



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

## **Kondenzační stopy a jejich závislost na meteorologické situaci**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích  
Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

**Mgr. Iveta Kameníková**

---

Praha 2023

Praha, červen 2023

Dizertační práce byla vypracována v rámci doktorského studia na ČVUT v Praze, Ústavu letecké dopravy Fakulty dopravní.

Uchazeč: Mgr. Iveta Kameníková  
Ústav letecké dopravy, České vysoké učení technické v Praze  
Horská 3, 128 03 Praha 2

Školitel doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.  
Ústav letecké dopravy, České vysoké učení technické v Praze  
Horská 3, 128 03 Praha 2

Školitel specialista: Ing. Martin Novák, Ph.D.  
Ústav letecké dopravy, České vysoké učení technické v Praze  
Horská 3, 128 03 Praha 2



## Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na studium kondenzačních stop a jejich závislosti na meteorologické situaci. Kondenzační stopy vytvořené letadly jsou v dnešní době velmi aktuálním tématem, přispívají k oteplování atmosféry podle několika vědeckých studií. Hustota letového provozu je značně vysoká a současné prognózy hlásají její další výrazné zvyšování. S větším objemem letového provozu souvisí i častější výskyt kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti. Vědecká úroveň vzniku kondenzačních stop a jejich vlivu na zemské klima je překvapivě velmi nízká. Dosud publikované odborné studie vycházejí především z globálních modelů, měření in-situ a satelitních pozorování kondenzačních stop. Výzkum na toto téma vycházel z pozorování kondenzačních stop v letových cestách v okolí Děčína. Získaná data kondenzačních stop a meteorologických veličin byla statisticky zpracována pomocí metod strojového učení pro klasifikační modely. Bylo vytvořeno několik modelů pro predikci a simulaci vlastností kondenzačních stop jako funkce daného leteckého provozu a meteorologických podmínek. Vybrané klasifikační metody dokázaly dostatečně kvalitně klasifikovat dobu trvání kondenzační stop. Byla zpracována statistika výskytu kondenzačních stop ve vybrané oblasti a poté i predikce jejich vzniku. Byly zjištěny závislosti mezi meteorologickými podmínkami, vznikem a životností kondenzačních stop. Tím tato studie přispívá zejména k rozvoji tohoto důležitého vědeckého problému a nastínila další možná pokračování výzkumu dané problematiky.

### **Klíčová slova:**

Kondenzační stopa, indukovaná cirrovitá oblačnost, Schmidt-Applemanovo kritérium, meteorologická data, aerologická měření, predikce, klasifikační modely.



## Abstract

The thesis focused on the study of contrails and their dependence on the meteorological situation. Contrails formed by airplanes are a very current topic these days, they contribute to the warming of the atmosphere according to several scientific studies. The density of air traffic is quite high, and current forecasts predict its further significant increase. The higher volume of air traffic is also related to the more frequent occurrence of contrails and induced cirrus clouds. The scientific level of the formation of contrails and their influence on the Earth's climate is surprisingly very low. Expert studies published so far are mainly based on global models, in-situ measurements and satellite observations of contrails. The research on this topic was based on the observation of contrails in flight paths in the vicinity of Děčín. The obtained data of contrails and meteorological quantities were statistically processed using machine learning methods for classification models. Several models have been developed to predict and simulate contrail properties as a function of given air traffic and meteorological conditions. The selected classification methods were able to classify the duration of contrails with sufficient quality. The statistics of the occurrence of contrails in the selected area and then the prediction of their occurrence were processed. Dependencies between meteorological conditions, the formation and lifespan of contrails were found. This study particularly contributes to the development of this important scientific problem and outlined further possible continuation of the research of the given issue.

### **Keywords:**

Contrail, induced cirrus clouds, Schmidt-Appleman criterion, meteorological data, aerological measurements, prediction, classification models.



## **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu dizertační práce panu doc. Ing. Jakubu Hospodkovi, Ph.D. za čas, který mi po celou dobu studia věnoval. Jsem mu vděčná za cenné rady a podněty, které mi poradil a nasměroval správnou cestou. Poděkování patří také panu doc. Ing. Ivanu Nagyovi, CSc. z Ústavu aplikované matematiky FD ČVUT za velmi přátelský přístup při konzultování postupu analýzy dat v praktické části práce. Na závěr je mojí milou povinností poděkovat mé rodině za obrovskou podporu během studia a vypracování dizertační práce.



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem Kondenzační stopy a jejich závislost na meteorologické situaci vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k dizertační práci.

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

Praze dne 28. června 2023

.....

*Podpis*



# Obsah

<b>Seznam obrázků</b> .....	ix
<b>Seznam tabulek</b> .....	x
<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	xi
Úvod .....	12
1 Cíle dizertační práce.....	13
1.1 Stanovené hypotézy.....	14
1.2 Předpokládané přínosy.....	14
2 Současný stav problematiky .....	15
2.1 Počátky výzkumu kondenzačních stop.....	17
2.2 Vznik kondenzačních stop.....	18
2.2.1 Schmidt - Applemanova teorie.....	21
2.2.2 Vliv vlhkosti vzduchu .....	22
2.2.3 Vliv teploty.....	25
2.3 Vývoj kondenzačních stop.....	27
3 Vliv meteorologických veličin a situací.....	29
3.1 Tlak vzduchu .....	30
3.2 Vzduchové hmoty a atmosférické fronty.....	32
3.3 Tlakové útvary .....	36
4 Vliv změn v atmosféře na klima .....	38
4.1 Vliv kondenzačních stop.....	41
4.2 Vliv vodní páry.....	44
4.3 Vliv sazí.....	44
5 Zdroje dat o stavu atmosféry a data ze systémů letadel .....	45
5.1 Aerologické měření .....	45
5.2 AMDAR .....	47
5.3 ADS-B.....	49
5.4 BDS registry .....	50
5.5 Další zdroje dat.....	51
5.6 Systém sběru kondenzačních stop na FD ČVUT .....	52
6 Kontrola kvality dat .....	54



6.1	Oblast pro přijímání meteorologických zpráv.....	55
6.2	Kvalita dat BDS registrů.....	56
6.3	Kvalita dat z pseudotempu.....	57
7	Zpracování dat a jejich statistické vyhodnocení.....	60
7.1	Ověření Schmidt-Applemanova kritéria.....	64
7.2	Závislost kondenzačních stop na meteorologické situaci.....	67
7.3	Statistické vyhodnocení dat.....	68
8	Výsledky.....	76
8.1	Lineární regrese .....	76
8.2	Metody strojového učení pro klasifikační modely .....	79
9	Diskuze .....	83
	Závěr .....	85
	Seznam použité literatury.....	88
	Přílohy .....	94
A	Rozhodovací strom .....	95
B	Modely v Knime .....	96
C	Ukázka pseudotempu .....	97
D	Program Diskrétního kategorického modelu .....	98
E	Kódování letadel .....	100





## Seznam obrázků

1	Graf H. Applemana z roku 1953, Závislost prahové teploty na tlaku a relativní vlhkosti vzduchu [5] .....	18
2	Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé okolní podmínky [7] .....	21
3	Kritická teplota pro 0, 40%, 60% a 100% RH pro nasycení vzhledem k vodě.[5].....	27
4	Šíření kondenzační stopy v závislosti na stříhu větru [7] .....	29
5	Přehled odhadů ERF a RF v období 1940-2018 [34] .....	41
6	Grafická prezentace simulace Bock a Burkhardt 2019 [36] .....	43
7	Palubní část systému AMDAR [30] .....	48
8	Navržená metodika práce .....	54
9	Odchyłka předpovězené teploty od naměřené teploty .....	58
10	Odchyłka předpovězené teploty rosného bodu od naměřené teploty rosného bodu .....	58
11	Odchyłka předpovězeného směru větru od naměřeného směru větru .....	59
12	Odchyłka předpovězené rychlosti větru od naměřené rychlosti větru .....	59
13	Výskyt kondenzačních stop dle doby trvání .....	62
14	Doba trvání kondenzační stopy v závislosti na nadmořské výšce .....	62
15	Doba trvání kondenzační stopy v závislosti na relativní vlhkosti vzhledem k vodě .....	63
16	Závislost doby trvání kondenzačních stop na relativní vlhkosti vzhledem k ledu .....	77
17	Pravděpodobnostní funkce náhodné veličiny typy letadel pro počet naměřených dob kondenzačních stop pro A krátkodobé kondenzační stopy, B dlouhodobé kondenzační stopy. V histogramu jsou na ose x jednotlivé typy letadel a na ose y počet naměřených dob příslušných kondenzačních stop .....	79



## Seznam tabulek

- 1 Počet kondenzačních stop a jejich doba trvání v závislosti na ročním období .....67
- 2 Výkonové charakteristiky klasifikačních modelů pro kondenzační stopy .....82



## Seznam použitých zkratk

ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay
BDS	Comm-B Data Selector
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ELS	Základní sledování
EHS	Rozšířené sledování
ERF	Efektivní radiační působení
FIR	Letová informační oblast
FL	Letová hladina
GS	Traťová rychlost
IATA	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů
IPCC	Mezivládní panel pro změny klimatu
IWC	Ice water content
K-NN	K-nearest neighbour klasifikace
MHR	Meteorological Hazard Report
MRAR	Meteorological Routine Air Report
MSA	Mezinárodní standardní atmosféra
MTOW	Maximální vzletová hmotnost
PNN	Neuronová síť
RF	Radiační působení
RPE	Relativní prediktivní chyba
SAC	Schmidt-Applemanovo kritérium
SSR	Sekundární přehledový radar
TAS	Pravá vzdušná rychlost
TH	Parametr regrese
UTC	Světový koordinovaný čas
WMO	Světová meteorologická organizace



## Úvod

Letadla vypouštějí plyny a částice přímo do horní troposféry a spodní stratosféry. Tyto plyny a částice mají vliv na atmosféru. Mění koncentraci skleníkových plynů, způsobují tvorbu kondenzačních stop a zvyšují pokrytí oblačnosti. Kondenzační stopa je jev, který lze v atmosféře pozorovat díky letectví. Jedná se o jeden z nejviditelnějších antropogenních účinků na atmosféru.

V poslední době je zájem o kondenzační stopy větší z důvodu jejich vlivu na životní prostředí, který spočívá ve zvyšování indukované cirrovité oblačnosti a následném efektu na teplotu atmosféry. V současné době legislativa neřeší tvorbu a výskyt kondenzačních stop.

Nejvyšší pokrytí a radiční působení kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti, která se z nich vytvořila, bylo zjištěno v oblastech s vysokou hustotou letového provozu, konkrétně ve střední Evropě, východní Severní Americe a jihovýchodní Asii.[3]

Bylo provedeno mnoho studií a výzkumů o kondenzačních stopách, ale úroveň vědeckého poznání je stále velmi nízká. Zejména dopad na životní prostředí a potenciální regionální teplotní změny nejsou dobře pochopeny a je třeba provést další výzkum. Dosud publikované studie a odborné články vychází z globálních modelů a satelitních pozorování kondenzačních stop a indukované oblačnosti.

Dodnes neexistuje žádný ověřený vztah, podle kterého by bylo možné určit životní dobu kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti. Pro podmínky ČR prozatím neexistuje studie, která by popsala podmínky vzniku a rozsah pokrytí kondenzačních stop nad územím ČR. Dosud se nikdo v okolních státech nevěnoval problematice výskytu a vlastnostem kondenzačních stop v souvislosti s meteorologickou situací v rámci dané oblasti. Výzkum takového rozsahu neexistuje ani v rámci celého světa.

Ústav letecké dopravy zahájil vlastní výzkum založený na pozorování kondenzačních stop v letových cestách v okolí Děčína v roce 2017. Cílem probíhajícího výzkumu je sbírat data (videozáznamy, zprávy ADS-B a meteorologická data) pro zajištění ucelené databáze. Tu lze následně použít za účelem stanovení frekvence výskytu kondenzačních stop ve vzdušném prostoru České republiky, podmínek, za kterých se vytvářejí trvalé kondenzační stopy a za účelem porovnání životnosti kondenzačních stop s typem letadla a meteorologickými podmínkami.



Na základě získaných dat je v dizertační práci podán přehled výskytu kondenzačních stop v ČR, dále jsou zhodnoceny podmínky vzniku a délka životnosti kondenzačních stop v porovnání s meteorologickými parametry. Zpracovaná a ověřená data jsou použita pro systém predikce vzniku kondenzačních stop v dané oblasti během roku. Výsledky výzkumu zpřesní úroveň vědeckého poznání o výskytu a vlastnostech kondenzačních stop. Zjištění závislostí mezi kondenzačními stopami a meteorologickými podmínkami je možné využít v různých matematických předpovědních modelech pro přesné výpočty radiačního působení na zemskou atmosféru a umožní vymezit oblasti, kde lze očekávat tvorbu perzistentních kondenzačních stop.

## 1. Cíle dizertační práce

Výzkum bude zaměřen na další sběr dat o kondenzačních stopách v letových cestách v okolí Děčína, dále na sběr odpovídajících meteorologických údajů nebo údajů, ze kterých se dají meteorologické informace o stavu atmosféry získat. Bude probíhat zpracování dat do formy určené pro další zpracování, jejich kvalitativní vyhodnocení (zda jsou získaná data platná, porovnání s referenčními konvenčními i zdroji těchto dat), kvantitativní a statistické vyhodnocení nasbíraných dat (časové a výškové rozvrstvení dat, počet letadel poskytující údaje). Na základě statistické analýzy dat bude proveden návrh a validace modelu kondenzačních stop a jejich závislostí na meteorologických podmínkách.

Cílem disertační práce je určit závislost mezi meteorologickými podmínkami a vznikem, délkou kondenzačních stop.

Naplnění hlavního cíle práce se bude opírat o dílčí cíle vyplývající z jednotlivých fází řešení.

1. Fáze - Stanovení základních meteorologických veličin ovlivňující kondenzační stopy a jakým způsobem budou získávány.
2. Fáze - Zjištění z dostupných meteorologických dat, jaké fyzikální prvky ovlivňují vznik kondenzačních stop a to hlavně těch perzistentních.
3. Fáze - Zpracování a analýza naměřených dat tak, aby bylo možné na jejich základě analyzovat závislost kondenzačních stop na meteorologické situaci.
4. Fáze - Vytvoření a validace modelu pro predikci kondenzačních stop v dané oblasti během roku.



## 1.1 Stanovené hypotézy

Na základě stanovených cílů byly formulovány výzkumné hypotézy. V rámci výzkumu budou potvrzeny nebo vyvráceny níže uvedené hypotézy, které jsou definovány při stanovení výzkumného záměru a cílů práce.

