

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy



Diplomová práce

Dopady letecké dopravy na počasí

Marian Flekač

Vedoucí práce: Mgr. Iveta Kameníková

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Obor: Provoz a řízení letecké dopravy

2023

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. Marian Flekač

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Dopady letecké dopravy na počasí**

Název tématu (anglicky): Impacts of Air Travel on Weather

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zhodnocení vlivu letecké dopravy na změny počasí se zaměřením na ovlivnění vzniku srážek.
- Identifikujte možnosti ovlivnění počasí se zaměřením na srážky.
- Porovnejte zplodiny klasických paliv vs. biopaliva.
- Analyzujte dostupná data o letecké dopravě a klimatická data se zaměřením na srážky.
- Proveďte experiment na ověření podmínek vzniku srážek.
- Na základě zanalyzovaných dat navrhnete možnosti pro ovlivnění vzniku srážek.

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: WALD Andreas, GLEICH Ronald , et. al. Introduction to Aviation Management . Berlin: LIT Verlag, 2010
Letecký předpis L16/II – Ochrana životního prostředí – Emise leteckých motorů
KURZ Manfred, Synoptic Meteorology. German Meteorological Service, 1998
ICAO Doc 9889 - Airport Air Quality Manual

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**
(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 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Marian Flekač
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....15. července 2022

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé práce Mgr. Ivetě Kamenikové za inspirativní vedení, postřehy, konstruktivní kritiku a schopnost udělat si čas, kdykoliv bylo potřeba. Velké poděkování patří taktéž Mgr. Pavlu Provinskému, Ph.D. za pomoc při zpracovávání statistických dat, za nemalé množství věnovaného času a za úpěnlivou snahu zlepšovat mé statistické schopnosti. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Blance Chalupníkové, Ph.D., Bc. Markétě Augustinové a pánům RNDr. Aleši Fardovi, Ph.D. a RNDr. Radimovi Tolaszovi, Ph.D. za postřehy a čas věnovaný při komunikaci. Dále patří mé poděkování zaměstnancům Letiště Praha, a.s. Ing. Miroslavovi Charvátovi a Ing. Petrovi Líkařovi za poskytnutí dat pro potřeby této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat firmám Stavby Strachota a Sklenářství Olejník za zhotovení glove-boxu pro účely experimentu, Sofii Flekačové za přípravu projektu, Karolíně Strachotové za mentální oporu a asistenci při experimentu a celé své rodině za podporu při psaní této práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia ČVUT v Praze na Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Ve Strání dne 8. 5. 2023



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

DOPADY LETECKÉ DOPRAVY NA POČASÍ

diplomová práce

květen 2023

Marian Flekač

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá dopadem letecké dopravy na změny počasí se zaměřením na ovlivnění srážek. V teoretické části jsou popsány jednotlivé druhy paliv, vlivy provozu letadel na životní prostředí a teorie srážek. Praktická část se zabývá statistickým vyhodnocením srážkových dat a daty o pohybech letadel, což je hlavním cílem celé práce.

Klíčová slova: Srážky, paliva, životní prostředí, emise, kondenzační jádra, analýza

Abstract

This diploma thesis deals with the impact of air transport on weather changes with a focus on the influence of precipitation. The theoretical part describes particular aviation fuels, environmental impacts of aviation and precipitation theories. The practical deals with the statistical evaluation of precipitation data and data of aircraft movements, which is the main goal of the entire work.

Keywords: Precipitation, fuels, environment, emissions, condensing core, analysis

Obsah

KAPITOLA I – SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
KAPITOLA II – ÚVOD	11
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST	13
1 PALIVA POUŽÍVANÁ V LETECKÉ DOPRAVĚ	13
1.1 PALIVA PRO PROUDOVÉ MOTORY	14
1.1.1 ZÁSTUPCI	15
1.2 PALIVA PRO PÍSTOVÉ MOTORY	17
1.2.1 ZÁSTUPCI	19
1.3 ALTERNATIVNÍ PALIVA	21
1.3.1 BIOPALIVA	21
1.3.2 OSTATNÍ ALTERNATIVNÍ PALIVA	25
2 LETECTVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	26
2.1 SKLENÍKOVÝ EFEKT.....	26
2.2 OXID UHLIČITÝ A OXIDY DUSÍKU	29
2.3 KONDENZAČNÍ ČÁRY A CIRROVITÁ OBLAČNOST	32
2.4 OSTATNÍ DOPADY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	34
3 SRÁŽKY	35
3.1 VÝVOJ SRÁŽEK	35
3.1.1 SRÁŽKOTVORNÉ TEORIE	36
3.2 DRUHY SRÁŽEK	37
3.3 MĚŘENÍ SRÁŽEK	39
3.3.1 MANUÁLNÍ SRÁŽKOMĚR A TOTALIZÁTOR.....	39
3.3.2 OMBROGRAF A AUTOMATICKÉ SRÁŽKOMĚRY	41
KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 STATISTICKÁ ANALÝZA DAT	42

4.1	ZDROJE DAT	42
4.2	VLASTNÍ ANALÝZA.....	43
4.2.1	CELÉ OBDOBÍ	45
4.2.2	JARNÍ OBDOBÍ.....	48
4.2.3	LETNÍ OBDOBÍ	51
4.2.4	PODZIMNÍ OBDOBÍ	54
4.2.5	ZIMNÍ OBDOBÍ	57
4.2.6	OBDOBÍ SRÁŽEK	60
4.2.7	EXPERIMENT	60
4.3	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	73
KAPITOLA V – ZÁVĚR		75
ZDROJE.....		77
SEZNAM OBRÁZKŮ		83
SEZNAM TESTŮ A TABULEK.....		84

KAPITOLA I

Seznam použitých zkratek

AVGAS	Aviation gasoline
JP	Jet propulsion
°C	Stupeň Celsia
AVTAG	Aviation turbine gasoline
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
USAF	United States Air Force
USA	United States of America
US	United States
ČR	Česká republika
FAA	Federal Aviation Administration
EPA	Enviromental Protection Agency
LL	Low lead
UL	Unleaded avgas
CO ₂	Oxid uhličitý
H ₂ O	Voda
C ₆ H ₁₂ O ₆	Cukr

KAPITOLA I – SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

O ₂	Kyslík ve formě dvouatomových molekul
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
SAF	Sustainable aviation fuel
CEO	Chief Executive Officer
UV	Ultraviolet
ICAO	International Civil Aviation Organisation
NO _x	Oxidy dusíku
MTBE	Buthyl ether aditivum

KAPITOLA II

Úvod

Mezi lidmi je obecně známo, že počasí do jisté míry ovlivňuje letadla a jejich provoz. Tato diplomová práce nabízí čtenáři opačný pohled – zdali a jak ovlivňují letadla počasí, především tedy srážky. Impulzem pro psaní práce na toto téma byl článek na renomovaném webu v roce 2020 s titulkem: „Prší, protože nelétají letadla, spekulují lidé.“ Hlavním cílem této práce je provést statistickou analýzu srážkových dat spolu s daty o pohybech letadel za účelem zjištění případné závislosti. Pracuje se s daty o pohybech letadel na Letišti Václava Havla v Praze a se srážkovými daty z letiště a jeho okolí mezi lety 2015–2021, celkem se tedy jedná o období sedmi let. Práce se skládá z teoretické a praktické části.

Teoretická část je rozdělena na tři kapitoly. V první kapitole jsou rozebrány nejrozšířenější druhy leteckých paliv používaných jak v komerční letecké dopravě, tak i v malém všeobecném letectví. Jedná se zejména o JET A-1 a AVGAS 100LL. Značná část první kapitoly se věnuje alternativním palivům a možnému vývoji do budoucna.

Druhá kapitola přibližuje čtenáři problematiku dopadů letectví na životní prostředí. V této části jsou rozebrány především emise výfukových plynů a jejich spojitost se skleníkovým efektem, následně je pozornost věnována kondenzačním čárám a dalším vlivům.

Poslední kapitola teoretické části se věnuje srážkám. Čtenář se obeznámí se vznikem srážek v mracích, různými druhy srážek ale i způsobem, jakým se srážky měří a měřily. Součástí je také zmínka o tzv. setí mraků.

KAPITOLA II – ÚVOD

Celá praktická část se pak zabývá statistickou analýzou dat. Nejprve je popsána metodika práce spolu se zdroji dat a následně jsou již čtenáři k dispozici výsledky statistických testů. Testování probíhalo pro celé období sedmi let jako takové a následně byla data roztríděna podle ročních období a vybraných prvků. Kapitulu zakončuje souhrn výsledků a s tím spojená diskuze a nechybí ani zmínka o provedeném experimentu na vznik srážek. Autor věří, že tato práce nabídne zase trochu jiný pohled na leteckou dopravu a na procesy interakce letecké dopravy a životního prostředí a pomůže vyvrátit nebo potvrdit jisté mýty spojené s provozem letadel.

KAPITOLA III

Teoretická část

1 Paliva používaná v letecké dopravě

Paliva jsou neodmyslitelnou součástí dopravy nejen letecké, ale i všech ostatních. Lidé už od pradávna toužili létat a historicky bylo mnoho pokusů, více či méně úspěšných, provádět tuto činnost přirozenou víc pro ptáky než pro lidi – od DaVinciho létajících strojů až po létající balóny, které byly lehčí než vzduch. Hlavní překážkou byl ale vždy právě pohon. To se změnilo až na začátku dvacátého století díky vývoji spalovacího motoru, který poskytoval kompaktní zdroj energie potřebné k překonání gravitace. Chemická energie, kterou v sobě paliva uchovávají se v motorech mění na mechanickou a díky tomu může být generován tah, což je síla, která je zodpovědná za dopředný pohyb letadla. Dopředný pohyb je zase esenciální pro generaci vztlaku na křídlech, tedy aby bylo možné s letadlem vzletět.

Původní paliva používaná pro letadla byla totožná s těmi určenými pro první automobily. Postupem času ale vznikala potřeba po větší dodávané energii, z toho důvodu byly vyvíjeny nové motory a tím pádem tedy i nová paliva určena speciálně pro tyto motory – zpočátku zejména *letecký benzin (AVGAS)*. Ve čtyřicátých letech dvacátého století začaly vznikat první turbínové motory v reakci na ještě větší potřebu dodávané energie, s čímž vzniklo i nové palivo *kerosin*, které bylo později nahrazeno speciálními palivy pro turbínové motory tzv. *JET palivy*. V devadesátých letech vyrostlo letectví z něčeho nového a vzrušujícího do jednoho z elementů

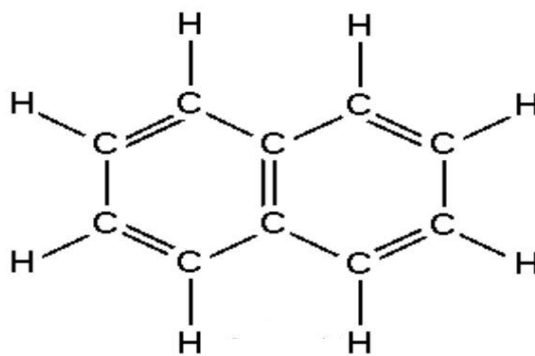
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

moderní společnosti. Umožnilo to lidem a zboží se přesouvat na velké vzdálenosti v řádech několika hodin, v porovnání s týdny nebo i měsíci, které k tomu bylo potřeba v minulosti.

V drtivé většině se jako palivo pro letadla používají substance na bázi ropy, což není náhoda. Tato volba byla opodstatněna velkým množstvím výhod, které ropa přináší. Kapalné uhlovodíky poskytují nejlepší kombinaci energického potenciálu, ceny a dostupnosti. Navíc kapalná paliva jsou schopna vytvořit víc energie na jednotku objemu v porovnání s plynými. V následujících kapitolách jsou rozebrána v současnosti nejrozšířenější letecká paliva na bázi ropy, jejich různé varianty, ale také je věnován prostor palivům novým a alternativním, neboť ropy není na Zemi nekonečno a je jasné, že dříve či později se bude muset přejít na jiné varianty. Zajímavými adepty se jeví biopaliva, vodík a motory na elektrický pohon. [1]

1.1 Paliva pro proudové motory

Tato skupina paliv známá také jako JET paliva jsou nejpoužívanější skupinou paliv, protože jsou určena pro proudové a turbovrtulové letouny. Z toho vyplývá, že jsou aktuálně absolutně nepostradatelná pro obchodní leteckou dopravu. Jako palivo do prvních motorů sloužil *kerosin*, který byl původně využíván do lamp s knotem. Jedná se o hořlavý uhlovodík¹, jeho strukturní vzorec znázorňuje Obr. 1.



Obrázek 1: Strukturní vzorec kerosinu [2]

Kerosin se vyrábí destilací ropy. Má široké využití, slouží jako petrolej do lamp, k technickým účelům, jako rozpouštědlo nebo právě jako palivo do proudových motorů. Během čtyřicátých let minulého století byl kerosin zvolen hlavně kvůli dostupnosti, protože ve válce byla každá kapka nafty cenná. Americká armáda tehdy zveřejnila specifikaci paliv pro svá letadla JP-1, což byl kerosin s bodem mrazu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takto stanovený bod mrazu velmi limitoval dostupnost,

¹ Organická sloučenina uhlíků a na nich navázaných vodíků

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

a proto po druhé světové válce začali Američané využívat tzv. *wide-cut* palivo s označením JP-2 až JP-4 (též znám jako AVTAG; NATO označení F-40). Jedná se taktéž o sloučeninu uhlovodíků, která kombinuje body varu motorové nafty a kerosinu. Volba opět vycházela z dostupnosti, neboť se předpokládalo, že *wide-cut* palivo bude dostupnější ve větších objemech, než kerosin nebo motorová nafta samostatně. Nicméně postupem času se začaly projevovat provozní nevýhody v porovnání s užíváním paliva na bázi kerosinu. Při zacházení ve vysokých nadmořských výškách se *wide-cut* palivo rychleji odpařovalo, což způsobovalo větší ztráty, navíc zde bylo zvýšené riziko požáru během manipulace. Další nevýhodou byla nižší šance na přežití při havárii letounu s tímto palivem v nádržích. Mnohé z těchto skutečností vyšly na povrch během vojenských konfliktů v jiho-východní Asii. Z těchto důvodů se USAF (americká armáda) začala v sedmdesátých letech orientovat zpět na paliva na bázi kerosinu a bylo vyvinuto palivo s označením JP-8, které je velmi podobné dnešnímu JET-A1. JP-8 se od té doby stala hlavním palivem pro proudové motory organizace NATO. [1][3]

1.1.1 Zástupci

V následující části jsou blíže popsáni nejvíce používaní zástupci z této skupiny. Jedná se o JET A-1 a JET-A. V extrémních podmínkách (nízkých teplotách) se používá i JET-B a je zde také zmínka o palivu TS-1, čímž je tato kapitola zakončena.

JET A-1

JET A-1 je použitelné pro většinu turbínových motorů, a proto není divu, že je celosvětově nejpoužívanějším palivem v obchodní letecké dopravě, široce dostupným vně USA. Je na bázi kerosinu, proto se lze často setkat s prostým pojmenováním „kerosin“, počestěle letecký petrolej. Výjimečně odolává chladu a nekystalizuje ani v nejvyšších hladinách. Jeho typické značení černým pruhem je znázorněno na *Obr. 2*. Má velmi dobrou tepelnou a skladovací stabilitu, která snižuje riziko horšení kvality paliva při déletrvajícím skladování.



