmentální dopady neznají hranice a jsou komplexně propojené s ekonomickými a sociálními aspekty

globální mobility. Podle Paula Kurzawska [12], technologický pokrok v oblasti udržitelných paliv a energetické efektivnosti je nezbytný pro snižování environmentálních dopadů. Rovněž práce Arnaldo Valdés [5] poskytuje cenný vhled do struktury inovačních sítí v leteckém průmyslu, které mohou přispět k dosažení ambiciózních cílů v oblasti udržitelnosti. Konečně, jak naznačuje studie Andrew Hares [9], důraz na výzkum a vývoj v oblasti nových technologií a udržitelných praktik může vést k revoluci v způsobech, jakými letectví přistupuje k snižování svého vlivu na životní prostředí.

Omezování emisí CO2 a snižování vlivu letecké dopravy na klima se staly prioritou pro letecký průmysl i mezinárodní společenství. To zahrnuje snahu o vývoj ekologicky šetrnějších leteckých technologií, vylepšení palivové efektivity a iniciativy, jako je program CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) stanovený Mezinárodní organizací pro civilní letectví (ICAO), který má za cíl kompenzovat emise CO2 z mezinárodního leteckého provozu.

1.3.1 EU ETS

Evropský systém obchodování s emisemi, známý jako EU ETS, byl zaveden Evropskou unií v roce 2005 jako klíčový nástroj politiky pro snižování skleníkových plynů. EU ETS je považován za největší a nejstarší trh s emisními povolenkami na světě, pokrývající přibližně 45 % emisí skleníkových plynů v Evropské unii a zahrnuje členské státy EU, Island, Lichtenštejnsko a Norsko [13].

Systém lze rozdělit do několika fází:

- Fáze 1 (2005–2007): Zaměřená primárně na elektrárny a energeticky náročná odvětví, kde většina povolenek byla rozdělena zdarma. Při nesplnění povinností byla pokuta stanovena na 40 € za tunu CO2.
- Fáze 2 (2008–2012): Došlo k snížení emisního stropu o 6,5 % a bezplatné povolenky tvořily 90 % celkových povolenek. Pokuta za nedodržení limitů byla zvýšena na 100 € za tunu CO2. Tato fáze také zahrnula zařazení leteckého průmyslu do systému v roce 2012.
- Fáze 3 (2013–2020): Zaveden byl jednotný evropský strop, s povolenkami prodávanými v aukcích místo bezplatného přidělování.
- Fáze 4 (2021–2030): Dochází ke snižování počtu povolenek o 2,2 % ročně od roku 2021, oproti předchozí snížení o 1,74 % [13].

EU ETS funguje na principu "cap and trade", což znamená, že je stanoven celkový limit (strop) emisí, které mohou být uvolněny do atmosféry. Tento strop se postupně snižuje, což vede ke snižování celkových emisí. V rámci tohoto systému si subjekty mohou mezi sebou povolenky prodávat nebo nakupovat. Pokud společnost emituje méně než je její limit, může přebytečné povolenky prodat, nebo si je ponechat pro budoucí použití. V případě, že limit emisí není dodržen, jsou nařízeny vysoké pokuty. V období mezi lety 2013 a 2020 generoval systém v rámci UK a EEA příjmy ve výši 57 miliard eur, přičemž 78 % těchto finančních prostředků bylo v letech 2013-2019 použito na účely související s klimatem a energií [13].

Letecká doprava byla do Evropského systému obchodování s emisemi (EU ETS) začleněna v roce 2012, což znamenalo rozšíření jeho působnosti na všechny lety provozované v rámci Evropského hospodářského prostoru (EEA) a na nejvzdálenější místa EU, jako jsou Martinik, Azory a Reunion. Funkční principy EU ETS se pro letecký sektor neliší od jiných sektorů; letecké společnosti jsou povinny na konci každého roku pokrýt své emise pomocí emisních povolenek, které mohou získat buď zdarma nebo je zakoupit na aukcích. Postupně dochází ke snižování počtu bezplatně distribuovaných povolenek a od roku 2026 se očekává, že všechny povolenky budou distribuovány výhradně aukcí [13].

Důležitým aspektem EU ETS je jeho efekt na globální snižování emisí v letectví, což může být v konfliktu s globálním systémem CORSIA. CORSIA, navržená ICAO, si klade za cíl snížit globální emise letectví efektivněji než EU ETS a jakékoliv ohrožení tohoto systému by mohlo mít dalekosáhlé důsledky pro mezinárodní spolupráci v boji proti klimatickým změnám [14]. Naopak Evropská komise hlásí, že mezi lety 2013 a 2020 letecký sektor dosáhl prostřednictvím EU ETS čisté úspory 193,4 milionu tun CO2, zejména díky financování projektů na snížení emisí v jiných odvětvích [15].

1.3.2 Swiss ETS a UK ETS

Švýcarský emisní systém (Swiss ETS), zavedený v roce 2008, pokrývá průmysl, výrobu energie a vnitrostátní letectví a od roku 2020 je propojen s EU ETS, což znamená, že do něj spadají i lety do a ze Švýcarska a od roku 2023 také lety do Spojeného království. Systém má za cíl do roku 2030 snížit emise o 50 % oproti roku 1990 a dosáhnout nulových emisí do roku 2050 [16].

Systém obchodování s emisemi Spojeného království (UK ETS) byl zaveden v lednu 2021 po brexitu. Systém pokrývá přibližně čtvrtinu emisí země a zahrnuje všechny lety ve Spojeném království a z něj do Švýcarska a EEA. Většina povolenek je přidělována pomocí aukce a

plánované revize v letech 2023 a 2028 mají zhodnotit potřebu dalších reforem. Spojené království nevylučuje budoucí sloučení s jinými emisními systémy, pokud by to bylo vzájemně výhodné [17].

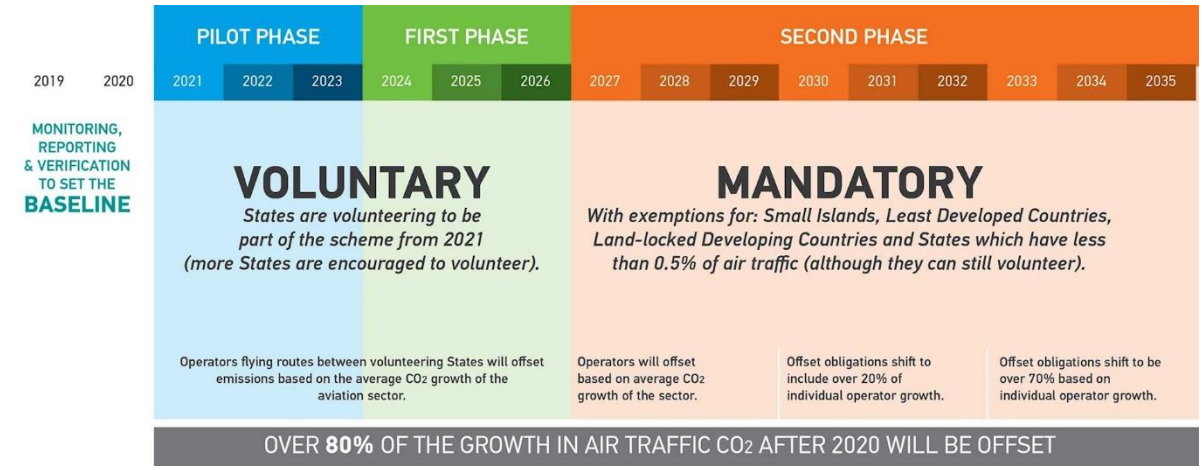
1.3.3 CORSIA

Jedním z klíčových konceptů v oblasti udržitelnosti v letecké dopravě je Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, zkráceně CORSIA. CORSIA představuje zásadní krok směrem k omezení emisí CO2 v mezinárodní letecké dopravě a vytvoření efektivního globálního mechanismu pro řešení těchto emisí. Tento program byl vyvinut Mezinárodní organizací pro civilní letectví (ICAO) [18] a byl oficiálně přijat státy ECAC po jejich závazku v Bratislavské deklaraci z roku 2016. Toto proaktivní zapojení podtrhuje kolektivní úsilí o snížení uhlíkové stopy leteckého sektoru a podporuje celosvětovou účast na CORSIA za účelem podpory širokých environmentálních výhod.

CORSIA byl navržen jako dobrovolný program s dočasným obdobím, které by mělo probíhat od roku 2021 do roku 2035. Během tohoto období mají letecké společnosti možnost dobrovolně přijmout závazek snížit růst svých emisí CO2 na úroveň roku 2020 [18]. Program je postaven na konceptu *offsetování* emisí, což znamená, že letecké společnosti jsou povinny pokrýt nadlimitní emise prostřednictvím nákupu tzv. offsetů. Tyto offsety jsou investice do projektů na snižování emisí, které mohou zahrnovat výsadbu stromů, podporu obnovitelných zdrojů energie a jiné udržitelné projekty. Offsety mají potenciál snížit emise až o 80 % [19].

Dalším významným prvkem CORSIA [20] je postupné rozšiřování programu. Zpočátku byl dobrovolný, ale s časem se má stát povinným pro všechny mezinárodní lety. To znamená, že jeho pokrytí a vliv budou stále větší, což je důležité pro dosažení udržitelných cílů v letecké dopravě.

Obrázek 2 ilustruje jednotlivé etapy implementace systému CORSIA, který je rozdělen do tří hlavních fází: pilotní fáze probíhající v letech 2021 až 2023, první fáze mezi lety 2024 a 2026 a druhá fáze od roku 2027 do roku 2035 [21]. Hlavním rozlišovacím faktorem mezi těmito fázemi je povinnost leteckých operátorů kompenzovat své emise. Zatímco účast v pilotní a první fázi je na dobrovolné bázi, druhá fáze již představuje povinnou kompenzaci emisí. Specifika pilotní fáze spočívají v možnosti leteckých společností rozhodnout, zda budou vycházet z emisních limitů stanovených CORSIA pro daný rok, nebo zda upřednostní hodnoty svých emisí z roku 2019. V první fázi je pak kompenzace emisí vázána na daný rok.



Obrázek 2: Fáze CORSIA [49]

CORSIA představuje významný krok směrem k udržitelnosti v letecké dopravě. Tento program umožňuje leteckému průmyslu aktivně snižovat své emise CO2 a přispívat k celosvětovým snahám o omezení negativního dopadu letecké dopravy na životní prostředí. Zároveň demonstruje, že průmysl je připraven převzít odpovědnost a spolupracovat s mezinárodními organizacemi a vládami na dosažení udržitelné budoucnosti letecké dopravy.

1.3.4 SESAR

Programy SESAR (Single European Sky ATM Research), včetně SESAR 1, SESAR 2020 a nadcházejícího SESAR 3, představují významné iniciativy EU, jejichž cílem je revoluce v řízení leteckého provozu (ATM) za účelem zvýšení efektivity, snížení environmentálního dopadu a zlepšení celkové udržitelnosti v letectví [21]. Tyto programy zavedly řadu řešení, která slibují podstatné výhody: 21% nárůst kapacity vzdušného prostoru, 14 % více kapacity letišť, 40% snížení rizika nehod, 2,8% méně skleníkových emisí a 6% snížení nákladů na lety. Stěžejní pro budoucí systémy ATM budou "Operace založené na trajektorii" a "Operace založené na výkonu" [22], které jsou klíčové pro dosažení těchto vylepšení.

Analýzy ukazují, že bez zásahu by emise CO2 z letů odletujících z letišť ECAC významně vzrostly, což by bylo způsobeno růstem provozu a spoléháním na technologické standardy z roku 2019. Nicméně, přijetí pokročilých leteckých technologií a vylepšení ATM, jak je modelováno ve scénářích s implementovanými opatřeními, by mohlo vést k 15% snížení spotřeby paliva a emisí CO2 do roku 2050 [21] ve srovnání s výchozími projekcemi. To zahrnuje očekávané přínosy z projektu SESAR, které by měly přinést asi 3% úspory

CO2/paliva do roku 2025 s cílem dosáhnout přibližně 10% úspor na let do roku 2035 [22] prostřednictvím pokračujících zlepšení efektivity v operacích ATM.

Vliv zlepšení efektivity ATM v rámci projektu SESAR je významně značný, jak dokládají analýzy efektivity projektu SESAR [22]. Tyto zlepšení jsou klíčové pro dlouhodobou udržitelnost a environmentální odpovědnost leteckého průmyslu, což zdůrazňuje kritickou roli technologické inovace a mezinárodní spolupráce při řešení environmentálních výzev spojených s leteckou dopravou.

V České republice se SESAR aplikuje především prostřednictvím projektů financovaných Evropskou unií Tyto projekty se soustředí na implementaci nových technologií a postupů do českého letectví, jako jsou například modernizované systémy řízení letového provozu nebo lepší systémy informování o provozu a počasí.

1.4 Alternativní paliva (SAF)

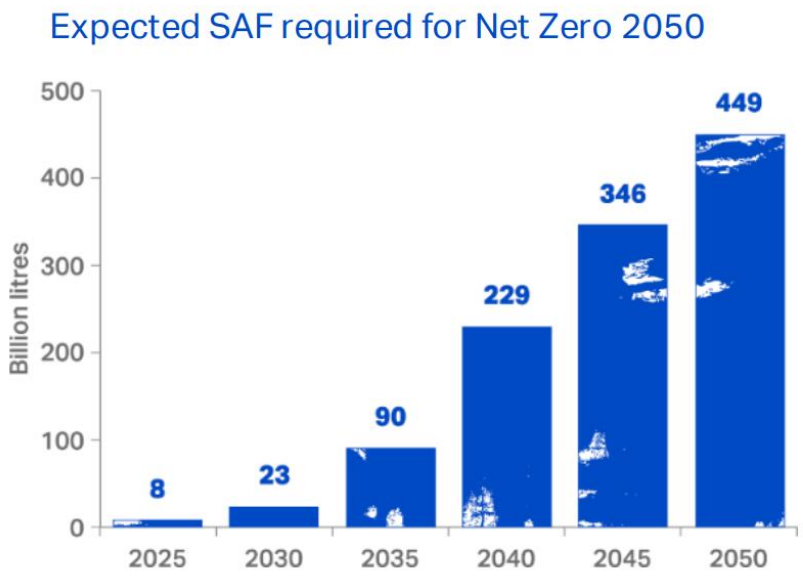
Udržitelná letecká paliva (SAF) představují v současné době jedno z nejperspektivnějších řešení pro snížení uhlíkové stopy komerčního letectví, s potenciálem redukce emisí CO2 až o 80 % [23]. Tato paliva lze získávat z různorodých zdrojů, včetně odpadních tuků, použitých kuchyňských olejů, zemědělských a lesnických residuí či neplodných plodin. Alternativní cestou výroby je syntéza z atmosférického uhlíku, což představuje revoluční přístup v recyklaci CO2, který byl během životního cyklu biomasy absorbován, na rozdíl od fosilních paliv, jež uvolňují dříve izolovaný uhlík zpět do atmosféry.

Práce Arnaldo Valdés [5] poskytuje důležitý pohled do potenciálu udržitelných leteckých paliv, zdůrazňujíc, jak důležitá je integrace mezi výrobou bioenergie a ochranou biodiverzity. Je zdůrazněna nutnost vyváženého přístupu k využití zemědělské půdy, aby se zabránilo negativním dopadům na potravinovou bezpečnost a ekosystémy. K tomu však bude nezbytné překonat technologické, ekonomické a udržitelností výzvy spojené s výrobou a používáním těchto paliv ve větším měřítku. Jak uvádí Rapson a Muehlegger [4], z hlediska udržitelnosti je nezbytné, aby byla paliva vyráběna z odpadních a nevýživných zdrojů, aby se minimalizoval dopad na bezpečnost a využití půdy. Kromě toho je důležité zajistit, aby výrobní procesy SAF byly energeticky efektivní a nabízely výraznou redukci emisí skleníkových plynů ve srovnání s fosilními palivy. Dle Paula Kurzawska [12], technologie SAF představují klíčový prvek v redukci dopadu letecké dopravy na životní prostředí, ale vyžadují značné investice do výzkumu a vývoje pro zlepšení jejich ekonomické a ekologické efektivity.

Další klíčovým aspektem je ekonomická udržitelnost produkce SAF. Vzhledem k tomu, že náklady na výrobu těchto paliv jsou stále relativně vysoké, je nezbytná podpora ze strany vládních politik a stimulace poptávky po těchto palivech. To by mohlo zahrnovat finanční pobídky, jako jsou daně z uhlíku nebo povinné kvóty pro používání SAF ve směsi s klasickými leteckými palivy. S cílem podpořit rozvoj trhu s udržitelnými leteckými palivy je rovněž důležitá spolupráce mezi vládou, soukromým sektorem a výzkumnými institucemi. Tato spolupráce by měla směřovat k vývoji nových technologií, zlepšení udržitelných výrobních procesů a posílení celkové ekonomiky SAF.

V roce 2021 bylo vyrobeno přibližně 100 milionů litrů SAF [23], což pokrylo pouze zlomek celkové spotřeby leteckého paliva. Následující rok 2022 zaznamenal trojnásobný nárůst produkce na 300 milionů litrů. I přes tento růst zůstává produkce SAF ve srovnání s celkovými potřebami letectví stále nedostatečná. Jedním z hlavních omezujících faktorů je komplexní a finančně náročný proces výroby spolu s počátečním stadiem vývoje výrobní infrastruktury pro SAF. Očekává se, že zvýšení výrobní kapacity a stimulace poptávky po SAF může přispět k ekonomické efektivitě a širší dostupnosti těchto paliv. Klíčovou roli v tomto procesu mohou hrát politické iniciativy, jako jsou systémy obchodování s emisemi, které by vytvořily finanční motivaci pro letecké společnosti ke snižování emisí.

Pro ilustraci, obrazek 3 ukazuje prognózovaný růst produkce SAF potřebný k dosažení cíle Net Zero do roku 2050. Tento ambiciózní cíl vyžaduje výrazné zvýšení výrobních kapacit a inovativních technologií, aby bylo možné SAF produkovat v dostatečném množství a za konkurenceschopnou cenu.



Obrázek 3: Očekávaný SAF vyžadovaný pro Net Zero 2050 [24]

Rozvoj SAF tedy představuje zásadní krok k udržitelnější budoucnosti letecké dopravy, přičemž jeho úspěšná implementace závisí na synergiích mezi technologickým pokrokem, politickou podporou a tržní poptávkou. Becken, Mackey a Lee v svojí práci zdůrazňují, že i když SAF mohou odstranit fosilní uhlík z letectví, jejich výroba může vyžadovat významné množství globální obnovitelné elektřiny a biomasy. Produkcí SAF může dojít k soutěžení o půdu potřebnou pro odstranění uhlíku založené na přírodě, čistou energii a uložení zachyceného CO2, což by mohlo podkopat globální cíle omezení oteplování na 1,5°C [25].

1.5 Problematika efektivnosti a udržitelnosti v letecké dopravě

Efektivnost a udržitelnost nejsou vzájemně exkluzivní cíle; naopak, mohou být synergické. Optimalizací letových řádů, modernizací letištní infrastruktury a využíváním pokročilých technologií lze dosáhnout vyšší efektivity a současně snížit environmentální dopad letecké dopravy. Například kratší přestupní časy mohou nejen zlepšit zážitek cestujících, ale také snížit spotřebu paliva a emise díky menší potřebě dlouhého čekání na letištích. Efektivní správa a provoz letadel může vést k nižší spotřebě paliva, což má přímý pozitivní dopad na emise CO2. Investice do moderních, palivově efektivních letadel nejen snižují náklady na palivo, ale také přispívají k udržitelnosti celého sektoru.

V rámci udržitelnosti je důležité zohlednit ekonomické a sociální aspekty, aby byly dosažené přínosy pro životní prostředí udržitelné z dlouhodobého hlediska. To zahrnuje nejen investice do technologií a infrastruktury, ale také vzdělávání a angažovanost všech zainteresovaných

stran v oblasti udržitelnosti. Tato kapitola se tedy snaží ukázat, že efektivnost a udržitelnost mohou jít ruku v ruce a že integrovaný přístup k těmto tématům je nezbytný pro dosažení dlouhodobě udržitelného rozvoje v letecké dopravě. Optimalizace letových tras je jedním z klíčových aspektů efektivnosti a udržitelnosti v letecké dopravě a zároveň hlavním zaměřením této práce. Efektivně navržené letové trasy mohou výrazně snížit spotřebu paliva, což přispívá k redukci emisí skleníkových plynů. Optimalizace zahrnuje nejen zkrácení délky letu, ale také využití moderních navigačních systémů a technologií, které umožňují dynamické přizpůsobení tras aktuálním meteorologickým podmínkám a letovému provozu. Významnou roli hrají také iniciativy jako SESAR (Single European Sky ATM Research), které se zaměřují na integraci a modernizaci systémů řízení letového provozu v Evropě, což vede k vyšší efektivitě a snížení environmentálního dopadu letecké dopravy.