- I. Existuje statisticky významná závislost mezi vlastnostmi kondenzační stopy, charakterizované vybranými parametry a sledovanými meteorologickými veličinami, resp. klasifikovanými meteorologickými situacemi.
- II. Z meteorologických dat lze na základě predikčních modelů odhadnout charakteristiku kondenzačních stop.

## 1.2 Předpokládané přínosy

Teoretický přínos spočívá zejména ve vytvoření statistiky výskytu kondenzačních stop v dané oblasti a jak se mění chování kondenzačních stop v průběhu roku. Bude definována závislost mezi vlastnostmi kondenzační stopy a meteorologickými podmínkami. Dále bude navržena možnost alternativního sběru meteorologických dat vysílaných z letadel (řešeno v rámci SGS19/126/OHK2/2T/16) a ověření spolehlivosti meteorologických dat získaných z registrů BDS pro další využití vědeckou komunitou.

Praktickým přínosem vytvoření softwarového nástroje, který poskytne možnosti sběru meteorodát z letadel na základě vyslýchání sekundárního radaru. Perspektivně bude softwarový nástroj umožňovat určení možnosti vzniku kondenzačních stop a jejich charakteristik na základě vstupních meteorodát a přidružených letových dat.



## 2. Současný stav problematiky

Kondenzační stopy (anglicky condensation trails, zkráceně contrails) jsou bílé čáry, které je možno na obloze zpozorovat pouhým okem. Letadlo letící horní troposférou ve výšce 7-12 km (tedy ve vyšších hladinách troposféry a nižších hladinách stratosféry) nad zemským povrchem produkuje kondenzační stopy důsledkem spalování leteckého paliva. Výfukové plyny leteckých motorů uvolňují do vzduchu velké množství vodní páry a velmi drobných pevných částic, která jsou vlastně kondenzačními jádry. Kondenzační jádra mají vyšší teplotu i tlak než okolní vzduch. Kondenzační stopy nevznikají bezprostředně za letadlem. Výfukové plyny jsou zpočátku příliš horké, a proto se kondenzační stopa vytvoří až v určité vzdálenosti za letadlem, kde dochází k vyrovnání tlaků a postupně se snižuje teplota. V chladném vzduchu už není možné udržení veškeré vodní páry a tak se začíná kondenzací měnit v kapky vody, které díky nízké teplotě následně mrznou. [1]

Vznik, vývoj a doba trvání kondenzačních stop jsou závislé na parametrech vzduchové hmoty, kterou letadlo prolétá. Pokud má vzduchová hmota takové vlastnosti, že umožňuje kondenzačním stopám na obloze vzniknout a přetrvávat v řádu desítek minut až hodin, dále se rozrůstat a vzájemně spojovat, označují se pak jako perzistentní kondenzační stopy, v opačném případě se jedná o kondenzační stopy krátkodobé. Perzistentní kondenzační stopy mohou pokrýt dlouhodobě značnou část oblohy, a protože je kondenzační stopa svým složením a výškou výskytu podobná druhu oblaků Cirrus, označuje se takto vzniklá oblačnost jako indukovaná cirrovitá oblačnost. [1]

K tvorbě krystalického jádra je zapotřebí různých kombinací teploty a vlhkosti vzduchu. Nutnou podmínkou pro tvorbu ledových krystalů je teplota hluboko pod bodem mrazu (ideálně kolem  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Na ledové krystaly dále krystalizuje vodní pára z okolní atmosféry, a pokud jsou krystaly dostatečně velké, je možné je vidět na obloze. Mnohdy je pouhým okem nemožné rozeznat kondenzační stopy od běžné oblačnosti. Další podmínkou pro vznik je relativní vlhkost okolního vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu představuje poměr mezi aktuálním množstvím vodní páry ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch při plném nasycení za podmínek stejného tlaku a teploty. V případě, že v okolní atmosféře není dostatečná vlhkost, kondenzační stopa zaniká téměř ihned po průletu letadla. Při vyšší relativní vlhkosti se vodní kapky nevypařují, díky nízké teplotě krystalizují, a kondenzační stopa může přetrvávat po delší dobu. [2] S rostoucí vzdáleností za letadlem se postupně deformuje a rozšiřuje v závislosti na okolním proudění vzduchu. Pokud je doba životnosti stopy



delší než několik minut, můžeme hovořit o přetrvávajících (perzistentních) kondenzačních stopách, a právě tyto stopy mají významný vliv na atmosféru, především na změnu radiační bilance. [3]

Kondenzační stopy můžeme rozdělit na čtyři druhy, ale podstata jejich vzniku zůstává stejná. Primární rozdíl je čas, po který je kondenzační stopa viditelná na obloze. Krátkodobé kondenzační stopy se objevují jako krátké bílé čáry následující letadlo a mizí téměř tak rychle, jako se objevily. Přežijí maximálně pár minut a poté vodní pára sublimuje zpět do plynné podoby. Rychlost odpařování závisí na tlaku vodní páry okolní atmosféry, teplotě vzduchu a též na velikosti a křivosti povrchu krystalků či kapiček. V tomto případě je vzduch, kterým letadlo prolétá, suchý pouze s malým množstvím vlhkosti umožňující vytvoření kondenzační stopy. [7]

Dlouhodobě rozšiřující se stopy můžeme rozdělit na dva druhy. Stopy rozšiřující se a nerozšiřující se, oba druhy jsou tvořeny stejným způsobem. V případě, že je relativní vlhkost atmosféry dostatečně vysoká, jsou kondenzační stopy schopny setrvat dlouho ve vzduchu, který je přesycen vodními párami a krystalky ledu, které vznikly při průletu letadla, dále rostou. Nicméně rozšíření se objevuje v případě, že je vzduch nestabilní nebo turbulentní. Turbulence rozptyluje husté kondenzační stopy a šíří je po obloze až do horizontální roviny několika set metrů, čímž jim dává vzhled podobný normální oblačnosti a může vznikat jev zvaný „contrail cirrus“. [9]

Perzistentní kondenzační stopy jsou často pozorovány v podmínkách, ve kterých se vyskytuje přírodní cirrovitá oblačnost, ale není to nutností. V přesycených vzduchových hnotách vzhledem k ledu v oblastech s hustým leteckým provozem dochází ke spojování jednotlivých stop za vzniku indukované cirrovité oblačnosti. Perzistentní stopa trávající i několik hodin se může značně rozrůst, horizontálně v jednotkách kilometrů a vertikálně může dosahovat výšky 200 – 400 m. [26]

Aerodynamické kondenzační stopy se také mohou vytvářet v místech letounu, kde se prudce mění tlak. Kondenzace vzniká vlivem víru a vztlačových proudů, kdy v oku víru klesá teplota a tlak. Jedná se o vytvoření stopy ve velmi vlhkém vzduchu, kdy je stopa tvořena pouze vodními kapkami, nikoli ledovými krystaly. Za speciálních meteorologických podmínek mohou být čáry viděny na konci křídel, klapek a jiných ostrých hranách letadel. Vznikají zejména během vzletu a přistání. Životnost těchto stop je v řádu vteřin, proto nemají žádný vliv na atmosféru a jejich pozorování je velmi vzácné. [10]

Contrail cirrus neboli indukovaná cirrovitá oblačnost se tvoří ve vzduchu, který má dostatečnou vlhkost na to, aby mohl kondenzační stopy dále rozšiřovat. Uměle vytvořená oblačnost je při pohledu ze země těžko rozeznatelná od té přírodní. Obecně





Je cirrus oblak vyskytující se ze všech nejvýše (ve výšce 8-10 km), většinou tedy v oblasti horní hranice troposféry. Jedná se o typický oblak vysokého patra. Vzhledem k výšce, ve které se cirrus vyskytuje, jsou oblaky složené výhradně z ledových krystalů. Cirrovitá oblačnost jsou bílá vlákna, které propouští sluneční i měsíční svit. Nikdy z nich nevypadávají atmosférické srážky. Vznik cirrovité oblačnosti z kondenzačních stop je jen velmi těžko odhadnutelný. [11] Indukovaná cirrovitá oblačnost může být přemísťována na vzdálenost až stovek km od zdrojové oblasti i tam, kde nejsou splněny podmínky pro vznik kondenzačních stop. Nad prostory s hustým leteckým provozem se mohou vyskytovat oblasti indukované cirrovité oblačnosti o rozloze až 100 000 km<sup>2</sup>, kterým je přisuzován největší vliv na radiační bilanci Země z letecké dopravy. [45]

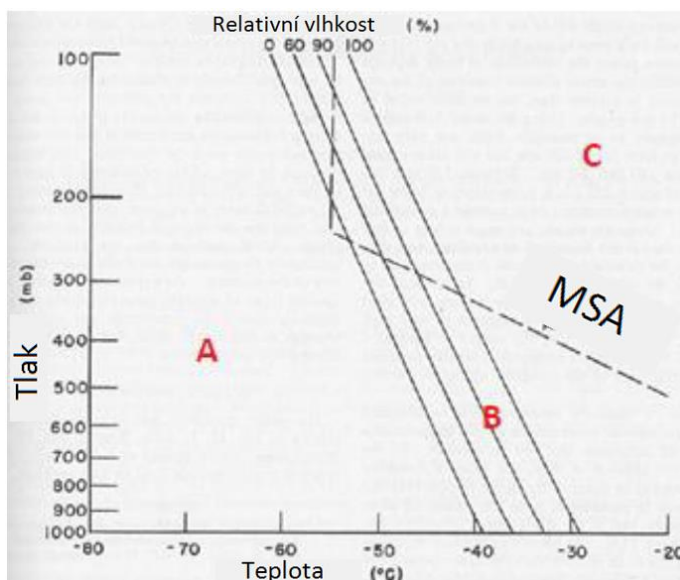
Zatímco krátkodobé kondenzační stopy ovlivňují radiační bilanci Země minimálně, u perzistentních kondenzačních stop a vzniklé indukované oblačnosti se naopak předpokládá značná míra tohoto vlivu. Na rozdíl od poměrně dobře zpracované teorie vzniku a vývoje kondenzačních stop přetrvávají nedostatky ve znalostech procesu přechodu perzistentních stop na indukovanou oblačnost a v nejistotách predikcí jejich radiačního působení. [3]

Díky závislosti kondenzačních stop na meteorologických podmínkách jsou dny, kdy jsou nepozorovatelné a dny, kdy je jimi obloha téměř zaplněná. Nejen meteorologické podmínky ovlivňují vzhled stop. Letadla letící v různých letových hladinách vytvářejí na obloze stopy různého vzhledu, šířky, navzájem se křížující nebo zdánlivě umístěné „vedle sebe“. [1]

## 2.1 Počátky výzkumu kondenzačních stop

Kondenzační stopy byly poprvé objeveny v roce 1919, během prvních letů ve vysoké nadmořské výšce. Většina vědců a inženýrů se jimi příliš nezabývala až do doby druhé světové války, kdy byly vojenské letouny zpozorovány na míle daleko, právě díky dlouhým čarám, které se za leteckými motory vytvářely. Kondenzační stopy byly někdy tak silné, že letadla nemohla zaměřit své cíle a někdy, ačkoliv zřídka, se díky špatné viditelnosti dokonce letadla navzájem srazila. V roce 1941 byl vydán článek o termodynamickém principu vzniku kondenzačních stop. Autorem byl německý vědec, Ernst Schmidt. Od 50. let je zaznamenáváno častější pozorování tohoto jevu, vlivem rostoucího objemu letecké dopravy nejen ve vojenské ale i civilní sféře. V roce 1953, vědec Herbert Appleman publikoval článek včetně grafu (viz. obrázek 1), ve kterém definoval podmínky pro vznik kondenzační stopy. [4] Svislá osa představuje tlak

v milibarech, na vodorovné ose je teplota vzduchu. Můžeme vyčíst i nejvyšší možnou teplotu, při které se za daných podmínek vytvoří kondenzační stopa. Z obrázku 1 je patrné, že čím je nižší teplota vzduchu, tím méně vlhkosti je potřeba k vzniku kondenzační stopy.



Obrázek 1: Graf H. Applemana z roku 1953, Závíslost prahové teploty na tlaku a relativní vlhkosti vzduchu [5]

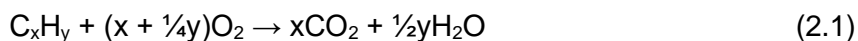
Na obrázku 1 je znázorněno několik křivek pro vlhkost, konkrétně tedy 0, 60, 90 a 100 % relativní vlhkost vzduchu. Předpokládá se, že okolní teplota odpovídá podmínkám mezinárodní standardní atmosféry (MSA). Oblast A je zprava ohraničena vlhkostí 0 %, v této oblasti dojde vždy k vytvoření kondenzační stopy i přesto, že vzduch neobsahuje žádnou vodní páru. Oblast B je vymezena 0 % až 100 % vlhkostí. V této oblasti může a nemusí dojít k vytvoření kondenzační stopy, závisí to na konkrétní hodnotě relativní vlhkosti. V oblasti C ohraničenou zleva křivkou 100 % vlhkosti nikdy nedojde k vytvoření kondenzační stopy (není zde dostatečně nízká teplota pro vznik kondenzační stopy). [4]

## 2.2 Vznik kondenzačních stop

Kondenzační stopy vznikají při spalování paliva v leteckých motorech a následném mísení vzniklých horkých výfukových plynů vystupujících z motoru letadla s okolní, dostatečně chladnou atmosférou, tj. -40 až -60 °C. Dokonalým spalováním leteckého



paliva coby směsi uhlovodíků, vyjádřené obecným vzorcem (2.1), vznikají dvě sloučeniny, a to oxid uhličitý a voda v plynném skupenství:



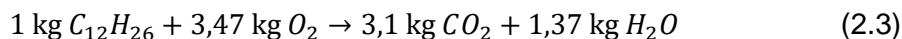
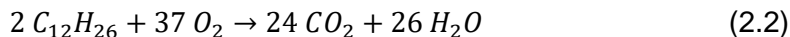
Při výtoku horkých a vlhkých výfukových plynů dochází při mísení s okolní vzduchovou hmotou k ochlazení směsi a tedy k nárůstu relativní vlhkosti této směsi. V případě, že relativní vlhkost směsi během procesu mísení překročí bod nasycení vodní parou a směs se stane přesycenou, dojde k energeticky nevyváženému stavu směsi, která má ale snahu tuto nevyváženost co nejkratší cestou opět vyrovnat kondenzací či depozicí. Protože spalování paliva dokonale nikdy neprobíhá, a navíc palivo není složeno jen z uhlovodíků ale i z přidaných aditiv, vystupující výfukové plyny obsahují kromě H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub> i další látky jako saze a oxidy síry. Díky přítomnosti těchto aerosolů, které slouží jako kondenzační jádra, molekuly vody v plynném skupenství v přesycené směsi kondenzují, případně i deponují a tím uvádějí energeticky nevyváženou směs opět do rovnováhy, což trvá do té doby, dokud je okolní vzduch přesycený. Zkondenzované a přechlazené kapičky vody poté velmi rychle mrznou a v tento okamžik se stává kondenzační stopa viditelnou. Aerosoly obsažené ve výfukových plynech nejsou nutnou podmínkou k vytvoření kondenzační stopy, neboť aerosoly se vyskytují (v mnohem menším počtu) i v neovlivněném vzduchu exhalacemi z motoru. Celý proces tvorby kondenzační stopy však urychlují a mají vliv na počet a velikost vzniklých kapiček vody a ledových krystalů. [1,11].