Obrázek 2: Značení JET A-1[4]

Vyrábí se z důkladně rafinované ropy a samozřejmě obsahuje malé množství příměsí, které se do směsi po rafinaci přidávají z důvodu zlepšení nebo přidání určitých vlastností. Zpravidla

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

se jedná jen o velmi malá množství měřitelná v jednotkách částecek na milion. Tato aditiva mají celou řadu funkcí, mezi které patří například zajištění paliva proti nabití statickou elektřinou, která může vznikat při pohybu paliva po nádržích a rozvodovém systému. Na druhou stranu ale nijak nesnižují potřebu „uzemnění“, sloužícího k zajištění přijatelného elektrického pole mezi kovovými prvky (například při tankování), ani neovlivňují riziko spojené se zásahem blesku. Další přídatné látky jsou inhibitory koroze, které chrání železné části potrubí a palivových nádrží před rží. Zároveň mohou zajišťovat také lubrikační vlastnosti. Do paliva se přidávají i kovové deaktivátory, které slouží k potlačení katalytických vlastností některých kovů na oxidaci paliva (například mědi). Mezi ostatní funkce aditiv patří prevence usazování malých částecek v motoru, předcházení samovznícení paliva nebo zbavení se organismů, které by se jinak množily v palivu a zhoršovaly tak jeho kvalitu². Navíc slouží některá aditiva jako základ výše zmíněné odolnosti vůči prostředí nízkých teplot, protože teploty v cestovních hladinách často klesají i pod $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zmrznutí paliva by mohlo mít fatální následky. Tzv. anti-icing aditiva snižují teplotu mrazu vody, která se za nízké teploty vysráží, a předcházejí tak formování ledových krystalků, které by bránily v plynulém přívodu paliva do motorů. Na druhou stranu tato aditiva nijak neovlivňují bod mrazu paliva jako takového. Nejvyšší bod mrazu JET A-1 je $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejnižší bod varu $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

JET A

Tento typ paliva je normálně dostupný pouze v USA a v některých částech Kanady. Charakteristikami je velmi podobný typu A-1, bod varu je totožný, ale bod mrazu je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy lehce vyšší. Podobné je i značení, ale na levé straně má jen jeden pruh v porovnání s předchozí variantou, která měla pruhy dva.

JET B

JET B je zástupcem zmíněné skupiny wide-cut paliv kombinujících kerosin a naftu. Běžně je směs tvořena ze 30 % kerosinem a 70 % naftou. Může sloužit jako alternativa k JET A-1, ale vzhledem k jeho velmi nízkému bodu mrazu ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) je určen k používání v těch nejchladnějších oblastech, kde je důležitá vysoká výkonnost i za nízkých teplot. Jeho nevýhodou je obtížnější manipulace, neboť je více hořlavý. [5][6]

² Tzv. organická koroze

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

TS-1

Toto palivo je dostupné hlavně v Rusku a v zemích Commonwealthu. Je na bázi kerosinu, podobný JET A-1, ale má jak nižší bod varu, který může začínat na 28 °C, tak nižší bod mrazu, který je pod –60 °C. Z toho vyplývá, že je taktéž určený pro použití především v chladnějším prostředí. [7]

1.2 Paliva pro pístové motory

Ruku v ruce s palivy pro proudové motory šla i ta pro pístové. Začátek měla v podstatě podobný. První letadla byla poháněna motory určenými pro tehdejší automobily a těm sloužilo jako palivo obyčejný benzín nebo nafta. Postupem času jednotlivé dekady dvacátého století vykazovaly stále větší a větší pokrok v leteckých motorech a palivech. Samozřejmě velký podíl na tom mělo vojenské odvětví, v USA i v Evropě. Primárním cílem byla větší spolehlivost a výkonnost bez přílišného zvětšování váhy nebo rozměrů motorů.

Paliva a motory jsou neoddělitelné složky jednoho systému a jejich postupný vývoj připomínal jakousi hru na předskakanou. „*Představení lepších motorů způsobilo znatelnou potřebu lepšího paliva pro tyto motory, ale po představení nového, lepšího paliva začalo být zjevné, že bude nezbytný další vývoj motorů pro jeho vhodné využití. Jakmile se kvalita motorů a paliv ustálila na stejné úrovni, začalo být znovu patrné, že ještě lepší druh paliva by zase zaručil lepší výkon motoru. Postupem času tedy konstruktéři i uživatelé pořád a pořád požadovali lepší palivo.*“³

U prvních paliv byl problém se samozápalem směsi při kompresi v motoru. Při tomto jevu dochází k samovolnému vznícení směsi paliva a vzduchu ještě před přeskočením jiskry ze svíčky a dochází tak k nekontrolované explozi. Tím se náhle rychlost spalování prudce zvýší a začne se uvolňovat přílišné množství tepla do okolí. Následně dojde k velkému ohřevu válců, ventilů a pístů, což je může trvale poškodit. Hlavním zájmem u paliv tedy bylo zlepšit antidetonační vlastnosti tak, aby nebyl výkon motorů tímto způsobem omezován. Používalo se pro to zejména olovené antidetonační činidlo *tetraethylolovo*. Postupně byly ale vyvíjeny i jiné, např. uhlovodíkové přísady s obdobnými vlastnostmi. V roce 1930 specifikovala americká armáda (U.S. Army Air Corps) benzín pro bojové účely s minimálním oktanovým číslem 87, což je

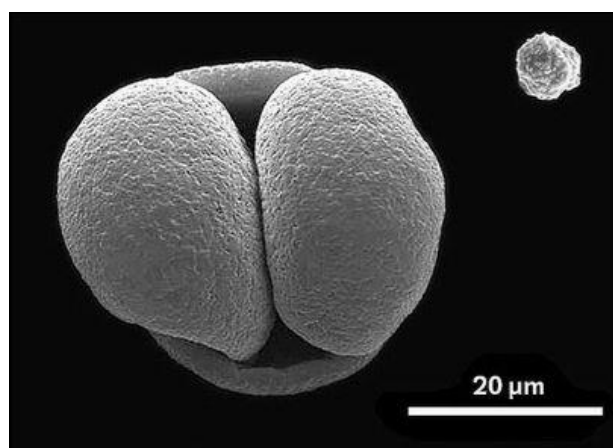
³ Přímou citováno, volně přeloženo z: R. Schlaifer and S. Heron, *Development of Aircraft Engines and Fuels*, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston, 1950, p. 552.

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

považováno za první příklad, kdy byly antidetonační charakteristiky leteckého benzínu specifikovány tímto způsobem. [1][8]

Oktanové číslo tedy udává u benzinových typů paliv jejich antidetonační odolnost. Z hlediska definice je to poměrně složitější. Jedná se o objemové procento směsi isooktanu a n-heptanu, vykazující ve zkušebním motoru stejnou odolnost vůči právě detonačnímu spalování (lidově také klepání) jako zkoušené palivo. Tyto dva zmíněné uhlovodíky nebyly zvoleny jako standardy pro hodnocení antidetonační odolnosti náhodou. Čistý isooktan má velkou odolnost vůči detonačnímu spalování, jeho oktanové číslo je sto, naopak čistý n-heptan má oktanové číslo nula a vykazuje tedy odolnost velmi malou. Samotné určování oktanového čísla se pak provádí buď tzv. motorovou metodou nebo výzkumnou metodou. [9]

S používáním olova v palivech se šla ruku v ruce i jeho stinná stránka, a sice, že je pro lidi toxické. Tetraethylolovo při spalování v motorech shoří na málo těžké sloučeniny olova, které se usazují a motor se tak může zadřít. Z toho důvodu se do paliv začaly přidávat příměsi bromu, který zajistil, že se olovo během spalování přetvoří do formy bromidu olovnatého. Ten už je těžký a odejde spolu s ostatními zplodinami výfukem. Do atmosféry je teda vypuštěn ve formě aerosolu a díky velkému specifickému povrchu těchto částic snadno reaguje s vlhkostí a oxidem uhličitým, a vznikne tak aerosol vyobrazený na Obr. 3 vpravo nahoře složený z uhlíčanů olova a oxidů.



Obrázek 3: Pylové zrno a aerosol [10]

Na snímku z elektronového mikroskopu je částice olova zachycená odběrovým zařízením v roce 1997 v oblasti středních Čech a porovnána s pylovým zrnem zachyceným tím samým zařízením. Částice větší než 10 mikrometrů (např. pylové zrno) se zpravidla zachytí na stěně dýchacích cest nebo jsou odfiltrována ochlupením v nose, nicméně z obrázku lze vypožorovat, že olověná částička je podstatě menší a dostane se tak hluboko do plic. Prostřednictvím

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

vzdušných proudů se mohou tyto částice přesouvat na obrovské vzdálenosti a stopová množství olova byla nalezena i v arktických ledovcích. Navíc se dobře rozpouštějí ve styku s dešťovou nebo povrchovou vodou a zakořeňují se tak hlouběji do životního prostředí. Co se množství provozu týče, tento problém se týkal především automobilů, a jak jejich počet stoupal, hrozivě s ním stouvalo také vypouštění aerosolů do ovzduší. Ty jsou také v malé míře zdrojem částic pro vznik smogu, který způsobil v minulém století mnoho obětí na lidském zdraví. Jakmile tento problém vešel ve známost, začal se hledat způsob nápravy. Automobilů už bylo tolik, že nebylo možné nějak omezit jejich provoz, a proto byli výrobci paliv nuceni obsah tetraethylolova snižovat. Mezi roky 1960–1990 se v ČR obsah olova v automobilových benzínech snížil o 75 % a nakonec byl 1. ledna 2001 prodej motorových paliv s obsahem olova určených pro automobily zastaven zákonem. Avgas nicméně příměsí olova stále obsahuje, ale kvůli jeho neblahým účinkům na lidský organismus spolupracuje americký úřad pro civilní letectví (FAA) s americkou agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA) na odstranění tetraethylolova i z avgasu. [11][12]

V padesátých letech minulého století bylo v používání (vojenském i civilním) celkem šest druhů avgasu. V té samé době začaly být pístové motory postupně nahrazovány proudovými. Nejprve ve vojenském prostředí, následně i v civilním. Poptávka po vysokooktanovém benzínu vymizela a na hodně komerčních letištích začaly být nádrže na avgas přetvářeny na tanky pro palivo pro proudové motory. V dnešní době je avgas využíván hlavně ve všeobecném letectví, tj. malými letadly nebo helikoptéry např. v aeroklubech, leteckých školách nebo soukromými piloty. Z armády ovšem úplně nevymizel, i dnes existuje nemalé množství armádních strojů, které jsou poháněny velkými pístovými motory.

1.2.1 Zástupci

Nejběžněji používanými zástupci avgasu jsou 100 a 100LL. Číslo u příslušného typu reprezentuje jeho oktanové číslo. Postupem času se vyvinulo velké množství typů s nejrůznějšími oktanovými čísly. V následujících řádcích jsou rozebrány ty nejznámější a nejpoužívanější z nich.

Avgas 100

Jedná se o standardní vysokooktanové palivo určené pro pístové motory letadel. Má vysoký obsah olova a značí se zelenou barvou. Existují dvě podvarianty, které se liší příměsí antioxidantů, požadavky na oxidační stabilitu a maximálním obsahem olova.

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Avgas 100LL

Tento typ je obdobou avgasu 100, písmena LL (low lead) značí nižší obsah olova v porovnání s předchozím typem a jejich hlavní rozdíl je tedy v procentuálním zastoupení tetraethylolova. Jeho značení je modré.

Avgas 80

Avgas s oktanovým číslem 90 se už nevyrábí a nahrazuje ho 100LL, pokud to povolují provozní specifikace, které by měly být umístěny v provozní příručce stroje. Značil se červenou barvou. Obr. 4 porovnává značení třech zmíněných druhů avgasu a paliva JET A probraného v předchozích kapitolách.



Obrázek 4: Značení paliv [13]

Avgas 115

Tento vysokooktanový typ by používán v armádních složkách ve čtyřicátých letech minulého století, kdy byl požadavek na vysokou výkonnost motorů. V současnosti většina armádních letadel přešla na proudové pohony, a tudíž již avgas 115 není dostupný.

V těchto dnech jsou už dostupná i paliva benzínového typu bez obsahu olova, například UL91 nebo UL94, nicméně právě kvůli absenci olova se snižuje jejich oktanové číslo, tím i výkonnost. Přední výrobci paliv se tedy potýkají s výzvou vývoje bezolovnatého avgasu, který bude mít oktanovou výkonnost stejnou nebo vyšší v porovnání s 100LL. Záměr je do budoucna nahradit typy 100LL a 100 bezolovnatou alternativou, a až bude vývoj ve fázi plošně dostupného paliva,

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

musí se provést ještě spousta testů, aby se ověřila vhodnost a použitelnost takového paliva napříč širokým spektrem letadel po celém světě. [14]

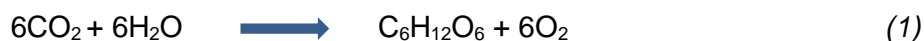
1.3 Alternativní paliva

Kromě hlavních a nejrozšířenějších zástupců paliv existují i různé jiné druhy, podobně jako u paliv určených pro automobily. Mezi důvody jejich existence by šel jistě zařadit dopad na životní prostředí, udržitelnost nebo třeba lepší cenovou dostupnost. Některé z nich jsou již rozšířeny více, jiné jsou teprve začátkách a snaží se prorazit. Jak je známo, zdroj fosilních paliv není neomezený, a tudíž dříve či později budou alternativní paliva dominovat. Mezi nejznámější z nich lze zahrnout biopaliva, vodík nebo elektrickou energii.

1.3.1 Biopaliva

„Aerolinie jsou vystaveny výzvám snižování dopadů na globální ekosystémy a progresivního zlepšování v oblastech otázky životního prostředí, zatímco se snaží snižovat provozní náklady. Letecké palivo derivování z biologických zdrojů je klíčový prvek ve strategii tyto výzvy splnit.“⁴

Pojmem biopalivo se rozumí takové palivo, které je získáno z obnovitelných rostlinných nebo zvířecích zdrojů, používané k pohonu do motorů. Energie dodávaná biopalivy je získávána z biologické fixace uhlíku, kterou živé organismy váží pomocí nejrůznějších biologických procesů. Nejběžnějším mechanismem je fotosyntéza (1), kdy rostliny za pomoci zeleného barviva chlorofylu, tepla a světla ze slunečního záření a vody přeměňují vzdušný oxid uhličitý na cukr. Zajímavostí je, že kyslík, který je nepostradatelný pro dýchání velkého množství organismů na Zemi, vzniká až jako vedlejší produkt.



Do rovnice tedy vstupují jako reaktanty oxid uhličitý a voda, oba jsou anorganické⁵ látky, na straně produktů vzniká také anorganický kyslík ale hlavně organický⁶ cukr. Z toho důvodu je fotosyntéza pokládána za základní převod mezi živou a neživou přírodou. Pro použití do

⁴ Přímo citováno, volně přeloženo z: AERO. BOEING: QTR_01 13 [online]. 2013, 21 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2246.pdf>

⁵ Patří do neživé přírody

⁶ Patří do živé přírody

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

motorů musí být energie uložená ve vázaném uhlíku vyjmuta z žijících nebo nedávno žijících organismů. Existují různé druhy biopaliv a jejich výroby:

- **Bioethanol** – alkohol produkován kvašením uhlovodíků v plodinách jako je kukuřice. Ve vývoji získávání ethanolu jsou také zdroje nesouvisející s jídlem, například kvašené trávy.
- **Biodiesel** – látka vyráběná z rostlinných olejů a živočišných tuků použitím chemického procesu známého jako transesterifikace, kdy dochází k vyměňování organických funkčních skupin esterů se skupinami alkoholů. [15]

Biopaliva, pokud jsou vyráběna udržitelným způsobem, mohou mít menší dopad na klimatickou změnu v porovnání s jejich fosilními protějšky. Toto tvrzení se opírá fakt, že na rozdíl od fosilních paliv mají biopaliva potenciál odjímat oxid uhličitý z atmosféry během růstu biomasy, což je jedna z fází produkčního cyklu. [16]

Poháněni potřebou najít náhradu vyčerpatelných fosilních paliv, požadavkem na snížení dopadů na životní prostředí a snížením provozních nákladů, čím dál častěji jak provozovatelé, tak regulátoři obracejí svou pozornost právě na biopaliva. Vědci v této oblasti už provedli poměrně značné pokroky. Současný hlavní cíl se soustředí na vyvinutí tzv. drop-in udržitelného paliva pro použití do proudových motorů. Drop-in palivo znamená, že může být smícháno s klasickým palivem a použito do motorů bez potřeby jakkoliv změnit právě motory, konstrukci letadel a systémy pro rozvod paliva. Samozřejmě musí mít také fyzikální vlastnosti srovnatelné s palivy na bázi ropy (například hustotu) a být použitelné v teplotních extrémech provozní obálky letadla. Aby bylo palivo považováno za udržitelné, mělo by být získáváno z obnovitelných zdrojů, které nevytlačují potravinářské plodiny, ani s nimi nekonkurují ve využití půdy nebo vody. Ideálně by tyto plodiny měly splňovat uhlíkově neutrální životní cyklus (růst/zpracování/použití) a je taktéž žádoucí, aby jejich růst a produkce způsobovala pozitivní lokální socioekonomický dopad. Některé ze zástupců, kteří splňují tato kritéria jsou:

- **Camelina (Lnička setá)** – olejnatá rostlina používaná během rotace plodin při moderních zemědělských postupech. Střídání plodin je praktika, při které se sadí různé druhy plodin sekvencně za sebou na jednom poli za účelem zlepšení stavu dané půdy, optimalizování živin v půdě a způsobu boje proti plevelům a nežádoucím travám. [17]
- **Jatropha (Dávivec)** – nejedlá, suchu odolná rostlina, která roste na okrajové půdě.
- **Algae (Řasy)** – jednoduché fotosyntetické organismy, které mohou růst v odpadních nebo slaných vodách.