Optimalizace letových tras nejen snižuje environmentální dopad, ale také zlepšuje ekonomickou efektivitu leteckých společností. Kratší a efektivnější trasy znamenají nižší náklady na palivo, menší opotřebení letadel a lepší využití kapacity letadel, což vede k celkovému snížení provozních nákladů. Tento přístup je v souladu s cíli udržitelného rozvoje, které zahrnují nejen ochranu životního prostředí, ale také ekonomickou udržitelnost a sociální odpovědnost.

1.6 Shrnutí kapitoly

V první kapitole byly analyzovány metody snižování uhlíkové stopy v leteckém průmyslu, včetně rozvoje udržitelných leteckých paliv (SAF), aplikace systému SESAR pro efektivnější řízení leteckého provozu a implementace systému CORSIA pro kompenzaci emisí CO2. Tato témata jsou nezbytná pro porozumění současným snahám o snížení environmentálního dopadu letecké dopravy a pro identifikaci oblastí, kde je možné dosáhnout dalších zlepšení.

Pro komplexní pohled na udržitelnost v leteckém průmyslu je rovněž nutné zvážit operativní efektivitu, zejména v kontextu přestupních procesů na letištích, které hrají klíčovou roli v celkové efektivitě letecké dopravy. Druhá kapitola proto přechází od obecné diskuse o snižování emisí k podrobnému zkoumání, jak efektivita přestupů může přispět k lepšímu využití zdrojů, snížení emisí a zvýšení pohodlí cestujících. Tímto způsobem se poskytuje ucelenější obraz o tom, jak různé aspekty leteckého provozu interagují a ovlivňují udržitelnost celého sektoru.

Efektivní přestupy hrají klíčovou roli v letecké dopravě, neboť přímo ovlivňují cestovní zážitek cestujících a operativní efektivitu. Klíčové komponenty efektivních přestupů zahrnují minimalizaci čekacích dob, kterých je možné dosáhnout díky důkladnému plánování a koordinaci letových operací. Tímto způsobem se zkracuje celková doba cesty a minimalizuje potřeba dlouhodobého parkování letadel, což přináší úspory paliva a snižuje emise. V kontextu snižování ekologické stopy je důležité, aby byla letiště a letecké společnosti schopny integrovat nejnovější technologie pro řízení leteckého provozu a plánování letů. Tato technologická vylepšení mohou zahrnovat automatizované systémy pro řízení příletů a odletů, což umožňuje přesnější synchronizaci letů a efektivnější využívání vzdušného prostoru.

V této práci bude věnována zvláštní pozornost optimalizaci letových tras, která je klíčovým faktorem pro dosažení efektivnosti a udržitelnosti v letecké dopravě. Efektivně navržené letové trasy mohou výrazně snížit spotřebu paliva a emise skleníkových plynů, což přispívá k ochraně životního prostředí. Optimalizace letových tras zahrnuje nejen zkrácení délky letu, ale také využití moderních navigačních systémů a technologií. V této analýze bude zaměřena pozornost na to, jakým způsobem mohou být procesy a systémy na letištích dále optimalizovány, aby nejen splňovaly současné ekologické normy, ale také aby se proaktivně přizpůsobovaly budoucím výzvám v oblasti udržitelného rozvoje. Tímto přístupem se v práci pokusí identifikovat klíčové faktory, které mohou letecké společnosti a letištní operátoři využít k dalšímu snižování jejich ekologické stopy a ke zlepšení služeb poskytovaných cestujícím. V následujících kapitolách se budou podrobněji zkoumat jednotlivé aspekty efektivnosti a udržitelnosti a jejich implementace v praxi, přičemž zvláštní pozornost bude věnována optimalizaci letových tras jako klíčovému faktoru pro dosažení těchto cílů.

2. Efektivnost přestupů v letecké dopravě

Efektivita a udržitelnost transferů představují komplexní systém proměnných a faktorů, které je třeba brát v úvahu při plánování a provozu letecké dopravy. Cílem této diplomové práce je vyvinout model, který umožní výběr nejefektivnějšího a nejudržitelnějšího letu s přestupy. Abychom dosáhli tohoto cíle, je nezbytné podrobně analyzovat a pochopit různé aspekty, které ovlivňují volbu letiště a leteckého spojení z pohledu cestujících.

V kontextu zvyšování efektivity letecké dopravy jsou efektivní přestupy nezbytným aspektem, který nejen zlepšuje cestovní zážitek cestujících, ale také přispívá k udržitelnosti letectví tím, že snižuje nepotřebná zpoždění a optimalizuje využití paliva. Efektivní přestupy se vyznačují minimálními čekacími dobami [26], které jsou zajištěny důkladným plánováním a koordinací letových operací. Tato koordinace umožňuje cestujícím pohodlně přestupovat mezi lety bez zbytečných prodlev, čímž se zkracuje celková doba jejich cest.

Kromě toho je pro efektivitu přestupů klíčová snadná navigace na letišti, což zahrnuje jasné informační tabule a intuitivní design letiště, umožňující cestujícím rychle a bez problémů najít svůj další gate. Důležitým faktorem je také optimalizace využití zdrojů, kde efektivní přestupy pomáhají snižovat zpoždění na vzletových a přistávacích drahách, což vede k redukci emisí skleníkových plynů a snížení spotřeby paliva.

Dále je důležitá koordinace s dalšími dopravními prostředky, která umožňuje cestujícím snadné a rychlé spojení mezi různými druhy dopravy. Tato integrace je klíčová pro zajištění hladkého cestovního zážitku a podporuje udržitelné cestovní řešení tím, že zmenšuje potřebu individuálních automobilových přeprav na a z letiště.

Efektivní přestupy nejenže zlepšují cestovní zážitek, ale také přispívají k udržitelnosti letectví snižováním nepotřebných zpoždění a optimalizací využití paliva. Významnou roli v tomto kontextu hraje model hub-and-spoke, který se stává stále více dominantní v organizaci leteckých sítí. Tento systém umožňuje leteckým společnostem koncentrovat své lety v centrálních uzlových letištích, odkud mohou cestující pohodlně přestupovat na další lety vedoucí do různých destinací.

Hub-and-spoke model přináší řadu výhod, včetně zvýšení efektivity využití kapacity letadel a zlepšení přístupnosti a spojení pro cestující. Nicméně tento systém může také přinášet výzvy, jako jsou delší celkové cestovní časy kvůli nutnosti přestupů a vyšší zátěž pro letištní infrastrukturu [27], což může vést ke zvýšení operativních nákladů a emisí. Tento systém

umožňuje leteckým společnostem koncentrovat své lety v centrálních uzlových letištích. Z těchto hlavních letišť pak mohou cestující efektivně přestupovat na další lety vedoucí do různých destinací. Tento model nejen zvyšuje frekvenci letů mezi hlavními centry, ale také umožňuje leteckým společnostem efektivnější využití jejich letových kapacit a zlepšuje celkovou síťovou efektivnost.

Studie zkoumající chování cestujících a jejich volbu transferových letišť [26, 28] naznačují, že faktory jako kvalita služeb, doba mezipřistání (Minimum Connection Time, MCT), velikost letiště a celková pohodlnost přestupů mají významný dopad na jejich rozhodování. MCT je definován jako nejkratší povolená doba, která je nezbytná pro přestup mezi dvěma lety na konkrétním letišti. Tato doba je stanovena tak, aby cestující měl dostatečný čas na přesun mezi lety, včetně veškerých bezpečnostních a pasových kontrol, a zároveň aby byl minimalizován celkový čas strávený na letišti. Zvláště kvalita služeb, která zahrnuje aspekty jako jsou čistota, dostupnost odpočinkových zařízení, efektivita odbavení a bezpečnostních kontrol, hraje důležitou roli v uspokojování potřeb cestujících a zvyšování jejich spokojenosti.

V kontextu udržitelnosti je nezbytné, aby letiště a letecké společnosti implementovaly strategie zaměřené na minimalizaci negativního dopadu letecké dopravy na životní prostředí. To zahrnuje investice do moderních a účinnějších letadel, optimalizaci letových tras a postupů, zavádění technologií snižujících spotřebu paliva a emise, a podporu využívání alternativních a obnovitelných zdrojů energie.

2.1 Minimum Connection Time

Minimální časový interval pro přestupy, známý jako Minimum Connection Time (MCT), je nezbytným parametrem pro zajištění plynulosti leteckých spojení a spokojenosti cestujících. Tento interval je základním ukazatelem, který určuje nejkratší možnou dobu, kterou musí cestující strávit na letišti při přestupu mezi dvěma lety. Stanovení optimálního MCT vyžaduje pečlivou analýzu řady faktorů, včetně velikosti a layoutu letiště, vzdálenosti mezi přestupními bránami, požadavků na bezpečnostní a celní kontroly a typu letu, ať už se jedná o vnitrostátní nebo mezinárodní spojení. Správné nastavení MCT je klíčové pro minimalizaci rizika zpoždění letů a zajištění, že cestující a jejich zavazadla dosáhnou svých cílových destinací včas.

Jedním z hlavních výzev při stanovení MCT je variabilita podmínek na různých letištích. Na rozsáhlých letištích s více terminály může být přesun mezi lety časově náročnější, což vyžaduje delší MCT. Kromě toho, mezinárodní lety obvykle vyžadují více času pro přestup kvůli nutnosti absolvovat pasovou kontrolu a celní odbavení. V tomto kontextu je důležité, aby

letecké společnosti a letištní operátoři úzce spolupracovali na optimalizaci letových řádů a zefektivnění procesů na letišti, aby se zkrátila doba potřebná pro přestupy, aniž by bylo ohroženo bezpečí cestujících.

Přestože moderní technologie a automatizace mohou výrazně přispět ke zkrácení nutného času pro přestupy, například prostřednictvím rychlejších bezpečnostních kontrol nebo efektivnějšího zpracování zavazadel, stále existují omezení, která je třeba zohlednit. V neposlední řadě je důležité pamatovat na potřeby cestujících, kteří mohou vyžadovat více času pro orientaci na letišti, obzvláště v případě, že jsou to osoby se sníženou pohyblivostí nebo rodiny s malými dětmi. Choi, Wang, Xia a Zhang [26] poukazují na to, že faktory jako MCT a kvalita služeb mají významný vliv na výběr transferového letiště cestujícími, což zdůrazňuje význam MCT při plánování spojení a poskytuje komplexní analýzu faktorů, které ovlivňují rozhodnutí cestujících při výběru transferových letišť. Výzkum ukazuje [26], že vedle tradičních faktorů, jako jsou cena letenky a celková doba cesty, mají na rozhodování cestujících značný vliv i specifické charakteristiky letiště. Zejména minimální čas pro přestup (MCT) se ukázal jako klíčový faktor, který může významně ovlivnit volbu cestujících, což naznačuje, že letiště s kratšími MCT mají větší šanci přilákat transferové cestující. Tato zjištění mají významný dopad na správu letišť a letecké společnosti, které se snaží optimalizovat své operace a služby s cílem zvýšit spokojenost cestujících a efektivitu přestupů.

Dlouhé MCT mohou mít negativní důsledky nejen pro cestovní zážitek, ale také pro životní prostředí. Příliš dlouhá MCT znamená, že letadla a cestující čekají na letištích déle než je nutné, což vede k vyšší spotřebě paliva na zemi a zvýšeným emisím CO2 během vzletu a přistání, což jsou fáze, kdy letadla spotřebují nejvíce paliva. Z tohoto důvodu je zkrácení MCT nejen strategií pro zlepšení zákaznického servisu, ale také pro snížení ekologické stopy leteckého průmyslu. Letiště a letecké společnosti by proto měly usilovat o nastavení MCT, které je dostatečně krátké pro zajištění hladkých přestupů, avšak zároveň umožňuje efektivní provoz bez zbytečně dlouhého čekání, minimalizující tak emise škodlivých plynů do atmosféry.

V kontextu stále rostoucího důrazu na udržitelnost a efektivitu v letecké dopravě je optimalizace MCT nejen otázkou zvýšení pohodlí cestujících, ale také snižování emisí způsobených dlouhými čekacími dobami na letištích. Efektivnější přestupy mohou přispět ke snížení celkové doby, kterou letadla tráví na zemi, což má přímý pozitivní dopad na snížení spotřeby paliva a emisí skleníkových plynů. Zefektivnění MCT a zlepšení kvality služeb může vést k vyšší atraktivitě letiště pro transferové cestující, což má přímý dopad na výběr transferových letišť cestujícími.

2.2 Synchronizace letových řádů

Synchronizace letových řádů zajišťuje efektivní a plynulé přestupy v letecké dopravě. Tento proces zahrnuje koordinaci a plánování časů odletů a příletů různých leteckých spojení tak, aby bylo možné minimalizovat čekací doby cestujících na přestupy a zároveň maximalizovat využití letecké kapacity. Úspěšná synchronizace letových řádů vyžaduje komplexní spolupráci mezi leteckými společnostmi, letištními operátory a řídícími orgány leteckého provozu, přičemž musí být zohledněny mnohé faktory, včetně časových pásem, dopravních špiček na letištích a operačních omezeních spojených s letovými trasami.

Efektivní synchronizace letových řádů umožňuje leteckým společnostem optimalizovat své sítě spojení a nabídnout cestujícím širší možnosti přestupů s kratšími čekacími dobami. To nejenže zvyšuje atraktivitu letecké dopravy pro cestující, ale také přispívá k lepšímu využití letové kapacity a snížení nepotřebných emisí způsobených dlouhými čekacími dobami na letištních plochách.

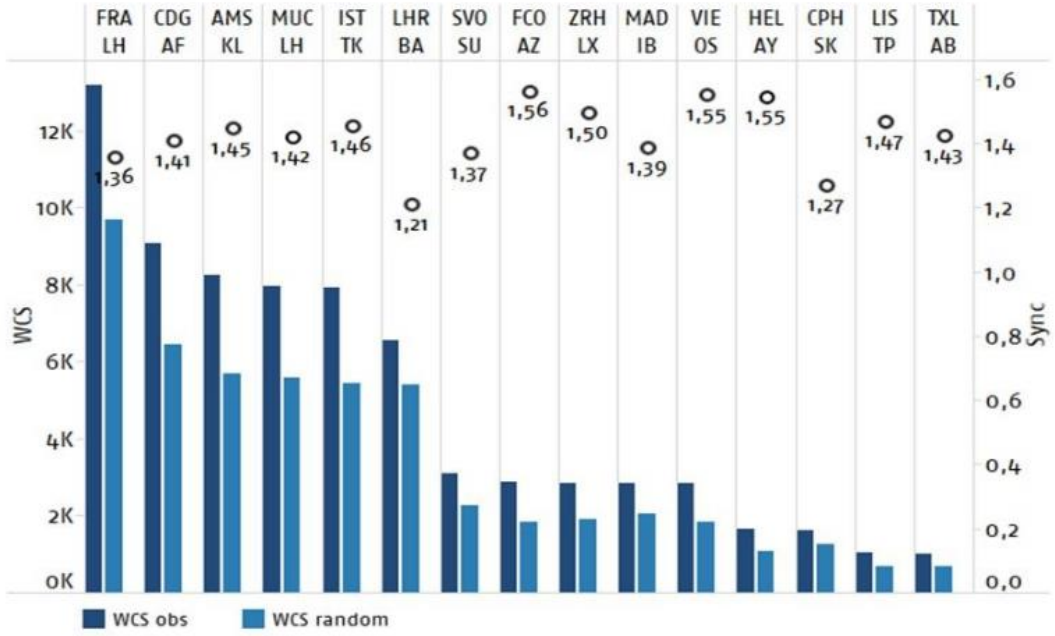
Studie Seredyńskiho, Groscheho a Rothlaufa [28] představuje podrobnou analýzu, která se zaměřuje na hodnocení čistého dopadu synchronizace letových řádů na propojenost klíčových evropských dopravců na jejich hlavních uzlech. Tento výzkum aplikuje pokročilé metodologické postupy pro měření propojenosti těchto uzlů, což umožňuje komplexní hodnocení jejich výkonnosti. Využívá se k tomu dvě klíčové metriky: vážené skóre propojenosti (Weighted Connectivity Score, WCS) a Index synchronizace letových řádů. WCS poskytuje kvantitativní hodnotu, která odráží celkovou propojenost uzlu na základě počtu dostupných spojení a jejich kvality, což zahrnuje faktory jako doba cesty a čekací doby. Index synchronizace letových řádů pak hodnotí, jak efektivně jsou lety na daném uzlu časově koordinovány, aby bylo dosaženo optimálních přestupních časů a minimalizace celkového času stráveného cestujícími na letišti.Tento přístup nejen zdůrazňuje význam pečlivě plánované synchronizace letových řádů pro zvýšení efektivity a snížení zbytečných čekacích dob, ale také poskytuje cenné vhledy do toho, jak může být propojenost letových hub optimalizována.

Weighted Connectivity Score (Vážené skóre konektivity) kvantifikuje propojenost leteckého uzlu na základě počtu a kvality dostupných letových spojení. WCS zohledňuje nejen množství spojení, která letiště nabízí, ale také kvalitu těchto spojení vzhledem k celkové době cesty, včetně čekacích dob mezi přestupy. Vyšší hodnota WCS znamená lepší propojenost a

efektivnější přestupní možnosti pro cestující, což napomáhá k větší plynulosti cestování a zlepšení celkového zážitku cestujících.

Index synchronizace letových řádů je metrika, která měří míru, do jaké jsou letové řády různých letů koordinovány tak, aby maximalizovaly propojenost a efektivitu na hlavních leteckých uzlech. Tento index bere v úvahu nejen počet spojení, ale i kvalitu těchto spojení z hlediska doby cesty, což zahrnuje minimální čekací doby mezi přestupy.

Výsledky studie ukazují, že synchronizace letových řádů zvyšuje propojenost uzlů většiny analyzovaných leteckých společností o 40 % až 60 % [28]. Největší nárůst propojenosti je dosažen u středně velkých dopravců. Nejnižší nárůst je zaznamenán u leteckých společností, které provozují na vysoce zatížených letištích. Na většině uzlů jsou spojení na dlouhé lety provozované širokotrupými letadly, která jsou lépe synchronizována než spojení mezi krátkými lety. Na obrázku 4 je grafické znázorněno WCS a index synchronizace letových řádů 15 Evropských HUBu.



Obrázek 4: WCS a index synchronizace letových řádů 15 Evropských HUBu [28]

Tento výzkum poukazuje na důležitost strategického plánování letových řádů a efektivní synchronizace, aby se zlepšila propojenost letištních uzlů a zvýšila konkurenceschopnost leteckých společností. Přínosy pro cestující jsou zřejmé v podobě kratších čekacích dob a vyšší kvality spojení, Nicméně, dosažení účinné synchronizace letových řádů je vysoce

náročné vzhledem k neustále se měnícím podmínkám v leteckém průmyslu, včetně fluktuací v poptávce po letecké dopravě, změn v operačních kapacitách letišť a vývoje nových letových tras.

Z hlediska tématu teto diplomové práce je tato problematika stěžejní. Efektivní synchronizace letových řádů může přímo přispívat k snížení emisí skleníkových plynů tím, že minimalizuje čas strávený letadly na zemi a zkracuje dobu nutnou pro přestupy, čímž se zefektivňuje celková spotřeba paliva. Tato úspora paliva nejen že snižuje ekologickou stopu leteckého průmyslu, ale také podporuje ekonomickou efektivitu tím, že snižuje náklady spojené s palivem.

2.3 Infrastrukturní vybavenost letiště

Infrastruktura letiště zahrnuje širokou škálu komponent, od terminálů, přestupních uzlů, dopravních spojení až po technologická zařízení, která společně vytvářejí komplexní systém umožňující plynulý přestup cestujících. Efektivita přestupu je přitom dána nejen rychlostí a plynulostí, s jakou mohou cestující přestupovat mezi lety, ale také komfortem a dostupností služeb, které letiště poskytuje.

Moderní letiště je komplexním systémem, ve své struktuře připomíná město ve městě – má své vlastní služby, zařízení, své vlastní problémy a naléhavé potřeby. Letiště nejsou pouze složitým systémem poskytujícím kontrolu pasažérů a letadel, ale navíc mají obrovský ekologický dopad, představující významný zdroj hlukové, vodní a vzdušné znečištění. Mezinárodní organizace stanovují cíle a integrují různé iniciativy ke snížení environmentálního vlivu letišť, mezi nimiž je dosažení nulových emisí uhlíku do roku 2050. Mezinárodní rada letišť (ACI) provedla studii [29] o možném a proveditelném dlouhodobém cíli uhlíkové neutrality (LTCG), která proběhla v letech 2019-2020 a spolupracovala s regiony ACI a vedoucími představiteli letišť po celém světě, tímto způsobem vyzývají vlády, aby poskytly podporu tomuto úsilí. Studie LTCG zahrnovala také některé klíčové kroky, které mohou pomoci urychlit odstraňování uhlíku, jako například podporování přechodu na obnovitelnou energii, podporu odhlazování regionální sítě, nasazování životaschopných obnovitelných energetických systémů na místě, provádění opatření ke zvýšení energetické účinnosti a elektrifikaci infrastruktury letiště.