Nejčastěji se kondenzační stopy vyskytují v horní troposféře nad 8 km. V těchto vyšších výškách připadají u letecké dopravy v úvahu nejčastěji pohonné jednotky dvouproudové tryskové s vysokým obtokovým poměrem, jehož typickým představitelem je motor CFM56 v různých verzích, používaného mj. u letadel Boeing 737 NG a rodiny letadel Airbus A320 ceo.

Motor CFM56 spaluje letecký petrolej, což je složitá směs uhlovodíků petrolejové frakce s destilačním rozmezím 180 – 190 °C a obvyklým počtem 9 – 16 atomů uhlíku v řetězci a dále přidaných aditiv. Platnými předpisy není dáno přesné chemické složení, jsou však přísně předepsány fyzikální parametry a stanoven maximální obsah alkenů a aromátů. Většinu leteckého petroleje tvoří alkany, které mají obecný sumární vzorec C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, tedy lze zjednodušený sumární vzorec se střední hodnotou uhlíku leteckého petroleje psát C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>. [24].



Po úpravě obecného vzorce spalování uhlovodíků (2.1) do tvaru alkanu s 12 atomy uhlíku ve vzorci (2.2) a dosazení relativních atomových hmotností v (2.3) vychází na 1 kg spáleného paliva vyprodukování 1,37 kg vodní páry ve výfukových plynech.



Výsledkem spalování leteckého paliva je mimo jiných složek též určité množství vodní páry, je udáno emisním indexem vodní páry. Skutečné množství vodní páry z výfukových plynů je závislé zejména na druhu paliva, typu motoru a pracovním režimu motoru.

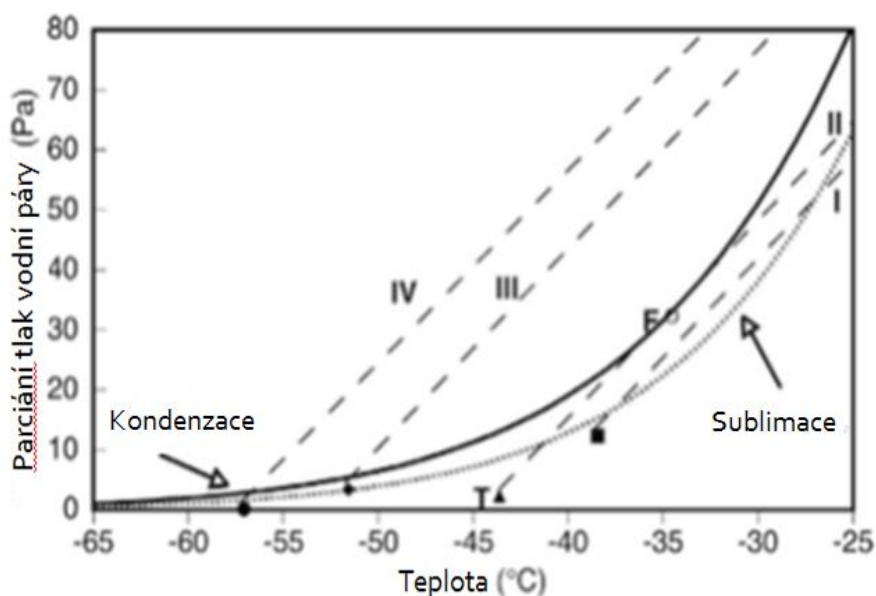
Ve výškách zhruba nad 8 km, jsou teploty (v mírných zeměpisných šířkách) zpravidla pod  $-50^\circ\text{C}$ . Při  $20^\circ\text{C}$  nastává nasycený stav tehdy, když 1 metr krychlový obsáhne 17,3 g vodní páry. Při  $-50^\circ\text{C}$  je ke stavu nasycení potřeba jen 0,06 g vodní páry v každém krychlovém metru vzduchu. Pro výpočet vzniklé vlhkosti po smíchání výfukových plynů a okolní atmosféry bude uvažováno s proudovým letadlem, které letí v atmosféře s okolní teplotou vzduchu  $-50^\circ\text{C}$  a relativní vlhkostí 30 %. Absolutní vlhkost v této hladině je proto  $0,02 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Palivem v letadle je kerosin  $C_{12}H_{26}$ , letadlo má spotřebu každého jednoho motoru  $0,42 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , což odpovídá spotřebě 1,5 tuny paliva na jeden motor a hodinu letu (např. Boeing 737 nebo Airbus 320).

Z rovnice (2.3) vychází, že po spálení 1 kg paliva vyjde z motoru do atmosféry 1,37 kg vody. V našem příkladě motor spotřebuje 0,42 kg paliva za jednu sekundu, takže za jednu sekundu vyjde z motoru 0,58 kg vodní páry. Když letadlo letí rychlostí 0,8 Machu, uletí za 1 sekundu 240 metrů. Předpokládejme, že proud vystupujícího vzduchu z motoru má průměr 5 metrů (kuželovitě se rozšiřuje, toto je jen průměrná hodnota), pak každou sekundu vznikne za letadlem válec výstupních plynů o objemu 4680 metrů krychlových, ve kterých je rozptýleno 0,58 kg vodní páry, tedy  $0,124 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . K tomu připočteme původní vlhkost, která v atmosféře byla, a která se turbulentně smísí s proudem vzduchu z motoru —  $0,094 \text{ kg}$  ( $4680 \text{ m}^3 \cdot 0,00002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), a dostaneme, že válec vzduchu za motorem obsahuje 0,674 kg vodní páry na 4680 metrů krychlových. Každý jeden metr krychlový vzduchu pak obsahuje 0,144 g vody. To by odpovídalo přesycení asi 230 %. Při nižší teplotě vzduchu a vyšší vlhkosti, např. při přibližování teplé fronty a růstu relativní vlhkosti ve vysoké troposféře, je snadné dosáhnout tímto způsobem přesycení i více než 500 %. Tak může docházet k umělé kondenzaci dokonce i bez přítomnosti kondenzačních jader. Vzniklé kapky vody za motorem

okamžitě mrznou a samy působí jako kondenzační jádra pro jiné kapky, které ještě nestačily zmrznout. Vlivem turbulence narážejí kapalně kapičky na vzniklá ledová jádra a ihned se s nimi spojují a mrznou, dochází k depozici.

### 2.2.1 Schmidt – Applemanova teorie

Pro pochopení vzniku kondenzačních stop se hojně využívá Schmidt - Applemanova teorie, která určuje meteorologické podmínky nutné ke vzniku kondenzační stopy. Teorie předpokládá, že okolní vzduch se smíchává s výfukovými plyny adiabaticky a izobaricky. Kondenzační stopa tedy vzniká smíšením horkých a vlhkých výfukových plynů z motoru letadla s okolním vzduchem, který je sušší a chladnější. [6] Je důležité, aby během mísení bylo dosaženo stavu nasycení atmosféry vodní parou vzhledem k vodě, to znamená, že vodní pára musí být v podobě kapek vody a nikoli ledových krystalů. Jak již bylo zmíněno, v oblasti těsně za letadlem je teplota výfukových plynů vysoká a vzduch tedy dokáže udržet velké množství páry, oproti větší vzdálenosti (přibližně 30 m) za letadlem, kdy je teplota nižší a vzduch nedokáže udržet páru v plynném skupenství, tudíž začíná kondenzovat. Proces vzniku kondenzačních stop je přiblížen na obrázku 2. Uvažujme, že se teplota a vlhkost za letadlem mísí rovnoměrně, a tudíž je možné předpokládat vznik kondenzačních stop podle grafu závislosti tlaku vodní páry na teplotě. [7]



Obrázek 2: Fázový diagram mísení výfukových plynů s okolním vzduchem pro různé okolní podmínky [7].



Plná křivka na obrázku 2 udává mez nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě (kondenzační), tečkovaná křivka udává mez nasycení vzduchu vodní parou vzhledem k ledu (sublimační). V prezentovaném grafu (obr. 2) jsou vidět čtyři čárkované křivky, které představují křivky mísení různých poměrů teploty a vlhkosti. Spodní body křivek reprezentují velmi chladný okolní vzduch a nízký parciální tlak vodní páry. [7]

V případech I, II a IV je tlak vodní páry nižší než parciální tlak nasyceného vzduchu vzhledem k ledu a v případě III je naopak vyšší. V případě I parciální tlak dosáhne hodnoty nasycení vzhledem k ledu ale ne vzhledem k vodě. Jelikož nebyla překročena křivka kondenzace, je nemožné, aby se vytvořila kondenzační stopa. V případě II dochází k nasycení vzduchu vodní parou vzhledem k vodě a v bodě F teploty dojde ke vzniku kondenzační stopy, která zmizí ve chvíli, kdy směs překročí hranici sublimace (přeměna do plynného skupenství). [7]

Případ III je odlišný v tom, že křivka sice značně zasahuje do oblasti kondenzace ale bod, označující stav vzduchu v atmosféře je nad hranicí sublimace. Vzduch je nasycen vzhledem k ledu a kondenzační stopa bude na obloze viditelná i dlouho po průletu letadla a může se ještě i rozšířit. V případě IV také vzniká dlouhodobá kondenzační stopa. Její dlouhodobé setrvání na obloze je způsobeno tím, že podmínky nasycení vzduchu vodní parou pokrývají větší spektrum teplot a křivka mísení zasahuje svou větší částí do oblasti nad hranicí kondenzace. Graf potvrzuje tvrzení, že kondenzační stopy se vytvářejí při nižších teplotách vzduchu. [7]

### 2.2.2 Vliv vlhkosti vzduchu

Vzduch má do výšky asi 100 km nad zemským povrchem stejné procentuální zastoupení plynů, tj. dusík a kyslík, které společně zaujímají 99 % v daném objemu vzduchu. Oxid uhličitý, ozon a vodní pára mají proměnnou koncentraci v čase i prostoru. Kromě těchto skupin plynů obsahuje vzduch i pevné a kapalné částice, které se označují jako atmosférický aerosol. Vodní pára významně ovlivňuje vznik vodních kapek či ledových krystalů a vznik oblačnosti.

Relativní vlhkost lze vyjádřit jako poměr skutečného tlaku vodní páry k tlaku nasycené vodní páry při téže teplotě. Při vyšší teplotě je skutečný tlak par vyšší, současně se ale s rostoucí teplotou zvětšuje i napětí nasycení, jehož vzrůst je ale daleko rychlejší než vzestup skutečného napětí vodní páry, proto se relativní vlhkost se vzrůstem teploty zpravidla zmenšuje. Relativní vlhkost má tedy opačný denní i roční chod než teplota vzduchu. Existují ale oblasti, kde má relativní vlhkost rozdílný roční



chod, což se týká především monzunových oblastí zemského povrchu, např. jihovýchodní Asie. [22]

Tlak vodní páry v atmosféře s výškou rychle ubývá, ve volné atmosféře je pokles tlaku vodní páry s výškou rychlejší než v horských oblastech. Mezi průběhem relativní vlhkosti a výškou nelze mluvit o jednoznačné závislosti, oblaky se v troposféře vyskytují v celém vertikálním rozsahu a někdy i v nižší stratosféře, z tohoto důvodu lze pozorovat střídání vrstev s velmi malou nebo naopak velkou relativní vlhkostí nad sebou. [22]

Z hlediska termodynamiky atmosféry je možné vzduch chápat jako směs dvou plynů složek, suchého vzduchu a vodní páry, tato směs je označována jako vlhký vzduch. Pro běžné aplikace v meteorologii se suchý vzduch i vodní pára považuje za termodynamický ideální plyn. Stavová rovnice ideálního plynu pro vodní páru je:

$$e = \rho_v \cdot R_v \cdot T, \quad (2.5)$$

kde  $e$  [Pa] je parciální tlak vodní páry ve vlhkém vzduchu,  $\rho_v$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] hustota vodní páry,  $R_v$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] měrná plynová konstanta vodní páry a  $T$  [K] teplota.

Maximální parciální tlak vodní páry nad vodou nebo ledem ve vlhkém vzduchu při běžných výpočtech lze určit pomocí Magnusenova vztahu:

$$e_{max} = e_0 \cdot \exp\left[\frac{C(T-T_0)}{T-D}\right], \quad (2.6)$$

kde  $e_0$  je parciální tlak vodní páry při 273,15 K (610,7 Pa pro vodu a 610,64 Pa pro led),  $T_0$  je 273,15 [K],  $T$  je teplota vzduchu [K],  $C$  je bezrozměrná konstanta 17,15 pro vodu a 21,88 pro led a konečně konstanta  $D$  [K] 38,25 pro vodu a 7,65 pro led. Po dosazení  $e_{max}$  do stavové rovnice pro vodní páru (2.5) lze pak určit hustotu syté páry pro konkrétní teplotu atmosféry a při známé relativní vlhkosti vyjádřit hustotu vodní páry ve vlhkém vzduchu [19]. Míra nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě rozhoduje spolu s ostatními faktory o vzniku kondenzační stopy, míra nasycení vodní párou vzhledem k ledu spolu s ostatními faktory rozhoduje o vývoji kondenzační stopy.

Procesy při tvorbě kondenzačních stop probíhají právě ve vlhkém vzduchu. Míra vlhkosti, tj. množství vodní páry ve vlhkém vzduchu, se vyjadřuje několika způsoby. Nejznámější je relativní vlhkost  $U$ , definovaná jako poměr parciálního tlaku vodní páry ve vlhkém vzduchu o dané teplotě a parciálního tlaku syté vodní páry o stejné teplotě, za předpokladu platnosti stavové rovnice pro vodní páru (2.5), lze vyjádřit i poměrem hustoty vodní páry  $\rho_v$  ve vlhkém vzduchu a hustoty syté vodní páry vzhledem k vodě či



ledu za stejných podmínek, je to bezrozměrná veličina nebo se udává v procentech [19].