Biopaliva vyráběná z těchto ale i jiných rostlin bývají označována jako SPK (syntetický parafinický petrolej) nebo HEFA (hydro estery mastných kyselin) paliva. Mezinárodní specifikace

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

pro chemické složení HEFA paliv jsou přísnější než paliva pro konvenční paliva. Děje se tak za účelem eliminace pravděpodobnosti potenciálního výskytu nějaké kontaminace, která by mohla být biopalivem způsobena. V roce 2011 povolily mezinárodní letecké a palivové autority míchání klasických paliv a biopaliv a jejich použití v komerční letecké dopravě. [16]

Před použitím biopaliva v ostrém provozu bylo provedeno mnoho testů v laboratořích a následně v pozemních motorových zkouškách. Výsledky testů používání směsí skládajících se z poloviny klasickými palivy a z druhé poloviny biopalivy nevykazovaly při porovnání se sto-percentními ropnými palivy žádné podstatné výkonnostní odchylky. Následující řádky popisují důležité a zajímavé milníky při implementaci biopaliv do ostrého provozu.

Na začátku roku 2008 předvedla společnost *Virgin Atlantic* s letadlem B747 let, při kterém bylo jako palivo použita směs tvořící biopalivo z 20 % a v zimě téhož roku provedla společnost *Air New Zealand* opět se strojem B747 let spalující palivo z 50 % tvořeného biopalivem z *Jatrophy*. V lednu roku 2009 byl uskutečněn let společnosti *Japan Airlines* letounem B747 spalující konvenční palivo a HEFA palivo *Camelina/Jatropha/Algae* v poměru 50/50. V červnu 2011 provedla společnost *Boeing* se strojem B747 transatlantický let, při kterém všechny motory používaly směs z 15 % tvořenou HEFA palivem a o dva měsíce později, *Aeromexico* B777, transatlantický let s pasažéry za použití 30% směsi *Jatrophy*. Od roku 2011 se užívání biopaliv v komerční letecké dopravě začalo stávat čím dál běžnější, ačkoliv jeho široké využití stále limitovala vysoká cena a nízká dostupnost. [16]

Postupem času se začala bio – syntetická paliva souhrnně označovat zkratkou SAF (udržitelné letecké palivo) a historie se začala psát prvního prosince roku 2021 kdy byl uskutečněn historicky první komerční let, jehož jeden z motorů běžel na 100% SAF. Podařilo se tak společnosti *United Airlines* s letounem B737 MAX. Tehdejší CEO společnosti Scott Kirby, který byl na palubě významného letu spolu s plným letadlem lidí se k události vyjádřil následovně: „*Dnešní let za použití SAF není jenom důležitým milníkem v úsilí dekarbonizovat naše odvětví, ale v kombinaci s rostoucím počtem závazků vyrábět a nakupovat alternativní paliva ukazujeme světu účinný a škálovatelný způsob, jak se mohou společnosti spojit a spolu hrát roli při řešení největší výzvy našich životů.*“⁷ Demonstrováný let z Chicaga do Washingtonu měl v jedné nádrži 500 galonů standardního JET paliva a ve druhé (pravé) nádrži 500 galonů SAF paliva. Každá nádrž zásobila jeden motor. Dle legislativy smí letadla létat s palivovou směsí tvořenou z SAF maximálně z 50 %, a proto byla provedena tato demonstrace dokazující, že se

⁷ Přímo citováno, volně přeloženo z: MCGURTY, Janet. *United Airlines launches first commercial flight with 100% SAF. S&P Global: Commodity Insights* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/agriculture/120121-united-airlines-launches-first-commercial-flight-with-100-saf>

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

neprojevují žádné provozní rozdíly při používání jednoho, či ono druhu paliva a aby položili základ používání alternativních paliv jiným aerolinkám. [18]

Historicky první let, během kterého bylo použito SAF palivo v obou motorech komerčního letadla uskutečnila společnost *Braathens Regional Airlines* v roce 2022 ve Švédsku. Použilo při tom palivo od firmy Neste, o kterém tato společnost tvrdí, že snižuje emise skleníkových plynů během výrobního cyklu o 80 % v porovnání s běžnými ropnými palivy. Typickou vstupní surovinou pro výrobu moderních SAF paliv mohou být kromě výše zmíněných rostlin také kuchyňský olej a odpadní oleje z jiných než palmových zdrojů. Další možností je použití pevného odpadu z domácností a podniků jako například obaly, textil papír nebo zbytky potravin, které by jinak skončily na skládce nebo ve spalovně. [20]

Poslední zajímavou zmínkou v pokroku při používání SAF paliv je nabídnut teprve nedávný let společnosti Emirates, která se svým strojem B777 taktéž uskutečnila let, kdy jeden z motorů byl poháněn 100% SAF. V pozadí *Obr. 5* je zachyceno letadlo právě demonstrující tankování SAF paliva.



Obrázek 5 : B777 během plnění SAF [19]

Spojené arabské emiráty vyhlásili rok 2023 jako rok udržitelnosti, proto má i let za použití SAF zvláštní význam. Takové a podobné lety pomáhají konat pokrok ve schvalovacím procesu létání na 100% SAF. Od roku 2011 bylo uskutečněno přes 350 tisíc komerčních letů, které alespoň z části využívali udržitelné palivo. Vyplyvá to z analýzy dat společnosti Air Transport Action Group. I přes takové číslo je ale dostupnost SAF stále omezená a k polovině roku 2022 představovala jeho produkce méně než 1 % celosvětové poptávky po

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

leteckém palivu. Jedním z důvodů budou i náklady, protože výroba SAF je zatím v této době pořád výrazně dražší než výroba klasického konvenčního paliva. [20]

1.3.2 Ostatní alternativní paliva

Celou první kapitolu zakončí zbývající perspektivní zdroje energie, a sice kryogenní paliva a elektřina. Pojem kryogenní paliva se používá pro látky, které jsou za normálních ambientních podmínek plyny, ale byly zmrazeny a stlačeny na kapaliny. Protože není příliš praktické skladovat plyn ve velkém objemu v jeho normálním skupenství. Příklady mohou být kapalný vodík nebo kapalný methan. Oba tyto plyny jsou schopny vyvinout poměrně velkou energii ve vztahu k jejich váze (v případě vodíku 120MJ/kg), ale jejich nízká hustota vede k ne tak velkému energetickému potenciálu v souvislosti s objemem. Tato paliva jsou podstatně odlišná od současně používaných paliv a jejich využívání bude vyžadovat novou infrastrukturu plošného užívání paliva spolu s novými motory a draky letadel (chladicí nádrže musí být násobně těžší, a zvýšená hmotnost letounu není zrovna v zájmu leteckých společností).

Vodík nicméně, je staven do předních pozic adeptů paliv budoucnosti. Důležitou otázkou v souvislosti s ním je ovšem výroba. Jedna z možností je využívání právě methanu na vodík a oxid uhličitý a takto HO bylo na začátku jednadvacátého století vyráběno více než 90 %. Takovýto způsob výroby není ovšem v dnešní době příliš žádoucí, neboť se jedná v podstatě o přeměnu jednoho paliva za druhé a vzniká u toho ještě navíc skleníkový plyn⁸. Rozumnější variantou může být elektrolýza vody, při které se za použití elektrické energie štěpí voda na kyslík a vodík. Účinnost takového procesu se pohybuje kolem 60 % a na výrobu 1 kilogramu vodíku je zapotřebí 9 litrů vody a 60 kWh elektrické energie. I tento druh výroby může být svým způsobem kontroverzní, protože ze zákona zachování energie je při spalování vodíku získávána ta samá⁹ energie, která byla použita při jeho výrobě. Nalezení efektivního procesu výroby vodíku a jeho efektivního využití je výzva pro vědce na další roky. [21][22]

Elektřinu jako zdroj paliva využívají letadla s elektromotory a některé aerolinky jako *Easyjet* plánují jejich uvedení do provozu ještě v této dekádě. Použití elektrická letadel je také jedna z variant snížení uhlíkové stopy letectví podobně, jako je tomu u automobilů v kontextu osobní dopravy. Zde se samozřejmě nabízí otázka výroby elektrické energie, použitelnost a následná likvidace baterií a samotná váha baterií, protože jak již bylo zmíněno, každý kilogram navíc stojí aerolinie ročně nemalou částku peněz. [23]

⁸ Podrobněji rozebrán v následující kapitole

⁹ Za ideálních podmínek. Vzhledem k účinnosti procesu výroby a ztrátám bude vždy menší.

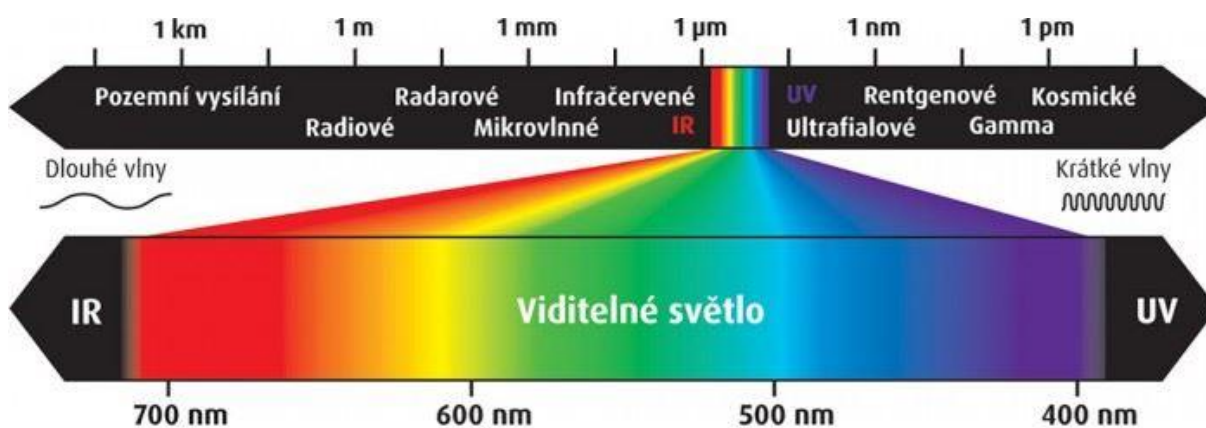
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

2 Letectví a životní prostředí

Otázka leteckého odvětví ve vztahu k životnímu prostředí je zvláště v poslední době velmi diskutovaná. Největší pozornost je věnovaná emisím, které se tvoří spalováním paliv probraňných v první kapitole a s tím spojené klimatické změně. Dopad letadel na prostředí, ve kterém se pohybují není však ani zdaleka jenom o emisích. Existuje mnoho dalších vlivů, jako například hluk z letadel, znečištění vody a podobně. Kromě toho budou v této kapitole rozebrány také kondenzační čáry vyskytující se za letadly.

2.1 Skleníkový efekt

Důležitým pojmem spojeným s životním prostředím je skleníkový efekt. Během normálního každodenního procesu fungování sluneční soustavy Slunce emituje do svého okolí elektromagnetické záření. Záření dopadající na Zemi je tvořeno ze tří složek. Jedná se o viditelné světlo, ultrafialové záření a infračervené záření. Jak je patrné z Obr. 6, tyto tři složky jsou pouze nepatrnou součástí velkého spektra elektromagnetického vlnění, které rozlišuje jednotlivá vlnění podle vlnové délky.



Obrázek 6 : Spektrum elektromagnetického vlnění [24]

Co se týče UV (z angl. ultraviolet) záření, je zastoupeno cca 5 % slunečního záření dopadající na Zemi a skládá se z více složek. UV-A složka tvoří 95 % a UV-B 5 %. Země má ve výšce 20 až 25 km nad mořem (platí pro střední zeměpisné šířky) ozonovou vrstvu, která zachytává většinu škodlivého UV-B záření. Když ale dojde k narušení ozonové vrstvy, na Zemi se dostane více UV záření, což vadí například pokožce, která se rychleji spálí nebo může docházet i k poškození zraku. Zvýšený přísun UV záření škodí také rostlinám a živočichům.

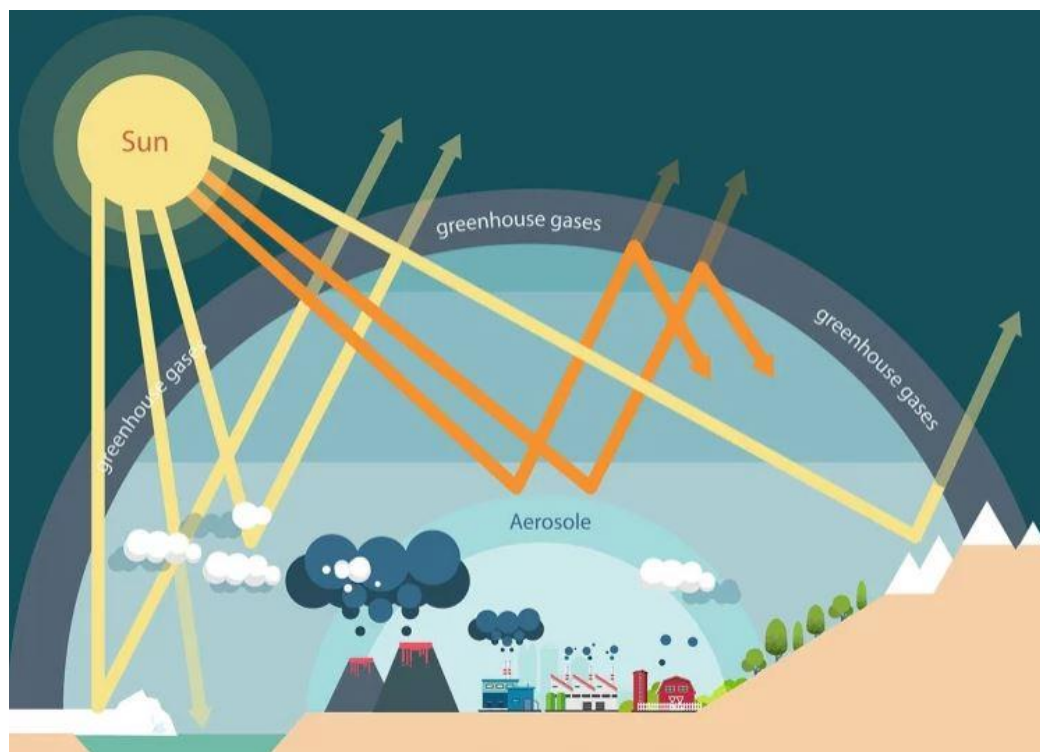
KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Množství propuštěného UV záření ovlivňuje kromě stavu ozonové vrstvy také řada dalších faktorů. Může se jednat o výšku Slunce nad obzorem, kdy při východu a západu je Slunce nízko a s tím klesají také hodnoty UV. Naproti tomu v poledne, kdy je slunce přímo nad obzorem je intenzita dopadajícího záření mnohem vyšší. Svou roli hraje také nadmořská výška. S rostoucí nadmořskou výškou klesá množství částic v atmosféře, které UV pohlcují. Gradient je 6-8 % na 1000 m výšky. Černá tělesa obecně záření pohlcují a bílá zase odráží, z toho důvodu je riziko spojené s UV zářením v zimě daleko vyšší, protože sníh odrazí kolem 80 % tohoto záření, kdežto zemina či tráva velkou část pohlcují. Na ochraně se podílí i oblačnost, přes kterou se průchodnost záření snižuje. Vlivem lidské činnosti, zejména vypouštění určitých látek do ovzduší došlo k narušení ozonové vrstvy a tím ke zvýšení dopadajícího UV záření. Z toho důvodu byl zřízen tzv. UV-index, který slouží veřejnosti pro zhodnocení zdravotního rizika vyplývajícího z příjmu UV záření. Nejnižších hodnot nabývá v zimním období při zatažené obloze, naopak nejvyšší hodnoty se objevují za jasných dní v letních měsících. [25]