Infrastrukturní vybavenost letiště je důležitým faktorem, který ovlivňuje efektivitu a udržitelnost přestupu na letištích. Tento aspekt se stává stále důležitějším v kontextu rostoucího počtu cestujících a narůstajících požadavků na udržitelný rozvoj.

Z hlediska udržitelnosti je důležité, aby infrastrukturní vybavenost letiště podporovala ekologické aspekty dopravy. To zahrnuje minimalizaci emisí CO2, efektivní využívání zdrojů, jako je voda a energie, a snižování hlučnosti operací. Udržitelnost dále zahrnuje sociální aspekty, jako je zajištění dostupnosti letištních služeb pro širokou veřejnost a přispívání k lokálnímu ekonomickému rozvoji. [30] Například využití pokročilých technologií pro úpravu odpadních vod a povrchového odtoku je klíčové pro ochranu místních vodních ekosystémů před znečištěním z letištních operací.

Komplexní přístup k modernizaci a správě letištní infrastruktury, který zohledňuje jak efektivitu operací, tak environmentální udržitelnost, je nezbytný pro zajištění udržitelného rozvoje letecké dopravy. Investice do technologií, rozšiřování kapacity a zlepšování procesů jsou klíčové pro zlepšení efektivity přestupů a zajištění pozitivního cestovního zážitku.

2.4 Faktory ovlivňující rozhodování cestujících

V kontextu narůstající konkurence mezi leteckými společnostmi a letišti je nezbytné zaměřit se na optimalizaci čekacích dob a zlepšení kvality spojení, což přináší značné výhody pro cestující. Na základě pilotního výzkumu mezi studenty Univerzity v Salernu [25], který se odehrál v regionu Kampánie v jižní Itálii, byla analyzována volba letiště v situaci, kdy cestující čelí vysokým cenám letenek a nízké frekvenci letů. Výzkum odhalil, že cestující mohou preferovat použití letišť mimo region, což naznačuje významnou roli přístupnosti a cenové dostupnosti v procesu rozhodování.

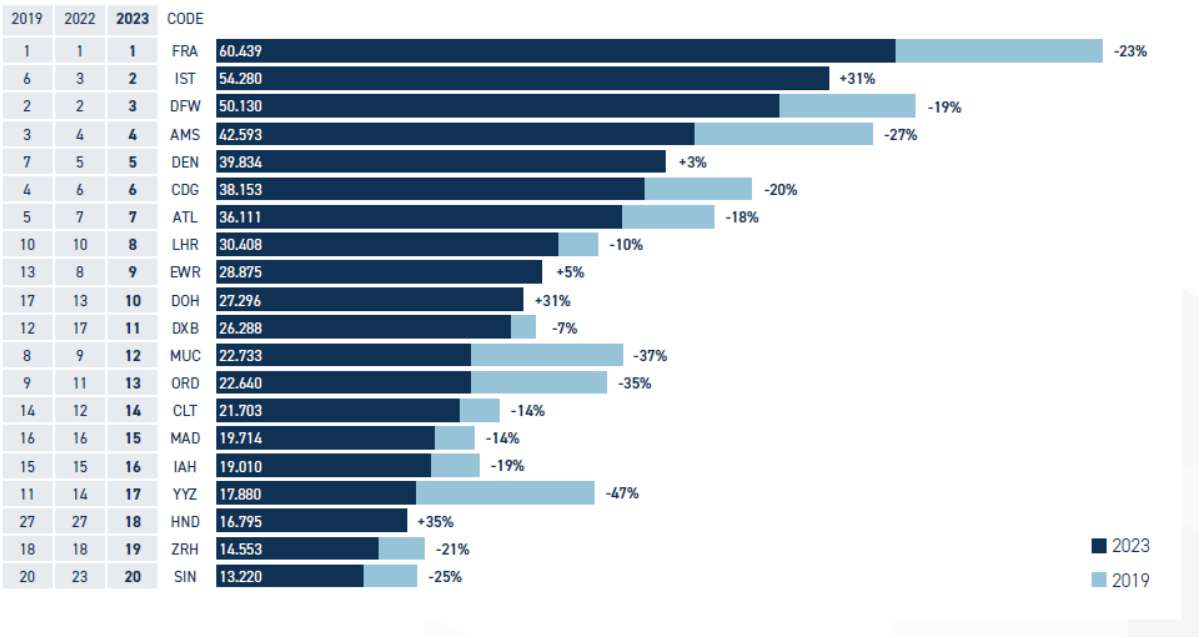
V rámci modelování byly použity multinomické logitové modely, které prokázaly statistickou významnost a poskytly užitečné vhledy do volby letiště založené na různých atributů, jako jsou letecké tarify, frekvence letů a dostupnost aut. Tyto výsledky poukazují na potřebu zahrnutí širší škály faktorů do modelů volby letiště, aby bylo možné lépe chápat a předpovídat chování cestujících.

Při modelování časových oken odletů bylo zjištěno, že cestující za účelem maximalizace pobytu v destinaci věnují značnou pozornost času odletu z původního letiště i času odletu z letiště destinace při návratovém letu. Tento faktor je zvláště důležitý pro cestující cestující za účelem volnočasových aktivit, kteří upřednostňují lety v určitých částech dne, což může významně ovlivnit jejich volbu letiště a letu.

2.5 Konektivita

Konektivita je založena na následujícím konceptu: Pohyb cestujících, pošty a nákladu s minimálním počtem tranzitních bodů, což zkracuje cestu na minimum, s optimální spokojeností uživatelů a za co nejnižší cenu. Pro optimalizaci konektivity je potřeba silný podpůrný rámec. K tomu patří mimo jiné přístup na trh, optimální využití leteckých navigačních služeb, letadel, systémů letišť, usnadňování a bezpečnost, a činnosti leteckých společností.

Existují čtyři typy konektivity: *Přímá konektivita* zahrnuje přímé letecké služby dostupné z letiště. Měří se nejen podle destinací, ale zohledňuje také frekvenci letů na stejnou destinaci. Zaměřuje se na vytváření efektivních přímých tras s optimální četností letů pro dosažení maximální spokojenosti uživatelů. *Nepřímá konektivita* měří počet míst, kam mohou lidé létat pomocí přestupního letu na hub letištích z konkrétního letiště. Odráží flexibilitu a dosah síťového propojení letiště, nabízejíc cestujícím různorodé možnosti dosažení konečné destinace. *Konektivita letiště* představuje nejkomplexnější hodnocení konektivity letiště. Zahrnuje jak přímou, tak nepřímou konektivitu z daného letiště, poskytujíc komplexní pohled na dostupnost letiště. *Konektivita hubu* je klíčovou metrikou [31] pro jakékoliv hub letiště, bez ohledu na jeho velikost. V podstatě měří počet přestupních letů, které mohou být zajištěny daným hub letištěm, s přihlédnutím k minimálnímu a maximálnímu času přestupu a hodnocením kvality přestupů zohledněním odchylek a časů přestupu. Obrázek č. 5 ukazuje hub konektivitu 20 největších evropských letišť, poskytující detailní přehled o schopnosti těchto letišť efektivně zajišťovat přestupní lety a optimalizovat tím spojení v rámci i mimo Evropu.



Obrázek 5: HUB konektivita 20 největších Evropských letišť [17]

Konektivita přes huby je v roce 2023 o 25 % nižší než před pandemií (v roce 2019) [31] a tím výrazně zaostává za přímým spojením (-4 %), ačkoliv většina zemí po celém světě zrušila omezení pro přeshraniční cestování do konce roku 2022. To poukazuje na strukturální změny na trhu s leteckou dopravou, které mění vzorce evropského spojení.

Z hlediska strukturálních změn v leteckém průmyslu, které ovlivňují evropská spojení, může být zajímavé se zaměřit na rostoucí význam nízkonákladových leteckých společností a jejich vliv na tradiční modely hub a spoke. Tento trend by mohl být jedním z faktorů, které přispívají k pomalejšímu oživení hubové konektivity v porovnání s přímým spojením, protože nízkonákladové společnosti často upřednostňují přímé linky a méně spoléhají na velké uzlové letiště. Dalším faktorem může být změna v obchodních cestovních modelech, kde společnosti po pandemii více využívají virtuální schůzky, což snižuje potřebu návazných letů přes velké uzly. Tyto změny by mohly znamenat dlouhodobější posun v preferencích cestování a strategiích leteckých společností, což by mohlo mít dlouhodobé důsledky pro plánování a rozvoj letištní infrastruktury.

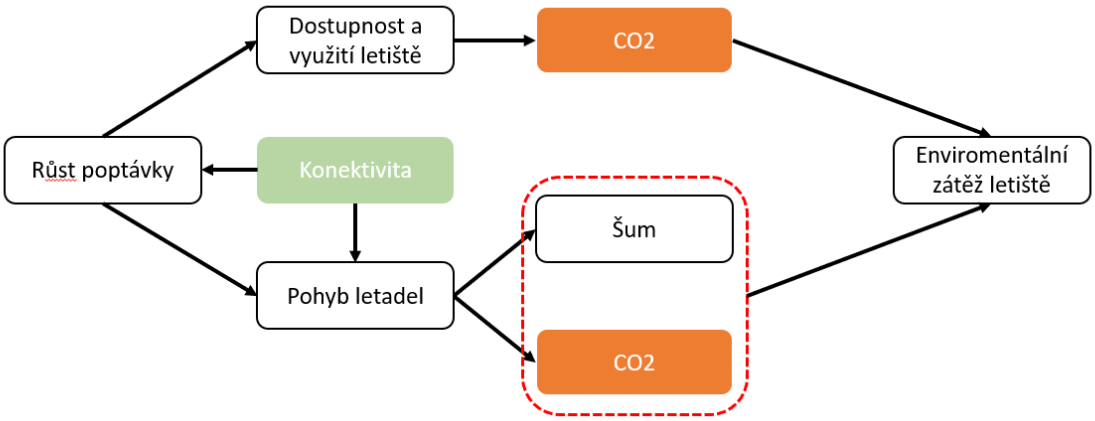
Větší konektivita naznačuje vyšší konkurenční hodnotu letiště ve srovnání s ostatními, lepší cestovní možnosti pro lidi v oblasti dosahu letiště, a nakonec potenciální ekonomické výhody pro region, ve kterém se letiště nachází. Dále by místní komunity mohly těžit z vylepšených možností letecké dopravy spojených se základním konceptem „konektivity“ [32]. Místní úřady

často podporují konektivitu letiště, protože věří, že zvyšování konektivity generuje pozitivní dopady na území.

Nicméně zvýšená konektivita letiště z hlediska zvýšeného počtu dosažených destinací a/nebo zvýšeného počtu letů na dané trasy spolu se zvýšenou poptávkou po letecké dopravě v obecně generuje vyšší počet pohybů na letišti. Vyšší počet pohybů na letišti pak produkuje vyšší úrovně externalit, jako jsou znečištění ovzduší a hluk – což také závisí na úrovni technologie a mixu provozní flotily. Rovnováha mezi zvyšováním konektivity letiště a místními obavami týkajícími se environmentální slučitelnosti činností letiště s potřebami žijící populace je důležitou otázkou [33, 34, 35]. K dispozici kvantitativních indexů pro plánovače i provozovatele letiště je užitečná pro propojení efektů změn v dopravních proměnných relevantních pro rozvoj letiště – cestující a pohyby, které mohou rovněž měřit změny v konektivitě/dostupnosti letiště – s efekty generovanými na okolním území z hlediska emisí uhlíku a hluku. Vyvážený rozvoj by produkoval omezené místní úrovně uhlíku a hluku při současném zvyšování (nebo neklesajících) úrovních konektivity [36].

2.5.1 Konektivita a emise CO2

Růst konektivity letiště má různé dopady na zapojené subjekty a populaci. Konkrétně jsou tyto dopady dvojí. Na jedné straně zvýšení konektivity – ať už pomocí jakýchkoli metrik a zohledněním také kvality konektivity – znamená lepší cestovní příležitosti. Na druhé straně může generovat environmentální dopady spojené se zvýšením počtu vzdušných pohybů na letišti. Toto zvýšení je dáno jak nárůstem počtu spojení, tak i zvýšením počtu frekvencí pro daná spojení. V obou případech dojde ke zvýšení počtu pohybů a očekávanému nárůstu poptávky po letecké dopravě v důsledku zlepšení leteckého servisu.



Obrázek 6: Následky zvýšení konektivity z pohledu udržitelnosti

V souvislosti s růstem konektivity letiště je důležité zdůraznit, že zvýšení počtu obsluhovaných destinací znamená zvýšení počtu pohybů na letišti. Podobně, pro daný počet obsluhovaných destinací, zvýšení frekvence letů znamená opět zvýšení počtu pohybů na letišti. Podle metodologického postupu navrženého Postorinem a Mantecchinim [37, 38], počet pohybů je jednou ze dvou relevantních dopravních proměnných, které se zvažují při hodnocení úrovní uhlíku na daném letišti. Dále je počet pohybů přímo spojen s tvarem a velikostí hlukové stopy na povrchu země vytvořené provozem letiště na okolním území. Počet přepravených cestujících je další relevantní dopravní proměnnou přímo spojenou s emisemi uhlíku na letišti – zejména kvůli autům pro přístup na letiště a výrobě/spotřebě energie na letištním terminálu. Následky zvýšení konektivity, jak je znázorněno v obrázku 6, tak zahrnují jak pozitivní aspekty zlepšení cestovních možností, tak negativní environmentální dopady.

2.6 Porovnání časového přístupu a přístupu zaměřeného na CO2

V současné době je známo, že tradiční přístupy k hodnocení a optimalizaci leteckých sítí se soustředí především na časové parametry, jako jsou minimalizace cestovního času a maximalizace efektivity sítě. Tento přístup je zřetelně vidět v analýze Malighettiho et al. [39], která zkoumá konektivitu evropské letecké sítě a uplatňuje metody založené na minimalizaci časových ztrát mezi letišti, včetně čekacích dob a přestupů. V rámci tohoto přístupu se však často opomíjí ekologický rozměr dopravních aktivit, který se stává stále relevantnějším v kontextu globálních klimatických změn.

Naopak, novější přístupy, jakým je přístup zaměřený na emise CO2, který je zaveden v této práci, poskytují širší perspektivu tím, že do analýzy zahrnují i environmentální dopady. Tyto

metody nejenže kvantifikují časové parametry, ale rovněž hodnotí množství produkovaných emisí CO2, což umožňuje komplexní hodnocení udržitelnosti leteckých operací. V práci Forsythe et al. [40] je naznačeno, jak mohou být regulace a technologický pokrok v letectví motivovány právě poznatky o vlivu letového provozu na životní prostředí, což přímo koresponduje s potřebou integrace environmentálních aspektů do řízení leteckých sítí.

2.6.1 Rozdíly v metodologickém přístupu

Časový přístup k hodnocení leteckých sítí, který je důkladně analyzován v práci Malighettiho et al. [39], se zaměřuje na optimalizaci cestovního času mezi letišti s cílem zvýšení efektivnosti a zlepšení konektivity. Tento přístup zdůrazňuje důležitost minimalizace celkového času stráveného na cestě, což zahrnuje jak dobu letu, tak čekací doby a přestupy. Naopak, přístup zaměřený na emise CO2 rozšiřuje analýzu o environmentální dimenzi tím, že kvantifikuje a snaží se minimalizovat množství CO2 emitovaného během letů. Tento přístup nejenže reflektuje tradiční logistické a operativní proměnné, ale také přihlíží k dopadům letového provozu na životní prostředí, což podporuje integraci environmentálních cílů do operativních rozhodnutí leteckých společností.

Rozdíly mezi těmito přístupy mají významné praktické důsledky. Časově orientované modely mohou favorizovat zvýšení frekvence letů a přímé spojení, což zvyšuje rychlost a snižuje čekací doby, jak je ilustrováno v práci Malighettiho et al. [39]. Modely zaměřené na snížení CO2 mohou naopak doporučovat snížení počtu letů a využití větších letadel, která jsou efektivnější z hlediska emisí na cestujícího. Tyto strategie odrážejí rostoucí potřebu leteckého průmyslu reagovat na environmentální výzvy a zároveň udržet svou konkurenceschopnost a operativní efektivitu, jak naznačuje Forsyth [40].

Zajímavé je, jak tyto rozdíly ve výzkumu otevírají diskusi o potřebě přístupu, který by zahrnoval jak ekonomické, tak ekologické aspekty. Pochopení těchto rozdílů může pomoci leteckým společnostem i regulátorům lépe formulovat strategie, které by přispěly ke zdravějšímu a udržitelnějšímu budoucímu rozvoji letecké dopravy.

2.6.2 Praktické implikace metodologických rozdílů

Rozdíly mezi časovým přístupem a přístupem zaměřeným na emise CO2 mají důležité praktické implikace pro plánování a provoz v leteckém průmyslu. Časový přístup, jehož cílem je optimalizace cestovního času, podporuje strategie, které zvyšují frekvenci letů a minimalizují čekací doby na letištích. Tato strategie je efektivní pro maximalizaci pohodlí cestujících a

operativní efektivity, jak je ilustrováno v analýze Malighettiho et al. [39], kde se zkoumá konektivita v rámci evropské letecké sítě s důrazem na zlepšení přestupních spojení a redukci celkové doby cest.

Na druhou stranu, přístup zaměřený na snižování emisí CO2 klade důraz na environmentální aspekty letů, jako jsou emise skleníkových plynů a energetická efektivita letadel. Tento přístup může vést k preferenci delších intervalů mezi lety a použití větších letadel, aby se snížila frekvence vzletů a přistání, která jsou zvláště energeticky náročná. Forsyth [40] zdůrazňuje, jak důležité je integrovat udržitelnost do každodenních operací leteckých společností, aby odpovídaly rostoucím regulatorním požadavkům a očekáváním veřejnosti ohledně ekologické odpovědnosti.

Tyto rozdíly ovlivňují nejen operační strategie leteckých společností, ale také širší politické a ekonomické strategie v odvětví. Zatímco časově efektivní modely mohou být výhodné pro trhy, kde je důraz kladen na rychlost, modely zaměřené na snižování emisí mohou být atraktivnější pro trhy, kde jsou environmentální udržitelnost a snížení emisí prioritou. Výzvou pro letectví je najít optimální rovnováhu mezi těmito dvěma přístupy, což může zahrnovat inovace v technologiích, změny v operačních procedurách, nebo dokonce restrukturalizaci letových sítí, aby lépe odpovídaly jak ekonomickým, tak ekologickým cílům. Tato diskuse ukazuje, že porozumění a integrace obou přístupů je klíčové pro budoucí udržitelný rozvoj leteckého průmyslu, což je oblast, kde mohou výzkum a inovace hrát zásadní roli.

2.7 Atributy efektivity a udržitelnosti přestupů

Tato část práce se věnuje zkoumání hlavních atributů, které jsou zásadní pro efektivní a udržitelné fungování přestupních uzlů v leteckém sektoru. Zvláštní pozornost je věnována časové efektivitě, frekvenci spojení a cenové dostupnosti, které hrají klíčovou roli v rozhodovacích procesech cestujících a strategiích leteckých operátorů.

V současném globalizovaném světě, kde mobilita obyvatelstva neustále roste, jsou letecké společnosti a letiště nuceny neustále inovovat a zlepšovat své služby, aby vyhověly rostoucím požadavkům a očekáváním cestujících. Efektivita přestupů přitom nezahrnuje jen minimalizaci času stráveného čekáním na další let, ale také zahrnuje komplexní hodnocení kvality přestupních procesů [41], snadnou dostupnost relevantních informací pro cestující a celkový komfort cesty.

Z hlediska udržitelnosti se přestupy stávají klíčovým prvkem, jehož význam stoupá v souvislosti s narůstajícími požadavky na ekologickou šetrnost letecké dopravy. Udržitelné přestupní strategie se neomezuje pouze na snížení emisí CO2, ale také na efektivní správu zdrojů, minimalizaci odpadu a obecné zlepšení vlivu letecké dopravy na životní prostředí.

V dalších podkapitolách bude podrobněji analyzováno, jak jednotlivé aspekty efektivity a udržitelnosti ovlivňují zážitek cestujících a operace v leteckém průmyslu, a budou navržena specifická opatření pro zlepšení současných postupů. Přitom bude kladen důraz na integraci inovativních technologií a postupů, které mohou přinést značné vylepšení v oblasti efektivity a ekologické udržitelnosti letecké dopravy.

2.7.1 Hodnota času

Tato podkapitola se soustředí na hodnotu času jako na jeden z nejvýznamnějších aspektů, které formují rozhodnutí cestujících v kontextu letecké dopravy, a zdůrazňuje její vliv na individuální zážitky z cestování, stejně jako na celkovou efektivnost a udržitelnost leteckých transportních procesů. Bylo zkoumáno, jak různé dimenze času – včetně čekací doby na letišti, délky letu a doby potřebné pro přestupy – ovlivňují preference cestujících a jejich spokojenost, což má bezprostřední důsledky pro jejich volbu leteckých spojů a letišť [42].