Relativní vlhkost  $U$  není zahrnutá v aerologických měření. Lze ji vypočítat na základě znalosti teploty  $T$  a teploty rosného bodu  $T_d$  použitím rovnice (2.7):

$$U(T, T_d) = e^{-\frac{L_{vw}T - T_d}{R_v T d T}}, \quad (2.7)$$

kde  $L_{vw}$  je latentní teplo kondenzace a  $R_v = 461,5 \text{ [J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vodní páry. Latentní teplo kondenzace pro danou teplotu  $T$  je:

$$L_{vw}(T) = L_{vw}[T_0] - (c_w - c_{pv})(T - T_0), \quad (2.8)$$

kde  $L_{vw}[T_0]$  je latentní teplo kondenzace při teplotě 273,15 K ( $2.501 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ),  $c_w$  je měrné teplo kapalné vody při teplotě  $T_0$  ( $4218 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $c_{pv}$  je měrné teplo vodní páry při konstantním tlaku ( $1870 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) a  $T_0$  je teplota 273,15 K [19].

Teplotu ledového bodu  $T_{ice}$  lze získat výpočtem pomocí Boltonova vztahu:

$$T_{ice} = \frac{243,5 \ln e_{ice} - 440,8}{19,48 - \ln e_{ice}}, \quad (2.9)$$

kde  $e_{ice}$  je napětí nasycení vodní páry nad ledem, získáme dosazením do (2.6) [19].

Při ochlazování vlhkého vzduchu roste relativní vlhkost a při určité teplotě dojde k dosažení vyšší hodnoty parciálního tlaku vodní páry než je hodnota parciálního tlaku nasycené vodní páry při téže teplotě. Vzduch se v tuto chvíli stává přesycený vzhledem k vodě. Protože jde o energeticky nevyvážený stav, vzniká nové skupenství, které nevyváženost eliminuje. Vznikají zárodečné vodní kapky, proces se nazývá nukleace vody. Pokud zárodečné kapky vznikají pouze náhodnými kolizemi molekul vody, jedná se o homogenní nukleaci. Pokud kapky vody vznikají na kondenzačních jádrech, jedná se o heterogenní nukleaci. Pro vznik kapek homogenní nukleaci je potřeba vysokých přesycení, která v případě exhalace výfukových plynů sice lze dosáhnout, nicméně běžně se s homogenní nukleací neuvažuje. Kapky, vznikající na jádrech jako kapalná vrstva na povrchu jádra, mají větší poloměr křivosti než kapky tvořené stejným počtem molekul vody a zároveň větší pravděpodobnost, že překonají kritickou velikost a stanou se zárodečnými kapkami schopnými dalšího růstu. Rychlost nukleace závisí na teplotě a přesycení vodní párou, při dané teplotě roste nukleační rychlost s přesycením od zanedbatelných hodnot k extrémně velkým hodnotám ve velmi úzkém rozsahu hodnot přesycení. Jakmile vznikne kapka nadkritické velikosti, začíná spontánně růst difuzí





vodní páry ke kapce. Protože teplota směsi výfukových plynů a okolního vzduchu je po smíchání velmi nízká, dojde při kondenzaci k tvorbě ledových krystalů [19].

Vznik ledových krystalů začíná podobně jako vznik kapek u kondenzace nukleací. Krystaly mohou vznikat mrznutím přechlazených vodních kapek nebo přímou depozicí z vodní páry. Oba způsoby mohou probíhat jak homogenní nukleací ledu, tak i heterogenní nukleací. Homogenní mrznutí vodní kapky je podobné homogenní nukleaci kapky z vodní páry. Stejně jako u homogenní kondenzace je homogenní mrznutí určeno velikostí kritického zárodku a pravděpodobností jeho vzniku náhodným uspořádáním molekul vody. Velikost kritického zárodku ledu v kapce je funkcí teploty. Ukazuje se, že homogenní nukleace nastává při teplotách nižších než asi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rychlost tvorby zárodků ledu ve vodě přechlazené o  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  je přibližně  $0,4\text{ m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ , při přechlazení o  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  roste rychlost až na  $10^{18}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro homogenní depozici ledových krystalů je zapotřebí velmi nízkých teplot pod  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  a vysokých přesycení. Při prahu homogenního mrznutí  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  nukleace vodních kapek z vodní páry a jejich následné mrznutí nastává dříve než homogenní depozice. Nad teplotou  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází výhradně k heterogenní nukleaci ledu. Jader, která podporují vznik ledu, je v atmosféře podstatně méně než jader kondenzačních, protože povrch ledového jádra musí podporovat uspořádání krystalické mřížky ledu, je vhodné, aby ledové jádro vykazovalo alespoň částečnou krystalografickou podobu s ledem. Když se během mísení výfukových plynů a okolního vzduchu objevují první ledové krystaly, je parciální tlak vodní páry ve směsi roven nebo vyšší než parciální tlak nasycení vzhledem k vodě, tzn. vzduch je přesycený vzhledem k ledu a zárodečné krystalky se nacházejí v příhodném prostředí pro jejich další růst a to do té doby, dokud se všechny přechlazené zkondenzované vodní kapky nevypaří nebo nezmrznou [19].

Zpočátku je ve vytvářející se stopě koncentrace ledových částic  $10^4$  v  $\text{cm}^3$  až  $10^5$  v  $\text{cm}^3$ , přičemž částice dále rostou a turbulentně se mísí s okolním vzduchem. Jejich koncentrace dále klesá na hodnotu  $10^3$  v  $\text{cm}^3$  až  $10^4$  v  $\text{cm}^3$  a rozměry částic se pohybují do  $1\text{ }\mu\text{m}$ , při stáří stopy okolo jedné minuty jsou rozměry částic  $2\text{ }\mu\text{m}$  a při stáří jedné hodiny  $8\text{ }\mu\text{m}$  za poklesu koncentrace na hodnotu 10-15 částic v  $\text{cm}^3$  [7,25].

### 2.2.3 Vliv teploty

Proces adiabaticko izobarického mísení začíná okamžikem, kdy spaliny opouštějí hnací trysku motoru, kondenzační stopa není viditelná bezprostředně za motorem letadla. To je způsobeno vysokou teplotou spalin, při které směs udrží obsaženou vodní páru. K dostatečnému ochlazení pro započítání kondenzace a mrznutí vzniklých kapek dochází několik desítek metrů za motory [7].



Pokud dochází k mísení dvou nenasyčených vzduchových hmot o jiných teplotách a vlhkostech, závisí vlhkost výsledné směsi na hmotnosti a vlastnostech obou složek. Promíchávání probíhá při konstantním tlaku vzduchu. Pak z definice měrné vlhkosti vyplývá rovnice (2.10):

$$q_v = \frac{m_1 \cdot q_{v1} + m_2 \cdot q_{v2}}{m_1 + m_2}, \quad (2.10)$$

kde  $q_v$  je měrná vlhkost směsi,  $m_1$  a  $m_2$  hmotnosti složek,  $q_{v1}$  a  $q_{v2}$  měrné vlhkosti složek. Pokud je proces adiabatický, tzn. všechno teplo teplejší složky je beze ztrát odevzdáno složce chladnější, lze psát bilanční rovnici (2.11):

$$m_1(c_{pd} + q_{v1} \cdot c_{pv})(T_1 - T) = m_2(c_{pd} + q_{v2} \cdot c_{pv})(T - T_2), \quad (2.11)$$

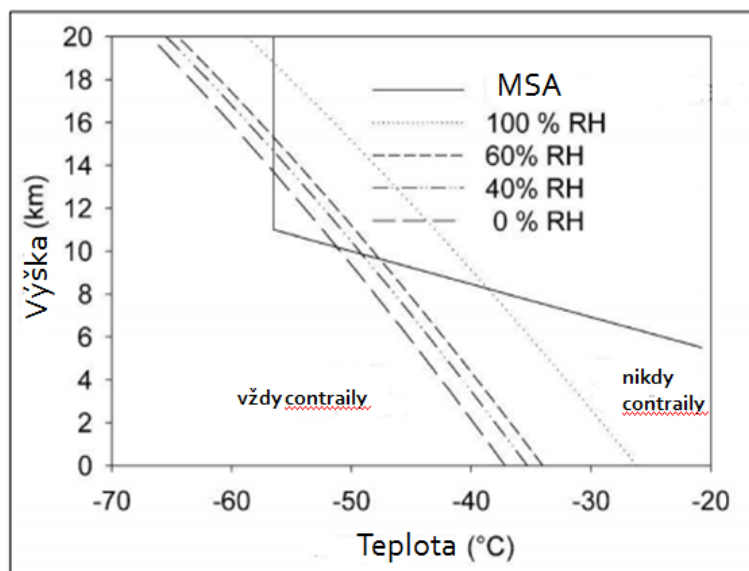
kde  $c_{pd}$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrné teplo suchého vzduchu při konstantním tlaku a  $c_{pv}$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrné teplo vodní páry při konstantním tlaku,  $T_1$  a  $T_2$  jsou teploty složek a  $T$  je výsledná teplota směsi [K] [19].

Pokud je teplota okolního vzduchu nižší než prahová, dojde během mísení k nasycení vzhledem k vodě a tudíž ke vzniku kondenzační stopy. V závislosti na míře přesycení vzhledem k vodě bude stopa obsahovat odpovídající množství zkondenzovaných kapek vody, které ihned mrznou. Míra přesycení tedy ovlivní koncentraci i velikost ledových částic v kondenzační stopě, což se pozorovateli jeví jako intenzita kondenzační stopy. Po vzniku ledových krystalů závisí další vývoj stopy na relativní vlhkosti konečného stavu směsi. Jestliže konečná směs není přesycena vzhledem k ledu, budou vzniklé krystaly přecházet zpět do plynné fáze a kondenzační stopa se rozplyne, a to tím rychleji, čím menší je v okolní atmosféře absolutní hustota vodní páry. Doba rozplynutí se udává v jednotkách sekund až jedné minuty, tato stopa se označuje jako krátkodobá. Jestliže však je konečná směs vzhledem k ledu přesycená, kondenzační stopa může setrvat dlouhou dobu v řádu desítek minut až několik hodin. V případě že relativní vlhkost konečné směsi vzhledem k ledu je jen těsně nad 100 %, bude růst krystalů ledu depozicí omezený a stopa se bude rozšiřovat jen difuzí a pomalu bude slábnout. Pokud bude konečný stav mísení významněji přesycený vzhledem k ledu, budou ledové krystaly dále růst depozicí z vodní páry. Taková kondenzační stopa se označuje jako dlouhodobá nebo perzistentní. Její další vývoj závisí na meteorologických parametrech okolních vzduchových hmot, tedy teplotách, vlhkostech, směrech a rychlostech větru [7].

Pro každý případ mísení výfukových plynů a okolního vzduchu existuje nejvyšší teplota (prahová teplota) okolního vzduchu, při které se může kondenzační stopa

vytvořit za daného parciální tlaku vodní páry ve vzduchu, teploty výfukových plynů a parciálního tlaku vodní páry obsažené ve výfukových plynech.

Při mísení nestačí překročit křivku nasycení vzhledem k ledu, ale je nutné minimálně dosáhnout křivky nasycení vzhledem k vodě, tento poznatek je znám jako Schmidt-Applemanovo kritérium. Toto kritérium je splněno, pokud není teplota okolního vzduchu vyšší než prahová [5].



Obrázek 3: Kritická teplota pro 0, 40 %, 60 % a 100 % RH pro nasycení vzhledem k vodě. [5]

Při znalostech kritických teplot pro jednotlivé případy lze sestavit graf kritické teploty jako funkce výšky a relativní vlhkosti. Z tohoto grafu (obrázek 3) je možné určit nejvyšší možnou teplotu tvorby kondenzační stopy při uvedených relativních vlhkostech, sestrojeného pro motory spalující kerosin s indexem emise vodní páry 1,223 a spalným teplem  $43,2 \text{ MJkg}^{-1}$  a pracující s celkovou účinností 0,3. [27,28]

### 2.3 Vývoj kondenzačních stop

Kondenzační stopy se vytvářejí díky dodatečné vlhkosti přidané do atmosféry. Podmínkou je nasycení vzduchu vzhledem k vodě. Tvorba ledových krystalů (nukleace) vzniká samovolně, bez interakce s další látkou, tzv. homogenní nukleace. Existuje však ještě jeden druh vzniku ledových krystalů a to tzv. heterogenní nukleace, při které vodní kapka zamrzne vlivem styku s pevnou částicí. Například pevné zplodiny z leteckého motoru jsou zdrojem pro heterogenní nukleaci. [8]



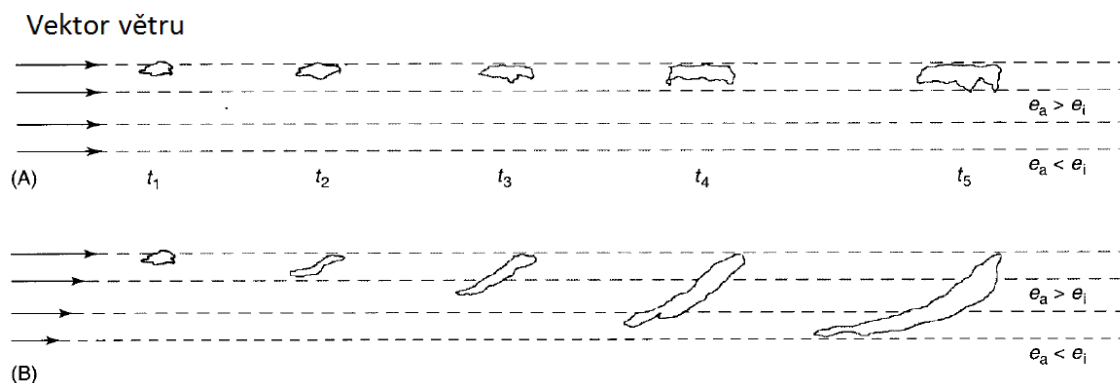
Kondenzační stopy vznikají přibližně 30 m za letadlem, když teplota výfukových plynů dostatečně klesne díky mísení s chladným vzduchem. Poslední výzkumy ukazují, že k prvotní kondenzaci vodních kapek dochází na různých pevných částicích, zejména při spalování leteckého benzínu dochází k emisi pevných zplodin, jako jsou například saze, aerosoly síranu, kovové částice a aerosoly minerálů. V druhé minutě stárí kondenzační stopy je střední hodnota poloměru částice přibližně 2  $\mu\text{m}$  a během třetí minuty roste až do velikosti 4-5  $\mu\text{m}$ . Bylo zjištěno, že částice mají různorodé tvary, například šestiboký sloupek, šestiboká destička, šesticípá hvězdice, šesticípý dendrit a další. Počáteční kondenzační stopy mají většinou tvar zubu pily nebo tvar buňky, vzniklé díky turbulentním proudům za letadlem. Páry turbulentních vírů působí tak, že vertikálně rozšiřují kondenzační stopu s nepravidelnostmi, což vede k vytvoření konvekčních buněk nebo gradientů radičního ochlazování, které pomáhají mísení kondenzační stopy s okolním vzduchem. [7]