S infračerveným zářením je to už složitější. Toto záření lze chápat jako přenos energie ve formě tepla a je lidskému oku neviditelné, byť lidé ze sebe infračervené záření vyzařují. Může být ale například pozorováno fotoaparátem mobilního telefonu, kdy při namíření objektivu na čočku ovladače televizoru, který využívá právě infračervené světlo k přenosu signálu, lze na displeji pozorovat „pohyb“ tohoto světla, který ale pouhým pohledem bez mobilu vidět nejde. Infračervené záření tvoří zhruba polovinu slunečního záření dopadající na Zemi. Nižší desítky procent jsou pohlceny nebo odraženy atmosférou a mraky a cca 50 % záření absorbuje zemský povrch. V součtu teoreticky kolem 30 % je odraženo zpět do vesmíru. Zde ovšem přichází role skleníkového efektu. Skleníkový efekt se v atmosféře Země projevoval od jejího samotného počátku. Princip jeho fungování spočívá v tom, že infračervené světlo, které je ze Země vyzářeno (zdroj teplé zemské jádro) nebo odraženo je zachytáváno skleníkovými plyny v atmosféře a částečně vraceno zpět na Zemi. Laicky řečeno není umožňováno úplnému odrazu tepla do vesmíru. Úloha skleníkových plynů je tedy vyrovnávací – zabraňují velkým změnám teplot v souvislosti s kolísáním slunečního záření. Vliv skleníkového efektu je zásadně důležitý pro existenci vody v kapalném stavu a tím pádem i pro existenci života. Je proto důležité nevnímat skleníkový efekt v negativním slova smyslu. Majoritním zástupcem skleníkových plynů je vodní pára. Ostatní látky jako oxid uhličitý, methan freony nebo oxid dusný jsou v atmosféře ve stopovém množství, a právě kvůli jejich nízké koncentraci je pro člověka snadné jejich množství významě a v dohledné době měnit. [27]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Více než polovinu antropogenního¹⁰ vlivu na změny skleníkového efektu představuje oxid uhličitý. Jeho rovnovážná koncentrace se zvyšuje uvolňováním jeho zásob, například spalováním fosilních paliv. Koncentrace CO₂ byla dle výzkumů dlouhodobě stálá a zvyšování začalo až v devatenáctém století v období industrializace. Od té doby se zvýšila o 30 %. Hlavní příčiny zvyšování koncentrace CO₂ v zemské atmosféře jsou dva. Jedná se o již zmíněné pálení fosilních paliv a kácení lesů. I když většinu skleníkových plynů tvoří vodní pára, s rostoucí koncentrací oxidu uhličitého se méně tepla vyzáří ze Země, to má za následek oteplení planety. Oteplení planety má nespočet důsledků mimo jiné i tání ledovců, které díky své bílé barvě záření odráží. S rostoucí teplotou atmosféry roste také schopnost vzduchu pojmout větší množství vodní páry a tím pádem roste množství skleníkových plynů. Z této skutečnosti je patrné, že oteplování planety ještě více zvyšuje účinnost skleníkového efektu. Jedná se o cyklus, který umocňuje sebe sama. Průměrná teplota na povrchu Země se zvýšila za poslední století o zhruba 0.6 °C a dnešní generace lidí může být tou poslední, která může tento proces ještě zastavit. Ostatní již zmíněné skleníkové plyny tvoří druhou polovinu látek vypouštěných do ovzduší, které má za následek člověk. Freony jsou uvolňovány dokonce výhradně lidskou činností, a i když jich je v atmosféře méně, jsou účinnější v pohlcování tepla v porovnání s oxidem uhličitým a mají delší životnost. Obr. 7 znázorňuje výše zmíněné procesy. Žluté paprsky představují viditelné světlo, oranžové infračervené záření. [27]



Obrázek 7: Skleníkový efekt [26]

¹⁰ =vyvolaného člověkem

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Již koncem devatenáctého století vypočítal Švédský badatel a laureát Nobelovy ceny za chemické objevy Swante Arrhenius, že teoretické zdvojnásobení oxidu uhličitého v atmosféře by mohlo zvednout její teplotu až o 5 °C. V následující části jsou vypsány rovnovážné efekty, jejichž nastání se předpokládá při zdvojnásobení koncentrace CO₂ v atmosféře (stav předpovídaný na polovinu 21. století). Tyto předpovědi jsou získány z reprezentativního výběru počítačových klimatických modelů. Pro každou oblast jsou seřazeny sestupně podle úrovně jistoty, že jev nastane (první položky mají největší jistotu, poslední nejmenší).

Teplota

- Ohřev povrchu Země a nižší vrstvy atmosféry
- Ochlazení stratosféry
- Na povrchu země průměrné oteplení o 2.5 °C
- Ve vyšších zeměpisných šířkách je oteplení podprůměrné v létě a nadprůměrné v zimě

Srážky

- Zvýšení průměrných srážek o 3–15 %, s rostoucím oteplením rostou i srážky
- Ve vyšších nadmořských výškách nadprůměrně vyšší srážky
- V zimě vysoké srážky ve středních nadmořských výškách
- V suchých subtropických oblastech srážky beze změn

Z výše vypsánoho vyplývá předpokládané zvýšení vlhkosti ve vyšších zeměpisných šířkách během zimy. Zároveň budou postupně mizet oblasti pokryté ledovci a sněhem. [27]

2.2 Oxid uhličitý a oxidy dusíku

Letecké motory produkují emise, které jsou podobné emisím z jiných strojů spalující fosilní paliva. Nicméně emise letadel jsou neobvyklé v tom slova smyslu, že velkou část z nich emitují ve vysokých nadmořských výškách. Právě tyto emise zvyšují potřebu a důležitost environmentálních otázek souvisejících s globálním dopadem ale také s lokální kvalitou ovzduší v nižších vrstvách atmosféry. Metodika ICAO pro výpočet oxidu uhličitého uvádí, že z jednoho kilogramu spáleného kerosinu je vyprodukováno 3.16 CO₂. Navíc emise vzniklé během produkce kerosinu (včetně přepravy a rafinace) přidávají přibližně dalších 0.5 kg na kilogram spáleného kerosinu. Jako praktický příklad může sloužit zpáteční let z Frankfurtu no New Yorku, kdy včetně emisí z výroby je vyprodukováno 570 tun CO₂, což odpovídá spáleným 156.500 kilogramům leteckého paliva. Mnohé studie dávají velkou relevanci údajům o množství vyprodukovaného CO₂ na osobu za let, což by v tomto případě znamenalo 870 kg CO₂ na pasažéra v ekonomické třídě. Tento údaj je vypočítaný na základě ICAO kalkulačky emisí [28] s ohledem na

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

skutečnost, že letadla standardně spolu s pasažéry přepravují i cargo, které také zaujímá poměrnou část vyprodukovaného oxidu.

Z pohledu celosvětové statistiky letadla vyprodukovala v roce 2019 950 milionů tun oxidu uhličitého a globálně lidé vyprodukovali 43 miliard tun CO₂. Ve zmíněný rok bylo přepraveno letadlem 4.5 miliardy lidí. Airbus ve verzích A380 a A220, Boeing 787, ATR-600 a Embraer E2 jsou letadla, jejichž spotřeba je menší než 3 litry na 100 cestujících/kilometrů, čímž jsou srovnatelné svojí efektivitou s většinou moderních kompaktních aut. Letectví je zodpovědné za 12 % globálních emisí oxidu uhličitého ze všech druhů transportu v porovnání s pozemní silniční dopravou, která tvoří 74 %. Ve se pak letectví podílí na globální produkci oxidu uhličitého dvěma až třemi procenty ročně. Tento plyn zůstává v atmosféře dlouhou dobu. Zhruba polovina emisí je absorbována oceány a lesy během třiceti let, dalších 30 % je odňato během pár stovek let a zbylá pětina zůstává v atmosféře po mnoho tisíc let. [29][30]

Oxidy dusíku označovány zkráceně jako NO_x tvoří další nemalou část látek spojených s provozem letadel, které znečišťují životní prostředí. Z toho důvodu se na důsledky těchto látek bere ohled při vyvíjení nových motorů, kdy je díky aktualizovaným normám snaha omezit dusíkaté emise. Oxidy dusíku produkované letadly mají vliv na lokální kvalitu ovzduší a tím i na lidské zdraví jednak skrze emise produkované na letištích a v přilehlém okolí (pohybem letadel na zemi a cykly vzletů a přistání) a jednak kvůli emisím vypouštěným v hladinovém letu. Hlavní látkou s ohledem na lidské zdraví je oxid dusičitý (NO₂). Ten proniká velice snadno do plic, kde je ho zhruba dvě třetiny vstřebáno do krve. Je špatně rozpustný ve vodě, což značí, že snadno pronikne do dolních cest dýchacích v porovnání například s formaldehydem nebo oxidem siřičitým, které působí především v horních cestách dýchacích. Zdraví dospělí lidé snesou bez větších obtíží krátkodobé zvýšení koncentrace až na 2 mg/m³. Tyto látky představují riziko ale především pro citlivé jedince, děti nebo lidi trpícími astmatickými potížemi, pro něž je bezpečná koncentrace desetkrát nižší. Podle lékařů a hygieniků je jsou oxidy dusíku 6x až 10x nebezpečnější než oxid siřičitý, a i proto je jejich limit pro krátkodobou koncentraci stanoven na 0.2 mg/m³. [31]

Oxid dusičitý je toxický hlavně kvůli dráždění sliznice. Nebezpečné mohou být již i velmi malé koncentrace, pokud působí déle než 30 minut. Při otravách je velmi nebezpečné především dlouhodobé vystavení dusíkatým oxidům bez vědomí toho, že se tak děje. První náznaky intoxikace se projevují poklesem krevního tlaku, pálením očí, boláním hlavy a dýchacími potížemi, které se mohou začít projevovat až po několika hodinách. Chronické otravy pak mohou způsobovat záněty spojivek a větší kazivost zubů. Do interiérů mohou tyto plyny pronikat z vnějšího ovzduší, obsahuje je ale i cigaretový kouř a uvolňují se i při používání naftových

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

kamen, či plynových spotřebičů. Lidé, kteří používají v kuchyni pro vaření plynové zdroje jsou v mírném, leč znatelném riziku vyššího výskytu respiračních onemocnění, jak naznačují vědecké studie. [31]

Mimo výše zmíněné problémy spjaté s emisemi oxidů dusíku existují i jejich tzv. nepřímé důsledky. NO_x ovlivňují atmosférickou koncentraci dvou významných skleníkových plynů, a sice methanu a ozonu. Methan (CH_4) je plyn, který zůstává v atmosféře po dobu nejméně deseti let. V rámci stoletého časového rámce je methan je zhruba 34x silnější v porovnání s oxidem uhličitým (v kontextu skleníkového efektu). Ozon (O_3) je skleníkový plyn, který zůstává v atmosféře od dvou do osmi týdnů. Vysoké koncentrace ozonu v přízemních vrstvách jsou generovány zejména silniční dopravou, i když s nástupem automobilů na elektrický pohon jeho koncentrace v poslední době klesá. Ozon dráždí oči, zhoršuje dýchací potíže a může být velkým problémem pro lidi trpící chronickými onemocněními. Tvorba ozonu zapříčiněná letadly je podobná silniční dopravě, avšak kvůli silnějšímu působení UV záření ve větších výškách je jeho formování efektivnější v porovnání s přízemními podmínkami. Chemické procesy atmosféry jsou poměrně komplexní, ve zkratce se ale jedná o tento proces: Emise oxidů dusíku z provozu letadel vedou k prvotnímu nárůstu ozonu, který přetrvá pár měsíců. To má za následek úbytek methanu v měřítku desetiletí, ale také samotného ozonu. Pozdější úbytek methanu a ozonu ovšem nevyváží svým vlivem na skleníkový efekt původní navýšení koncentrace ozonu a celkový efekt dusíkatých oxidů je tedy oteplovací. [32]

NO_x zapříčiňují klimatické změny, které jsou relativně krátkodobého charakteru. Krátkotrvající efekty jako jsou tyto začínají být relevantní až v případě, kdy aktivity, které je způsobují přetrvávají nebo se zesilují. Tak jako tak se zde nedá bavit o akumulaci jako u skleníkových plynů s dlouhodobějšími charakteristikami.

Co se týče celkově otázky emisí do budoucna velkou roli budou hrát biopaliva. Spalování biopaliv oproti klasickým palivům probíhá čistěji, což znamená, že při jejich spalování je vypouštěno do okolí méně emisí a jsou v přírodě plně rozložitelné. To třeba neplatí pro některá aditiva kerosinu. Ethanol vyrobený z celulózy například má potenciál snížit emise skleníkových plynů až o 86 %. Navíc se snadno rozkládá bez újmy okolnímu prostředí a díky svému vysokému oktanovému číslu může sloužit jako bezpečná náhrada pro některá aditiva jako např. MTBE¹¹. Ano, produkce takového ethanolu může zvýšit emise určitých látek, protože se využívá zdrojů fosilní energie během zemědělských prací spjatých s pěstováním plodin a následnou produkcí

¹¹ Butyl ether používaný ke zvýšení oktanového čísla paliva

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

biopaliv. Tyto emise mohou být ovšem do budoucna redukovány použitím energie z obnovitelných zdrojů a využíváním zlepšených pěstitelských metod. Biopaliva navíc kvůli přísnějším nárokům obsahují méně nečistot (například síru) což umožňuje snížit emise oxidu siřičitého, který je taktéž jedou z hlavních látek podílejících se na znečištění ovzduší. [33][34]

2.3 Kondenzační čáry a cirrovitá oblačnost

Kondenzační stopy známé z anglického „contrails“ (ze zkrácení condensation trails) jsou přirozenými jevy v atmosféře. Vznikají ve výškách kolem osmi až dvanácti kilometry nad povrchem jako důsledek spalování leteckých paliv dopravními letouny. Při pracovním cyklu motoru se do okolního prostředí uvolňuje voda (ve formě vodní páry) a stopové množství velmi malých pevných částic. Tento drobný aerosol funguje jako kondenzační jádra, na kterých vodní pára produkovaná motory letadel kondenzuje. Kondenzace probíhá vždy až v určité vzdálenosti od letadla, až po poklesu teploty spalin na teplotu ambientního prostředí. To je důvod, proč při pohledu ze země jsou čáry vidět vždycky až v jisté vzdálenosti za letadly. Mohou nastat i případy, kdy kondenzační stopy vůbec nevzniknou. Všechno to záleží hlavně na relativní vlhkosti vzduchové hmoty, kterou letadlo prolétává.

Pokud dojde k samotné kondenzaci, další vývoj (tím pádem i vzhled) stopy záleží na vícero meteorologických faktorech. Jedná se především o vertikálních pohybech okolní atmosféry, intenzitě a charakteru větu, turbulenci a opět vlhkost okolního vzduchu. Pokud není vzduchová masa dostatečně vlhká, vzniklé kapičky se mohou velmi rychle vypařit a životnost kondenzační stopy není příliš dlouhá po průletu letadla. Při vyšší vlhkosti již však k vypařování kapek nedochází. Vzhledem k tomu, že teplota vzduchu ve vysokých letových hladinách se pohybuje od -40 °C do -60 °C, kapky vody velmi rychle promrznou a přetvoří se na ledové krystalky, které pak slouží jako tzv. krystalizační jádra, kolem kterých krystalizuje voda ve formě vodní páry z okolí. Vznikají tak oblaka tvořena jenom z ledových krystalků, která jsou svým vzhledem podobná přirozené výškové řasovité oblačnosti – cirům a může být obtížné pouhým pohledem složitě odlišit, co je co. V takovýchto případech se může životnost kondenzačních čar výrazně prodloužit a v závislosti okolního proudění se zpravidla s rostoucí vzdáleností za letadlem rozšiřují a deformují. Ve výjimečných případech se mohou kompletně „roztéci“ do svého okolí, kdy jejich rozeznání od normálních cirů je ještě složitější. Takto uměle vzniklé mraky se mohou postupně pospojovat do víceméně souvislého závoje cirů.