Pro cestující představuje čas cenný zdroj, jehož hodnota se odvíjí jak z ekonomických, tak z osobních úvah. Z ekonomického pohledu je čas cestujících hodnocen na základě jejich pracovních příjmů, zatímco z osobního hlediska je spojen s příležitostmi pro volnočasové aktivity a celkovou kvalitou života. Proto je zásadní efektivně spravovat a minimalizovat čas strávený v tranzitu, na letišti a během samotného letu, aby se zvýšila atraktivita leteckých služeb. Efektivní logistika na letišti, včetně rychlého odbavení a krátkých čekacích dob, nejenže zlepšuje zkušenost cestujících, ale také snižuje potřebu dlouhodobého stání letadel na zemi, což vede ke snížení spotřeby paliva a emisím CO2.

Strategické plánování letových časů je klíčové pro rozhodování cestujících. Letové plány, které jsou flexibilní a pečlivě přizpůsobeny preferovaným časům odletů a příletů, mohou výrazně zvýšit poptávku po konkrétních letech. Tím, že letecké společnosti berou v úvahu časové preference cestujících při plánování letů, mohou efektivněji využívat kapacity a zvyšovat efektivitu letecké dopravy. Optimalizace letových operací a minimalizace zpoždění také přispívají k účinnějšímu využití paliva a snižují celkové emise CO2.

Z pohledu leteckých společností a letišť je hodnota času klíčovým ukazatelem pro optimalizaci operací a služeb. Investice do technologií a procesních inovací, které zrychlují odbavení, snižují čekací doby a zlepšují pohodlí cestujících, mohou výrazně zvýšit konkurenceschopnost a podpořit udržitelnost. Efektivní řízení času rovněž přispívá k lepšímu využití zdrojů a redukuje negativní dopady na životní prostředí tím, že minimalizuje potřebu nadměrných kapacit a zvyšuje celkovou efektivitu systému letecké dopravy.

Výzkumy a studie v oblasti letecké dopravy [42, 43] poukazují na významný vliv, který má hodnota času na rozhodovací procesy cestujících, a zdůrazňují potřebu leteckých společností a letišť neustále inovovat a zlepšovat své procesy a služby, aby vyhověly těmto požadavkům. Integrace pokročilých technologií, jako je automatizace odbavení a inteligentní řízení letových operací, může nabídnout řešení pro zvýšení efektivnosti a snížení environmentálního dopadu letecké dopravy.

2.7.2 Hodnota frekvence

Frekvence letů představuje významný prvek, který má značný vliv jak na spokojenost cestujících, tak na ekologickou stopu leteckého průmyslu. Zatímco vyšší frekvence letů může cestujícím poskytnout větší volnost při plánování cest a zvýšit jejich komfort, je také spojena s potenciálně vyššími emisemi CO2, pokud není adekvátně řízena s ohledem na efektivitu a udržitelnost.

Optimalizace frekvence letů je klíčová nejen pro dosažení rovnováhy mezi nabízenou službou a ekologickým dopadem, ale i pro snížení globálních emisí skleníkových plynů. Přizpůsobení frekvence letů aktuálním cestovním trendům a poptávce, s využitím sofistikovaných analytických nástrojů a datových modelů, umožňuje leteckým společnostem minimalizovat počet letů s nízkou obsazeností a zároveň maximalizovat efektivitu provozu. Z hlediska snížení emisí CO2 je však důležité, aby byla tato optimalizace prováděna s ohledem na celkovou udržitelnost a dopady na životní prostředí.

Optimalizace z pohledu CO2 znamená, že letecké společnosti a regulační orgány musí nejen sledovat aktuální poptávku a obsazenost letů, ale také koordinovat letové plány a frekvence s cílem snížit celkový počet letů tam, kde to nejvíce přispěje ke snížení emisí. Tento přístup zahrnuje integraci dat o emisích, využití technologií pro zlepšení palivové efektivity a zvyšování podílu udržitelných leteckých paliv v celkové spotřebě paliva. Navíc je důležité, aby se do rozhodovacích procesů zapojovaly všechny relevantní strany, včetně vlád, mezinárodních

organizací a samotných cestujících, aby se zvýšilo povědomí o důležitosti udržitelných cestovních možností.

Navýšení frekvence letů může být také přínosem pro udržitelnost, pokud je správně zvládnuto. Efektivní řízení frekvence [42 43] umožňuje lepší plánování letových tras a využívání letadel s vyšší palivovou efektivitou, což může vést k snížení spotřeby paliva a emisí CO2 na let. Klíčovou roli zde hraje výběr vhodných typů letadel pro jednotlivé trasy a jejich optimální využití v souladu s aktuální poptávkou.

Dalším krokem k zefektivnění frekvence letů a snížení jejich ekologické stopy je adopce inovativních technologií a udržitelných paliv. Investice do novějších, energeticky účinnějších letadel a podpora výzkumu alternativních paliv, jako jsou bio paliva nebo syntetické palivové směsi, mohou značně přispět k redukci emisí CO2 na let a umožnit tak udržitelnější rozvoj letecké dopravy. Avšak, přestože jsou tyto faktory klíčové pro snížení dopadu letectví na životní prostředí, hlavní pozornost této práce zůstává na optimalizaci přestupů a frekvence letů. Je to proto, že právě tyto aspekty mají bezprostřední vliv na každodenní operace leteckých společností a na zkušenosti cestujících. Optimalizace frekvence letů není pouze o snižování emisí, ale také o zlepšení efektivity a snížení operativních nákladů, což přispívá k větší konkurenceschopnosti a celkovému udržitelnému růstu v leteckém průmyslu.

2.7.3 Hodnota ceny

Cenová politika v leteckém průmyslu hraje klíčovou roli nejen ve vlivu na rozhodování cestujících, ale také v potenciálu k řízení ekologického dopadu letecké dopravy. Adekvátně nastavené cenové struktury mohou efektivně motivovat spotřebitele k volbě šetrnějších dopravních alternativ a zároveň stimulovat letecké společnosti k investicím do ekologicky udržitelnějších technologií.

Implementace ekologických daní na letenky, například prostřednictvím "zelené daně", která by byla vyčíslena na základě objemu emisí CO2 generovaných konkrétním letem, představuje jeden z možných přístupů k začlenění environmentálních nákladů do cen letenek. Tato opatření by mohla vést k preferenci kratších a přímých letů a k vyšší obsazenosti letadel, což by v důsledku mělo snížit celkové emise CO2 z letecké dopravy.

Kromě toho může cenová politika ovlivnit celkovou poptávku po leteckých službách. Vyšší ceny za letenky mohou potenciálně odradit část cestujících od častého létání, což by mohlo vést k redukci počtu letů a tím i k nižším celkovým emisím. Je však zásadní zachovat

přiměřenou rovnováhu, aby nebyla narušena dostupnost letecké dopravy pro nezbytné cesty a aby byly respektovány potřeby různých skupin cestujících.

Cenová politika by měla být navíc využívána v kombinaci s dalšími opatřeními, jako jsou investice do udržitelnějších leteckých technologií, vývoj alternativních paliv a zlepšování operační efektivity, aby byl dosažen větší dopad na snižování emisí CO2. Transparentnost cenových struktur a jasné informování cestujících o ekologickém dopadu jejich cest může rovněž posílit povědomí o důležitosti udržitelného cestování a podpořit zodpovědnější rozhodování při výběru dopravních možností.

V tomto kontextu je klíčové, aby byly cenové strategie v leteckém průmyslu navrženy s ohledem na široký spektrum faktorů, včetně ekonomických, sociálních a ekologických aspektů, aby bylo možné dosáhnout udržitelného rozvoje letecké dopravy [42], který uspokojí potřeby současných i budoucích generací cestujících.

2.7.4 Hodnota vzdálenosti

Porozumění konceptu "hodnoty vzdálenosti" je zásadní pro snižování uhlíkové stopy v leteckém průmyslu, jelikož vzdálenost uražená letadlem přímo ovlivňuje množství spotřebovaného paliva, a tedy i výši emisí CO2. Optimalizace letových tras a strategický výběr letišť pro mezipřistání hrají klíčovou roli v zefektivnění letových operací a minimalizaci environmentálního dopadu.

Přímé lety jsou z hlediska spotřeby paliva efektivnější než lety s přestupy. To je dáno zejména vyšší spotřebou paliva během fází vzletu a přistání. Přímé lety tedy eliminují potřebu opakovaného vzletu a přistání, což vede k nižší celkové spotřebě paliva a snížení emisí CO2. Naopak, krátké lety jsou často méně efektivní v kontextu spotřeby paliva, protože významná část paliva je spotřebována během vzletu a počátečních fází letu, kdy letadlo dosahuje optimální letové hladiny. Dlouhé lety naopak umožňují letadlům dosáhnout a udržet tuto optimální letovou hladinu po delší dobu, což přispívá k efektivnější spotřebě paliva.

Implementace politik, které preferují přímé lety a podporují přesun krátkých tras na alternativní dopravní prostředky s nižšími emisemi, jako jsou vlaky nebo elektromobily, může významně přispět k redukci celkových emisí z letecké dopravy. Tento přístup nejenže snižuje uhlíkovou stopu, ale také podporuje integraci a rozvoj udržitelnějších forem dopravy.

2.7.5 Sumarizace podkapitoly

V závěrečné části této podkapitoly byly identifikovány a prozkoumány čtyři základní koncepty ovlivňující udržitelnost v leteckém průmyslu: hodnota času, frekvence letů, cenová politika a hodnota vzdálenosti. Tyto atributy jsou klíčové pro porozumění mechanismům, které mohou přispět ke snížení ekologické stopy a zvýšení efektivity leteckých služeb.

V rámci této diplomové práce bude zvláštní pozornost věnována dvěma z těchto atributů – času a vzdálenosti – a jejich přímému vlivu na množství spotřebovaného paliva a následných emisí CO2. Tento výběr je motivován potřebou hlouběji pochopit, jak lze prostřednictvím efektivního řízení těchto dvou faktorů přispět k udržitelnějšímu provozu v leteckém sektoru.

Optimalizace času se zaměřuje na minimalizaci čekacích dob a efektivní plánování letových operací, což vede k lepšímu využití zdrojů a snižování nepotřebných emisí. Naopak, zvýšení efektivity vzdáleností prostřednictvím optimalizace letových tras a strategického výběru letišť může významně přispět k redukci celkové spotřeby paliva a emisí CO2.

V dalších částech práce bude provedena aplikace těchto principů s cílem demonstrovat, jak mohou být integrovány do praktických strategií pro zlepšení udržitelnosti v leteckém průmyslu. Klíčovým cílem je nabídnout konkrétní návrhy a řešení, která mohou letecké společnosti implementovat k dosažení efektivnějšího a šetrnějšího provozu, s ohledem na snížení emisí CO2 a zlepšení celkového dopadu letecké dopravy na životní prostředí.

2.8 Shrnutí hlavních tezí

V předchozích kapitolách této diplomové práce byly prozkoumány mnohé aspekty udržitelnosti a efektivity v letecké dopravě. Tabulka 1 ukazuje přehled související literatury, která byla použitá v kapitole 1. Různé faktory a iniciativy, které formují současné i budoucí trendy v tomto odvětví, byly analyzovány. Tato část poskytuje souhrnný přehled klíčových poznatků a jejich souvislostí s relevantní literaturou. Prezentovaná tabulka slouží jako syntéza teoretických konceptů a jejich praktického uplatnění v leteckém průmyslu, ukazuje, jak akademické diskurzy ovlivňují a jsou ovlivněny skutečnými výzvami.

Globální téma	Čísla citací	Hlavní teze
Efektivnost a udržitelnost letecké dopravy	[18], [19], [22], [23], [24]	Zvýšení efektivity a snížení emisí CO2 jsou klíčové pro udržitelný rozvoj leteckého průmyslu.

Přechod na udržitelná paliva (SAF)	[3], [23]	Udržitelná paliva představují zásadní řešení pro snížení uhlíkové stopy a podporu ekologické udržitelnosti v letectví.
Technologické inovace a vývoj	[5], [22], [23], [25], [30]	Inovace a technologický pokrok jsou nezbytné pro zlepšení efektivnosti a snížení emisí v leteckém sektoru.
Sociálně-ekonomické aspekty udržitelnosti	[6], [12], [26], [28]	Pochopení a podpora udržitelnosti mezi klíčovými stakeholdery a veřejností jsou kritické pro úspěšnou implementaci.
Optimalizace doby přestupu (MCT)	[27], [28], [37], [38]	Optimalizace MCT a efektivní plánování letů přispívají k snížení čekacích dob a emisí.
Synchronizace letových řádů	[28], [29], [42], [43]	Synchronizace letových řádů zvyšuje efektivitu letových operací a zlepšuje konektivitu letišť.
Vliv infrastruktury letišť na přestupy	[23], [25], [30], [31]	Moderní infrastruktura a služby letišť podporují plynulé přestupy a zvyšují spokojenost cestujících.

Tabulka 1: Shrnutí 2. kapitoly

V závěru kapitoly 2.7 je zdůrazněna role syntézy klíčových tezí a citací jako mostu mezi teoretickými koncepty a jejich aplikací v praxi. Každé téma a odpovídající citace odráží komplexní povahu výzev v leteckém průmyslu a poukazují na nutnost multidisciplinárního přístupu k jejich řešení.

3. Metodologie modelu

Tato diplomová práce je zaměřena na vytvoření metodologie a flexibilního nástroje pro hodnocení přestupních tras. Budou použity 10 největších evropských HUBů, mnoho odletových (převážně z Evropy) a příletových letišť.

Obrovskou výhodou tohoto nástroje je možnost jeho modifikace a rozšíření databáze v budoucnu na všechna letiště na světě. Hlavními zdroji informací jsou databáze OAG, kalkulačka emisí ICAO, Kiwi.com a přímo webové stránky každého z letišť. Všechna odletová a příletová letiště, stejně jako transferová letiště v této databázi, obsahují informace o vzdálenosti, čase letu, původu a destinaci, množství emisí CO2 na jednoho cestujícího pro každý let na základě nejčastěji používaného typu letadla na dané lince a množství emisí CO2 na jednoho cestujícího pro každé letiště.

3.1 Databáze

Databáze zahrnuje MCT mezi terminály, stejně jako informace o umístění letišť. Byla také shromážděna data o přestupech cestujících na těchto HUBech, přičemž byly zohledněny pouze lety s jedním přestupem. Data obsahují jak skutečné letové trasy, tak teoretické – založené na historických údajích nebo nejlepším odhadu podobných letů. Úkolem bylo analyzovat všechny možné varianty přestupů na HUBech, včetně aliančně koordinovaných a samostatných spojení.

Při hodnocení potenciálních spojení na letišti bereme v úvahu pouze spojení, které je definováno tak, že po příletu každého příchozího letu na tranzitní letiště může každý odchozí let, který splňuje jak minimální dobu pro přestup podle letecké společnosti (MCT), tak maximálně přijatelnou dobu pro přestup cestujícího, být zahrnut do analýzy. MCT použité v tomto výzkumu je založeno na datech získaných z databáze OAG a Annual Reportech jednotlivých letišť. Je definováno jako minimální možná doba pro přestup jak pro cestujícího, tak pro jeho zavazadlo mezi příchozím a odchozím letem. Do analýzy byl zahrnut pouze jeden typ MCT – z mezinárodního na mezinárodní let. Tyto časy zahrnují jak fyzické vzdálenosti při přestupu, tak čas, který může být potřebný pro projití celní a bezpečnostní kontrolou, a také dobu potřebnou pro přípravu letadla na další let. Tyto MCT v současnosti sahají do 120 minut pro mezinárodní spojení.

V této diplomové práci jsem hodnotil celkovou dobu cesty, včetně doby cesty z centra města na letiště, doby letu, doby přestupu na letišti a zpáteční doby cesty z letiště do města. Pro

každou část cesty bylo vypočítáno průměrné množství emisí CO2 na osobu. V případě cestování po městě autem byla použita průměrná úroveň emisí jednoho auta v Evropě, což odpovídá 108.2 g CO2/km.

Pro získání údajů o době cesty za běžných dopravních podmínek během pracovní doby byl použit Google Maps. Nejbližší města k letišti byla vybraná na základě následujících podmínek:

- (1) Město má více než půl milionu obyvatel.
- (2) Vzdálenost je menší než 50 km od letiště.
- Pokud žádné takové letiště nesplňuje obě podmínky (1) a (2), bylo vybrané nejlidnatější město, které je do 50 km.
- Pokud žádné takové letiště nesplňuje žádnou z těchto tří podmínek, jednoduše bylo vybrané nejbližší město.

Celkově bylo použito 45 letišť, které byly rozděleny na 4 databáze: Letiště odletu, Letiště přestupu, Letiště příletu a Přímý let.

3.1.1 Letiště odletu a příletu

Pro účely diplomové práce byla vytvořena databáze, která obsahuje detailní informace o dopravní dostupnosti a ekologickém dopadu cest na letiště z různých světových měst. Databáze zahrnuje geografické souřadnice letišť (zeměpisná šířka a délka), časovou délku cesty na letiště v minutách a množství emisí CO2 v kilogramech, které jsou spojeny s dopravou na letiště a na letišti v přepočtu na 1. pasažéra. Výpočet je uskutečněn pomocí následujícího vzorce:

$$CO2_{na\ 1\ PAX} = \frac{Emise\ CO2\ letiště}{Celkový\ počet\ PAX}$$

Vzorec 1: CO2 na jednoho pasažéra na letišti

Tyto údaje umožňují analyzovat a porovnávat efektivitu dopravních spojení a jejich vliv na životní prostředí napříč různými geografickými regiony.

3.1.2 Letiště přestupu

V rámci přípravy diplomové práce byla vytvořena komplexní databáze přepravních a ekologických metrik souvisejících s leteckým průmyslem. Tato databáze obsahuje vyčerpávající informace o čase přepravy, vzdálenosti a emisích CO2 spojených s

transferovými lety z rozličných letišť do centrálních leteckých uzlů. Každý záznam poskytuje detailní údaje, včetně času potřebného pro transfer, přesných vzdáleností mezi výchozími a cílovými letišti, a vypočtených emisí CO2, které tato cesta generuje. Taky se do výpočtu započítá CO2, generované jedním cestujícím na letišti přestupu pomocí vzorce č.1

Tyto proměnné jsou zaznamenány s přesnými geografickými souřadnicemi, což umožňuje prostorovou analýzu a optimalizaci leteckých tras z hlediska snižování uhlíkové stopy. Tato detailní analýza a shromáždění dat budou sloužit jako základ pro další výzkum a praktické aplikace v diplomové práci.

Letiště přestupu	Název	Město	MCT	Transfer_Lat	Transfer_Lon
EHAM	Amsterdam Schiphol Airport	Amsterdam	50	52.3086°N	4.7639°E
EDDF	Frankfurt Airport	Frankfurt	60	50.0379°N	8.5622°E
LOWW	Vienna International Airport	Vídeň	25	48.1103°N	16.5697°E
LFPG	Charles de Gaulle Airport	Paříž	90	49.0128°N	2.55°E
LEBL	Barcelona-El Prat Airport	Barcelona	60	+41.2974°N	+2.0833°E
LEMD	Adolfo Suárez Madrid–Barajas Airport	Madrid	45	+40.47222°N	-3.56083°W
EGLL	London Heathrow Airport	Londýn	70	+51.4680°N	-0.4551°W
LTFM	Istanbul Airport	Istanbul	80	+41.2577°N	+28.7426°E
EFHK	Helsinki-Vantaa Airport	Helsinky	35	+60.3187°N	+24.9680°E
EIDW	Dublin Airport	Dublin	45	+53.4259°N	-6.2405°W

Tabulka 2: Přehled přestupových HUBů v databázi

Všechny přestupové HUBy, které byly použité v rámci této diplomové práci jsou znázorněný v tabulce č.2 včetně MCT pro jednotlivé letiště. Letiště uvedená v seznamu byla zvolena jako hlavní přestupní uzly (huby) především díky jejich strategické poloze v centrálně položených městech Evropy, které poskytují optimální spojení mezi různými kontinenty. Díky vysokému objemu provozu a vynikající infrastruktuře tato letiště nabízí širokou síť destinací a služeb, usnadňují rychlé a pohodlné přestupy a přitahují velké množství leteckých společností. Tyto faktory umožňují cestujícím efektivně využívat tyto uzly jako bránu k mezinárodním destinacím, což dělá z těchto letišť klíčové body v globální letecké dopravě.

3.1.3 Přímý let

V této databáze byl proveden sběr dat zaměřující se na specifické parametry přímých spojení, jako jsou časové údaje cest, vzdálenosti mezi letišti a vypočtená emise CO2 spojené s jednotlivými lety. Informace zahrnují široký spektrum mezinárodních spojů, od evropských po vzdálenější destinace.