Pokud je teplota okolního vzduchu nižší než prahová, dojde během mísení k nasycení vzhledem k vodě a tudíž ke vzniku kondenzační stopy. V závislosti na míře přesycení vzhledem k vodě bude stopa obsahovat odpovídající množství zkondenzovaných kapek vody, které ihned mrznou. Míra přesycení tedy ovlivní koncentraci i velikost ledových částic v kondenzační stopě, což se pozorovateli jeví jako intenzita kondenzační stopy. Po vzniku ledových krystalů záleží další vývoj stopy na relativní vlhkosti konečného stavu směsi. Jestliže konečná směs není přesycena vzhledem k ledu, budou vzniklé krystaly přecházet zpět do plynné fáze a kondenzační stopa se rozplyne, a to tím rychleji, čím menší je v okolní atmosféře absolutní hustota vodní páry. Doba rozplynutí se udává v jednotkách sekund až jedné minuty, tato stopa se označuje jako krátkodobá. Jestliže však je konečná směs vzhledem k ledu přesycená, kondenzační stopa může setrvat dlouhou dobu v řádu desítek minut až několik hodin. V případě že relativní vlhkost konečné směsi vzhledem k ledu je jen těsně nad 100 %, bude růst krystalů ledu depozicí omezený a stopa se bude rozšiřovat jen difuzí a pomalu bude slábnout. Pokud bude konečný stav mísení významněji přesycený vzhledem k ledu, budou ledové krystaly dále růst depozicí z vodní páry. Taková kondenzační stopa se označuje jako dlouhodobá nebo perzistentní. Její další vývoj závisí na meteorologických parametrech okolních vzduchových hmot, tedy teplotách, vlhkostech, směrech a rychlostech větru. [7]

Stejně jako přirozená oblačnost se může i kondenzační stopa rozšiřovat nebo vymizet. Rozšiřování kondenzační stopy je závislé na tloušťce přesycené vrstvy, stupních přesycení, charakteru turbulence a rychlosti a směru větru. Přesycená vrstva je vrstva, ve které je vzduch přesycen vodní parou vzhledem k vodě. Částice

dlouhodobé kondenzační stopy narůstají do velikosti 30 až 1 000  $\mu\text{m}$ , což je velikost charakteristická pro cirrovitou oblačnost. Ledové krystalky rostou rychleji ve vysoce přesycených oblastech. Jejich velikost může vést k vypadávání daných částic v závislosti na stříhu větru. [3]

Růst částic kondenzační stopy je v přesycených oblastech atmosféry velmi rychlý. Kondenzační stopa se rozšiřuje horizontálně a vertikálně do nižších vrstev v závislosti na stříhu větru, což je zobrazeno na obrázku 4. Zleva doprava je schematicky znázorněno pět časových okamžiků růstu kondenzační stopy. V horních vrstvách vzduchu je parciální tlak vodní páry ( $e_a$ ) nad hodnotou nasycení vzhledem k ledu ( $e_i$ ). Schéma A ukazuje, jak by se teoreticky stopa šířila za podmínek bez stříhu větru, schéma B za podmínek se stříhem větru. Je vidět, že pokud je přítomný stříh větru, kondenzační stopa se rozšíří do větší oblasti [7].



Obrázek 4: Šíření kondenzační stopy v závislosti na stříhu větru [7]

### 3. Vliv meteorologických veličin a situací

Vznik a vývoj kondenzačních stop je závislý na aktuálním stavu horní troposféry nebo spodní stratosféry, v nichž se dané letadlo v cestovních hladinách pohybuje. Aktuální stav okolní atmosféry je vyjádřen meteorologickými prvky, tlakem, teplotou, vlhkostí a případně rychlostí a směrem větru. V souvislosti se vznikem kondenzačních stop je nejdůležitější z meteorologických prvků teplota a vlhkost okolní atmosféry. V souvislosti s vývojem vzniklé kondenzační stopy pak vlhkost okolní atmosféry a vektor větru. Všechny uvedené prvky podléhají neustálým časovým a prostorovým změnám, které jsou spojeny s pohybem vzduchových hmot různých vlastností a se změnami těchto hmot v důsledku energetického působení na ně. V obou zmíněných částech vrstev atmosféry probíhá neustálé promíchávání vzduchu, které je způsobeno



turbulentním prouděním a konvekcí. Turbulentní proudění lze zjednodušeně popsat jako statisticky náhodný pohyb vírů různých velikostí, příčiny vzniku turbulencí jsou jak mechanické, např. tření proudícího vzduchu o zemský povrch nebo tření mezi vrstvami vzduchu o jiných rychlostech proudění, tak i termické povahy v případě malých vzduchových elementů s nižší hustotou (vyšší teplotou) oproti okolí, které jsou vztakovou silou vynášeny do vyšších vrstev. Konvekce je podmíněná nehomogenitami v horizontálním poli teploty vzduchu, přičemž na rozdíl od termické turbulence v případě termické konvekce v důsledku nerovnoměrného ohřívání vzduchu od zemského povrchu získává konvekční pohyb uspořádaný charakter. Uspořádané vzestupné pohyby jsou kompenzovány sestupnými pohyby nad chladnějšími místy zemského povrchu. Promíchávání vzduchu má za následek poměrně stálé zastoupení hlavních plynných složek vzduchu jak v horizontálním tak vertikálním směru atmosféry, sahající do výšky asi 100 km, což ale neplatí pro vodní páru, oxid uhličitý a ozon a případně i další složky jako jsou aerosoly, jejichž zastoupení je v atmosféře proměnlivé. [22]

Na základě dostupných znalostí bylo zjištěno, že vznik kondenzačních stop je závislý především na dvou základních meteorologických prvcích, a to je atmosférická teplota a vlhkost vzduchu, jejich vliv byl popsán v kapitole 2.2. Vznik perzistentních kondenzačních stop je závislý na relativní vlhkosti vzhledem k ledu, resp. existenci přesycených oblastí vzhledem k ledu.

Další meteorologické veličiny jako je atmosférický tlak, směr a rychlost větru, turbulence, stříh větru, vertikální pohyby okolní atmosféry, typ vzduchové hmoty a synoptické situace, přechod front významně ovlivňují vzhled, životnost, průběh kondenzačních stop.

Existuje několik možností, jak získat informace o meteorologických veličinách v horní troposféře a spodní stratosféře. Výchozím zdrojem je aerologické měření, které poskytuje základní meteorologické prvky. Dále je možné využít data z BDS registrů a AMDAR data a satelitní data. Pro doplnění potřebných dat je čerpáno z webových zdrojů.

### 3.1 Tlak vzduchu

Atmosférický tlak je hydrostatický tlak působený tíhou vertikálního vzduchového sloupce, který sahá od hladiny moře k horní hranici atmosféry. Tlak vzduchu představuje sílu, která působí kolmo na jednotkovou plochu. Na základě přijímané konvence se za normální atmosférický tlak v úrovni hladiny moře považuje hodnota 1013,25 hPa. Obecně atmosférický tlak klesá exponenciálně s výškou dle barometrické rovnice (3.1):



$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{g \cdot \Delta z}{R \cdot T}}, \quad (3.1)$$

kde  $p_0$  je tlak ve spodní hladině [Pa],  $p$  je tlak v horní hladině [Pa],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  $R$  je měrná plynová konstanta suchého vzduchu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\Delta z$  je výškový rozdíl hladin [m] a  $T$  je průměrná teplota vrstvy mezi hladinami  $p_0$  a  $p$  [K]. V praxi je hojně využíván fakt, že na každý vzestup o 5500 m klesne tlak přibližně na polovinu jeho předchozí hodnoty. [11]

Změny tlaku vzduchu lze dělit na periodické a aperiodické. V případě periodických změn se rozlišují roční a denní chody atmosférického tlaku. Roční chod souvisí se sezónními změnami barického pole na zemském povrchu. Tyto změny jsou jiné nad kontinenty i oceány a mají odlišný charakter i v různých zeměpisných šířkách. Roční chod tlaku tedy není v různých místech stejný, na kontinentech nastává v nižších polohách roční maximum tlaku vzduchu v zimě a minimum v létě, obrácený chod se vyskytuje ve vysokých horách. Nad oceány je v nižších a středních zeměpisných šířkách mimo polární oblasti roční chod tlaku vzduchu ve tvaru dvojité vlny s dvěma maximy v létě a v zimě a dvěma minimy na jaře a na podzim, opačný dvojitý roční chod se vyskytuje v polárních oblastech. Denní chod atmosférického tlaku v mírných zeměpisných šířkách je zřetelný zřídka, neboť bývá překryt aperiodickými změnami, projevuje se relativně málo při stabilních, zejména anticyklonálních meteorologických situacích. Naopak v tropických oblastech jevy počasí probíhají pravidelněji a denní periodické výkyvy tlaku jsou podstatně větší než v mírných zeměpisných šířkách. Nicméně z pozorování vyplývá, že denní chod tlaku vzduchu představuje dvojitou vlnu s maximy asi v 10 a 22 hodin a dvěma minimy ve 4 a 16 hodin místního času. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou se zmenšuje s rostoucí zeměpisnou šířkou, přičemž rozdíl činí jednotky hPa v tropickém pásu a desetiny hPa v mírném zeměpisném pásu. Denní kolísání tlaku vzduchu je výsledkem zejména denního kolísání teploty vzduchu a slapových pohybů atmosféry. Atmosférický tlak se mění jak ve svislém, tak i horizontálním směru. Vlivem těchto změn vzniká síla tlakového gradientu. Síla tlakového gradientu působí kolmo k plochám konstantního tlaku a patří k základním silám, které ovlivňují proudění vzduchu v atmosféře. K základním tlakovým útvarům v zemské atmosféře se řadí především tlakové níže (cyklony), tlakové výše (anticyklony), hřebeny vysokého tlaku a brázdy nízkého tlaku. Nad zemským povrchem lze nalézt oblasti s trvale nižším nebo vyšším tlakem vzduchu vzhledem k svému okolí. Patří mezi ně pás sníženého tlaku obepínající Zemi v rovníkové oblasti, tj. rovníková (ekvatoriální) tlaková deprese, dva rovnoběžkové pásy zvýšeného tlaku vzduchu vzhledem k okolí, obepínající Zemi na obou polokoulích v subtropích mezi cca. 25. a



30. stupněm zeměpisné šířky, které však nejsou zcela souvislé a vyskytují se v nich jednotlivé tlakové výše (pro oblast střední Evropy je významná azorská výše) a konečně pásy nízkého tlaku ležící přibližně podél 60. stupně zeměpisné šířky na obou polokoulích. Na severní polokouli posledně jmenovaného pásu je jeho součástí výrazná islandská tlaková níže významně ovlivňující počasí v severním Atlantiku a Evropě. Dále se vyskytují sezónní tlakové útvary, vytvářející se v určitých oblastech pouze v teplé nebo chladné části roku. V centrálních oblastech kontinentů vznikají tlakové výše podmíněné silným prochlazováním vzduchu, nejvýraznější je sibiřská tlaková výše. Tyto zimní kontinentální výše jsou utvářeny velmi studenými vzduchovými hmotami, ve kterých tlak vzduchu s výškou rychle klesá, a v důsledku toho se v horní polovině troposféry již neprojevují, jsou to tedy poměrně nízké tlakové útvary na rozdíl od subtropických výší, které mají vertikální rozsah přes celou troposféru. V letním období se vzduch nad kontinenty silně prohřívá, v důsledku čehož vznikají rozsáhlé, ale mělké oblasti nízkého tlaku [11].

### **3.2 Vzduchové hmoty a atmosférické fronty**

V atmosféře se lze setkat s rozsáhlými oblastmi, v nichž jsou poměrně homogenní meteorologické podmínky, zatímco v jiných oblastech mohou být tyto podmínky sice také poměrně homogenní, avšak zcela odlišné. Na základě provedených aerologických měření je známo, že tyto rozdíly podmínek v sousedních oblastech existují i ve vertikálním směru a souvisejí s rozdělením troposféry na různé vzduchové hmoty. Horizontální rozměry vzduchových hmot bývají v tisících km, vertikální rozsah pak v jednotkách kilometrů, v některých případech může vzduchová hmota zasahovat celý vertikální rozsah troposféry. Při delším setrvávání vzduchové hmoty v místě jejího vytvoření přijímá tato hmota určité vlastnosti díky turbulentní výměně tepla a vlhkosti s podkladem a také díky radiačním dějům oteplování nebo ochlazování samotné vzduchové hmoty v celém jejím vertikálním rozsahu. Proces tvoření vzduchové hmoty se považuje za ukončený, když teplota ve všech hladinách dosáhne stálého rovnovážného stavu, který odpovídá podmínkám tepelné a radiační rovnováhy v dané oblasti a roční době. Při změně cirkulačních podmínek se vzduchové hmoty přemísťují mimo oblasti svého vzniku, přičemž si zachovávají do značné míry své charakteristické vlastnosti. Vzájemná rozhraní různých vzduchových hmot pak vytvářejí atmosférické fronty. Často se vzduchové hmoty při svém pohybu spíše vyvíjejí v průběhu času vlivem určitého podkladu v dané oblasti při různorodých podmínkách cirkulace, i přes to, že jejich vývoj prakticky není nikdy ukončen, je v případě, že se hmoty od sebe navzájem dostatečně odlišují, možný vývoj atmosférických front. Transformace vzduchových hmot, tedy změna vlastností vzduchových hmot následkem jejich pohybu





z oblasti do oblasti jiné, má velký význam pro změny podmínek počasí. Ve vzduchových hmotách různé meteorologické prvky podléhají v denním chodu nestejným změnám. Prvky, které se při přemísťování vzduchových částic mění jen málo nebo vůbec, se nazývají konzervativní, při adiabatických dějích je typickým konzervativním prvkem potenciální teplota. Nad vrstvou bezprostředně ovlivňovanou kontaktem s povrchem jsou konzervativními prvky např. absolutní vlhkost nebo teplota rosného bodu. V blízkosti zemského povrchu jsou teplota vzduchu i zejména relativní vlhkost velmi málo konzervativními prvky. [22]