Zajímavějšími případy nastávají během specifického podmínek v atmosféře, například při vlnovém proudění, kdy kondenzační čára vzniká nebo se udržuje pouze v jedné části oblohy,

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

zatímco kousek dál se rychle rozpouští nebo vůbec nevzniká. Silná deformace pak může čáry různě deformovat, přerušovat je nebo vytvářet kličky a vlnky, jak zachycuje *Obr. 8*.



Obrázek 8: Kondenzační stopa [35]

Díky závislosti stop na meteorologických podmínkách mohou nastat dny, kdy při pohledu na oblohu ze země je vidět nespočet čar, slangově je obloha celá „počmáraná“, jindy je zase těžké najít byť jen jednu. Ve vzhledu stopy hraje svou roli také hladina, ve které letadlo letí. Díky tomu lze současně pozorovat různorodé čáry jako například široké déletrvající a rychlemizící tenké zdánlivě vedle sebe, přičemž mezi nimi může být výškový rozdíl stovky metrů. Geometrie nasvícení sluncem rovněž ovlivňuje vzhled podobně jako u oblačnosti. Kromě běžných bílých mohou být pozorovány i tmavé nebo mohou jednotlivé stopy vrhat svůj stín na řídké závoje cirů pod nimi. V takových případech lze kromě samotné čáry pozorovat i její tmavší „dvojče“ kousek od ní. [36]

Kondenzační čáry i cirrovité mraky mohou mít z pohledu globálního oteplování pozitivní i negativní vliv. Oteplování způsobují zachytáváním infračerveného záření ze Země a ochlazování zase odrazem záření kratších vln (viditelné světlo a UV) zpět do vesmíru. Z celkového pohledu však oblačnost způsobená provozem letadel mají významný oteplující vliv který se ale liší v závislosti na úseku dne. Během dne zachycují kondenzační stopy infračervené záření a odráží obecně záření ze slunce. V noci mají pouze oteplující efekt, protože neodráží žádné záření ze Slunce. Protože jsou čáry krátkotrvající a formují se v oblastech s vyšší hustotou provozu letadel a dokáží ovlivňovat i cirrovité mraky, mohou způsobit lokální nebo regionální klimatické změny. Tento oteplující efekt je tak silný, že dle výzkumů převyšuje celkový oteplující efekt oxidu uhličitého vyprodukovaného za celou dobu provozu poháněných letadel. [37]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

2.4 Ostatní dopady na životní prostředí

Hluk je často definován jako „nechtěný zvuk“ a letadla jdou s hlukem ruku v ruce. Mezi hlavní zdroje hluku z letadel lze zařadit aerodynamický hluk a hluk generovaný motory. Aerodynamický vzniká při interakci letadla se vzduchem, kdy vzduch prolétá a naráží do nejrůznějších částí letadla. Hluk z motorů vzniká silným míšením urychlených plynů a okolní atmosféry a projevováním tzv. shear efektu, který vzniká kvůli rozdílu relativních rychlostí a s tím i ovlivněného tlaku plynů. Při vyšších výkonech motorů, například při vzletu a stoupání, převažuje hlavně zvuk generován motory, zatímco třeba při klesání, kdy jsou motory na volnoběh, převládá hluk aerodynamický. Zákon jasně popisuje hluk jako zvuk, který existuje na nesprávném místě nebo v nesprávnou dobu a způsobuje obtíže, vyrušení od spánku nebo jiné potíže. Na rozdíl od ostatních typů „znečištění“ hluk nezávisí pouze na fyzikálních parametrech zvuku jako takového, ale také na reakci lidí na něj. To způsobuje z měření hlukových emisí poměrně komplexní proces. Mnohá letiště publikují na webových stránkách celou řadu údajů ohledně hluku a pohybech letadel. Poskytované informace závisí na okolních podmínkách, a i když se budou lišit letiště od letiště, nejčastěji se lze setkat s provozními údaji, jako je dráha v používání, z čehož se dá předpokládat lokace letadla v čase. Dalšími informacemi může být detailnější popis vzniku hluku z letadel a postup letiště ve snaze jeho redukování, výkonnostní zprávy letiště ve vztahu k hluku nebo odkazy na trackovací služby, díky kterým je možné sledovat polohu letadel. Zatímco množství pohybů letadel může poskytnout hrubý odhad dopadů hluku na jednotlivých letištích, je důležité mít na paměti, že efekty hluku mohou být velmi subjektivní a závislé i na jiných zdrojích hluku z okolí letiště. Obecně letiště situovaná ve více zalidněných oblastech budou mít silnější dopady, protože bude dotčeno více lidí. [38]

Poslední zmíněný, avšak také velmi důležitý je dopad na **kvalitu vody**, který může být narušena úniky leteckých paliv. Z tohoto důvodu existují přísné regulace, jakým způsobem musí být zacházeno a manipulováno s palivou při jejich převozu a, skladování a tankování. Během zimních měsíců, kdy jsou nízké teploty, musí být letadla před odletem odmrazena, případně je potřeba aplikovat nemrznoucí kapalinu, která zajistí, že po určité době od nanesení křídla letadla nezamrzou. Tyto kapaliny mohou také ovlivnit kvalitu okolních vod, pokud s nimi není zacházeno zodpovědně. Letiště sama o sobě jsou velkými spotřebiteli vody. Některá velká letiště mohou mít stejnou spotřebu vody jako malé město, a i proto jsou například ve Velké Británii publikované informace o spotřebě vody většiny hlavních letišť v pravidelných výkazech. [38]

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

3 Srážky

Hlavním bodem zájmu této práce jsou srážky, jejich množství, vznik a zkoumání možnosti jejich ovlivnění letadly. Z toho důvodu je poslední kapitola teoretické části věnována právě srážkám. V kapitole jsou postupně rozebrány srážkotvorné mechanismy, druhy srážek z několika hledisek a vybrané druhy mraků. Poslední část se zabývá přístroji měření srážek v praxi na meteorologických stanovištích.

3.1 Vývoj srážek

Prvotní podmínkou pro vznik srážek ve středních zeměpisných šířkách je přítomnost ledových krystalků a vodních kapek, jinými slovy vody ve dvou skupenstvích, v jednom mraku. Tento stav nastává, pokud se oblak dostane během vertikálního vývoje do výšek, ve kterých se pohybuje teplota vzduchu od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čím je atmosféra teplejší, tím dokáže pojmout více vody, a proto aby mohlo dojít ke kondenzaci vodní páry, musí se teplota vzduchové hmoty snížit. Tzv. rosný bod udává teplotu, na které bude vzduch plně nasycen a běžně se udává v pravidelných meteorologických hlášeních pro piloty. Pokud například bude teplota vzduchu $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rosný bod $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ znamená to, že pokud by teplota postupně klesala až rosnému bodu, relativní vlhkost takové vzduchové hmoty by rostla až ke 100 % a po překonání rosného bodu by se již voda obsažená ve vzduchu začala vysrážet do okolí. Takovéto ochlazení je zapříčiněno třemi různými způsoby. Prvním z nich je vertikální pohyb vzduchové hmoty (tzv. adiabaticky). Může se tak dít při nuceném výstupu vzduchu například podél svahů hor nebo při termické konvekci, kdy určitá část vzduchu stoupá, protože má větší teplotu než její okolí. Tak se děje kvůli rozdílu hustot, kdy teplejší vzduch má hustotu nižší, a proto stoupá. Mísení dvou různých vzduchových hmot je dalším způsobem ochlazení. Tento proces ale často způsobuje pouze mlhu, nanejvýš může vyvolat mrholení. Zpravidla díky němu nedochází k rychlému zkapalnění velkého množství vodní páry na jednom místě, aby tak došlo k déletrvajícím srážkám. Třetí způsob ochlazení vzduchové hmoty nastává případně, kdy se vzduch nepřesouvá, ale ochlazuje se během předávání svého tepla radiačním vyzařováním do zemského povrchu. Takovýto proces, kdy se vzduch nepřesouvá podél vertikály a tím pádem nemění svoji tlakovou hladinu, se nazývá izobarický.

Po dosažení rosného bodu se jednotlivé molekuly vody začnou shlukovat do větších částic – vodních kapek. V čistém vzduchu bez příměsí a nečistot by byl tento proces energeticky náročný, nicméně v reálné atmosféře existuje spousta částic, které slouží jako kondenzační jádra, kolem nichž kapky vody jednoduše kumulují a kapky se tak tvoří podstatně snadněji. Přítomnost kondenzačních jader v ovzduší je dalším důležitým předpokladem pro vznik srážek.

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

Jedná se o pevné nebo kapalné částičky, jako například aerosoly zmíněné v předchozí kapitole, křemen, slída, kyselina sírová a různé soli nebo i mikroorganismy. Po dosažení určité velikosti již výstupné proudy vzduchu pod mraky nejsou schopny kapky vody udržet déle a ty tak padají vlivem gravitační síly směrem k povrchu. V kapalném stavu mohou srážky nabývat tří podob. Jedná se o mrholení, déšť a přeháňky. To, jaké srážky vypadávají závisí na druhu mraku, ze kterého vypadávají. Z vrstevnatých frontálních mraků padá trvalý déšť, z kupovitých mraků přeháňky a z nízkých mlhovitých stratů mrholí. [39]

3.1.1 Srážkotvorné teorie

Růst kapiček vody až do takových velikostí, kdy je už výstupné proudy vzduchu pod mrakem neudrží popisuje několik hlavních teorií. Tyto teorie jsou popsány v následující podkapitole.

Pro první z nich je důležité, aby byly v horní části mraku přítomny ledové krystalky. Tyto krystalky zastávají funkci kondenzačních jader. Z této teorie tedy vyplývá, že určitá část oblaku musí zasahovat nad nulovou izotermu¹², kde jsou záporné teploty. V této části mraku vznikají právě ledové krystalky. Tato skutečnost je například důvodem, proč se předpokládá vznik přeháněk z kupovitých mraků tehdy, jakmile vyrostou dostatečně vysoko, aby byla jeho část ve výškách nad nulovou izotermou. V této oblasti spolu koexistují ledové částičky a přechlazené vodní kapky. Po kontaktu přechlazené kapky s krystalkem ledu se na něj okamžitě přimkne a následně ztuhne. Nárůstem velikosti těchto těles přirozeně dochází také k nárůstu jejich hmotností a postupnému propadu. Při pohybu směrem dolů dochází ke kolizím s dalšími velmi malými kapičkami, které se taktéž nabalují, až dosáhnou tyto shluky ledu velikosti známých běžných kapek. Rychlost propadu postupně narůstá a jakmile se toto ledové tělíčko dostane do nadnulových teplot, tj. do prostředí pod nulovou izotermu, roztaje a je z něj dešťová kapka. Pakliže je nulová izoterma nízko, nebo dokonce na zemském povrchu, vypadávající srážky mohou být sněhové nebo smíšené. Tato teorie také objasňuje, proč v létě nemusí vznikat srážky ani z mohutných vertikálně rozrostlých mraků. Nulová izoterma může být v takové výšce, že mrak, ačkoliv je mohutně rozvitý, nad ni jednoduše nesahá. Naopak v zimě mohou vypadávat srážky i z relativně tenkých vrstev oblačnosti. Tato teorie se obecně označuje podle jejich autorů Tora *Bergerona* a *Władysława Findeisena*. [40]

Druhá teorie popisuje vznik srážkových oblaků v nízkých zeměpisných šířkách a pracuje s absencí ledových krystalků. Vysvětluje tvorbu srážek koalescencí¹³ v oblacích, kde je nadnulová

¹² Čára spojující místa se stejnou teplotou vzduchu

¹³ Spojování menších částiček ve větší celky (v tomto případě vody)

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

teplota, z toho důvodu se tento princip označuje jako „*koalescenční teorie*“. Staví na přítomnosti velkých kondenzačních jader, které mohou představovat například krystalky mořských solí. V mraku se nachází velké množství malých kapiček, které mají víceméně stejnou velikost. Jakmile se tyto kapky shlukují, roste jejich velikost a propadávají směrem dolů. Podobně jako tomu bylo v předchozí teorii, srážejí se s dalšími oblačnými částicemi a opět se nabalují, díky čemuž se znovu zvětšují. Po určité době jsou kapky velké natolik, že je povrchové napětí nedokáže udržet pohromadě a částečně se rozpadnou. Takto vzniklé miniaturní kapénky nejsou těžké natolik, aby překonaly výstupné proudy vzduchu pod mrakem, a jsou znovu unášeny směrem vzhůru do mraku. Celý proces se tak opakuje. Podmínkou pro vznik srážek podle této teorie je přítomnost kapalné vody v oblaku a velký obsah vodní páry, což je typické spíše pro mraky v oblasti rovníku. [40][41]

V kontextu vývoje srážek je vhodné také zmínit i tzv. cloudseeding neboli „setí mraků“. Jedná se o proces, který má za úkol podpořit tvorbu srážkových částic v mracích, a tím zvýšit pravděpodobnost, že z daného mraku začnou vypadávat srážky. Při cloudseedingu se využívají vybrané chemické sloučeniny, často se jedná o jodid stříbrný. Látky se do ovzduší aplikují skrze dým vytvořený generátory na povrchu, mohou je aplikovat letadla nebo být vystřelovány pomocí raket.

Ověření předpokladu o fungování cloudseedingu je v praxi složité, neboť každý mrak je trochu jiný a po jeho ovlivnění už tím pádem není k dispozici „kontrolní vzorek“. Moderní výzkumy na základě dat z radaru skutečně potvrzují větší růst sněhových vloček v místech, kde byla rozptýlena srážkotvorná látka. Reálné dopady je ale přesto obtížné určit, odhady hovoří o nárůstu srážek o jednotky procent. Cloudseeding se nicméně potýká s celou řadou kontroverzí – případný negativní vliv na životní prostředí nebo otázka, zdali vyvolání srážek nad určitou oblastí nezpůsobí absenci srážek nad jiným územím, kde by za normálních podmínek srážky vypadávaly. Největší síť zařízení pro ovlivňování srážek má v současnosti Čína. [50]

3.2 Druhy srážek

Během kondenzace narůstají oblačné kapičky do velikostí kolem dvou setin milimetru. Aby byly udrženy ve vzduchu, je dostačující i velmi slabé vertikální proudění o rychlosti kolem 0,012 m/s. Jakmile vlivem některého z výše popsaných procesů kapky v mraku narostou a zvětší svoji hmotnost, začnou vypadávat ve formě srážek. V následující části jsou popsány nejběžnější zástupci srážek, se kterými se lze setkat.

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

- **Déšť** je jev, během kterého vypadávají kapky o průměru 0,5 až 5,5 mm. Maximální rychlost padání zpravidla nepřesahuje 9 m/s. Pokud vznikne kapka, která má větší průměr než 5,5 mm, při pádu se vlivem aerodynamických sil rozpadne na menší částičky. Největší vertikální rychlosti kapek a největší velikost kapek bývá obecně dosahována v konvekčních mracích.
- **Mrholení** je srážka podobná dešti, nicméně vodní kapky mají menší velikosti. Jejich průměr má maximálně půl milimetru a rychlost padání nepřesahuje 4 m/s.
- Krystalky ledu, které mají podobu šestičetných ledových hvězdic nebo větviček se nazývají **sníh**. Při teplotách kolem bodu mrazu vznikají vločky největších rozměrů a postupně s klesající teplotou vzduchu postupně klesá i velikost vloček. Pokud je teplota prostředí nižší než $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, jednotlivé vločky se mohou spojovat do větších částic. Mohou nastávat i případy, kdy srážky sice vypadávají z mraku v podobě sněhových vloček, nicméně kvůli plusovým teplotám na zemském povrchu (zpravidla nad $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$) roztají a dopadají v kapalném skupenství. Pokud roztaje jen část padajících vloček, vzniká tzv. smíšená srážka nazývaná **déšť se sněhem**. Příklad sněhového krystalku znázorňuje Obr. 9.