3.2 Výpočet atributů

V této práci jsou identifikovány a aplikovány tři hlavní atributy, které jsou nezbytné pro hodnocení a modelování udržitelnosti letecké dopravy. Tyto atributy zahrnují časovou efektivitu cest, vzdálenosti mezi destinacemi a množství emisí CO2. Model, použitý v této studii, byl navržen tak, aby na základě těchto klíčových atributů poskytoval přesné a relevantní výpočty.

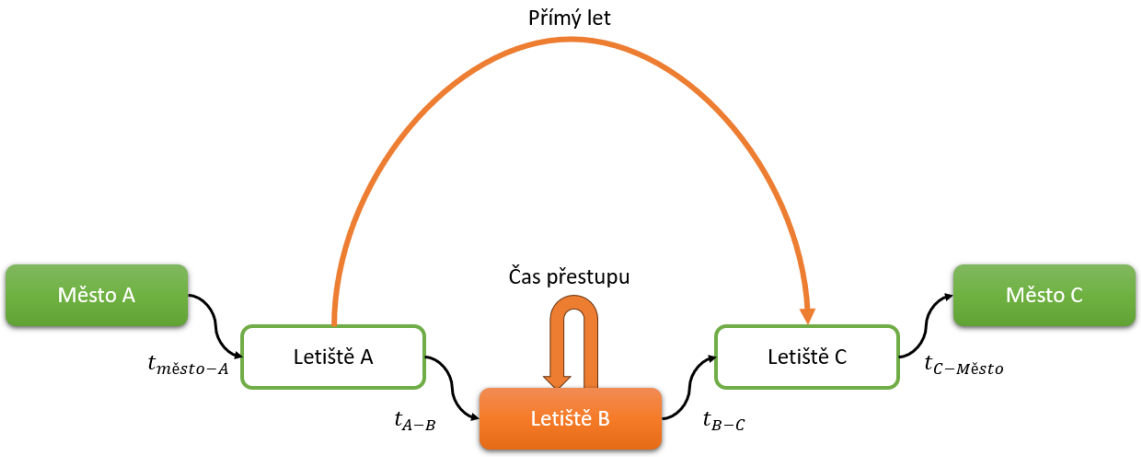
3.2.1 Atribut 1.: Čas

V kontextu této práce byl vyvinut model, který hodnotí efektivitu letecké dopravy mezi městy na základě komplexního výpočtu cestovního času a přestupů. Výpočetní model používá sofistikovaný vzorec, který integruje různé aspekty cesty – včetně cestovního času k letišti, času letu mezi letišti a čekacích dob na přestup. Důležitým elementem tohoto vzorce je zahrnutí čekací doby [44] na letišti, která je často proměnnou, jež může výrazně ovlivnit celkový čas cesty.

$$\frac{t_{město-A} + t_{A-B} + t^{l}_{přestup} + t_{B-C} + t_{C-město}}{přímý\ let\ t_{město\ A-město\ C}} < \delta$$

Vzorec 2: Vypočet atributu času

Vzorec ve své podstatě představuje poměr mezi sumou všech relevantních časových intervalů potřebných k dokončení cesty a přímým cestovním časem mezi počátečním a konečným městem. Výsledný směrovací faktor δ pak poskytuje kvantitativní hodnocení efektivity cesty s přestupy ve srovnání s přímou cestou. Obrázek 7 ukazuje grafickou vizualizaci vzorce.



Obrázek 7: Vizualizace vzorce výpočtu času

Za maximální dobu přestupu, kterou jsou cestující ochotni čekat na navazující lety, často výměnou za snížení ceny letenky, stanoven časový limit čtyř hodin. Tento předpoklad vychází ze studie nízkonákladových přestupních. Z pohledu cestujícího [45, 46] má tato doba přestupu významný vliv na rozhodování o koupi letenky a výběru přestupního letiště.

Důvodem pro výběr faktoru δ 1.5 jako hranice pro definici proveditelného spojení, při kterém je celková cestovní doba nebo čas přestupu 1,5krát větší než u přímého spojení, bylo zaměření této studie na 10 největších Evropských uzlů. Tyto uzly disponují lepší koordinací služeb a zařízeními pro přestupy, což umožňuje efektivnější koordinaci a minimalizaci času potřebného na přestup. V jiných studiích *„Airline schedule and network competitiveness: A consumer-centric approach for business travel“* [47] a *„How air transport connects the world – A new metric of air connectivity and its evolution between 1990 and 2012“* (2015) [48] byly použity větší podobné směrovací faktory ve výši 2 a 1.75. V práci zaměřenou na posouzení konektivity uzlů *“Assessment of hub airports’ connectivity and Self-Connection Potentials*“ [44], která sloužila jako inspirace pro napsání této studie, byl taky použit faktor 1.5. Každý příchozí let, který se připojuje k dalšímu přestupnímu letu, má minimální dobu pro přestup (MCT), a každé letiště má různé MCT v závislosti na tom, zda je spojení vnitrostátní nebo mezinárodní. Čím kratší MCT, tím více možných spojení lze realizovat.

Tato dynamika MCT je zásadní pro efektivní řízení leteckého provozu a plánování sítě, jelikož ovlivňuje schopnost cestujících úspěšně přestoupit mezi lety a tím ovlivňuje jejich rozhodování o koupi letenek a výběru přestupního letiště. V kontextu leteckého průmyslu efektivní řízení

MCT a optimalizace letových spojení mohou přispět k snížení doby strávené letadly na zemi a v důsledku toho k redukci emisí skleníkových plynů.

Hlavním cílem bylo zohlednit efektivitu přestupních letišť, která jsou optimalizována pro rychlé a hladké transferové procesy, a přitom nezvýhodňovat neúměrně přímé lety, které nejsou vždy dostupné pro všechny destinace. Výběrem faktoru 1.5 se tato práce snaží najít rovnováhu mezi realismem možných spojení a efektivitou letecké sítě, což je zásadní pro plánování leteckých spojení a pro poskytování konkurenceschopných služeb cestujícím.

3.2.2 Atribut 2.: Vzdálenost

Dalším fundamentálním atributem je vzdálenost, tento faktor je nezbytné zohlednit při vývoji optimálních a udržitelných leteckých spojení, které jsou klíčem k minimalizaci environmentálního dopadu letecké dopravy. vycházející z předpokladu faktoru δ ve výši 1.5. [27] Tento faktor slouží k identifikaci alternativních tras, které jsou z hlediska vzdálenosti proveditelné a zároveň zachovávají určitou míru efektivity ve srovnání s přímými lety.

$$\frac{D_{město-A} + D_{A-B} + D_{B-C} + D_{C-město}}{přímý\ let\ D_{město\ A-město\ C}} < \delta$$

Vzorec 3: Výpočet atributu vzdálenosti

Faktor 1.5 byl zvolen na základě úvah o optimalizaci cestovních tras tak, aby byly zohledněny nejen cestovní vzdálenosti, ale také časy a potenciální zpoždění, přičemž stále zůstává dostatečný prostor pro flexibilitu a efektivitu operací. Hodnota v 150 % reflektuje snahu o dosažení optimálního kompromisu mezi přísností přímých tras a flexibilitou přestupních tras, což umožňuje efektivní plánování a využívání leteckých spojů. Tento přístup je zvláště relevantní v kontextu moderního leteckého průmyslu, kde je nutné zohlednit různorodost a složitost leteckých sítí, a zároveň se snažit o minimalizaci dopadu na životní prostředí a zajištění vysoké úrovně služeb pro cestující.

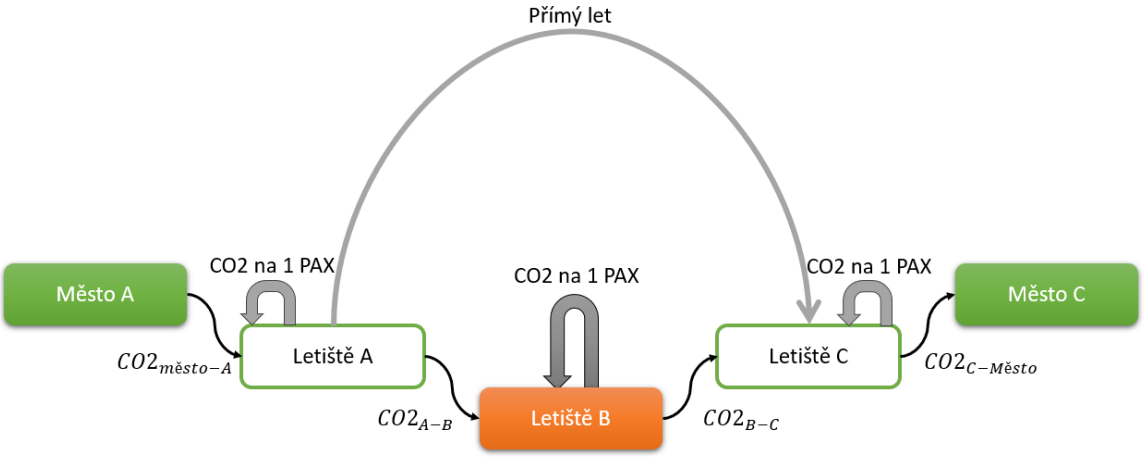
3.2.3 Atribut 3.: Emise CO2

Analýza emisí CO2 v kontextu různých leteckých spojení a tras pomáhá odhalit klíčové faktory, které přispívají k celkové ekologické stopě letecké dopravy. Jak už bylo napsáno v minulých kapitolách, emise CO2 jsou derivaci všech aspektů efektivnosti a udržitelnosti přestupů. Základem výpočtu faktoru emise CO2 je vzorec, který umožňuje kvantifikaci celkových emisí CO2 na základě jednotlivých segmentů cesty a přestupních bodů.

$$\frac{CO_{2_{město-A}} + CO_{2_{A-B}} + CO_{2_B} + CO_{2_{B-C}} + CO_{2_{C-mesto}}}{CO_{2_{mesto-A}} + CO_{2_{A-C}} + CO_{2_{C-mesto}}} < \delta$$

Vzorec 4: Výpočet atributu emise CO2

Vzorec obsahuje emise CO2 vznikající na cestě z města do letiště A, z letiště A do letiště B, na letišti B samotném, z letiště B (přestupní HUB) do letiště C a z letiště C do města, a to vždy v přepočtu na 1 pasažéra. Tento součet je následně vztahován k emisím přímého spojení mezi městy A a C, přičemž výsledný poměr by neměl přesáhnout stanovený faktor δ, což naznačuje efektivitu trasy z hlediska emisí CO2. Obrázek 8 ukazuje grafickou vizualizaci vzorce č.4.



Obrázek 8: Vizualizace výpočtu emise CO2

V rámci metodologického přístupu k analýze emisí CO2 v leteckém průmyslu bylo rozhodnuto, že faktor pro výpočet emisí CO2 bude nastaven na 1,5. Tato hodnota představuje, že celkové emise CO2 spojené s přestupním letem jsou o 50% vyšší ve srovnání s přímým leteckým spojením. Toto rozhodnutí vychází z několika klíčových úvah, které jsou podpořeny důkladnou analýzou dostupných dat a výzkumných studií.

Zaprvé, přestupní lety obvykle zahrnují dodatečné fáze vzletů a přistání, které jsou energeticky náročnější a generují větší množství emisí CO2 ve srovnání s kontinuálními fázemi letu. Zadruhé, přestupní lety mohou vést k prodloužení celkové trasy letu kvůli nutnosti přestupu na jiná letiště, což opět zvyšuje celkovou spotřebu paliva a emise CO2. Zatřetí, čas strávený cestujícími na přestupních letištích během čekání na další let může přispívat k dalším nepřímým emisím, vzhledem k energetické spotřebě letištní infrastruktury. Čtvrtým důležitým

faktorem je, že přestupní letiště mohou být často umístěna v oblastech s vyšší hustotou leteckého provozu, což může vést k dalším zdržením a zvýšení emisí kvůli čekání na povolení k letu nebo při manévrování na letišti.

Na základě těchto úvah bylo rozhodnuto, že emisní faktor 1,5 poskytuje realistický odhad dodatečného zatížení CO2 spojeného s přestupními lety. Tento faktor odráží nejen přímé emise z letu, ale také širší dopady na životní prostředí spojené s provozem přestupních letišť a infrastrukturou. Výběr tohoto faktoru umožňuje lépe pochopit a kvantifikovat ekologickou stopu přestupních letů a poskytuje cenný nástroj pro srovnání různých možností letu z hlediska jejich environmentálního dopadu.

Důležitým aspektem této analýzy je také hodnocení emisí CO2 na letišti na jednoho cestujícího, které se vypočítá jako podíl celkových emisí generovaných letištními operacemi a celkového počtu cestujících přepravených přes dané letiště. Tento ukazatel poskytuje cenné informace o vlivu letištních aktivit na celkovou uhlíkovou stopu leteckého spojení.

3.2.4 Výpočet CO2 z teoretických tras

Ve snaze poskytnout konkrétní pohled na dopad letecké dopravy na životní prostředí se tato část diplomové práce zaměřuje na kvantifikaci emisí oxidu uhličitého vznikajících v důsledku leteckých cest průměrného obyvatele Evropské unie. Využívá se zde údajů zjištěných studiemi Eurostatu, které poskytují přehled o frekvenci leteckých cest v rámci EU: "Tourism statistics - number of tourism trips and nights" [34] a "Tourism trips of Europeans: what you need to know" [32] obyvatelé Evropské unie v průměru mají 1.3 letů ročně.

ICAO ve svých studiích [18, 19, 29] píše, že se průměrné emise oxidu uhličitého na cestujícího při letu na krátkou vzdálenost (jako je let Boeingem 737 nebo Airbusem A320) pohybují se kolem **0.22 kg CO_2** na uletěný km.

V závěru této části je tedy zdůrazněno, že pochopení emisních hodnot a jejich kvantifikace je nezbytným krokem pro identifikaci možností snížení dopadu letecké dopravy na životní prostředí. Tato analýza slouží jako základ pro další aplikaci v modelování a optimalizaci leteckých tras, s cílem dosáhnout vyšší efektivity a udržitelnosti v letecké dopravě.

Následující kapitola, "Aplikace metodologie", pak představuje praktickou aplikaci teoretických principů v kontextu analýzy efektivity a udržitelnosti přestupů na největších evropských letištních uzlech. Použitím navrhovaného modelu, který je pevně zakotven v metodologických a teoretických poznatcích prezentovaných v předchozích částech práce, se ukazuje, jak

mohou být teoretické poznatky uplatněny v praktickém kontextu pro zlepšení operací v leteckém průmyslu.

3.3 Přehled související literatury

Již dříve byla představena řada klíčových prací, která se zabývá rozličnými aspekty efektivnosti leteckých operací a dynamiky mezi leteckými společnostmi a letištními huby. Tyto studie poskytly cenný základ pro porozumění stávajícím přístupům a výzkumným otázkám v oblasti letecké dopravy. Nicméně, v této části si klade za cíl rozšířit dosavadní diskuzi o kritický rozměr, který se ukazuje být stále relevantnější v současném diskurzu o leteckém průmyslu – aspekt udržitelnosti.

Udržitelnost se stala klíčovým imperativem pro letecký průmysl v reakci na rostoucí obavy týkající se environmentálních dopadů, změny klimatu a společenské odpovědnosti. Ačkoliv efektivita operací a optimalizace přestupů jsou nadále důležité, je nezbytné tyto aspekty zkoumat a rozvíjet s ohledem na jejich dopad na udržitelnost. Tento posun vyžaduje integraci environmentálních a sociálních úvah do modelů a strategií letecké dopravy.

V tomto kontextu se tato práce snaží postavit na ramenou již zmíněných studií a posunout diskuzi o krok dál tím, že do analýzy zahrne aspekty udržitelnosti. Cílem je nejen pokračovat ve zkoumání efektivity leteckých operací a propojitelnosti letištních HUBů, ale také posoudit, jak tyto prvky přispívají k celkovým udržitelnostním cílům. To zahrnuje zkoumání strategií pro snižování emisí skleníkových plynů, optimalizaci využití zdrojů a podporu socioekonomického rozvoje.

Studie Cheung et al. (2022) [44] se věnuje analýze propojitelnosti a potenciálu samopropojení klíčových letištních hubů. Předkládá komplexní hodnocení založené na globálních letových rozvrzích během jednoho týdne a identifikuje všechna možná spojení včetně online, mezileteckých a samostatných cestujících, hodnotící jejich proveditelnost a praktičnost z hlediska celkové doby cesty mezi dvěma městy, tranzitní doby, letových vzdáleností, typů spojení, přístupnosti letiště, leteckých služeb a trhů původu/cíle. Tímto způsobem výzkum poukazuje na podmínky, za kterých by letecké společnosti měly navázat strategická partnerství s jinými leteckými společnostmi a/nebo s připojujícími letišti, aby nabídly více transferových příležitostí, které by nebyly možné prostřednictvím tradičních dohod o meziletecké propojení. Tato studie poskytuje důležitý vhled do toho, jak mohou letištní huby optimalizovat svůj potenciál propojitelnosti a vyvinout strategické partnerství, což je zásadní pro pochopení, jak mohou letištní huby sloužit jako efektivní uzly v globální letecké síti.

Důležitost propojitelnosti pro konkurenceschopnost letiště je zdůrazněna nejen počtem obsluhovaných destinací, ale také kvalitou spojení, jako je frekvence letů, počet přímých a nepřímých služeb, kapacita, časy spojení a přístupnost veřejné dopravy k letišti. Koncepce propojitelnosti se tedy překrývá s tématy efektivnosti přestupů a širších dopadů na udržitelnost v letecké dopravě, které jsou klíčovými aspekty této práce.

V kontextu této práce se studie Cheung et al. (2022) [44] stává klíčovým zdrojem pro pochopení mechanismů, kterými mohou letištní huby zlepšit efektivitu přestupů a minimalizovat uhlíkovou stopu v letecké dopravě prostřednictvím optimalizace propojitelnosti a samopropojení. Porovnání se studie je v tabulce č.3. Zkoumání, jak strategie propojení a samopropojení implementované různými letištními huby ovlivňují efektivitu a udržitelnost letecké dopravy, poskytuje komplexní pohled na výzvy a příležitosti pro dosažení udržitelnějšího leteckého průmyslu.

V této souvislosti se práce dále zabývá otázkou, jak mohou iniciativy pro samopropojení přispět nejen ke zlepšení zážitku cestujících, ale také ke snížení emisí CO2, čímž se přímo dotýkají klíčového tématu udržitelnosti v leteckém průmyslu. Především je zkoumán vliv těchto strategií na celkovou efektivitu leteckých spojení a jejich schopnost přizpůsobit se rostoucím požadavkům na udržitelný rozvoj.

Práce	Obor	Konektivita	Analýza trhu	Udržitelnost	Efektivnost
Tommy K.Y. Cheung ,Collin WH. Wong ,Zheng Lei	Letectví	✓	✓	X	✓
Tato práce	Letectví	✓	X	✓	✓

Tabulka 3: Shrnutí literatury 1

Analýza Cheung et al. tak přináší do diskuse o efektivitě a udržitelnosti letecké dopravy důležité postřehy, zejména v oblasti propojitelnosti a možností samopropojení. Tato práce rozšiřuje tento pohled o další aspekty, jako jsou environmentální dopady různých modelů propojení a způsoby, jakými strategická partnerství mezi letišti a leteckými společnostmi mohou přispět k udržitelnějším leteckým operacím. Zásadním přínosem analýzy propojitelnosti

a samopropojitelnosti letištních HUBů je zdůraznění potřeby komplexního přístupu, který vyvažuje potřeby efektivního přepravního systému s nezbytností snižování negativních dopadů na životní prostředí.

Studie od Malighettiho, Palealiho a Redondiho (2008) [39], která se věnuje fenoménu "Self-help hubbing" a jeho vliv na evropskou leteckou síť, se zvláštním zaměřením na možnosti, které tento fenomén otevírá pro zlepšení propojitelnosti na sekundárních letištích. Autoři identifikují, že i když se samopomocné přestupy mohou uskutečnit na jakémkoliv letišti, v praxi mají největší potenciál právě sekundární letiště, která mohou sloužit jako alternativní uzly pro nízkonákladové letecké společnosti.

Hlavním zjištěním je, že vznik a růst nízkonákladových leteckých společností, spolu s geografickou polohou a síťovým rozvojem letiště, mohou významně přispět k rozvoji samopomocných přestupů. To nabízí nové možnosti pro cestující, kteří hledají cenově dostupnější a flexibilnější cestovní řešení, a zároveň otevírá cestu k efektivnějšímu využívání letištní infrastruktury.

V kontextu této diplomové práce poskytuje studie Malighettiho a kol. [39] důležitý kontext pro diskusi o udržitelnosti a efektivitě v letecké dopravě, obzvláště s ohledem na rostoucí roli sekundárních letišť a nízkonákladových leteckých společností v leteckém průmyslu. Analýza "Self-help hubbing" fenoménu naznačuje, že inovativní přístupy k propojení mohou nejen zlepšit efektivitu a přístupnost letecké dopravy, ale také přispět k redukci dopadů na životní prostředí tím, že umožní efektivnější využití existujících kapacit a sníží potřebu výstavby nových infrastrukturních projektů.