Vzduchové hmoty se klasifikují termicky nebo geograficky. V termické klasifikaci se rozlišují teplé vzduchové hmoty, tj. hmoty, které se při postupu nad danou oblast postupně ochlazují, studené vzduchové hmoty, tj. hmoty, které se při postupu nad danou oblast oteplují a místní vzduchové hmoty, které se v dané oblasti nachází delší dobu a mají charakteristické vlastnosti pro tuto oblast a roční období. Všechny tři vzduchové hmoty se dále dělí na stabilní vzduchové hmoty, tj. hmoty s nižším vertikálním teplotním gradientem než je nasyceně adiabatický gradient, ve kterých se ani v nejpříznivějších denních hodinách nevytvářejí konvekční pohyby, a hmoty instabilní, tj. hmoty s vyšším vertikálním teplotním gradientem než je nasyceně adiabatický gradient, ve kterých alespoň v nejpříznivějších denních hodinách vzniká výrazná konvekce a s ní spojená turbulence a s obvykle se vytvářejícími konvekčními oblaky. V případě, že je instabilní vzduchová hmota suchá a konvekční kondenzační hladina leží nad horní hladinou konvekce, kupovitá oblačnost nevzniká. [22]

Zeměpisná klasifikace rozlišuje v závislosti na zeměpisné poloze zdrojové oblasti vytvoření vzduchové hmoty arktický vzduch, vzduch mírných šířek (polární), tropický vzduch. Vzduchové hmoty se dále dělí na oceánský a pevninský typ. [22]

Pro naše území je nejtypičtější výskyt vzduchu mírných šířek. V zimních obdobích je kontinentální vzduch mírných šířek značně chladnější než oceánský. V letních obdobích je kontinentální vzduch mírných šířek značně teplejší než oceánský a může být i teplejší než tropický vzduch. Ve všech případech je kontinentální vzduch mírných šířek sušší než oceánský. Vzduch mírných šířek obvykle sahá až k tropopauze. Teplota v přízemní vrstvě v oceánském vzduchu mírných šířek je v zimě poměrně vysoká, v kontinentálním naopak velmi nízká, často nižší než v arktickém vzduchu. Vlivem malých hodnot vertikálních teplotních gradientů a častých přízemních teplotních inverzí, je ve výšce teplota kontinentálního vzduchu mírných šířek obvykle znatelně vyšší než v arktickém vzduchu i oceánského vzduchu mírných šířek. Kontinentální vzduch mírných šířek má nízkou relativní vlhkost a převládá suché a málo oblačné počasí. [22]



Kondenzační stopy se budou snadněji tvořit v chladnějších (arktické, polární v zimním období) vzduchových hmotách než v teplejších (tropické). Zvýšenou tvorbu déletrvajících kondenzačních stop lze předpokládat v oceánských typech vzduchových hmot vzhledem obsahu vyšší absolutní vlhkosti.

Atmosférická fronta je tvořena úzkou přechodovou zónou mezi vzduchovými hmotami různých vlastností. Frontální plocha je vůči horizontální rovině skloněna v průměru o  $1^\circ$ . Základní fronty dosahují délek tisíců km, tvoří se na nich cyklony nebo rodiny cyklon a vzájemně oddělují vzduchové hmoty různého zeměpisného původu, na povětrnostních mapách je lze sledovat alespoň několik dní. Základní fronty se dále dělí dle postupu sousedních vzduchových hmot na stacionární, teplé nebo studené fronty. [22]

Teplé fronty se objevují především v počátečních stadiích vývoje cyklon. Přední část zvlněného frontálního rozhraní, kde se protlačuje teplý vzduch výkluzem po původní studené vzduchové hmotě, se nazývá teplá fronta. Teplý vzduch se při výstupu po frontální ploše ochlazuje a rozpíná, dochází ke kondenzaci či depozici vodní páry a vzniku vrstevnaté oblačnosti, která je nad rozsáhlým územím pro teplou frontu charakteristická, s trvalými srážkami ve formě deště nebo sněžení či mrholení, případně v některé kombinaci. Přibližování teplé fronty je tedy spojeno s přibližováním tlakové níže, obvykle nejprve převládá počasí zadní strany tlakové výše, tlak vzduchu klesá a převládá jasno nebo vysoká cirrovitá oblačnost. Ve vyšších hladinách dochází k zvyšování relativní vlhkosti. Pokud je vyklouzávající teplý vzduch dostatečně vlhký, je možné před příchodem teplé fronty očekávat tvorbu déletrvajících kondenzačních stop. Ve výškách v blízkosti tropopauzy lze sledovat postupné přibývání cirrů, které se slévají do souvislejších celků, obloha se dále zatahuje oblačností Cs, frontální plocha přibližující se teplé fronty klesá do nižší výšky a oblačnost nabývá na mohutnosti. Pásmo oblačnosti teplé fronty bývá ve směru jejího postupu široké asi 1000 km, v zimě i více, rychlost postupu teplé fronty bývá obvykle okolo  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  [11,22]

Studená fronta uzavírá teplý sektor cyklony a odděluje od sebe teplý vzduch před sebou a studený vzduch v týlu tlakové níže, studený vzduch proniká směrem k teplému a na svém čele ho vytlačuje do výšky. Frontální plocha je v oblasti dotyku se zemským povrchem deformována vlivem tření do podoby jazyku. Na rozdíl od teplé fronty se změny počasí odehrávají za čarou fronty. Rychlost postupu studené fronty bývá obvykle okolo  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . S časovým odstupem od přechodu studené fronty se počasí obecně zlepšuje, ubývá oblačnosti, v sušším vzduchu se vyskytují samostatné kupovité oblaky, přičemž jejich vertikální rozměr se postupně zmenšuje. Po přechodu studené



fronty nastupuje počasí přední strany tlakové výše. Rozlišují se studené fronty prvního a druhého typu. [11,22]

Studená fronta prvního druhu je ve svém vertikálním řezu zrcadlově podobná teplé frontě a na jejím čele se především v teplé části roku utváří mohutná oblačnost druhu Cb s navázaným systémem As-Ns s intenzivními trvalými srážkami, s rostoucí vzdáleností od čáry fronty se postupně zvyšuje základna oblaků, následuje pásmo vrstevnaté nebo kombinované oblačnosti, kde trvalé srážky plynule přecházejí do přeháněk. Obvykle se studené fronty prvního druhu vyskytují v blízkosti středů tlakových níží nebo v silně protažených brázdách nízkého tlaku. Nad územím ČR přecházejí studené fronty prvního druhu hlavně v zimním období, jejich oblačné pásmo je rozsáhlé, šířka může dosahovat i 600 km. [11,22]

Studené fronty druhého druhu jsou ve střední Evropě častější a jsou charakteristické pro teplou část roku. Mají oblačnou soustavu podstatně užší než studené fronty prvního druhu a tato oblačnost je soustředěna obvykle v oblasti čáry fronty a před ní. Postupuje razantněji než studená fronta prvního druhu, na jejím čele je intenzivně vytlačována teplá vzduchová hmota za vzniku bouřkové oblačnosti, které v létě přesahují výšku i 10 km. [11,22]

U studené fronty prvního druhu existuje za čarou fronty díky adiabatickému vytlačování teplé vzduchové hmoty oblast se zvýšenou vlhkostí, ve které se vyskytuje oblačnost Ci a v této oblasti lze předpokládat i výskyt déletrvajících kondenzačních stop. U studených front druhého druhu se tato oblast nevyskytuje.

Během vývoje cyklony dochází vlivem rozdílných rychlostí postupu teplé a studené fronty k jejich postupnému spojení, přičemž jako důsledek stáčení baroklinní vlny a jejího protažení vlivem deformace a rotace proudění kolem středu cyklony vzniká okluzní fronta. Teplý vzduch nejdříve proniká v teplém sektoru směrem k centru tlakové níže a vystupuje podél frontálních ploch, s čímž je spojena tvorba oblačnosti. S postupným spojováním frontálních ploch původní teplé a studené fronty dochází k oddělování teplého vzduchu od zemského povrchu, v průběhu času se délka okluzní fronty zvětšuje a teplý sektor se vzdaluje od středu cyklony více na okraj, až ztratí pro další vývoj cyklony význam. Teplá vzduchová hmota se svojí původní teplou frontou (již výškovou frontou) projevují dále již jen na výškových povětrnostních mapách. Podle rozdílu teplot obou původně studených vzduchových hmot se rozlišují teplé a studené okluzní fronty. Teplé okluzní fronty se nad pevninou vyskytují především v chladné části roku a studené naopak v teplé části roku. [11,22]

U obou typů okluzních front je původní teplejší vzduch vytlačen až do vyšších hladin troposféry, postupně se ochlazuje a tím se zvyšuje hodnota relativní vlhkosti. Nad



čárou okluzní fronty se nachází oblast s výskytem oblačnosti Ci a je zde díky zvýšené relativní vlhkosti i možnost výskytu déletrvajících kondenzačních stop.

### 3.3 Tlakové útvary

Rozložení tlakových útvarů bezprostředně ovlivňuje proudění v celé atmosféře včetně oblasti pod tropopauzou. Mezi základní tlakové útvary se řadí tlaková níže (cyklona), tlaková výše (anticyklona), brázda nižšího tlaku, hřeben vyššího tlaku, neutrální oblast tlaku. Názvosloví tlakových útvarů vychází z tvaru tlakového pole na synoptických mapách, tlaková níže a výše je charakterizovaná alespoň jednou uzavřenou izobarou, naopak brázda nižšího tlaku a hřeben vyššího tlaku představují oblasti, které uzavřené izobary neobsahují. Cyklony se rozlišují dle zeměpisných a meteorologických podmínek na mimotropické a tropické, mimotropické cyklony se v závislosti na způsobu tvoření dále dělí na frontální a místní. Frontální cyklony se vyvíjejí na atmosférických frontách, místní cyklony nejsou obvykle velké a hluboké a tvoří se bez souvislosti s frontami zpravidla z termických nebo orografických příčin. Anticyklony se v závislosti na zeměpisných a meteorologických podmínkách rozlišují na mimotropické a subtropické. Mimotropické anticyklony se dále dělí na pohyblivé, tj. anticyklony oddělující cyklony jedné série cyklon, uzavírající, tj. pohyblivé anticyklony uzavírající sérii cyklon, a stacionární, tj. málo pohyblivé anticyklony, které typicky představují zimní kontinentální anticyklony. Subtropické anticyklony jsou teplé, málo pohyblivé anticyklony v subtropické zóně. [11,22]

Nejčastější hodnota průměru dobře vyvinuté tlakové níže s jedním středem bývá okolo 1000 km a nejčastější hodnota průměru dobře vyvinuté tlakové výše bývá asi 2000 km. Hodnota tlaku vzduchu ve středu cyklony závisí na jejím vývojovém stadiu a na okolním poli tlaku, ve kterém cyklona vzniká. V počátečním stadiu a stadiu mladé cyklony zde bývá tlak obvykle okolo 1000 hPa, v období největšího rozvoje o 10 až 15 hPa nižší. Hodnoty tlaku vzduchu anticyklony v jejím středu kolísají v širokých mezích, v počátečním stadiu bývá hodnota tlaku vzduchu okolo 1015 hPa, ve stadiu největšího vývoje pak 1020 až 1050 hPa. Oblasti středů anticyklon bývají v porovnání s cyklonami poměrně široké. Vertikální složka proudění v oblasti středů cyklon a anticyklon je až o dva řády nižší než složka horizontální. V cykloně se vzestupné proudění nachází v široké oblasti jejího středu s maximy nad oblastí maximálního poklesu tlaku vzduchu před teplou frontou v oblasti teplé advekce, ve stadiu maximálního rozvoje cyklony lze pozorovat za studenou frontou oblast významných sestupných proudů. V anticykloně v široké oblasti kolem jejího středu se nachází sestupné proudění s maximy v oblasti přední části anticyklony, kde jsou v oblasti studené advekce největší



vzestupy tlaku. V pozdějších stadiích vývoje anticyklony lze v řadě případů nalézt na zadní straně anticyklony slabé vzestupné proudění. Rychlost postupu cyklon a anticyklon se mění v rozsahu 0 až 100 km.h<sup>-1</sup>, průměrná rychlost postupu cyklon nad Evropou bývá 30-40 km.h<sup>-1</sup>. Rychlost postupu anticyklon bývá podobná, avšak anticyklona se častěji stává málo pohyblivou. Rychlost a směr postupu přízemních tlakových útvarů přibližně odpovídá rychlosti a směru geostrofického proudění v hladině asi poloviny troposféry. [11]

Na základě proudění v tlakových útvarů lze odvodit jejich vliv na kondenzační stopy. V případě frontálních cyklon existuje vliv na vlhkost vzduchu ve vyšších hladinách daný jejich aktuálním frontálním systémem a s ním spojeným prouděním uvnitř cyklon a advekcí vzduchových hmot v příslušných sektorech a obecným vzestupným prouděním uvnitř cyklon, které způsobuje nárůst relativní vlhkosti a tedy i možný výskyt déletrvajících kondenzačních stop. V případě anticyklon se uplatňuje sestupné proudění a záleží na obsahu vodních par ve vzduchu, kterým je shora anticyklona vyplňována. Zadní část ustupující anticyklony ovlivňuje svou teplou frontou nastupující cyklona a je tedy možné v zadní části anticyklony očekávat výskyt déletrvajících kondenzačních stop. To platí pro dostatečně vertikálně vyvinuté cyklony a jejich frontální systémy i anticyklony.