Obrázek 9: Sněhová vločka [42]

- Dalším zástupcem vypadávajících srážek jsou **sněhová zrna**. Jedná se o malé ledové částičky, které připomínají kuličky nebo rýži. Jejich velikost je menší než jeden milimetr a pokud dopadnou na zemský povrch, tak se nerozpadají. Trochu větší částice s názvem „**snow pellets**“¹⁴ dosahují rozměrů od dvou do pěti milimetrů a jsou křehké. Při dopadu na povrch mohou odskočit nebo se roztříštit.
- **Kroupy** jsou bílé ledové částice a považují se za největší vypadávající druh srážek. Svým vzhledem připomínají kámen achát, protože při jejich řezu jsou viditelné

¹⁴ Volně přeloženo jako „broky“

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

jednotlivé vrstvy, ze kterých je patrný způsob, jakým kroupa během životního cyklu narůstala. Vznikají pouze v bouřkových mracích typu cumulonimbus. V případě vhodných podmínek mohou dosahovat značných velikostí, čímž představují velké riziko pro letadla prolétávající skrz cumulonimbus nebo pod ním. Existují případy, kdy byly od krup poškozeny nebo úplně zničeny některé přední části letadel jako například čelní okna pilotů nebo kryt povětrnostního radaru. I když se kroupy nevyvíjejí v každé bouřce, jejich předpověď je složitá a v rámci bezpečnosti by se jejich přítomnost měla předpokládat v každém bouřkovém mraku. [40]

Co se týče časového intervalu vypadávání srážek, rozlišují se padající srážky na trvalé, občasné a přeháňky. Pokud srážky vypadávají nepřetržitě alespoň hodinu, klasifikují se jako *trvalé*. *Občasné* srážky se určitým způsobem podobají trvalým, alespoň co se způsobu vzniku týče, ale intenzita vypadávání kolísá (chvílemi nemusí vypadávat vůbec). Přeháňky jsou spojeny výhradně s kupovitou oblačností, pro kterou je typické časově i prostorově krátké trvání. Kupovité mraky se navíc po obloze vlivem větru přesouvají, což platí i pro srážky, které z nich vypadávají. Tyto srážky jsou často silnějšího charakteru, ale v určitém místě pozorování trvají jen v rozsahu několika jednotek minut až nižších desítek minut.

3.3 Měření srážek

Zařízení určené pro měření srážek, zejména jejich úhrnu a případně i okamžité intenzity se nazývá jednoduše *srážkoměr*. Toto zařízení je určeno k měření kapalných i tuhých srážek a podle způsobu, jakým je zařízení obsluhováno, se rozlišují srážkoměry automatické, manuální, popřípadě ombrografy. V České republice využívá ČHMÚ většinou srážkoměry, které mají záchytnou plochu 500 cm² a jsou instalovány takovým způsobem, aby se záchytná plocha nacházela ve výšce jednoho metru nad terénem (popř. sněhovou pokrývkou). Pro zimní období mohou být srážkoměry v horských a celkově vyšších polohách vybaveny zařízením, které dokáže nastavovat výšku měřicího přístroje. Informace o množství srážek se udává v milimetrech kapalné vody dopadlé na zemský povrch (1 mm je roven 1 l/m²). V následující části jsou rozebrány nejrozšířenější druhy srážkoměrů. [43]

3.3.1 Manuální srážkoměr a totalizátor

Manuální srážkoměr se skládá ze dvou záchytných nádob, nálevky se stejnou záchytnou plochou, konvice a odměrky. Při měření je vždy jedna nádoba vystavena na podstavec tak,

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

aby byla plocha zachycující srážky jeden metr nad terénem. V letních měsících se kvůli omezení výparu zachycené vody nasazuje na nádobu nálevka. Princip měření kapalných srážek spočívá v přelití vody ze záchytné nádoby do odměrky. Odměrka je pak rozdělená na jednotlivé dílky, které odpovídají milimetrům srážek. Aby bylo možné změřit tuhé srážky, je potřeba je nejprve nechat roztát v mírně teplém prostředí. Moderní manuální srážkoměry se mohou skládat pouze ze záchytné nádoby, která má škálu pro měření napadlých srážek umístěnou na sobě. V dnešní době jsou moderní manuální srážkoměry využívány ve velké míře amatérskými nadšenci. Na profesionálních stanicích v ČR se používají především automatické měřicí přístroje, nicméně manuální srážkoměry se používají jako záloha při výpadku automatických systémů nebo během souběžných měření. [44]

Totalizátor je zařízení sloužící pro měření úhrnu srážek za delší časové období, zpravidla půl roku. Využívá se pro měření v odlehlých nebo špatně dostupných místech, protože nevyžaduje každodenní obsluhu. Srážky jsou zachytávány do poměrně velké nádoby, která už na začátku měření obsahuje určité množství nemrznoucí kapaliny. Krom toho se přidává i vhodná látka, která má za úkol zabránit výparu napadaných srážek (např. olej). Množství napadaných srážek na dané období se pak jednoduše určí z přírůstkem celkového objemu kapaliny v nádobě. Průkopníkem tohoto způsobu měření byl francouzský glaciolog¹⁵ P. Mougín. Na Obr. 10 je zachycen totalizátor umístěný na vrcholu Lysina, což je druhá nejvyšší hora Slavkovského lesa. [45]



Obrázek 10: Totalizátor [46]

¹⁵ =zabýval se studiem ledovců a ledovcové činnosti

KAPITOLA III – TEORETICKÁ ČÁST

3.3.2 Ombrograf a automatické srážkoměry

Ombrograf je přístroj určený k zaznamenávání časového průběhu kapalných srážek. Název se skládá z řeckého *ombros* (dešťová přeháňka) a *grafos* (odvoz. od slova grafein – psát). Princip fungování spočívá ve stékání srážek do nádoby s plovákem, přičemž ke plováku je připojeno registrační zařízení. Toto zařízení zapisuje data na otáčející se papír. Takto vytvořený záznam dat na papíru se nazývá *ombrogram*. Ombrografy byly v Česku postupně nahrazeny člunkovými a váhovými srážkoměry. [47]

Moderní automatické srážkoměry jsou schopny měřit průběžné srážky bez přímé lidské součinnosti. Jedním z nich je **člunkový srážkoměr** (též překlápěcí, klopný), který zaznamenává elektrické impulzy vyvolané překlápěním dvoudílného člunku. Jakmile se jedna polovina člunku naplní srážkovou vodou, dojde díky hmotnosti vody k překlopení a začne se plnit druhá polovina člunku. Z první části voda vyteče. Z počtů impulzů se pak určí úhrn srážek nebo i jejich okamžitá intenzita v případě silnějších srážek. Člunkové srážkoměry jsou navrženy zpravidla tak, aby každé překlopení odpovídalo úhrnu srážek 0,1 mm. Při měření v zimním období je třeba, aby byl přístroj vyhříván. [48]

Nedostatky člunkového srážkoměru, jako například neschopnost okamžitého vyhodnocení tuhých srážek nebo závislost přesnosti na určité intenzitě, řeší použití **srážkoměru váhového**. Princip jeho fungování spočívá v měření hmotnosti napadaných srážek tenzometrickou¹⁶ váhou, která je připojena na řídicí elektroniku. Při procesu měření jsou využity metody používané v totalizátoru – nemrznoucí ekologická kapalina součástí měrné nádoby a vrstva silikonového oleje na povrchu vážené kapaliny. Součástí systému může být také detektor srážek, který má za úkol zamezit falešným srážkovým indikacím. [49]

¹⁶ Tenzometrie=měření mechanického napětí objektu prostřednictvím měření jeho deformace

KAPITOLA IV

Praktická část

4 Statistická analýza dat

Hlavním cílem této práce je provést analýzu srážkových dat a pohybů letadel na Letišti Václava Havla v Praze. Snaha je tedy prokázat nebo vyvrátit závislost mezi pohyby letadel a srážkami spadnými na letišti. Zkoumaná teze zní: „Pohyby letadel na letišti neovlivňují množství napařených srážek na letišti.“ Při čtení této kapitoly se čtenář nejprve seznámí s metodikou práce, zdroji dat a postupem zpracování. Druhá část se zabývá vlastní statistikou a samozřejmě nechybí ani zhodnocení výsledků a s tím související diskuze.

4.1 Zdroje dat

Autor pracoval se srážkovými daty a daty o pohybech (vzletech a přistání) na Letišti Václava Havla za období od 1.1.2015 do 31.12.2021, což tvoří dohromady období sedmi let. Krok členění je jeden den, celkem se tedy jedná o 2557 dnů.

Data o pohybech letadel poskytlo pro potřeby této práce Letiště Praha a.s. Jedná se o součet přistání a vzletů všech druhů letadel, tj. letadel provozovaných v komerční letecké dopravě a malých letadel používaných ve všeobecném letectví.

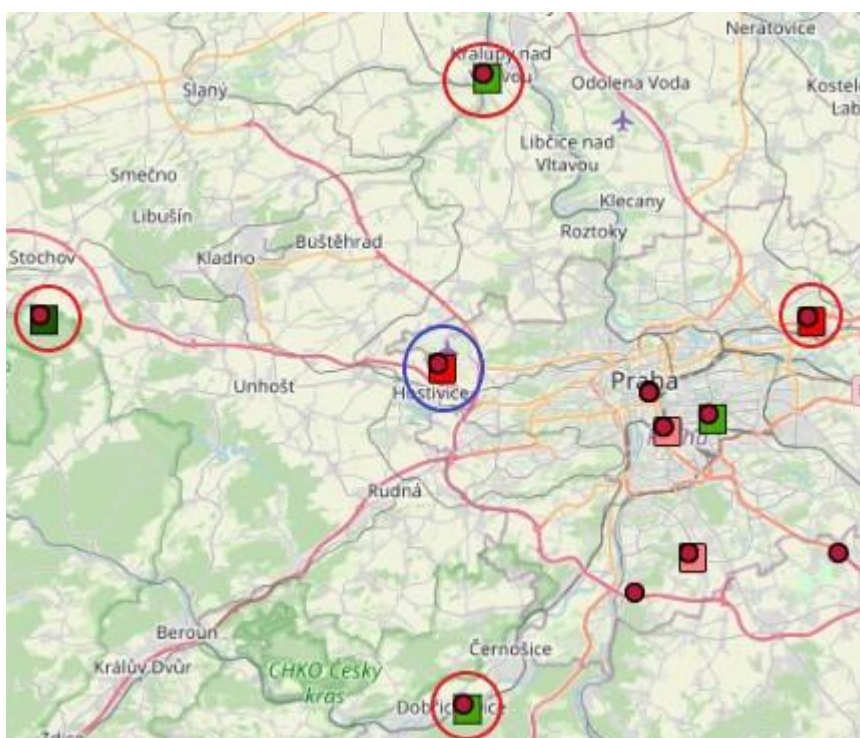
Jako zdroj denního úhrnu srážkových dat posloužil archiv Českého hydrometeorologického ústavu, ve kterém musí ČHMÚ na základě zákona 123/1998 Sb. o právu na informace o

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

životním prostředí, zpřístupňovat roční, měsíční a denní klimatologické charakteristiky naměřené na stanicích ve správě ČHMÚ. Pro potřeby této práce byla využita data celkem z pěti stanic, první z nich je Praha, Ruzyně následována čtyřmi stanicemi, každá na jednu světovou stranu od referenční Ruzyně:

- Kralupy nad Vltavou (sever)
- Dobřichovice (jih)
- Lány (západ)
- Praha, Kbely (východ)

Ze čtyř vypsanych stanic byla data zprůměrována a následně se pracovalo již pouze s průměrem dat jako celkem. *Obr. 11* znázorňuje mapu zmíněných stanic.



Obrázek 11: Mapa stanic [51]

4.2 Vlastní analýza

V následující části textu je popsán průběh statistické analýzy dat s korespondujícími statistickými testy. Pro kompletaci a třídění dat byl využit program Microsoft Excel v. 2019, statistické testy byly provedeny v aplikaci MATLAB R2020a. Analýza byla provedena ve třech hlavních krocích. Nejprve autor pracoval s daty za celých sedm let v kuse (2557 dnů). Následně byla separována jednotlivá roční období všech let dohromady. Jmenovitě tedy všechna jara (644

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

dnů), léta (644 dnů), podzimy (637 dnů) a zimní období (632 dnů). Do třetice se pracovalo pouze s jednotlivými dny, ve kterých přelo. Tato část analýzy byla provedena kvůli prověření možné hypotézy, že letadla neovlivňují vznik nebo zánik vypadávání srážek jako takový, ale pouze umocňují nebo zeslabují vlastní vypadávání.

Ve všech případech byl postup shodný. Nejprve se zkoumala podobnost/odlišnost statistických charakteristik srážek z Ruzyně a průměru srážek z okolí. T1 uvádí vzorový příklad, jak jsou testy do práce vkládány. Vždy je vypsána P-hodnota na základě které je nulová hypotéza zamítnuta nebo nezamítnuta. Některé testy vypisují i další hodnoty, komentovaná je však vždy pouze P-hodnota.

Test 1: Vzorový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(ruzyne2,prumer2)

H =

    0

P =

    0.8395
```

V tomto vzorovém případě vyšla P-hodnota 0.8395. Nulová hypotéza by tedy na hladině významnosti 5 % zamítnuta nebyla.

Z teorie *Centrální Limitní Věty* lze uvažovat normalitu rozdělení výběrové střední hodnoty dat, pokud soubor obsahuje více prvků, než je hranice. Obvyklou hranicí se považuje 30 dat, takže vzhledem k vyšším stovkám dostupných dat lze přistoupit k parametrickému testu na shodnost středních hodnot:

1) Párový t-test (*ttest*)

Následně byly prováděny již neparametrické testy na shodnost mediánů a shodnost rozdělení:

2) Wilcoxonův test (*signrank*)

3) Kolmogorovův–Smirnovův dvouvýběrový test (*kstest2*)

Kolmogorovovým–Smirnovovým testem na shodnost rozdělení dat byla zakončena část testování srážkových dat navzájem. Ve druhé části autor nejprve prověřoval nezávislost padání srážek na Ruzyni a pohybů letadel:

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4) Spearmanův test nezávislosti (*corr*)

Provedení testu nezávislosti bylo nezbytné, aby bylo zjištěno, zdali případná (ne)závislost není způsobená například tím, že při silných bouřích jsou letadla odkláněna na jiná letiště. V takových případech by výslednou statistiku znepřesňovaly právě situace, kdy při menších pohybech (odklon letadel) více prší (bouře na letišti).

V poslední řadě byl opět proveden test nezávislosti, tentokrát již rozdílových srážkových dat Ruzyně a průměru okolí a následně test vhodnosti regrese:

5) Spearmanův test nezávislosti (*corr*)

6) Regrese (*fitlm*)

Testem vhodnosti regrese bylo završeno statistické testování každého bloku dat. Další část práce již prezentuje výsledky analýzy.

4.2.1 Celé období

Srážky z Ruzyně označeny *ruzyne*.

Průměr z okolí označen *prumer*.

Rozdíl srážek označen *rozdil*. Rozdíl je ve formátu *ruzyne – prumer*.

Součet vzletů a přistání je označen *pohyby*.

Párový t-test (*T2*):

Test 2: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(ruzyne,prumer)
H =
    0
P =
    0.3311
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla 0.331, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (T3):

Test 3: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H] = signrank(ruzyne,prumer)
```

```
P =
```

```
7.2204e-13
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (T4):

Test 4: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P] = kstest2(ruzyne,prumer)
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

```
P =
```

```
4.4426e-20
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T5):

Test 5: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL] = corr(ruzyne,pohyby,'Type','Spearman')  
  
RHO =  
  
-0.0151  
  
PVAL =  
  
0.4465
```

P-hodnota vyšla 0.447, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T6):

Test 6: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL] = corr(pohyby,rozdil,'Type','Spearman')  
  
RHO =  
  
-0.0144  
  
PVAL =  
  
0.4659
```

P-hodnota vyšla 0.466, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Regrese (T7):

Test 7: Regrese [52]

```

>> fitlm(pohyby, rozdil)

ans =

Linear regression model:
y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.076506	0.085432	-0.89552	0.37059
x1	0.00013759	0.00024667	0.55779	0.57704

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.577, tudíž nebyla prokázána závislost.

4.2.2 Jarní období

Veličiny členěné podle ročních období představují vždy trojici měsíců daného ročního období následovaného trojicí měsíců dalšího roku atd.

Srážky z Ruzyně označeny *jruzyne*.

Průměr z okolí označen *jprumer*.

Rozdíl srážek označen *jrozdil*. Rozdíl je ve formátu *jruzyne – jprumer*.

Součet vzletů a přistání je označen *jpohyby*.

Párový t-test (T8):

Test 8: Párový t-test [52]