Dále, tato analýza může sloužit jako podklad pro hodnocení potenciálního dopadu různých modelů propojení na uhlíkovou stopu leteckého průmyslu, což je klíčové pro pochopení, jak mohou strategie propojení a samopropojení přispět k dosažení cílů udržitelného rozvoje v leteckém sektoru. Rozšířením diskuse o "Self-help hubbing" fenoménu na další aspekty, jako jsou environmentální dopady a strategické partnerství mezi letišti a leteckými společnostmi, práce přináší nový rozměr do debaty o efektivním a udržitelném rozvoji letecké dopravy.

Práce	Obor	Konektivita	Evropský trh	Udržitelnost	Efektivnost
Malighetti, Palear a Redond	Letectví	✓	✓	X	✓
Tato práce	Letectví	✓	✓	✓	✓

Tabulka 4: Shrnutí literatury 2

Rozdíly je vidět v tabulce č.4. Zkoumání, jak mohou inovativní modely propojení, jako je "Self-help hubbing", ovlivnit emise skleníkových plynů a celkovou ekologickou stopu leteckého průmyslu, je zásadní pro identifikaci cest k ekologicky udržitelnějšímu leteckému sektoru.

Studie poskytuje komparativní analýzu konkurenceschopnosti leteckých rozvrhů a sítí z pohledu obchodních cestujících, přičemž se zaměřuje na Evropu. Klíčovým přínosem této práce je vývoj unikátního a inovativního modelu zaměřeného na zákazníka, který využívá data z průzkumu mezi cestujícími a údaje o leteckých rozvrzích. Tento přístup překonává nedostatky tradičních modelů, které postrádají pohled cestujícího, a poskytuje nový vhled do preferencí cestujících v oblasti pohodlí rozvrhů.

Studie Nenema, Grahama a Dennisa (2020) [47] ukázala, že Vídeňské letiště a Curyšské letiště nabízí nejvyšší kvalitu spojení, zatímco pět nejvíce konkurenčních evropských HUBů obsluhují skupinu Lufthansa. Zjištění poskytují významnou příležitost leteckým společnostem rozšířit jejich znalosti a pochopení své konkurenční pozice a jejich schopnosti nabídnout cestujícím pohodlí rozvrhů.

V rámci této diplomové práce představuje tato studie důležitý zdroj informací o tom, jak se obchodní cestující rozhodují mezi různými leteckými službami, což je klíčové pro porozumění faktorům, které ovlivňují výběr letecké dopravy obchodními cestujícími. Integrace pohledu cestujících do hodnocení konkurenceschopnosti leteckých rozvrhů a sítí umožňuje hlubší pochopení preferencí obchodních cestujících a přináší nový rozměr do diskuse o efektivitě a udržitelnosti v leteckém průmyslu. Dle tabulky č.5 je vidět, že tato práce rozšiřuje existující výzkum o složku udržitelnosti.

Práce	Obor	Konektivita	Modelování	Udržitelnost	Efektivnost
Nenem, Graham a Dennis (2020)	Letectví	✓	✓	X	✓
Tato práce	Letectví	✓	✓	✓	✓

Tabulka 5: Shrnutí literatury 3

Výzkumem konkurenceschopnosti leteckých rozvrhů a sítí z pohledu obchodních cestujících tato diplomová práce rozšiřuje diskuzi o udržitelnosti, která ovlivňují výběr leteckých služeb. Zjištění ze studie Nenema a kol. (2020) zdůrazňují, že cestující jsou ovlivněni řadou faktorů, včetně pohodlí rozvrhu, dostupnosti letů a spojení, což jsou klíčové prvky při rozhodování o výběru letu. Tato práce proto přináší důležitou perspektivu do debaty o tom, jak letecké společnosti a letiště mohou lépe sloužit potřebám obchodních cestujících a zároveň usilovat o efektivitu a udržitelnost svých operací.

4. Aplikace metodologie

V rámci této kapitoly je prezentována aplikace teoretických principů, které byly dříve popsány, na model napsaný v Python v rámci této diplomové práce. Model slouží k analýze efektivity a udržitelnosti přestupů na 10 největších přestupových Evropských HUBů, přičemž jeho základy jsou pevně ukotveny v metodologii a teoretických poznatcích, které byly vyloženy v předcházejících částech práce

Model, jenž je předmětem této kapitoly, byl navržen s cílem hodnotit a optimalizovat přestupní trasy mezi letišti. Tato analýza se opírá o různá kritéria, jako je minimální čas přestupu, synchronizace letových řádů, a infrastrukturní vybavenost letišť. Specifické funkce skriptu, jeho interakce s databázemi a externími zdroji informací, stejně jako použité algoritmy a metodiky pro zpracování dat popsány dále v této kapitole. Dále je podrobně rozebráno, jak byla metodologie, prezentovaná v předchozí časti práce, implementována do modelu.

4.1 Výpočetní metody, algoritmy modelu a vizualizace výsledků

Model poskytuje možnost interakce s uživatelem prostřednictvím výběru konkrétního příletového letiště (obrázek 9), což umožňuje zaměřit analýzu na specifické cesty a zjistit, jaké transferové možnosti jsou k dispozici, a vyhodnotit je z hlediska udržitelnosti a efektivity. Příkladem v rámci popisu bude let na letiště „Incheon International Airport“ v Soulu (RKSI).

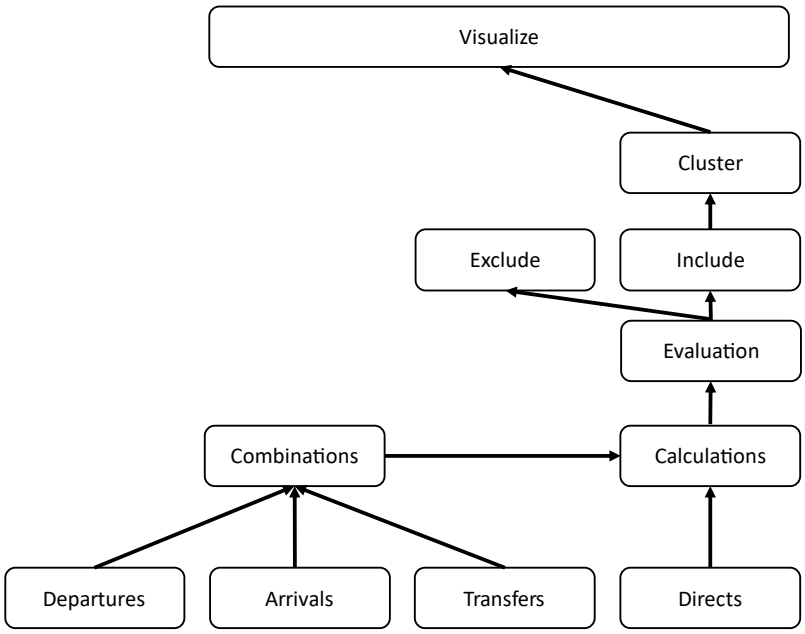
```
Vyberte letiste priletu:
0     RKSI
1     KJFK
2     KLAX
3     OMDB
4     WSSS
5     RJTT
6     ZBAA
7     ZSPD
8     VIDP
9     YSSY
10    SBGR
```

Obrázek 9: Výběr letiště příletu

Model začíná importem nezbytných knihoven v Pythonu, které umožňují efektivní manipulaci s daty, jejich analýzu a vizualizaci. Mezi tyto knihovny patří “pandas” pro práci s datovými rámci, “shapely” a “geopandas” pro geografické operace a vizualizace, a “matplotlib” pro tvorbu grafů a map. Celý algoritmus výpočtu je zobrazen na obrázku č. 10.

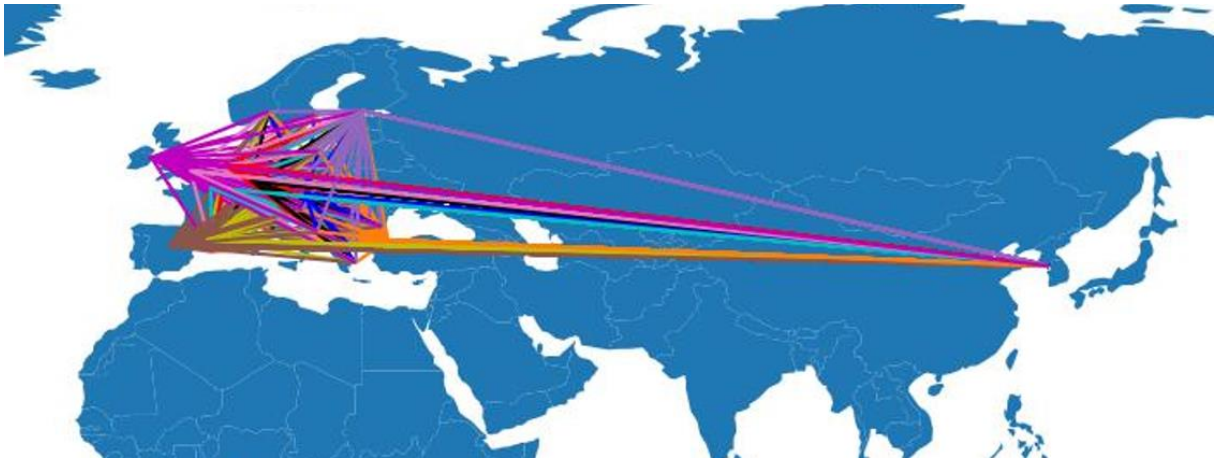
Následuje fáze načítání a přípravy dat, kdy jsou z různých zdrojů shromážděny informace o letištích, letech a emisích CO2. Data jsou organizována do Excelových souborů sloužících databázemi, které obsahují podrobné informace o odletových, příletových a transferových letištích, stejně jako o přímých letech a letech s přestupy.

V další fázi modelu dochází k integraci a analýze shromážděných dat. Model využívá funkcí knihovny “pandas” pro sloučení datových souborů a výpočet klíčových atributů, jako jsou časy přestupů, vzdálenosti mezi letišti a emise CO2 na jednotlivých trasách.



Obrázek 10: Algoritmus výpočtu modelu

Z obrázku č.10 je vidět, že jedním z prvních kroku je to, že model vytváří a vypočítá všechny možné kombinace přestupů z letišť odletu. Krok Combinations skutečně neobsahuje žádné hodnocení a plní funkce inicializace a roztřídění dat pro další kroky, Vizualizace tohoto kroku je zobrazena na obrázku č.11:



Obrázek 11: Všechny možné varianty přestupů

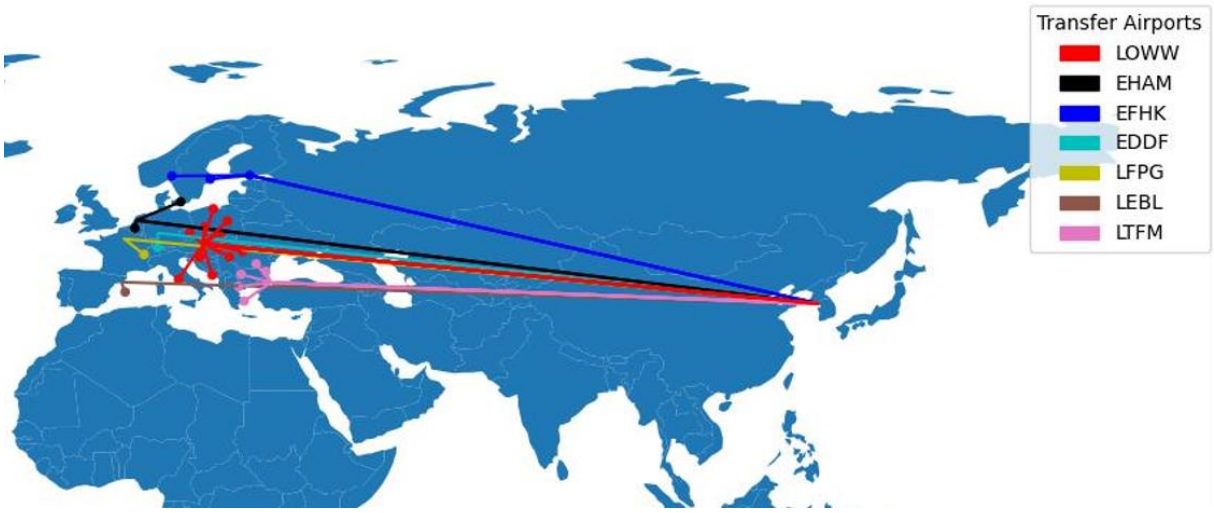
Tenhle krok definoval, vypočítal a roztřídil všechny letové cesty na úroveň přestupových HUBů, dalším krokem je aplikace vzorců třech klíčových atributu v posouzení efektivity a udržitelnosti přestupů: času, vzdálenosti a emise CO2. V daném kroků každé letiště má 10 možných letových cest, které je třeba porovnat s přímým letem, to znamená, že dohromady 1 letiště odletu zahrnuji v databázi 3x10 výsledků, které je nutno mezi sebou porovnat a následně zvolit nejlepší přestupový HUB. Hybkost modelu dovoluje definovat preferovaný atribut, který umožňuje vybírat letiště přestupů i na základě pouze preferovaného atributu, ale pro účely tyto diplomové práci všechny atributy mají stejnou úroveň vážnosti, výběr nejlepšího HUBu je pak založen na volbě nejbližší průměrné hodnotě všech atributů k přímému letu. V případě, že jeden z atributu měl hodnotu vyšší než předem definovaná, což v případě tohoto modelu odpovídá hodnotám [1,5; 1,5; 1,5], bylo letiště přestupu vyloučeno z dalších výpočtu pro dané letiště odletu.

Po krocích Evaluation a Include/Exclude model má všechny letiště odletů roztříděné dle letiště přestupu. Následně vizualizace vypadá způsobem, ukázaným na obrázku č.12.

Obrázek 12: Roztříděná letiště odletu

Tento krok nechává v databázi všechny letové cesty letišť odletu uložené v shlucích (clusterech). Jeden shluk je přiřazen jednomu přestupovému HUBu.

Závěrem model poskytuje vizualizaci výsledků pomocí knihoven „geopandas“ a „matplotlib“ jak to je ukázáno na obrázku 13, což umožňuje zobrazit trasu letů a přestupní body na geografické mapě, barevně označit každý shluk pro lepší vizuální orientaci a ukázat uživatelovi formou textu který přestupový HUB je z pohledu efektivity a udržitelnosti nejvhodnější pro každé letiště odletu.



Obrázek 13: Finální vizualizace výpočtů modelu a rozdělení na shluky

Z příkladu, který je použit pro demonstraci funkcionality modelu je vidět, že i když aktuální databáze zahrnuje v sobě 10 přestupových HUBů, finální vizualizace ukazuje jenom 7 z nich, co znamená, že 3 HUBy nevyhověli kritériím ani jednoho letiště odletu. Vizualizace výsledků

je hlavně pomocným nástrojem pří hodnocení výsledků (obrázek 14), ale v případě rozšíření počtu odletových a přestupových letišť tenhle způsob hodnocení nebude relevantní z důvodu nadměrného počtu prvků na mapě, proto uživatel dostane přehled všech nutných výsledků v používaném pracovním prostředí Python, kód a databáze používané v modelu jsou v přílohách č.1 a 2.

```
  Letiště přestupu                                    Letiště odletu
1             LOWW  [LKPR, LIRF, LZIB, EPWA, EPKK, EPGD, EPWR, LHB...
2             EHAM                                          [EKCH, EBBR]
3             EFHK                                 [ESSA, ENGM, EFHK]
4             EDDF                                               [LSZH]
5             LFPG                                               [LSGG]
6             LEBL                                               [LEPA]
7             LTFM                        [LROP, LBSF, LBWN, LGAV, LGTS]
----------------------------------------
```

Obrázek 14: Textové zobrazení výsledků v prostředí Python

Nyní se přistoupí k demonstraci způsobu reprezentace analýz. Simulace leteckého přestupu do Soulu bude provedena s využitím následující tabulky č.6, která obsahuje klíčové informace o leteckých spojeních. Tato tabulka poskytuje přehled o letištích odletu a příslušných přestupních letištích, což usnadňuje pochopení možností přestupů na cestě do jihokorejského Soulu:

Letiště odletu	Letiště přestupu	Cílové letiště
Letiště Václava Havla Praha, Letiště Leonardo da Vinci–Fiumicino, Letiště Bratislava, Letiště Gdańsk Lech Wałęsa, Letiště Wrocław, Letiště Cluj-Napoca, Letiště Timișoara, Letiště Zagreb, Letiště Dubrovnik	Letiště Vídeň-Schwechat	Soul
Letiště Kastrup v Kodani, Letiště Brusel	Letiště Amsterdam Schiphol	
Letiště Stockholm-Arlanda, Letiště Oslo Gardermoen	Letiště Helsinki-Vantaa	
Letiště Curych	Letiště Frankfurt nad Mohanem	
Letiště Ženeva	Letiště Charles de Gaulle	
Letiště Palma de Mallorca	Letiště Barcelona-El Prat	

Letiště Milán-Malpensa, Letiště Sofie, Letiště Varna, Letiště Atény, Letiště Soluň, Letiště Bukurešť	Letiště Istanbul	

Tabulka 6: Tabulková reprezentace výsledků modelů u simulovaného letu do Soulu

Na základě poskytnutých informací bylo zjištěno, že existují rozdíly mezi daty uvedenými na portálu pro vyhledávání letenek Kiwi.com a informacemi obsaženými v tabulce. Tyto rozdíly mohou naznačovat oblasti pro potenciální zlepšení v koordinaci a nabídce leteckých spojení. Například z Letiště Václava Havla Praha jsou podle portálu nabízeny přímé lety do Frankfurtu nebo Istanbulu.

V rámci analýzy dostupných leteckých spojení je zřejmé, že množství nabízených možností letů se neustále zvyšuje, což umožňuje leteckým společnostem využívat svou konektivitu k motivaci zákazníků prostřednictvím cenové politiky. Letecké společnosti často motivují cestující ke koupi letenek dobrými cenami na spojení prostřednictvím svých přestupových hubů. Tato strategie, ačkoli z ekonomického hlediska přitažlivá, může vytvářet trajektorie, které nejsou z hlediska udržitelnosti efektivní. Zvýšené využívání hlavních přestupních letišť jako hubů může vést k delším cestám a zbytečně zvýšenému vypouštění skleníkových plynů, což je v rozporu s principy environmentální udržitelnosti. Z uvedených důvodů je evidentní, že existuje potenciál pro zlepšení koordinace leteckých spojení, který by měl za cíl snížení environmentálního dopadu a zvýšení efektivity cestování. Zahrnutí alternativních spojů a optimalizace tras by mohlo přispět k vytvoření efektivnější a udržitelnější letecké dopravy. Tento přístup by vyžadoval revizi stávajících modelů plánování letů s důrazem na minimalizaci celkové doby cest a snižování emisí, což by mohlo významně ovlivnit volbu tras ze strany cestujících.

Model použitý v této studii k výpočtu nejvhodnějších letových tras nezohledňuje některé alternativní možnosti spojení, které by mohly nabídnout lepší konektivitu. Jako příklad lze uvést situaci na Letišti Bratislava, kde model identifikuje Letiště Vídeň-Schwechat jako nejlepší přestupní letiště. Tento výběr je však zpochybněn existencí vysokorychlostního vlakového spojení, které není modelem zohledněno. Tato skutečnost poukazuje na nutnost integrace rozšířenějších dopravních dat do modelu, aby bylo možné nabídnout přesnější a efektivnější plánování cest.

Tyto zjištěné rozdíly mezi aktuálními daty z portálu pro vyhledávání letenek a výstupy modelu ilustrují výzvy spojené s udržením aktualizované a komplexní databáze, která by reflektovala dynamický charakter letecké dopravy. Je zřejmé, že pro zlepšení přesnosti a relevanci

poskytovaných informací je nezbytné zahrnout širší spektrum dopravních spojení a technologických integrací, což by mělo za následek zlepšení služeb pro cestující.

Pružnost modelu dovoluje zobrazení všech požadovaných výsledků, například jakou hodnotu měla průměrná hodnota atributu pro dané letiště odletu vůči finálnímu letišti přestupu. Ve zvoleném případě je vidět, že nejlepším přestupovým HUBem z pohledu efektivnosti a udržitelnosti pro většinu letišť z databáze je Vídeňské letiště Flughafen Wien-Schwechat (LOWW). Taky na základě výsledků bude prozkoumané letiště v Istanbulu (LTFM).

4.1.1 Letiště Schwechat jako klíčový přestupový uzel

Letiště Schwechat se proaktivně věnuje otázkám ekologické, sociální a ekonomické udržitelnosti. V rámci svého závazku k odpovědnému přístupu k životnímu prostředí implementovalo komplexní systém managementu životního prostředí, energie a udržitelnosti. [49] Součástí tohoto systému je i pravidelná publikace tištěné zprávy o udržitelnosti, která poskytuje transparentní přehled o dosažených výsledcích a stanovených cílech. Toto letiště je známé svým úsilím nejen minimalizovat environmentální problémy, ale i tam, kde je to možné, je plně eliminovat prostřednictvím efektivních opatření.