Brázdy nižšího tlaku a hřebeny vyššího tlaku se vyznačují neuzavřeným izobarickým, resp. geopotenciálním polem. Brázda nižšího tlaku vzduchu může vzniknout v tlakové níži, která se nepravidelně vyplňuje, v závětrří horských překážek, nebo za situací, které generují cyklonální zakřivení izobar nebo izohyps např. v místě s intenzivní teplou advekcí. Projevy počasí se v podstatě podobají počasí v tlakové níži, cyklonální zakřivení izobar způsobuje konvergenci proudění s následkem v podobě velkoprostorových výstupných pohybů vzduchu do výšky a jeho adiabatické ochlazování. Při vhodných vlhkostních poměrech se vyvíjí oblačnost a srážky, v teplé části roku se v brázdách nižšího tlaku vzduchu často tvoří bouřky. Hřeben vyššího tlaku vzduchu je počasím podobný tlakové výši, která se často z tohoto výběžku vyššího tlaku vzduchu tvoří. Hřeben vzniká v místech, kde se nacházejí vhodné podmínky pro anticyklonální zakřívování izobar nebo izohyps např. v místech, kde dochází k ochlazování vzduchové hmoty. [11]

Při vhodných podmínkách se mohou utvořit cyklony a anticyklony ve střední a horní troposféře, které se ale neprojevují na přízemních mapách, tyto cyklony a anticyklony se označují jako výškové. Jejich vývoj může probíhat nezávisle na situaci ve spodní troposféře, počátkem vývoje je vždy nestabilní vlna ve výškovém proudění, přičemž teplotní vlna zaostává za vlnou geopotenciálu. Při této situaci převažuje studená



advekce v oblasti brázd a teplá advekce v oblasti hřebene geopotenciální vlny. V konečném stadiu je studený vzduch, který pronikl na jih izolován od polární zdrojové oblasti, teplý vzduch, který pronikl na sever je izolován od subtropické oblasti. Rozsáhlé výškové cyklony a anticyklony existují v atmosféře poměrně dlouhou dobu a vzhledem ke své malé pohyblivosti významně ovlivňují povětrnostní situaci blokováním zonálního proudění, které se pak štěpí do větví s meridionálními složkami. Pokud dojde k nahromadění více výškových cyklon a anticyklon vedle sebe, může dojít k déletrvajícimu blokování západního proudění, typicky v oblastech západních břehů Evropy a severní Ameriky. [11]

#### 4. Vliv změn v atmosféře na klima

Klimatický systém Země získává téměř veškerou energii ze slunečního záření. Zhruba třetina tohoto elektromagnetického záření je odražena od atmosféry a povrchu Země zpět do kosmického prostoru. Zbylé dvě třetiny slunečního záření jsou pohlcovány zemským povrchem a atmosférou a následně vyzařovány v podobě dlouhovlnného záření. Vyrovnaná energetická bilance Země, tedy rovnovážný stav příjmu energie s odraženou a vyzařenou energií od Země, je nutný pro zachování stálé globální průměrné roční teploty. Působení člověka však tuto rovnováhu porušuje a dochází ke globálnímu oteplování Země se souvisejícími extrémními projevy počasí a jinými environmentálními dopady. Současné vědecké poznání globálního oteplování přisuzuje největší podíl na globálním oteplování zvyšování obsahu skleníkových plynů v atmosféře pohlcující dlouhovlnné tepelné záření, získanou energii poté vyzařují, čímž atmosféru ohřívají. Tyto oteplující účinky jsou částečně maskovány ochlazujícími účinky vypouštěných aerosolů. Ze zatím dostupných kapitol nedokončené šesté zprávy IPCC vyplývá pozorovaný relativní vzrůst povrchové teploty v letech 2010-2019 proti letům 1850-1900 o 1,09 °C. [23]

V roce 2016 vstoupila v platnost tzv. Pařížská dohoda přijatá smluvními stranami Rámcové úmluvy Organizace spojených národů. Dohoda mimo jiné formuluje cíl udržet nárůst průměrné globální teploty pod 2 °C ve srovnání s obdobím před průmyslovou revolucí a usilovat o to, aby nárůst nepřekročil 1,5 °C. Podle zvláštní zprávy IPCC z roku 2018 by nepřekročení této hranice vyžadovalo snížení emisí skleníkových plynů o polovinu do roku 2030 a dosažení nulových emisí do roku 2050. Letecká doprava, jako kterákoliv jiná lidská činnost, při které se využívá spalování fosilních paliv, přispívá tedy přímo i nepřímo ke globálnímu oteplování Země dlouhodobým působením emisí CO<sub>2</sub> v řádu stovek let a krátkodobým působením v řádu let až desítek let působením



ostatních emisí. Od dob počátků letecké dopravy její objem vykazuje vytrvalý růst až na výjimky v podobě krizí jako byla např. ropná krize či nedávný nástup pandemie Covid19. Právě z důvodu dopadů pandemie Covid19 na leteckou dopravu, byly poněkud sníženy odhady růstu ukazatele RPK letecké dopravy v období do roku 2050, v případě středně optimistického scénáře ICAO uvádí hodnotu 3,6 %, v případě ukazatele FTK 3,5 %. Přestože moderní pohonné jednotky vykazují lepší hodnoty ohledně spotřeby paliva, lze očekávat, že pokud se nepřijmou významná technická opatření ohledně snížení dopadu letecké dopravy na klima, porostou i objemy emisí. V roce 2005 přispělo letectví přibližně 5% dílem k celkovému působení na klima. Globální rozložení letecké dopravy je velmi nerovnoměrné, v roce 2006 bylo 93 % leteckého paliva spáleno na severní polokouli, 26 % globální produkce CO<sub>2</sub> z letectví pochází z USA, 15 % z Evropy a 11 % z východní Asie. [31,35,36]

Zatímco výpočet množství produkovaných emisí z antropogenních činností člověka není příliš obtížné určit na základě dostupných údajů o spotřebě, je vyjádření míry ovlivnění radiační bilance jednotlivých faktorů značně komplikované pro jejich vzájemné ovlivňování se, pro odezvu klimatu a pro nejistoty v některých fyzikálních parametrech. IPCC se opírá o odhady dopadů z mnoha vědeckých studií, které kontinuálně zlepšují své odhady, přesto je u některých faktorů zatím téměř nemožné výpočetně dostatečně spolehlivě simulovat odezvu klimatu na jednotlivý faktor, což je případ i indukované cirrovité oblačnosti. Ke kvantifikování míry vlivu na radiační bilanci soustavy zemský povrch-atmosféra nějakého konkrétního faktoru IPCC používá koncept radiačního působení RF (Radiative Forcing), nově pak koncept efektivního radiačního působení ERF (Effective Radiative Forcing), které IPCC představilo v páté hodnotící zprávě z let 2013-2014, přičemž obě veličiny jsou uváděné v jednotkách W.m<sup>-2</sup> a obě se vyjadřují jako hodnota působení v důsledku změn mezi konkrétním obdobím a obdobím předindustriálním. RF vyjadřuje čistou změnu energetické bilance Země konkrétním radiačním faktorem, v případě kladných hodnot tak faktor přispívá k oteplení a v případě hodnot záporných k ochlazení. Okamžité RF označuje okamžitou změnu rozdílu čistého energetického toku ve směru k povrchu a ve směru od povrchu Země, a vztahujícího se k vrcholu atmosféry nebo tropopauze. Definice RF vylučuje zahrnutí odezvy klimatického systému v energetickém toku na radiační působení faktoru. Předpokládaný vztah přírůstku globální teploty povrchu Země a trvalé RF je dán vztahem (4.1):

$$\Delta T = \lambda \cdot RF, \quad (4.1)$$

kde  $\lambda$  značí parametr klimatické citlivosti RF v páté hodnotící zprávě přejímá definici z předchozích zpráv stratosféricky upraveného RF, tj. okamžité RF se zahrnutím

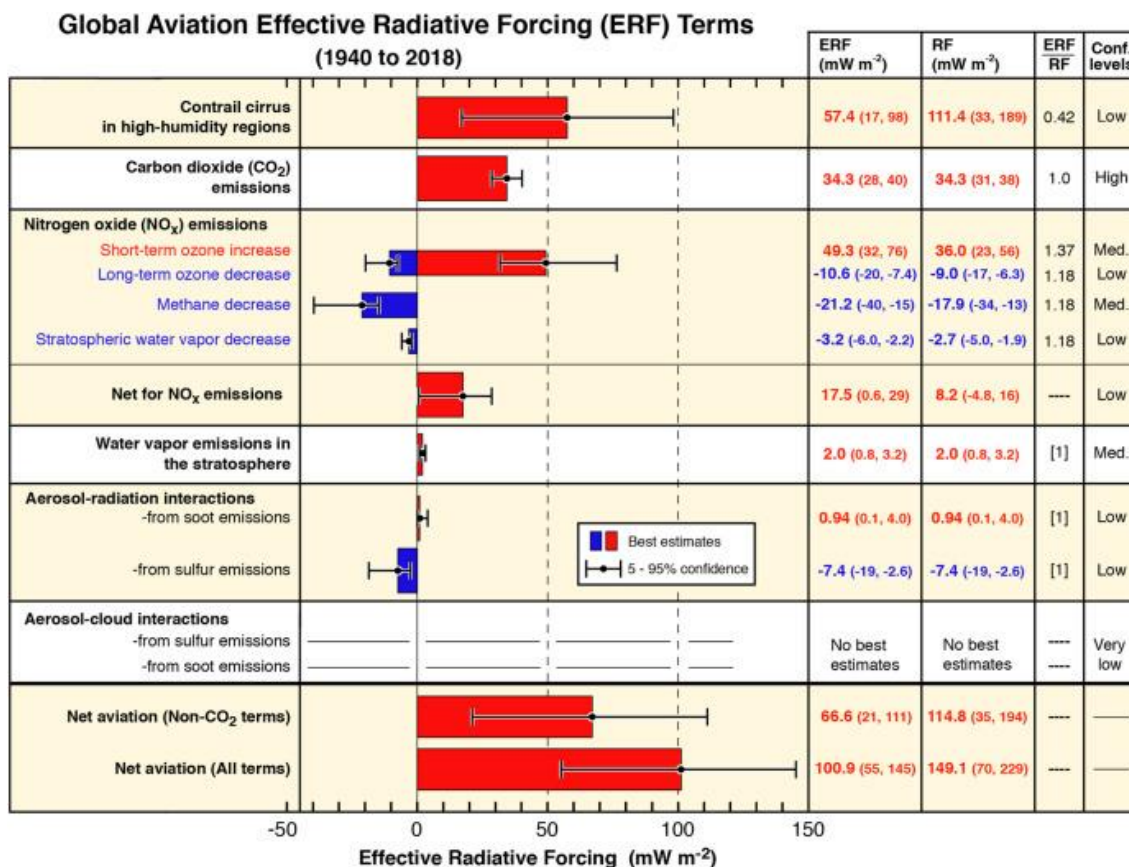


přizpůsobení se změně stratosférické teploty a bez zahrnutí odezvy zemského povrchu a troposféry. ERF vylepšuje koncept RF tím, že zahrnuje i krátkodobé odezvy atmosféry při působení radiačního faktoru. [33]

IPCC v poslední zprávě uvádí celkové ERF z antropogenní činnosti  $2,72 \text{ W.m}^{-2}$  [90% interval spolehlivosti; 1,96 až 3,48], z čehož na letectví připadá podle odhadu ERF uvedeném v Lee et al. 2020  $100,9 \text{ mW.m}^{-2}$  [90% interval spolehlivosti; 55 až 145]. To znamená, že letectví se na celkovém antropogenním ERF podílí asi 3,7 %. [32,34] V kapitole 2.2 bylo popsáno dokonalé spalování uhlovodíkového paliva, jehož produkty jsou oxid uhličitý a voda. Ve skutečnosti však letecký petrolej obsahuje i jiné chemické látky a spalování dokonale neprobíhá, tzn., že při spalování jsou do atmosféry uvolňovány i další chemické produkty, tj. radiační faktory s různými dopady na klima, z nichž nejvýznamnější jsou oxid uhličitý, vodní pára, oxidy dusíku, oxidy síry a saze. V případě, že let probíhá v podmínkách vhodných pro tvorbu kondenzačních stop, je nutné k těmto uvedeným faktorům započítat i faktor samotných dlouhodobých kondenzačních stop, které si udržují lineární tvar, a případně faktor indukované cirrovité oblačnosti pokud se ze stop vyvine, přičemž pro oba faktory se udává kombinovaná hodnota ERF označená jako contrail cirrus. IPCC se ohledně hodnot odhadů jednotlivých ERF z leteckého odvětví aktuálně opírá o nejnovější studii Lee et al. z roku 2020, přehled jednotlivých odhadovaných ERF za období 1940-2018 je vidět na obrázku 5, studie pracuje s následujícími emisními indexy na 1kg paliva:

- $\text{CO}_2$   $3,16 \text{ kg.kg}^{-1}$ ,
- $\text{NO}_x$   $15,4 \text{ g.kg}^{-1}$ ,
- vodní pára  $1,231 \text{ kg.kg}^{-1}$ ,
- saze  $0,03 \text{ g.kg}^{-1}$  při koncentraci  $2 \cdot 10^{14}$  částic na  $\text{m}^2$ ,
- oxidy síry  $1,2 \text{ g.kg}^{-1}$ .