```

>> [H,P]=ttest(jruzyne,jprumer)

H =

0

P =

0.4689

```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla 0.469, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (*T9*):

Test 9: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(jruzyne,jprumer)

P =

    0.0128

H =

    logical

     1
```

P-hodnota vyšla 0.013, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (*T10*):

Test 10: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(jruzyne,jprumer)

H =

    logical

     1

P =

    1.3813e-04
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T11):

Test 11: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(jpohyby,jruzyne,'Type','Spearman')  
  
RHO =  
  
    -0.0693  
  
PVAL =  
  
    0.0789
```

P-hodnota vyšla 0.079, proto na hladině významnosti 5 % těsně nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T12):

Test 12: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(jpohyby,jrozdil,'Type','Spearman')  
  
RHO =  
  
    -0.0415  
  
PVAL =  
  
    0.2926
```

P-hodnota vyšla 0.293, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Regrese (T13):

Test 13: Regrese [52]

```
>> fitlm(jpohyby,jrozdil)

ans =

Linear regression model:
    y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.097321	0.10312	-0.94374	0.34566
x1	0.00022333	0.00032224	0.69304	0.48853

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.489, tudíž nebyla prokázána závislost.

4.2.3 Letní období

Srážky z Ruzyně označeny *lruzyne*.

Průměr z okolí označen *lprumer*.

Rozdíl srážek označen *lrozdil*. Rozdíl je ve formátu *lruzyne – lprumer*.

Součet vzletů a přistání je označen *lpohyby*.

Párový t-test (T14):

Test 14: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(lruzyne,lprumer)

H =

    0

P =

    0.8049
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla 0.805, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (T15):

Test 15: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(lruzyne,lprumer)

P =

    9.0815e-05

H =

    logical

     1
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (T16):

Test 16: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(lruzyne,lprumer)

H =

    logical

     1

P =

    1.0117e-05
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T17):

Test 17: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr(lpohyby, lruzyne, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
    -0.0486  
  
PVAL =  
  
    0.2182
```

P-hodnota vyšla 0.218, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T18):

Test 18: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr(lpohyby, lrozdil, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
    0.0829  
  
PVAL =  
  
    0.0355
```

P-hodnota vyšla 0.036, proto na hranici významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Regrese (T19):

Test 19: Regrese [52]

```
>> fitlm(lpohyby,lrozdil)

ans =

Linear regression model:
y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.1261	0.32497	-0.38803	0.69812
x1	0.00041478	0.00081146	0.51115	0.60942

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.609, tudíž nebyla prokázána závislost.

4.2.4 Podzimní období

Srážky z Ruzyně označeny *pruzyne*.

Průměr z okolí označen *pprumer*.

Rozdíl srážek označen *prozdil*. Rozdíl je ve formátu *pruzyne – pprumer*.

Součet vzletů a přistání je označen *ppohyby*.

Párový t-test (T20):

Test 20: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(pruzyne,pprumer)

H =

     1

P =

     0.0422
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla 0.042, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (T21):

Test 21: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(pruzyne,pprumer)

P =

    1.6858e-05

H =

    logical

    1
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (T22):

Test 22: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(pruzyne,pprumer)

H =

    logical

    1

P =

    1.5383e-05
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T23):

Test 23: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr (ppohyby, pruzyne, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
    0.0313  
  
PVAL =  
  
    0.4308
```

P-hodnota vyšla 0.431, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T24):

Test 24: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr (ppohyby, prozdil, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
   -0.0649  
  
PVAL =  
  
    0.1016
```

P-hodnota vyšla 0.102, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Regrese (T25):

Test 25: Regrese [52]

```
>> fitlm(ppohyby,prozdil)

ans =

Linear regression model:
  y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	0.049135	0.1007	0.48796	0.62575
x1	-0.00036317	0.00027836	-1.3047	0.19248

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.193, tudíž nebyla prokázána závislost.

4.2.5 Zimní období

Srážky z Ruzyně označeny *zruzyne*.

Průměr z okolí označen *zprumer*.

Rozdíl srážek označen *zrozdil*. Rozdíl je ve formátu *zruzyne – zprumer*.

Součet vzletů a přistání je označen *zpohyby*.

Párový t-test (T26):

Test 26: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(zruzyne,zprumer)

H =

    0

P =

    0.0626
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla 0.063 tedy hraničně, proto na hladině významnosti 5 % těsně nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (T27):

Test 27: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(zruzyne,zprumer)

P =

    6.5604e-04

H =

    logical

    1
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (T28):

Test 28: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(zruzyne,zprumer)

H =

    logical

    1

P =

    1.0610e-05
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T29):

Test 29: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr (zpohyby, zruzyne, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
-0.0335  
  
PVAL =  
  
0.3998
```

P-hodnota vyšla 0.400, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T30):

Test 30: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr (zpohyby, zrozdil, 'Type', 'Spearman')  
  
RHO =  
  
-0.0016  
  
PVAL =  
  
0.9680
```

P-hodnota vyšla 0.968, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Regrese (T31):

```

Test 31: Regrese [52]

>> fitlm(zpohyby, zrozdil)

ans =

Linear regression model:
  y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.039237	0.084544	-0.4641	0.64273
x1	-5.2335e-05	0.00028888	-0.18117	0.8563

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.856, tudíž nebyla prokázána závislost.

4.2.6 Období srážek

Poslední část analýzy se zaměřuje pouze na dny, ve kterých padaly srážky. Tento způsob byl proveden celkem třikrát. Vždy se sice jednalo o celé období sedmi let, pokaždé ale rozděleno jiným způsobem.

Jako první je představeno období, kdy na Ruzyni srážky padaly, a na ostatních stanicích buď padaly nebo nepadaly. Jedná se o 1064 dnů, z čehož 22 dnů na Ruzyni srážky padaly, ale ani na jedné z ostatních čtyřech ne.

Srážky z Ruzyně označeny *ruzyne1*.

Průměr z okolí označen *prumer1*.

Rozdíl srážek označen *rozdil1*. Rozdíl je ve formátu *ruzyne1 – prumer1*.

Součet vzletů a přistání je označen *pohyby1*.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Párový t-test (T32):

Test 32: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(ruzynel,prumer1)

H =

    0

P =

    0.8073
```

P-hodnota vyšla 0.807, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (T33):

Test 33: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(ruzynel,prumer1)

P =

    0.0037

H =

    logical

    1
```

P-hodnota vyšla 0.004, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Kolmogorovův–Smirnovův test (T34):

Test 34: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(ruzynel,prumer1)
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

```
P =
```

```
0.0046
```

P-hodnota vyšla 0.005, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T35):

Test 35: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(pohyby1,ruzynel,'Type','Spearman')
```

```
RHO =
```

```
0.0885
```

```
PVAL =
```

```
0.0039
```

P-hodnota vyšla 0.004, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T36):

Test 36: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr(pohyby1, rozdill, 'Type', 'Spearman')

RHO =

    0.0103

PVAL =

    0.7366
```

P-hodnota vyšla 0.737, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

Regrese (T37):

Test 37: Regrese [52]

```
>> fitlm(pohyby1, rozdill)

ans =

Linear regression model:
y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.15802	0.19722	-0.80123	0.42318
x1	0.00056754	0.00057723	0.98321	0.32573

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.326, tudíž nebyla prokázána závislost.

Další soubory dat jsou složeny ze dnů, kdy padaly srážky jak na Ruzyni, tak i minimálně v jedné z ostatních stanic. Celkem se jedná o 1042 dnů.

Srážky z Ruzyně označeny *ruzyne2*.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Průměr z okolí označen *prumer2*.

Rozdíl srážek označen *rozdil2*. Rozdíl je ve formátu *ruzyne2 – prumer2*.

Součet vzletů a přistání je označen *pohyby2*.

Párový t-test (*T38*):

Test 38: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(ruzyne2,prumer2)
```

```
H =
```

```
0
```

```
P =
```

```
0.8395
```

P-hodnota vyšla 0.840, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (*T39*):

Test 39: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(ruzyne2,prumer2)
```

```
P =
```

```
0.0016
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

P-hodnota vyšla 0.002, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Kolmogorovův–Smirnovův test (T40):

Test 40: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(ruzyne2,prumer2)
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

```
P =
```

```
0.0040
```

P-hodnota vyšla 0.004, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T41):

Test 41: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(pohyby2,ruzyne2,'Type','Spearman')
```

```
RHO =
```

```
0.0854
```

```
PVAL =
```

```
0.0058
```

P-hodnota vyšla 0.006, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T42):

Test 42: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(pohyby2,rozdil2,'Type','Spearman')

RHO =

    0.0112

PVAL =

    0.7190
```

P-hodnota vyšla 0.719, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

Regrese (T43):

Test 43: Regrese [52]

```
>> fitlm(pohyby2,rozdil2)

ans =

Linear regression model:
  y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.16632	0.20219	-0.82262	0.41091
x1	0.00058359	0.00059114	0.98724	0.32376

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.324, tudíž nebyla prokázána závislost.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Poslední skupinu tvoří data z období, kdy alespoň na jedné stanici z okolí Ruzyně srážky padaly a na letišti v ten samý den padaly nebo nepadaly. Jedná se o 1403 dnů, z čehož je 361 dnů, kdy na Ruzyni nebylo naměřeno nic.

Srážky z Ruzyně označeny *ruzyne3*.

Průměr z okolí označen *prumer3*.

Rozdíl srážek označen *rozdil3*. Rozdíl je ve formátu *ruzyne3 – prumer3*.

Součet vzletů a přistání označen *pohyby3*.

Párový t-test (*T44*):

Test 44: Párový t-test [52]

```
>> [H,P]=ttest(ruzyne3,prumer3)
```

```
H =
```

```
0
```

```
P =
```

```
0.3113
```

P-hodnota vyšla 0.311, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že jsou střední hodnoty srážkových dat stejné.

Wilcoxonův test (*T45*):

Test 45: Wilcoxonův test [52]

```
>> [P,H]=signrank(ruzyne3,prumer3)
```

```
P =
```

```
5.5814e-14
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že jsou mediány obou souborů stejné.

Kolmogorovův–Smirnovův test (T46):

Test 46: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]

```
>> [H,P]=kstest2(ruzyne3,prumer3)
```

```
H =
```

```
logical
```

```
1
```

```
P =
```

```
3.8148e-41
```

P-hodnota vyšla velmi malá, proto na hladině významnosti 5 % byla zamítnuta hypotéza, že oba soubory pocházejí ze stejného rozdělení.

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a srážky na Ruzyni (T47):

Test 47: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO,PVAL]=corr(pohyby3,ruzyne3,'Type','Spearman')
```

```
RHO =
```

```
0.0225
```

```
PVAL =
```

```
0.4005
```

P-hodnota vyšla 0.401, proto na hladině významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a srážky na Ruzyni jsou nezávislé.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Spearmanův test nezávislosti pro pohyby letadel a rozdíl srážek (T48):

Test 48: Spearmanův test nezávislosti [52]

```
>> [RHO, PVAL]=corr (pohyby3, rozdil3, 'Type', 'Spearman')

RHO =

    -0.0179

PVAL =

    0.5038
```

P-hodnota vyšla 0.504, proto na hranici významnosti 5 % nebyla zamítnuta hypotéza, že pohyby letadel a rozdíl srážek jsou nezávislé.

Regrese (T49):

Test 49: Regrese [52]

```
>> fitlm(pohyby3, rozdil3)