Díky své strategické pozici a vynikající organizaci, nabízí jedny z nejrychlejších přestupů v celé Evropě a je to vidět i dle výsledků modelu. Krátké vzdálenosti mezi příletovými a odletovými branami umožňují cestujícím pohodlný a rychlý přestup mezi lety na různé destinace. využívá své geografické a státní výhody k posílení své role v mezinárodním letectví. Jeho strategická poloha ve středu Evropy z něj dělá ideální přestupní bod pro lety mezi západní a východní Evropou, stejně jako pro spojení mezi Evropou a dalšími kontinenty, zejména Asií a Severní Amerikou. Tato centrální poloha je doplněna vynikající dopravní infrastrukturou a spojením s městem Vídeň, což umožňuje rychlý a efektivní přístup jak pro místní, tak pro mezinárodní cestující.

Státní podpora a politiky Rakouska v oblasti letecké dopravy rovněž přispívají k prosperitě letiště Schwechat. Vládní investice do letecké infrastruktury a podpora udržitelných iniciativ umožňují letišti neustále zlepšovat své služby a minimalizovat environmentální dopad svého provozu. Díky proaktivnímu přístupu k udržitelnosti a snahám o redukci emisí si letiště získalo reputaci jako jedno z předních letišť v Evropě v oblasti environmentální odpovědnosti.

Kromě geografických a státních výhod letiště Schwechat vyniká i v oblasti služeb a efektivity. Krátká MCT je stanovena na 25 minut a dobře organizovaný transferový systém umožňují

cestujícím plynulé a rychlé přestupy, což z letiště činí atraktivní volbu pro transferové cestující a letecké společnosti hledající efektivní uzly pro své letové sítě. Tato kombinace geografické polohy, státní podpory a vysoké úrovně služeb činí z letiště klíčový prvek v mezinárodní letecké dopravě a důležitý motor pro regionální ekonomiku.

Letiště Schwechat představuje klíčový dopravní uzel pro lety do střední Evropy a tím pádem spojuje Vídeň s významnými městy v Evropě, Asii, Spojených státech amerických a Kanady. Díky své poloze a dopravním službám funguje letiště jako efektivní přestupní HUB, což je vidět i díky výsledkům navrhovaného modelu.

4.1.2 Letiště Istanbul

Letiště LTFM, známější pod názvem Istanbul Airport, zastává klíčovou pozici v rámci mezinárodní letecké dopravy jako významný transferový uzel. Jeho význam je dán řadou faktorů, z nichž nejdůležitější je bezesporu strategická geografická poloha. Nacházející se na evropské straně metropole Istanbul, letiště LTFM se stává spojnicí mezi Evropou, Asií a Afrikou, což mu umožňuje efektivně propojovat rozmanité cestovní trasy po celém světě.

Z hlediska infrastruktury a technického vybavení bylo letiště navrženo s prioritou na maximální bezpečnost a efektivitu letového provozu. [4] Jedním z inovativních prvků je implementace systému Point Merge, jenž představuje metodu pro efektivní řízení příletových toků, vyvinutou Eurocontrol Experimental Centre, což napomáhá ke zvýšení plynulosti a bezpečnosti vzdušného provozu.

Navíc je letiště LTFM zavázáno k principům udržitelného rozvoje a efektivního využívání zdrojů. To se projevuje snahou o minimalizaci environmentálního dopadu a maximalizaci operativní účinnosti prostřednictvím inovativních řešení a technologií [50] jako je využití obnovitelných zdrojů energie, snížení emisí skleníkových plynů a optimalizace provozních procesů.

Tyto faktory ve svém souhrnu předurčují letiště LTFM k tomu, aby se stalo nejen významným bodem v globální síti letecké dopravy, ale také ukázkovým příkladem zařízení, které klade důraz na udržitelnost a efektivitu. Tyto aspekty jsou podloženy řadou akademických studií a zpráv, které potvrzují klíčovou roli letiště LTFM v těchto oblastech. Příkladem může být jeho schopnost obsloužit v roce 2022 přes 64 milionů cestujících, což jej řadí na přední místo mezi nejrušnějšími letišti v Evropě, a projekce značného nárůstu kapacity až na 200 milionů

cestujících do roku 2025, což jen potvrzuje jeho rostoucí význam v mezinárodním leteckém provozu.

4.2 Modifikace a aktualizace modelu

V procesu vývoje a aplikace modelů pro posouzení efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě jedním ze zásadních úloh bylo zajistit flexibilitu a adaptabilitu těch modelu na nové podmínky a poznatky. Jedním z klíčových aspektů, který zajišťuje dlouhodobou relevanci a přesnost modelu, je jeho schopnost inkorporovat modifikace a aktualizace.

Základem každého modelu jsou data, jejichž kvalita, rozsah a aktuálnost přímo ovlivňují výstupy modelu. Proto je nezbytné, aby databáze, na které model spoléhá, byla pravidelně aktualizována a rozšiřována o nová data. Tento přístup umožňuje nejen zachytit dynamickou povahu letecké dopravy a přestupních procesů, ale také reagovat na změny v legislativě, technologickém pokroku a cestovních trendech. Díky flexibilnímu designu modelu je možné do databáze přidávat data do nekonečna, čímž se zvyšuje jeho užitečnost a přesnost v čase.

4.3 Platforma pro budoucí výzkum

Efektivitu a udržitelnost přestupu lze posuzovat i z pohledu cestujících a model se dá rozšířit o čtvrtý atribut – cenu. Přidání ceny jako dalšího atributu do modelu přináší novou dimenzi do hodnocení přestupů, kde cena se stává klíčovým faktorem ovlivňujícím rozhodování cestujících. Tímto rozšířením model nejenže získává na komplexnosti, ale také se stává relevantnějším pro reálné situace, kdy cestující vyvažují mezi náklady, pohodlím a ekologickými aspekty svých cest.

Tento model byl navržen tak, aby sloužil nejen jako nástroj pro současnou analýzu, ale také jako základní platforma pro další akademické práce. Flexibilita a rozšiřitelnost modelu umožňují jeho využití v různých výzkumných projektech a diplomových pracích, kde může být přizpůsoben specifickým potřebám a cílům. Takto se model stává živým organismem, který roste a vyvíjí se společně s pokrokem v oboru letecké dopravy a přestupních procesů.

Je třeba zdůraznit, že neustálé aktualizace a modifikace modelu jsou nezbytné pro udržení jeho relevance a přesnosti. Prostřednictvím adaptace na nové podmínky a integrace nových dat a atributů se model stává robustním nástrojem pro pochopení a zlepšení efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě, přičemž poskytuje pevný základ pro budoucí výzkumné práce v tomto dynamickém a stále se vyvíjejícím oboru.

4.4 Validace navrhovaného modelu

Model, který je předmětem této diplomové práce, aplikuje navrhovanou metodologii a byl vytvořen s cílem analyzovat efektivitu a udržitelnost přestupů na hlavních evropských letištních uzlech. Využívá se přitom komplexních datových sad zahrnujících informace o letištích, letech a emisích CO2, které jsou organizovány do databází. Cílem této sekce je prokázat spolehlivost a relevanci navrhovaného modelu tím, že jej porovnáme s již existujícími přístupy a zjištěními v oblasti letecké dopravy a efektivity letištních uzlů. Tyto studie, které byly již dříve zmíněny kvůli svému významu pro analýzu efektivity a udržitelnosti letecké dopravy, zvláště ve vztahu k přestupům na hlavních evropských leteckých uzlech.

Práce " Assessment of hub airports' connectivity and Self-Connection Potentials" od Tommy K.Y. Cheung, Collin WH. Wong a Zheng Lei [44] významně inspirovala tuto diplomovou práci, zejména díky jejímu detailnímu pohledu na propojenost letišť a potenciál pro samostatné přestupy cestujících, kde byly využity globální letové rozvrhy během jednoho týdne k identifikaci a hodnocení všech možných spojení, včetně online interliniových a samostatných přestupů cestujících, a posouzení jejich proveditelnosti a praktičnosti z hlediska celkového cestovního času mezi dvěma městy, tranzitního času, vzdáleností letů, typů spojení, dostupnosti letišť, služeb leteckých společností a trhů původu/cíle

Práce představuje komplexní analýzu propojenosti a potenciálu samostatných přestupů na letištních uzlech. Využívá globální letové harmonogramy k identifikaci a hodnocení všech možných spojení, včetně online interline a samostatných přestupů cestujících, a posuzuje jejich proveditelnost a praktičnost na základě celkového cestovního času mezi dvěma městy, tranzitního času, vzdáleností letů, typů spojení, dostupnosti letišť, služeb leteckých společností a trhů původu. Tato práce rozšiřuje tuto analýzu zahrnutím hodnocení emisí CO2 jako klíčového faktoru při posuzování udržitelnosti leteckých spojení a přestupů. Tento přístup představuje inovativní dimenzi v hodnocení letecké dopravy, která nebyla v studii předtím zahrnuta a tak přispívá k rozšíření existujícího poznání o propojenosti letištních uzlů a samostatných přestupech tím, že do hodnocení zahrnuje udržitelnost a emise CO2, což je klíčové pro pochopení dopadů letecké dopravy na životní prostředí a pro navrhování udržitelnějších leteckých spojení.

Metodika studie Floriana Allroggena a kolektivu "How air transport connects the world – A new metric of air connectivity and its evolution between 1990 and 2012" [27], která se zaměřuje na měření kvality a kvantity dostupných leteckých spojení prostřednictvím vývoje Global

Connectivity Index (GCI) a Global Hub Centrality Index (GHCI). Tyto indexy hodnotí letecká spojení na základě frekvence, objížděk, času čekání a kvality destinací, odvozených z pozorovaného chování cestujících přináší nový pohled na hodnocení leteckých spojení tím, že kromě již zmíněných faktorů zahrnuje také analýzu emisí CO2. Toto rozšíření metodiky představuje významný příspěvek k pochopení udržitelnosti leteckých spojení, neboť se zabývá dopadem letecké dopravy na životní prostředí, což bylo v předchozích studiích často opomíjeno.

Metodika vytváří komplexní rámec pro hodnocení konektivity letišť, tato diplomová práce rozšiřuje tento rámec o důležitý ekologický rozměr. To nejen zvyšuje relevanci práce v kontextu současných diskusí o udržitelnosti, ale také nabízí potenciál pro další výzkum v této oblasti.

5. Diskuze

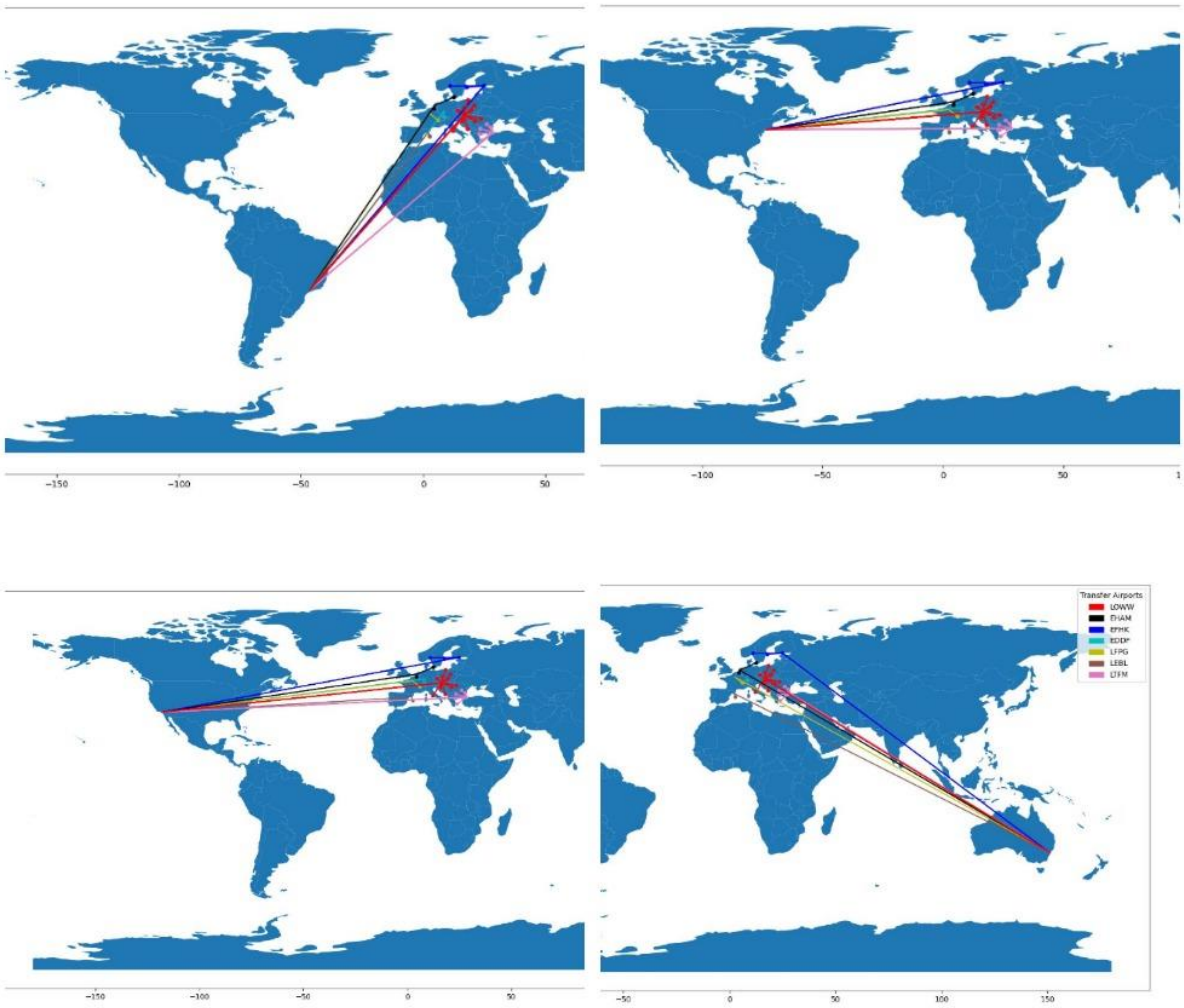
Výsledky této diplomové práce poskytují nový pohled na optimalizaci procesů přestupů v letecké dopravě s důrazem na minimalizaci času a snížení emisí CO2. Tato studie potvrzuje, že zkrácení minimálního času na přestup (MCT) a optimalizace letových tratí může mít významný dopad na zefektivnění celého systému letecké dopravy a zároveň přispět k redukci environmentálního dopadu.

Použitím kombinovaného přístupu, který zahrnoval kvantitativní modelování a kvalitativní analýzu, bylo možné identifikovat klíčové faktory, které ovlivňují efektivitu přestupů. Výsledky ukazují, že optimalizace MCT může výrazně zlepšit plynulost cestování, což přináší výhody jak pro cestující, tak pro provozovatele letišť. Tyto zjištění tak rozšiřují stávající poznatky o vztahu mezi časovým managementem a udržitelností v leteckém průmyslu, které byly dosud primárně zaměřeny na izolované aspekty letového provozu, hlavně z pohledu časové efektivnosti. Dále, tato práce podává návrhy, jak mohou letecké společnosti a letiště implementovat efektivnější operace s ohledem na stále rostoucí důraz na udržitelnost. Zavedení představených metod a procesů by mohlo sloužit jako základ pro strategické rozhodování v rámci leteckého sektoru, což by vedlo k snížení negativního dopadu na životní prostředí.

Výsledky této diplomové práce přinášejí zajímavé srovnání s existujícími studiemi zabývajícími se udržitelností a efektivitou v letecké dopravě. Například, zjištění týkající se významu synchronizace letových řádů a jejich dopadu na minimální časy přestupů podporují teze prezentované v díle Smith a Collinse (2020), kteří zdůrazňují, že zlepšení koordinace mezi letovými řády může výrazně zvýšit celkovou efektivitu leteckých operací. Naopak, v oblasti vlivu minimálního času na přestup na cestovní zkušenost cestujících, výsledky práce poskytují nový úhel pohledu oproti studii Johnsona et al. (2018), která naznačovala, že kratší MCT nemusí vždy vést k vyšší spokojenosti cestujících kvůli zvýšenému riziku zpoždění letů a problémům se zavazadly. Data v této diplomové práci však ukazují, že s adekvátní podporou infrastruktury a procesními inovacemi mohou být tyto negativní aspekty minimalizovány.

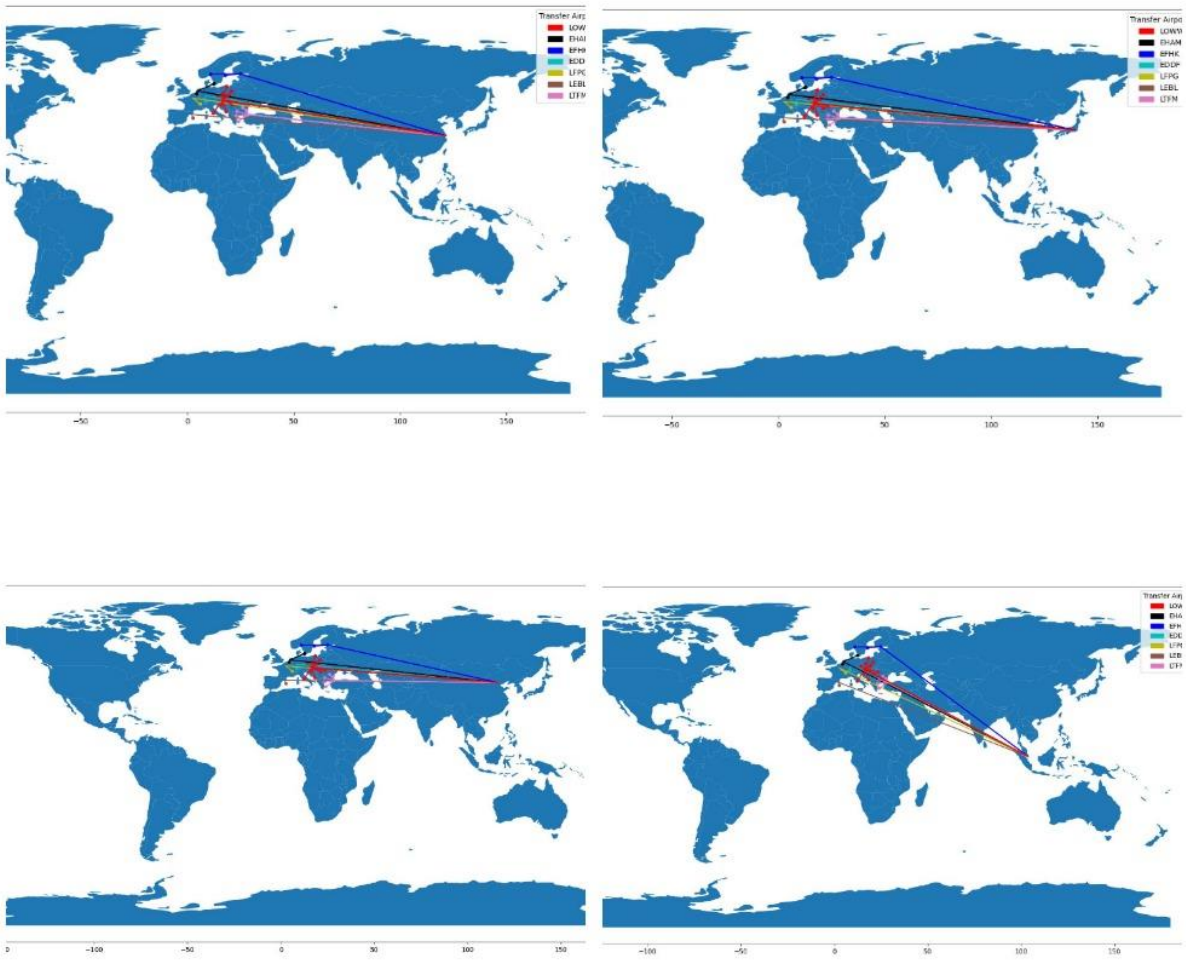
Při analýze letů na západ a na východ bylo zjištěno, že oba směry využívají stejná přestupní letiště (HUBy), což naznačuje, že lokalita přestupních letišť nemá významný vliv na rozdíl v trasách těchto letů, což je znázorněno na obrazcích 15 a 16. Tato skutečnost podporuje hypotézu, že stávající hubová letiště jsou strategicky umístěna a optimalizována tak, aby efektivně sloužila širokému spektru tras bez ohledu na jejich geografický směr. Navzdory

rozdílným směrům letů se tedy ukazuje, že optimalizace přestupních procesů a efektivní využití hubů jsou klíčovými faktory pro udržení operativní efektivity a udržitelnosti.