ans =

Linear regression model:
y ~ 1 + x1

Estimated Coefficients:

```

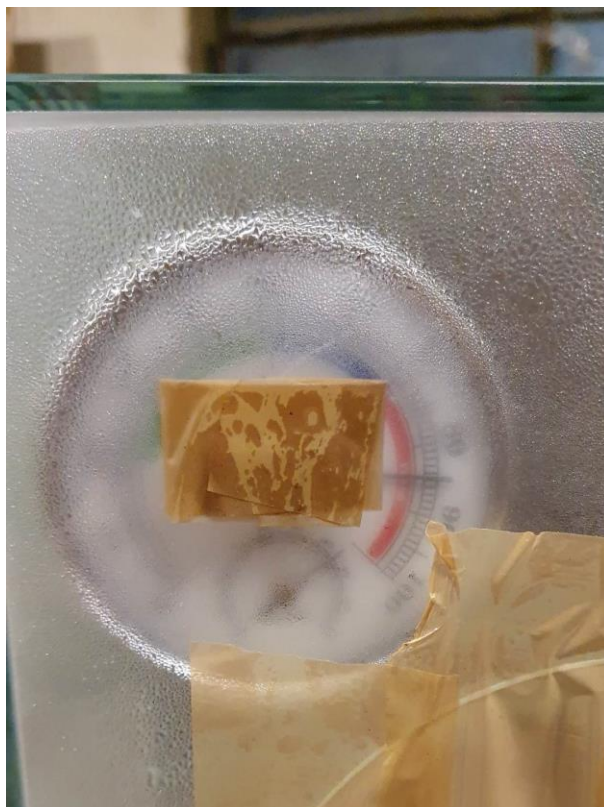
	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-0.14072	0.15552	-0.90482	0.36572
x1	0.00024839	0.00045155	0.55009	0.58235

P-hodnota u lineárního členu vyšla 0.582, tudíž nebyla prokázána závislost.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4.2.7 Experiment

Součástí praktické části byl také experiment, při kterém byl skleněný glove-box, uzavřený od okolního prostředí, nasycen vodní parou a následně probíhalo jeho zchlazení. Účelem bylo zjistit, zdali se nějak bude lišit množství zkondenzované vody ze směsi „normálního“ vzduchu a směsi vzduchu, který obsahuje zplodiny ze spáleného AVGASu. Uvnitř objektu byl během napařování umístěn vlhkoměr s teploměrem, který je zachycen na *Obr. 12*.



Obrázek 12: Vlhkoměr [54]

V prvním případě byl obsah boxu složen pouze ze vzduchu nasyceného na 100 %, ve druhém případě směs uvnitř obsahovala i spaliny z 5 ml spáleného leteckého benzínu.

Kromě zapálení benzínu uvnitř boxu probíhal proces experimentu v obou případech shodně. Glove-box se nechal nejprve napařit po dobu deseti minut, a následně byl vložen do chladného prostředí po dobu patnácti minut. Zkoumalo se množství vysrážené vody, které bylo v obou případech velmi podobné. *Obr. 13* ukazuje fotografii vysrážené vody v prvním případě.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST



Obrázek 13: Voda poprvé [54]

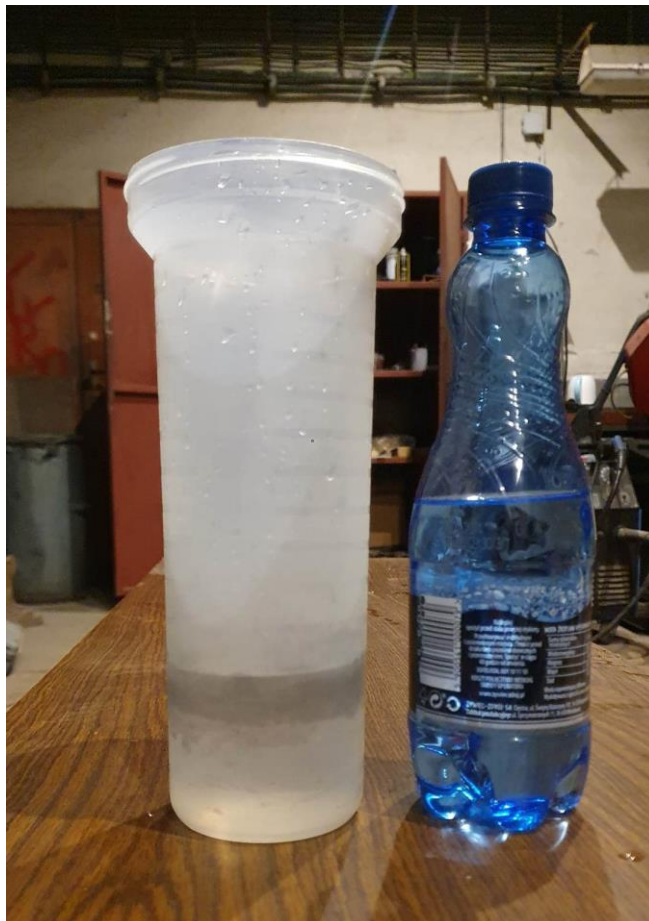
Zapálení AVGASu uvnitř boxu je zachyceno na Obr. 14.



Obrázek 14: Zapálení AVGASu [54]

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

A konečně snímek s vysráženou vodou ve druhém případě spolu s lahví, která obsahuje letecký benzin zobrazuje *Obr. 15*.



Obrázek 15: Voda podruhé [54]

Zhodnocení výsledků z experimentu, stejně jako z analýzy dat je provedeno v následující kapitole. Autor by rád zdůraznil, že provedení experimentu bylo pouze jedním z dílčích úkolů této práce a konalo se v domácím prostředí, tudíž nemůže být vyloučeno, že za pomoci profesionálních laboratorních přístrojů by byl vlastní experiment přesnější. Z toho důvodu by hlavní pozornost čtenáře měla být zaměřena převážně na statistickou analýzu dat.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

4.3 Zhodnocení výsledků

Poslední část této kapitoly se zabývá zhodnocením výsledků a následné diskuzi. Souhrnné výsledky znázorňuje *Tab. 1*.

Tabulka 1: Souhrn výsledků [52]

VÝSLEDKY	TOTAL	JARA	LÉTA	PODZIMY	ZIMY	SR1	SR2	SR3
STŘEDNÍ HODNOTY								
MEDIÁNY								
ROZDĚLENÍ								
NEZÁVISLOST 1								
NEZÁVISLOST2								
REGRESE								

	Nulová hypotéza byla zamítnuta
	Nulová hypotéza nebyla zamítnuta
	Nulová hypotéza těsně nebyla zamítnuta

Možné ovlivnění lokálních srážek v blízkosti letiště může být způsobeno z několika důvodů. Jedním z nich je zvýšená koncentrace kondenzačních jader ze spalin z motorů a tím tvořeno větší množství srážek. Další z možností ovlivnění je tvorba kondenzačních čár, potažmo následné oblačnosti, která by ovlivnila vyzařování tepla ať už z vesmíru na Zemi, nebo ze Země do vesmíru, což by také mohlo ovlivnit srážky v okolí letišť. Další z teorií říká, že letadla prolétávající mraky v nich tvoří díry, a tím tak ovlivňují podchlazenou vodu obsaženou v mracích. [53]

Na základě analýzy dat v této práci se nicméně žádnou závislost prokázat nepodařilo. Takováto závislost buď tedy neexistuje, nebo je velmi malá, nebo je k jejímu prokázání potřeba více dat (z více letišť a za delší časové období). Pouze v jediném případě (léta viz *Tab. 1*) byla zamítnuta hypotéza, že rozdíl srážek a pohyby letadel jsou nezávislé. Pakliže tento výsledek nastal pouze jedenkrát z celkových osmi období, je autorem považován za neprůkazný.

Za zmínku stojí také dvakrát zamítnutá hypotéza o nezávislosti pohybů a srážek na Ruzyni pouze ve dnech padání srážek, z čehož se dá usuzovat například větší množství odklonu letadel v daném období. Hypotézy o shodě mediánů a rozdělení srážkových dat byly zamítnuty ve všech případech, což může být zdůvodněné geografickou polohou daných stanic, nicméně hypotéza o shodě středních hodnot srážkových dat zamítnuta až na jednu výjimku nebyla.

KAPITOLA IV – PRAKTICKÁ ČÁST

Naměřené podobné množství vody (cca 200 ml) během experimentu koresponduje s výsledkem analýzy dat, a sice, že provoz letadel srážky ovlivňuje vůbec, nebo velmi málo. Výše zmíněné možnosti ovlivnění (kondenzační čáry, kondenzační jádra ze spalin) fungují tedy pravděpodobně spíše v globálním měřítku, a ovlivňují větší oblasti, jak bylo naznačeno v teoretické části. Jako nejlepší způsob lokálního ovlivnění se jeví nejspíše cloudseeding, tedy vypouštění například malých částecek jodidu stříbrného, na kterém kondenzuje voda a tvoří se tak mraky. Tímto procesem lze vytvářet a regulovat srážky i nad obrovskými oblastmi, což může být vykřičník kvůli možným následkům jodidu stříbrného na člověka a životní prostředí. Pokud se cloudseeding začne globálně užívat ve velkém, lze předpokládat nutnost určité regulace na mezinárodní úrovni, protože lze očekávat situace, kdy si budou jednotlivé oblasti „krást“ srážky, což může být problém pro méně technicky vyvinuté oblasti, které jsou na srážkách závislé.

KAPITOLA V

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala tématem dopadů letecké dopravy na životní prostředí. Hlavním cílem bylo zhodnocení vlivu právě letecké dopravy na změny počasí se zaměřením na ovlivnění vzniku srážek. Pro splnění tohoto cíle bylo zvoleno statistické vyhodnocování dat o pohybech letadel a naměřených srážkách v okolí Letiště Václava Havla v Praze. Dílčími úkoly bylo identifikovat možnosti ovlivnění srážek, porovnat zplodiny biopaliv a klasických paliv na bázi ropy a provést experiment na vznik srážek. Tyto cíle byly splněny. Z dostupných dat vyšlo, že pohyby letadel srážky v okolí letišť neovlivňují, nebo ovlivňují jen nepatrně. Z toho důvodu autor nenavrhl možnosti pro ovlivnění vzniku srážek, ale popsal vybrané metody v teoretické části v odstavci věnujícímu se tzv. setí mraků.

Teoretická část byla rozdělena na tři kapitoly. První z nich se zabývala palivy používanými v letecké dopravě a možnému vývoji do budoucna. Druhá řešila problematiku vlivů letecké dopravy na životní prostředí, především emise výfukových plynů a tvorbu cirrovité oblačnosti. Konečně třetí kapitola teoretické části přiblížila čtenáři srážky jako takové, srážkotvorné procesy a způsob měření srážek v současnosti, ale i v minulosti.

V praktické části proběhla statistická analýza dat, byly popsány zdroje a metodika zpracování dat a následně byly vypsány jednotlivé statistické testy. Na konci kapitoly proběhlo zhodnocení výsledků, následná diskuze a nechyběla ani zmínka o provedeném experimentu na tvorbu srážek.

KAPITOLA V – ZÁVĚR

Autor věří, že přečtení práce poskytlo zajímavé vhlédnutí do problematiky vztahu letectví-počasí-životní prostředí nejen člověku zasvěcenému do dané problematiky, ale také laikům, kteří jsou v dané oblasti neznalí.

Zdroje

- [1] *Aviation Fuels: Technical Review* [online]. Chevron Products Company [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20150907173111/https://www.cgabusinessdesk.com/document/aviation_tech_review.pdf
- [2] *What is the structural formula of kerosene?* [online]. Vedantu [cit. 2023-03-09]. Dostupné z:
- [3] The History of Jet Fuel. *Air BP* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20121018042938/http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=4503664&contentId=57733>
- [4] *GAMMON: JET A-1 Identification Decal* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.gammontechstore.com/ProductDetails.asp?ProductCode=GTP%2D2135%2D7>
- [5] *Aviation Jet Fuel Information* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <http://www.csgnetwork.com/jetfuel.html>
- [6] *What is Jet A1?* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://jet-a1-fuel.com/info/what-is-jet-a1>

-
- [7] *Jet A1* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20190821213340/https://www.worldoiltraders.com/supplier/>
- [8] Co ve skutečnosti vyjadřuje oktanové číslo u benzínu?. *AutoŽivě* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.autozive.cz/co-ve-skutecnosti-vyjadruje-oktanove-cislo-u-benzinu/>
- [9] Oktanové číslo. *TipCars* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/slovník-pojmu/oktanove-cislo.html>
- [10] Geologický ústav Akademie věd ČR
- [11] Olovo: Těžká minulost jednoho z těžkých kovů. *Vesmír* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2006/cislo-9/olovo.html>
- [12] The Different Types of Aviation Fuel or Jet Fuel. *IJET* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://ijet.aero/ijet-blog/different-types-aviation-fuel-jet-fuel>
- [13] Aviation Fuel Systems: Aviation Fuel Grades. *CFI Notebook.net - "Higher Education"* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.cfinotebook.net/graphics/operation-of-aircraft-systems/fuel/fuel-coding.webp>
- [14] AVGAS: Types of AVGAS. *Shell Global* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/avgas.html>
- [15] EVC1: Transesterification to biodiesel. *ETIP Bioenergy: European Technology and Innovation Platform* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/conventional-technologies/transesterification-to-biodiesel>
- [16] Biofuel. *SKYbrary* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/articles/biofuel#cite_note-1

-
- [17] CROP ROTATIONS: What is crop rotation?. *RODALE INSTITUTE* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://rodaleinstitute.org/why-organic/organic-farming-practices/crop-rotations/>
- [18] MCGURTY, Janet. United Airlines launches first commercial flight with 100% SAF. *S&P Global: Commodity Insights* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/agriculture/120121-united-airlines-launches-first-commercial-flight-with-100-saf>
- [19] 100% udržitelné letecké palivo. *TRANSPORT-LOGISTIKA.CZ* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://transport-logistika.cz/zpravy/letecka-doprava/100-udrzitelne-letecke-palivo/>
- [20] KREJČA, Jiří. ATR dokončilo první let s použitím paliva SAF.: *AEROWEB* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/7768-atr-dokoncilo-prvni-let-s-pouzitim-paliva-saf>
- [21] *Alternative Jet Fuels* [online]. A supplement to Chevron's Aviation Fuels Technical Review [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2479.pdf>
- [22] HYDROGEN PRODUCTION. *DEVINN* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://en.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku>
- [23] Electric Planes Are Coming Sooner Than You Think. *AFAR* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.afar.com/magazine/electric-planes-are-coming-sooner-than-you-think>
- [24] DUŠEK, Jiří. Zelené a UV lasery. *MEGABLOG: Budte v obraze. Mluvte s námi.* [online]. 2012 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.megablog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [25] BORSKÁ, Jana. Ultrafialové záření a UV index. *Česká geologická služba: Můj kousek Země* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/mujkousekzeme/veda/dira-do-sveta/ultrafialove-zareni#>

-
- [26] Skleníkový efekt. *Atlaso.cz* [online]. 2020 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.atlaso.cz/sklenikovy-efekt/>
- [27] ŠEDLBAUER, Josef. *Atmosféra a skleníkový efekt* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.kch.tul.cz/sedlbauer/tema3.htm>
- [28] <https://applications.icao.int/icec>
- [29] CO2 Emissions. *Carbon Offset Guide* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.offsetguide.org/understanding-carbon-offsets/air-travel-climate/climate-impacts-from-aviation/co2-emissions/>
- [30] Aviation Sustainability: Facts and Figures. *Greenbaggage* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.greenbaggage.org/news-and-media/aviation-sustainability-facts-and-figures>
- [31] Oxidy dusíku: CAS: 10102-44-0 (NO₂), Vzorec: NO_x / NO₂. *Arnika* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/database-latek/oxidy-dusiku>
- [32] LEE, David S. The current state of scientific understanding of the non-CO₂ effects of aviation on climate. *Manchester Metropolitan University* [online]. 2018 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/813342/non-CO2-effects-report.pdf
- [33] *Biofuels & Greenhouse Gas Emissions: Myths versus Facts* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/articles/biofuels-greenhouse-gas-emissions-myths-versus-facts-0>
- [34] *Beginner's Guide to Aviation Biofuels* [online]. 2009 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: https://www.verifavia.com/bases/ressource_pdf/124/BeginnersGuide-Biofuels-WebRes.pdf
- [35] FRANCOVÁ, Martina. *Chmi.cz* [online]. 2007 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/kondenzacni_stopy/20070430_1203utc.jpg

-
- [36] SETVÁK, Martin. Kondenzační stopy za letadly. *Chmi.cz* [online]. 2009 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/kondenzacni-stopy>
- [37] Issue Brief | The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation. *EESI: Enviromental and Energy Study Institute* [online]. 2019 revised 2022 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation>
- [38] Information on the environmental impact of aviation: Where to find information and data from the aviation industry. *UK Civil Aviation Authority* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.caa.co.uk/consumers/environment/information-on-the-environmental-impact-of-aviation/>
- [39] DVOŘÁK, Petr. *Letecká Meteorologie: Padající srážky str.184*. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [40] DVOŘÁK, Petr. *Letecká Meteorologie: Padající srážky str.184-190*. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [41] KRÁLOVÁ, Mgr. Magda. VZNIK SRÁŽEK. *Techmania Science Center: EDU-PORTÁL* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfericke-srazky/vznik-srazek>
- [42] PŘEUČIL, Pavel. Sněhová vločka. *21. století* [online]. 21.1.2004 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://21stoleti.cz/2004/01/21/snehova-vlocka/>
- [43] Srážkoměr. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3539>
- [44] Srážkoměr manuální. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3542>

-
- [45] Totalizátor. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/4048>
- [46] Na vrcholu přejmenovaného Kladského vrchu se tyčí totalizátor. *CHEBSKÝdeník.cz* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://chebsky.denik.cz/galerie/na-vrcholu-prejmenovaneho-kladskeho-vrchu-se-cni-totalizator.html?back=611116974-804-18&photo=15>
- [47] Ombrograf. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/2438>
- [48] Srážkoměr člunkový. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3540>
- [49] Srážkoměr váhový. *Elektronický meteorologický slovník* [online]. terminologická skupina ČMeS [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/3541>
- [50] Mají pokusy o ovlivňování srážek nějaký význam?. *Meteocentrum.cz* [online]. 9.9.2022 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/aktuality/meteorologie-klima/22090801/maji-pokusy-o-ovlivnovani-srazek-nejaky-vyznam>
- [51] Mapa dostupná z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations_CZ.html dále upravená autorem
- [52] Data z letiště a ČHMÚ dále zpracovaná autorem
- [53] BRYN, Brandon. *Science: Hole-Punching Aircraft Influence the Local Weather* [online]. 2011 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.aaas.org/news/science-hole-punching-aircraft-influence-local-weather>
- [54] Vlastní fotografie autora

Seznam obrázků

- 1: Strukturní vzorec kerosinu [2]
- 2: Značení JET A-1[4]
- 3: Pylové zrno a aerosol [10]
- 4: Značení paliv [13]
- 5: B777 během plnění SAF [19]
- 6: Spektrum elektromagnetického vlnění [24]
- 7: Skleníkový efekt [26]
- 8: Kondenzační stopa [35]
- 9: Sněhová vločka [42]
- 10: Totalizátor [46]
- 11: Mapa stanic [51]
- 12: Vlhkoměr [54]
- 13: Voda poprvé [54]
- 14: Zapálení AVGASu [54]
- 15: Voda podruhé [54]

Seznam testů a tabulek

Testy:

- 1: Vzorový t-test [52]
- 2: Párový t-test [52]
- 3: Wilcoxonův test [52]
- 4: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
- 5: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 6: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 7: Regrese [52]
- 8: Párový t-test [52]
- 9: Wilcoxonův test [52]
- 10: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
- 11: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 12: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 13: Regrese [52]
- 14: Párový t-test [52]
- 15: Wilcoxonův test [52]

-
- 16: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
 - 17: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 18: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 19: Regrese [52]
 - 20: Párový t-test [52]
 - 21: Wilcoxonův test [52]
 - 22: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
 - 23: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 24: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 25: Regrese [52]
 - 26: Párový t-test [52]
 - 27: Wilcoxonův test [52]
 - 28: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
 - 29: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 30: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 31: Regrese [52]
 - 32: Párový t-test [52]
 - 33: Wilcoxonův test [52]
 - 34: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
 - 35: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 36: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 37: Regrese [52]
 - 38: Párový t-test [52]
 - 39: Wilcoxonův test [52]
 - 40: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
 - 41: Spearmanův test nezávislosti [52]
 - 42: Spearmanův test nezávislosti [52]

MF

- 43: Regrese [52]
- 44: Párový t-test [52]
- 45: Wilcoxonův test [52]
- 46: Kolmogorovův–Smirnovův test [52]
- 47: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 48: Spearmanův test nezávislosti [52]
- 49: Regrese [52]

Tabulky:

- 1: Souhrn výsledků [52]