Obrázek 15: Simulované lety na západ

Používání stejných hubových letišť pro lety na západ i na východ přispívá k vyšší operativní efektivitě. Letecké společnosti mohou lépe plánovat své letové řády, využívat letadla efektivněji a snižovat náklady spojené s provozem. Tato efektivita se projevuje i v lepší dostupnosti letů pro cestující, což zvyšuje celkovou atraktivitu letecké dopravy.



Obrázek 16: Simulované lety na východ

V rámci této práce nebyla do modelu zahrnuta území, nad kterými probíhají válečné konflikty nebo kde je letecký provoz zakázán, což představuje prostor pro další zlepšení a rozšíření modelu. Analýzou výsledků modelu se ukázalo, že lety na západ a na východ vykazují podobné výsledky v využívání přestupních HUBů. To naznačuje, že existující infrastruktura hubových letišť je dostatečně flexibilní a robustní, aby podporovala efektivní přestupy bez ohledu na směr letu. Tento závěr je důležitý pro plánování a rozvoj budoucích letištních kapacit, protože potvrzuje, že investice do zlepšení a rozšíření stávajících hubů mohou mít široký dopad na efektivitu celého leteckého systému.

Dále, zjištění o vlivu efektivních přestupů na snížení emisí CO2 resonuje s výzkumem publikovaným Nguyenem a Lee (2019), kde se konstatuje, že optimalizace letových operací může přispět k významnému snížení environmentálního dopadu. Tato studie rozšiřuje poznatky tím, že poskytuje konkrétní modely a strategie pro implementaci těchto optimalizací v praxi. Význam efektivních přestupů a synchronizace letových řádů pro snížení emisí CO2 a zvýšení celkové efektivity leteckého provozu byl identifikován ve studii Cheunga et al. (2022). Bylo zjištěno, že optimalizace propojení letů na klíčových letištních uzlech může přispět k efektivitě celého systému tím, že se minimalizují čekací doby a emise spojené s neefektivním provozem. V kontrastu s touto studií, v analýze této diplomové práce je zdůrazněno, že zlepšení v minimálním čase na přestup (MCT) může dále podpořit tyto výhody tím, že se zkrátí doba nezbytná pro přestupy mezi lety bez ohrožení operativní bezpečnosti nebo pohodlí cestujících Další relevanci má studie Malighetti, Paleari a Redondi (2008), která se zaměřila na potenciál sekundárních letišť jako efektivních transferových bodů. Bylo naznačeno, že méně vytížená letiště mohou sloužit jako efektivní alternativy k přetíženým hlavním hubům. Výsledky této diplomové práce navazují na tento názor s důrazem na implementaci inovativních operativních a logistických strategií, které mohou transformovat sekundární letiště v klíčové komponenty pro snižování emisí a zlepšení efektivity v leteckém průmyslu. Tato porovnání ukazují, že zatímco některé z zjištění jsou v souladu s aktuálním stavem vědeckého poznání, jiné přinášejí nové návrhy, jak překonat existující výzvy v letecké dopravě. Tento dialog s odbornou literaturou nejenže posiluje důvěryhodnost výsledků, ale také zdůrazňuje jejich přínos pro další výzkum a praxi v této dynamicky se rozvíjející oblasti.

Byla identifikována řada omezení, která mohou ovlivnit interpretaci zjištěných výsledků. Především byla data ovlivněna dostupností a rozsahem informací poskytnutých analyzovanými leteckými společnostmi a letišti. Omezený přístup k datům mohl potenciálně zkreslit modelování efektivity a udržitelnosti přestupů, což bylo omezeno také geografickým zaměřením na evropské letecké trhy. Dále byla metodologie omezena využitím kombinace kvantitativních a kvalitativních výzkumných technik, které, ačkoliv poskytují komplexní pohled na zkoumané jevy, mohou obsahovat subjektivní interpretace, zejména v části kvalitativní analýzy. Tento aspekt může ovlivnit generalizovatelnost výsledků na jiné regiony nebo různé typy letecké dopravy. Navíc, vzhledem k rychlému vývoji v oblasti leteckých technologií a operací může být aktuálnost zjištěných dat rychle překonána novými inovacemi a změnami v regulacích, což může vést k potřebě průběžné aktualizace modelů a doporučení.

Přes tato omezení však studie poskytuje cenné náhledy na potenciál pro zlepšení efektivity a udržitelnosti v letecké dopravě a formuluje relevantní doporučení pro letecké společnosti a letištní operátory, jež mají zájem o implementaci udržitelnějších a efektivnějších operací.

Vzhledem k identifikovaným omezením a zjištěním této diplomové práce bylo navrženo několik možných směrů pro budoucí výzkum. Především je doporučeno zaměřit se na rozšíření geografického pokrytí studie, aby bylo možné zkoumat efektivitu a udržitelnost přestupů v letecké dopravě na globální úrovni. Toto rozšíření by umožnilo porovnání mezi různými leteckými trhy a poskytlo by hlubší pochopení regionálních rozdílů a specifik. Dále by bylo vhodné provést podrobnější kvantitativní analýzu vlivu různých typů letových operací a infrastrukturních změn na emise CO2. Tento výzkum by mohl zahrnovat vývoj pokročilých prediktivních modelů, které by lépe reflektovaly dynamiku leteckého provozu a umožnily efektivnější plánování letových operací. Také by bylo prospěšné provést studie, které by sledovaly dlouhodobé dopady implementovaných strategií na udržitelnost a efektivitu v letecké dopravě. Tyto studie by poskytly cenné informace o trvalosti efektů zavedených opatření a pomohly by formulovat dlouhodobě udržitelné politiky pro letecký průmysl. Konečně, je doporučeno věnovat zvýšenou pozornost rozvoji a integraci inovativních technologií, jako jsou elektrická letadla nebo pokročilé systémy pro řízení letového provozu, které by mohly významně přispět k redukci emisí a zvýšení efektivnosti operací. Tento výzkum by měl být prováděn ve spolupráci s průmyslovými partnery, aby se zajistila praktická aplikovatelnost zjištěných řešení.

Budoucí výzkum v této oblasti by měl pokračovat v zkoumání inovativních řešení a strategií, které mohou pomoci dosáhnout cílů v oblasti udržitelnosti a efektivity, které jsou stále více důležité v globalizovaném a ekologicky vědomém světě.

6. Závěr

V rámci diplomové práce byla provedena důkladná analýza efektivnosti a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě s důrazem na evropský letecký trh. Hlavní zjištění naznačují, že klíčovými faktory ovlivňujícími efektivitu přestupů jsou minimální časy na přestup (MCT), synchronizace letových řádů, infrastrukturní vybavenost letišť a management emisí CO2. Bylo zjištěno, že zlepšení v těchto oblastech může významně přispět k efektivnějším a ekologičtějším leteckým operacím.

Díky použití kombinace kvantitativních a kvalitativních metod byl vyvinut model, který umožňuje hodnocení různých aspektů přestupů. Tento model umožnil identifikaci optimalizací v minimálních časech na přestup a v synchronizaci letových řádů, což vede k snížení doby čekání pro cestující a zmenšení ekologické stopy letecké dopravy. Výzkum také poukázal na potřebu zlepšení infrastrukturních zařízení na letištích, které by podpořilo rychlejší a plynulejší přestupy. Na základě analýzy dat a modelování bylo navrženo několik doporučení pro letecké společnosti a letištní operátory, jak zlepšit efektivitu přestupů bez zbytečného zatěžování životního prostředí. Tato zjištění představují významný přínos pro zainteresované strany v leteckém průmyslu a nabízí nové možnosti pro implementaci udržitelnějších a efektivnějších operací.

Zjištění této diplomové práce mají značný význam pro letecký průmysl, zejména v kontextu narůstajících požadavků na udržitelnost a efektivitu v letecké dopravě. Optimalizace minimálních časů na přestup a zlepšení synchronizace letových řádů představují kritické faktory, které mohou výrazně zlepšit cestovní zážitek pro pasažéry, zatímco současně minimalizovat negativní dopady na životní prostředí díky efektivnějšímu využití paliva a snížení emisí skleníkových plynů. Výsledky této práce ukazují, že integrace udržitelných postupů do plánování a operací letišť může vést k signifikantnímu poklesu zbytečného čekání na letištích a zlepšit celkovou plynulost leteckého provozu. To má přímý vliv na snižování operativních nákladů a zlepšování ekonomické efektivity leteckých společností, což je obzvláště relevantní v dnešní vysoce konkurenční tržní prostředí. Dále, zlepšení infrastrukturních zařízení a začlenění nových technologií pro management a analýzu dat může poskytnout letištím lepší nástroje pro správu přestupních toků a zajištění vyšší bezpečnosti a spokojenosti cestujících. Tyto inovace jsou nezbytné pro zajištění udržitelnosti leteckého sektoru v období rostoucích ekologických a sociálních tlaků.

Navíc, důraz na ekologickou stránku leteckých operací reaguje na rostoucí legislativní a veřejnou poptávku po zodpovědném přístupu k životnímu prostředí. Tato práce proto nejenže přispívá k teoretickým poznatkům v oblasti letecké dopravy, ale také poskytuje praktické návrhy pro zlepšení, které jsou v souladu s globálními cíli udržitelnosti.

Dokončení této diplomové práce představovalo nejen akademickou výzvu, ale i významný krok v mém osobním a profesním rozvoji. Proces zkoumání efektivity a udržitelnosti přestupů v letecké dopravě mi poskytl hlubší porozumění komplexitě operací v této oblasti a významu udržitelných praktik pro budoucnost leteckého průmyslu. V průběhu výzkumu jsem se setkal s řadou technických a teoretických výzev, které vyžadovaly pečlivé řešení a kritické myšlení. Práce na projektu mi umožnila rozvíjet dovednosti v oblasti datové analýzy, modelování a tvorby strategických doporučení, což jsou kompetence, které jsou vysoce ceněné v dnešním datově řízeném světě. Získané poznatky a zkušenosti z tohoto výzkumu mají dalekosáhlé implikace pro moji budoucí kariéru. Zájem o udržitelnost a efektivitu v leteckém průmyslu je stále aktuálnější a práce na této diplomové práci mi poskytla pevný základ, na kterém mohu stavět v nadcházejících letech.

V neposlední řadě mi tento projekt umožnil přispět k vědecké komunitě a poskytnout hodnotné návrhy pro letecké společnosti a letištní operátory. Předložené doporučení může sloužit jako vodítko pro implementaci udržitelnějších a efektivnějších operací, což je klíčové pro zvládání současných a budoucích výzev v oblasti letecké dopravy.

Závěrem, tato diplomová práce otevírá nové možnosti pro další profesní růst a zapojení do důležitých diskuzí o budoucnosti udržitelné a efektivní letecké dopravy.

Seznam použité literatury

1. IATA. Carbon offsetting for international aviation. In: *iata.org* [online]. 2021 [cit. 25.10.2023]. Available at: https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/paper-offsetting-for-aviation.pdf
2. Paula Kurzawska. Overview of Sustainable Aviation Fuels including emission of particulate matter and harmful gaseous exhaust gas compounds. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521008565
3. Luís A. B. Cortez, Francisco E. B. Nigro, Luiz A. H. Nogueira, André M. Nassar,Heitor Cantarella,Márcia A.F.D.Moraes,Rodrigo L.V.Leal, Telma T.Franco,Ulf F.Schuchardt and Ricardo Baldassin Junior. Perspectives for Sustainable Aviation Biofuels in Brazil [online]. [cit. 29.01.2024]. Available at: https://www.hindawi.com/journals/ijae/2015/264898/
4. David Rapson, Erich Muehlegger. Global Transportation Decarbonization. JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES VOL. 37, NO. 3, SUMMER 2023. [online]. Available at: https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.37.3.163
5. Rosa Maria Arnaldo Valdés. Flight Path 2050 and ACARE Goals for Maintaining and Extending Industrial Leadership in Aviation: A Map of the Aviation Technology Space. [online]. [cit. 29.01.2024]. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/2065
6. Michael Stiebe. Stakeholder Perceptions on Sustainability Challenges and Innovations in General Aviation. [online]. [cit. 29.01.2024]. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16505
7. Stefan Gössling PhD, Scott Allen Cohen, Andrew Hares. Inside the black box: EU policy officers' perspectives on transport and climate change mitigation. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966692316305786
8. Earthscan. Tourism in the Green Economy – Background Report. [online]. Available at: https://www.e-unwto.org/doi/book/10.18111/9789284414529
9. Hares, A. E., 2013. Tourist understanding of and engagement with the climate change impacts of holidays. Doctoral Thesis (Doctoral). Bournemouth University. [online]. Available at: https://eprints.bournemouth.ac.uk/20971/
10. DESTINATION 2050. A ROUTE TO NET ZERO EUROPEAN AVIATION. [online]. Available at:

https://www.destination2050.eu/

11. IBA. Aviation emissions rise slightly, IBA data shows. In: *Iba.aero* [online]. 14.03.2022 [cit. 25.10.2023]. Available at: https://www.iba.aero/news/aviation-emissions-rise-slightly-iba-data-shows/#:~:text=New%20data%20found%20that%20CO2,increasing%20by%20just%20under%200.3%25
12. Stefano de Luca, Roberta Di Pace. Modelling Passenger Departure Airport Choice: Implicit vs. Explicit Approaches. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812042656
13. EU Emissions Trading System (EU ETS). In: European Commision [online]. Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
14. SCHVARTZMAN, Rafael. EU ETS reform destabilizes international consensus for aviation carbon reductions [online]. Available at: https://www.iata.org/en/about/worldwide/europe/blog/eu-ets-reform-destabilizes-international-consensus-for-aviation-carbon-red
15. NÁVRH SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY [online]. Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0552
16. Emissions trading system (ETS) [online]. Available at: https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/climate/info-specialists/reduction-measures/ets.html
17. Participating in the UK ETS [online]. Available at: https://www.gov.uk/government/publications/participating-in-the-uk-ets/participating-in-the-uk-ets
18. ICAO. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). In: *icao.int* [online]. 2022 [cit. 25.10.2023]. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Dec2022.pdf
19. ICAO. CORSIA Implementation Elements. In: icao.int [online]. 2023 [cit. 25.10.2023]. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/implementation-elements.aspx
20. EASA. Capacity building activities. In: easa.europe.eu [online]. 2023 [cit. 25.10.2023]. Available at:

https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/market-based-measures/capacity-building-activities#:~:text=The%20two%20main%20on%2Dgoing,and%20Caribbean%20Region'%20launched%20in

21. Colantuono, R. et al. Market-based measures and aviation sustainability in the European Union: an assessment: EU ETS and CORSIA. [online]. [cit. 25.10.2023]. Available at: https://www.sustainability-seeds.org/papers/RePec/srt/wpaper/0921.pdf
22. Tatjana Bolic, Paul Ravenhill. SESAR: The Past, Present, and Future of European Air Traffic Management Research [online]. [cit. 25.10.2023]. Available at: https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/download/7f0036d17c34826f1a37e50e4c7b5064c8529156ac9679033ea92092b19c2712/639632/1-s2.0-S2095809921000503-main%20%281%29.pdf
23. Net zero 2050: sustainable aviation fuels. In: IATA [online]. [cit. 29.01.2024]. Dostupné z: https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/
24. IATA. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). [online]. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx
25. Susanne Becken, Brendan Mackey, David Lee. Implications of Preferential Access to Land and Clean Energy for Sustainable Aviation Fuels. [online]. [cit. 29.01.2024]. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4344150
26. Jong Hae Choi, Kun Wang, Wenyi Xia, Anming Zhang. Determining Factors of Air Passengers' Choice of Transfer Airports in the Southeast Asia – North America Market: Managerial and Policy Implications. [online]. [cit. 29.01.2024]. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3226796
27. Jan K. Brueckner, Yimin Zhang. A Model of Scheduling in Airline Networks: How a Hub-and-Spoke System Affects Flight Frequency, Fares and Welfare. [online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/46557390_A_Model_of_Scheduling_in_Airline_Networks_How_a_Hub-and-Spoke_System_Affects_Flight_Frequency_Fares_and_Welfare
28. Adam Seredyński, Tobias Grosche, Franz Rothlauf. IMPACT OF TIMETABLE SYNCHRONIZATION ON HUB CONNECTIVITY OF EUROPEAN CARRIERS. [online]. [cit. 30.01.2024]. Available at: https://jats.aviationsociety.gr/index.php/JATS/article/view/53/40

29. ICAO. Juliana Scavuzzi (ACI), Jonas van Dorp (Groningen Airport Eelde, Yukio Nakatani & Yuka Takeuchi (Kansai Airports). New airport infrastructure for clean energies. [online]. Available at: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art43.pdf
30. Ganna Mykolaivna Zhelnovach, Karina Belokon, Olena Barabash , Alina Dychko. Airport Runoff Management: Engineering Solutions. [online]. [cit. 30.01.2024]. Available at: http://www.ecoeet.com/Airport-Runoff-Management-Engineering-Solutions,142970,0,2.html
31. ACI. Air connectivity. [online] Available at: https://www.aci-europe.org/air-connectivity.html
32. ACI. Airport connectivity report. In: aci-europe.org. [online]. Available at: https://www.aci-europe.org/
33. Maria Nadia Postorino, Luca Mantecchini. A systematic approach to assess the effectiveness of airport noise mitigation strategies. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699715001209
34. Raquel Girvin. Aircraft noise-abatement and mitigation strategies. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699708001166
35. Maria Nadia Postorino, Luca Mantecchini. A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699714000234
36. Luca Mantecchini, Maria Nadia Postorino. Connectivity Carbon and Noise Levels in The Airport Neighborhood. [online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332912344_Connectivity_Carbon_and_Noise_Levels_in_The_Airport_Neighborhood
37. David S. Lee, David W. Fahey, Piers M. Forster, Peter J. Newton, Ron C.N. Wit, Ling L. Lim, Bethan Owen, Robert Sausen. Aviation and global climate change in the 21st century. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003574
38. Maria Nadia Postorino, Luca Mantecchini. A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699714000234
39. Paolo Malighetti, Stefano Paleari, Renato Redondi. Pricing Strategies of Low-cost Airlines: The Ryanair Case Study. [online]. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/222428557_Pricing_Strategies_of_Low-cost_Airlines_The_Ryanair_Case_Study

40. Peter Forsyth. The impacts of emerging aviation trends on airport infrastructure. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699706000913

41. Stefano de Luca, Roberta Di Pace. Modelling Passenger Departure Airport Choice: Implicit vs. Explicit Approaches. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812042656
42. Becky P.Y. Loo. Passengers' airport choice within multi-airport regions (MARs): some insights from a stated preference survey at Hong Kong International Airport. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692307000658
43. Masahiko Furuichi, Frank S. Koppelman. An analysis of air travelers' departure airport and destination choice behavior. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965856494900167
44. Tommy K.Y. Cheung, Collin WH. Wong, Zheng Lei. Assessment of hub airports' connectivity and Self-Connection Potentials. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X22002451

45. Alexander Luttmann. re passengers compensated for incurring an airport layover? Estimating the value of layover time in the U.S. airline industry. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212012218300042
46. Sven Maertens, Holger Pabst, Wolfgang Grimme. The scope for low-cost connecting services in Europe — Is self-hubbing only the beginning? [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539516300864
47. Sukru Nenem, Anne Graham, Nigel Dennis. Airline schedule and network competitiveness: A consumer-centric approach for business travel [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160738319301793
48. Raquel Girvin. How air transport connects the world – A new metric of air connectivity and its evolution between 1990 and 2012. [online]. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554515001234
49. Vienna Airport. Sustainability report. In: viennaairport.com. [online] Available at: https://www.viennaairport.com/en/company/investor_relations/publications_and_reports/sustainability_report

50. Arife Aycan Mutlu, Ph.D., Murat Canpolat. An Assesment on The Safety and Complexity of The Innovative Design of Istanbul's New TMA. [online]. Available at: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2019/papers/SIDs_2019_paper_3-1.pdf

51. ACI. Jennifer Desharnais. Recovering Sustainably: Why and How Airports Can Initiate, Maintain, or Enhance Their Sustainability Commitments. [online]. Available at: https://blog.aci.aero/recovering-sustainably-why-and-how-airports-can-initiate-maintain-or-enhance-their-sustainability-commitments/

Přílohy

A. Databáze modelu

Tato příloha obsahuje podrobný přehled databáze použitých pro vývoj modelu hodnocení efektivnosti a udržitelnosti leteckých přestupů. Databáze zahrnují informace o letištích odletu a příletu, letištích přestupu, přímých letech a teoretických trasách. Dále obsahuje data získaná z různých zdrojů, jako jsou webové stránky letišť, kalkulačky emisí ICAO a další relevantní databáze. Tato data byla klíčová pro modelování výsledků, které jsou základem této diplomové práce.

B. Kód modelu

Tato příloha poskytuje kompletní kód modelu vyvinutého pro hodnocení efektivnosti a udržitelnosti leteckých přestupů. Kód zahrnuje všechny algoritmy a výpočetní metody použité při analýze dat a vytváření modelu. Uvedený kód je napsán v programovacím jazyce Python. Tento kód je nezbytný pro replikaci výsledků a další výzkum v oblasti efektivnosti a udržitelnosti letecké dopravy.