Obrázek 5: Přehled odhadů ERF a RF v období 1940-2018 [34]

Černé úsečky v grafu označují 90% interval spolehlivosti, červená barva znázorňuje kladné působení mající oteplovací účinek, modrá barva záporné působení s ochlazujícím účinkem. Hodnota ERF je získána vynásobením hodnoty RF hodnotou z předposledního sloupce, tam kde je uvedena hodnota [1] není doposud odhad k dispozici, poslední sloupec udává úroveň spolehlivosti dle definic této studie. Je vhodné zdůraznit, že v souladu s jinými studiemi je vliv indukované oblačnosti dle odhadů vyšší než vliv emisí CO<sub>2</sub>. [34]

#### 4.1 Vliv kondenzačních stop

Kondenzační stopa může mít na radiační bilanci vliv přímý a nepřímý. Přímý vliv je založen na faktu, že kondenzační stopa a indukovaná oblačnost je tvořena krystaly ledu stejně jako cirrovitá oblačnost, přičemž koeficient odrazivosti a mohutnost vrstvy určují její optickou tloušťku. Na optické tloušťce, koncentraci a velikosti ledových krystalů, globálním pokrytí stopami nebo indukovanou oblačností a dalších méně významných faktorech závisí jejich výsledné radiační působení, které spočívá v odrazení krátkovlnného slunečního záření, čímž přispívají k ochlazování, ale také v pohlcování dlouhovlnného záření, které přispívá k oteplování. Které radiační působení

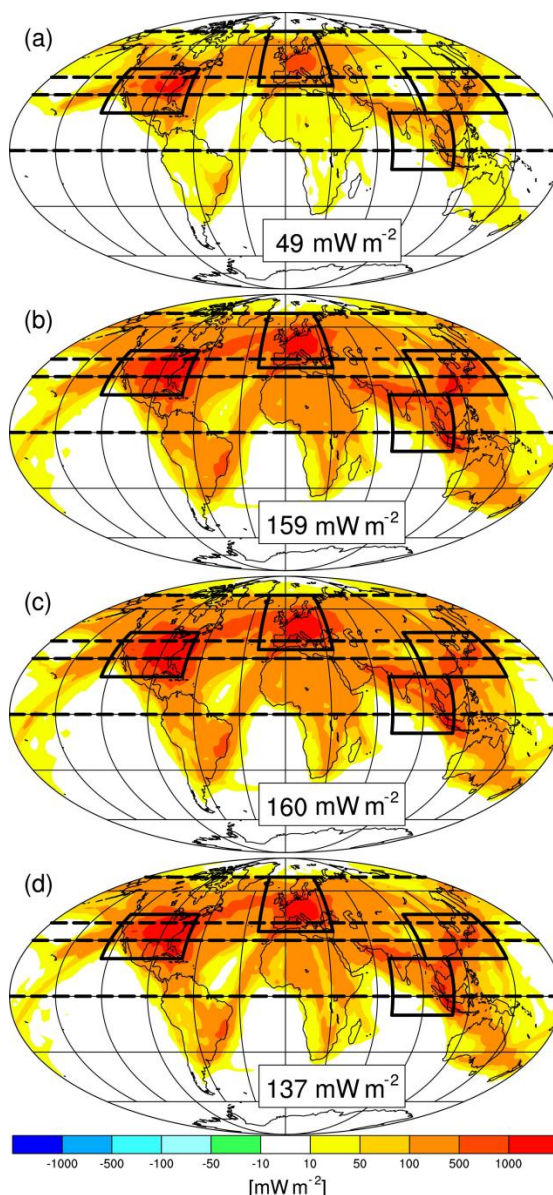


převládá, je dáno uvedenými faktory a prostředím ve kterém a nad kterým se stopa nebo cirrovitá oblačnost vyskytuje. Nad jinak bezoblačnou atmosférou převládá efekt ochlazení, nad oblačnou vrstvou se bude vždy atmosféra oteplovat, v noci je efekt vždy oteplující. Podle dosud známých závěrů publikovaných studií globálně převládá oteplující efekt. Studie uvádí hodnotu ERF pro kondenzační cirrus, což je kombinace perzistentních stop a indukované cirrovité oblačnosti,  $57,4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  [90% interval spolehlivosti; 17 až 98]. To představuje asi 39,9% podíl na celkovém kladném ERF z letecké dopravy. [32,37]

Ohledně působení na klima jsou důležité především dlouhodobé kondenzační stopy a indukovaná cirrovitá oblačnost, které patří k málo prozkoumaným faktorům a tudíž trpí malou spolehlivostí odhadu. Stále je třeba zlepšovat vědecké poznání o tomto faktoru a okolnostech vzniku indukované oblačnosti z dlouhodobých kondenzačních stop. Přestože se klimatické modely stále zlepšují (např. vyvinutím modulu CCMod a jeho použití v klimatickém modelu ECHAM5, který umožňuje simulovat celý životní cyklus od vzniku kondenzační stopy po tvorbu indukované oblačnosti), stále existuje mnoho nejistot v odhadu ERF dlouhodobých kondenzačních stop a indukované cirrovité oblačnosti. [55]

Studie Bock a Burkhardt 2019 se zabývá odhadem RF contrail cirru na rok 2050, pracuje s přibližně stejným globálním rozložením letecké dopravy, jako bylo v roce 2006, mírném posunutí provozu do vyšších hladin a očekávanému nárůstu provozu vycházející z databáze emisí z letecké dopravy vyvinuté Volpe National Transportation Systems Center s využitím nástroje AEDT (Aviation Environmental Design Tool) Amerického federálního úřadu pro letectví. Simulace byly provedeny pomocí emisních scénářů v klimatickém modelu ECHAM5 za použití modulu contrail cirru CCMod. Byly provedeny čtyři simulace s následujícími parametry:

- simulace s letovým provozem z roku 2006 (simulace C2006-T06),
- simulace se zvýšeným provozem pro rok 2050 dle odhadů AEDT (simulace C2006-T50),
- simulace se zvýšeným provozem zohledňující změnu klimatu v roce 2050 (simulace C2020-T50),
- simulace se zvýšeným provozem zohledňující změnu klimatu, změnu v palivové účinnosti a změnu v emisích používáním alternativních paliv (simulace C2050-T50M).



Obrázek 6: Grafická prezentace simulace Bock a Burkhardt 2019 [36]

Výsledky simulace lze vidět na obrázku 6, kde část (a) zobrazuje simulaci C2006-T06, část (b) zobrazuje simulaci C2006-T50, část (c) zobrazuje simulaci C2050-T50, část (d) zobrazuje simulaci C2050-T50M. Ze studie mj. vyplývá, že nárůst letecké dopravy povede k většímu pokrytí kondenzačními cirry, nárůstu optické mohutnosti a zvýšení hodnoty RF. Se čtyřnásobným zvýšením leteckého provozu v roce 2050 se radiální působení zvýší třikrát ze 49  $\text{mW.m}^{-2}$  na 159  $\text{mW.m}^{-2}$  [36].

Nepřímo se kondenzační stopy mohou podílet na radiálním působení tím, že pravděpodobně oddalují tvorbu přírodní oblačnosti nebo zmenšují jejich optickou tloušťku. Přetrvávající kondenzační stopa, resp. vzniklé ledové krystaly, spotřebovávají další vlhkost obsaženou ve vzduchu, která poté není k dispozici pro potenciální vznik



přírodních cirrů. Zmenšená optická tloušťka se projeví na převažujícím záporném působení přírodních cirrů, což by mohlo částečně kompenzovat pozitivní radiační působení kondenzačních stop. [39]

## 4.2 Vliv vodní páry

Pokud není dosaženo při mísení výfukových plynů podmínek kondenzace, je vodní pára pouze vyloučena do atmosféry a přidává se k přirozenému hydrologickému cyklu. Vodní pára je velmi silný skleníkový plyn, v troposféře je jí vyloučena většina a v ní se vyznačuje krátkou průměrnou dobu setrvání. Ve stratosféře je vyloučena menší část celkového množství a setrvává déle, což může vést k její akumulaci. Většina letů v troposféře se ale odehrává v blízkosti tropopauzy a vodní pára přechází do troposféry. Emitovaná vodní pára, kromě toho, že může být zdrojem vlhkosti pro tvorbu kondenzačních stop, se také podílí na řadě chemických reakcí při chladnutí výfukového oblaku. Jako faktor radiační bilance týkající se vodní páry je ve studii Lee et al. 2020 uváděno pouze zvýšení vodní páry ve stratosféře s odhadovaným ERF  $2,0 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  [90% interval spolehlivosti; 0,8 až 3,2], což představuje asi 1,4% podíl na celkovém kladném ERF letecké dopravy. [34,38]

## 4.3 Vliv sazí

Saze zahrnují všechny primární netěkavé produkty obsahující uhlík z nedokonalého spalování uhlovodíkových leteckých pohonných hmot, řadí se mezi aerosoly. Obecně se dělí na částice elementárního uhlíku a organické sloučeniny. V cestovních hladinách se podle měření vyskytuje asi 40-80 % elementárního uhlíku z celkového počtu sazí, v případě vzletu to může být více jak 90% podíl. Naopak ve volnoběžném režimu může tento podíl činit až 10 %. Poměr obou základních frakcí závisí na teplotě spalování paliva. Zdá se, že jsou částice elementárního uhlíku v sazích hydrofobní v důsledku povlaku z  $\text{HNO}_3$  nebo  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a proto mohou sloužit jako kondenzační jádra, frakce organických sloučenin uhlíku v sazích jako kondenzační jádra slouží vždy, pokud to okolní podmínky umožňují. V případě elementárního uhlíku se zdá, že bez organického povlaku není vhodný ani jako ledové jádro. Emise sazí jsou u moderních proudových motorů specifikovány ICAO pomocí tzv. kouřového čísla. Průměrná hodnota emisního indexu se udává  $0,04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  spáleného paliva. Množství emitovaných sazí závisí na typu motoru, nastaveném výkonu a letové hladině. Částice sazí jsou složeny z jednotlivých téměř sférických částic se středním poloměrem 40 až 70 nm, přičemž počet emitovaných částic sazí se udává v rozmezí  $10^6$  až  $10^7$  na  $\text{cm}^3$ . Primární význam tohoto aerosolu spočívá v tom, že v příhodných podmínkách slouží jako kondenzační



nebo ledová jádra ve vznikajících kondenzačních stopách. Sekundární efekt spočívá v působení aerosolu jako kondenzační nebo ledová jádra, ovlivňující nebo aktivující přírodní oblačnost. Několik provedených měření ukazují, že počet ledových částic v čerstvě utvořených kondenzačních stopách se přibližně rovná počtu emitovaných částic sazí. Přímé radiační působení sazí je dáno vysokou schopností pohlcovat sluneční záření, čímž způsobují oteplení atmosféry. Za nepřímé působení se považuje možný podíl na tvorbě oblačnosti bez vzniku kondenzačních stop, protože saze jsou schopné aktivovat kondenzační nebo depoziční procesy za nižších hodnot supersaturace než přirozené aerosoly obsažené ve vzduchu, při kterých by jinak přírodní oblačnost nevznikla. Saze rovněž snižují kontaminaci albedo zasněžených oblastí zemského povrchu. [25,37,38,42]

Studie Lee et al. 2020 hodnotí přímé radiační působení sazí obsažených ve výfukových plynech a uvádí odhad ERF  $0,94 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  [90% interval spolehlivosti; 0,1 až 4,0], což představuje asi 0,7% podíl na celkovém kladném ERF letecké dopravy. [34]

## 5. Zdroje dat o stavu atmosféry a data ze systémů letadel

Pro výzkum kondenzačních stop je nutné znát aktuální parametry vzduchových hmot, ve kterých se konkrétní pozorované kondenzační stopy tvoří. Je možné využít nejbližší aerologickou sondáž, radarová a satelitní měření, případně data z numerických předpovědních modelů a data ze systému AMDAR. Dále je třeba získávat informace o letadlech, která stopu vytvořila a to ze zpráv odpovídáčů sekundárního radaru módu S a zpráv ADS-B, s jejichž pomocí lze kromě letových parametrů získat i některé přímé meteorologické informace nebo je stanovit nepřímo výpočtem.

### 5.1 Aerologické měření

Hlavním zdrojem meteorologických dat ve vysokých nadmořských výškách je aerologické měření. Aerologie je jednou z oblastí meteorologie, která se zabývá pozorováním atmosféry za použitím balónků, radiosond apod. Jsou důležitou komponentou globálního pozorovacího systému organizace WMO pro numerické předpovědní modely. Aerologický systém se skládá z nosiče sondy v podobě vodíkem nebo heliem plněného balonu a ze sondy, zavěšené v dostatečné vzdálenosti pod



balónem, která vysílá naměřené meteorologické parametry i svou polohu do pozemního vyhodnocovacího zařízení.

Základními a nejčastějšími měřenými prvky jsou teplota vzduchu, atmosférický tlak, vlhkost, směr a rychlost větru jsou určovány na základě pohybu sondy prostřednictvím systému GPS. Aerologická sonda je vypouštěna do vzduchu 3krát denně a stoupá až do výšky 35 km. Měření se provádějí denně ve standardizovaných, tzv. synoptických, termínech v 00, 06 a 12 UTC s tím, že časy startů jsou přibližně o 30 min. předsunuty. Navigační systém GPS slouží k určení jeho polohy. V České republice jsou výsledky aerologických měření k dispozici ze dvou stanic - Prahy Libuš a Prostějov. Z obou stanovišť je na webových stránkách ČHMÚ k dispozici výstup z měření za poslední tři dny ve formě několika typů grafu a tabulky vybraných hladin.

ČHMÚ v současnosti používá radiosondy Vaisala RS41 SG a pozemní vyhodnocovací systém Vaisala MW41. RS41 SG vysílá v pásmu 400 MHz frekvenčně modulovaný (GFSK) signál s četností vysílání signálu jednou za sekundu, obsahující v datovém bloku naměřená data z teplotního a vlhkostního senzoru, GPS polohu a další pomocné informace, tento typ sondy nenesení senzor tlaku, tlak je vypočítáván pozemní stanicí.

Sonda je schopna měřit teplotu v rozsahu od +60 °C do -90 °C s přesností 0,1 °C. Vlhkost je měřena odmrázovací metodou dvěma vyhřívanými tenkovrstvými kondenzátorovými čidly měřícími v rozsahu 0 až 100 % RH s přesností na 2 %. Ke zjištění polohy sondy při výstupu je využíván družicový navigační systém GPS (Global Positioning System). Přesnost měření vektoru větru je 0,15 m/s při intervalu měření 10s.

Program METGRAPH společnosti VAISALA vyhodnocuje naměřená a vypočtená data na standardních úrovních tlaku a také určuje významné úrovně teploty, vlhkosti a profilu větru. Tato data jsou zakódována ve formě meteorologické zprávy TEMP a zprávy PILOT. Tyto zprávy se používají nejen pro prediktivní meteorologické účely. V rámci Evropy je zřízeno pouze 26 meteorologických stanic, které provádějí letecká měření. Nejbližší k našim hranicím je německý Kuemmersbruck, Muenchen, Lindenberg, polský Wroclaw, rakouský Linz a Wien. [13]

Aktuální naměřená aerologická data z České republiky za poslední tři dny najdeme na stránkách chmi.cz. Historická data z celého světa lze např. získat na stránkách <https://ruc.noaa.gov/raobs/>.



## 5.2 AMDAR

Systém AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), iniciovaný organizací WMO, je součástí globálního pozorovacího systému, který je definovaný a udržovaný v rámci programu WMO World Weather Watch Programme. Data získaná systémem AMDAR primárně slouží jako doplňková data k aerologickým měřením a měřením z pozemních stanic a jsou asimilována do předpovědních numerických modelů. V evropském prostoru systém AMDAR provozuje EUMETNET ve spolupráci s leteckými společnostmi, program je známý pod názvem E-AMDAR nebo E-ABO (Eumetnet-Aircraft Based Observation), v současnosti je do evropského programu zapojeno 14 leteckých společností. Celosvětově se počet zpráv AMDAR před vypuknutím pandemie onemocnění covid-19 pohyboval do 800 tisíc za den. [30]

Ve srovnání s modelovanými daty počasí nebo měřeními radiosond poskytují data o počasí shromážděná z letadel výrazně vyšší časovou a prostorovou přesnost, zejména v oblastech s hustým leteckým provozem. Data jsou využívána převážně v různých meteorologických aplikacích využívaných u WMO. Jako hlavní senzory pro různá atmosférická měření je využíváno:

- pitot-statické trubice – měření statického tlaku
- teploměr – měření celkové teploty vzduchu
- inerční referenční systém – měření vertikálního a laterálního zrychlení

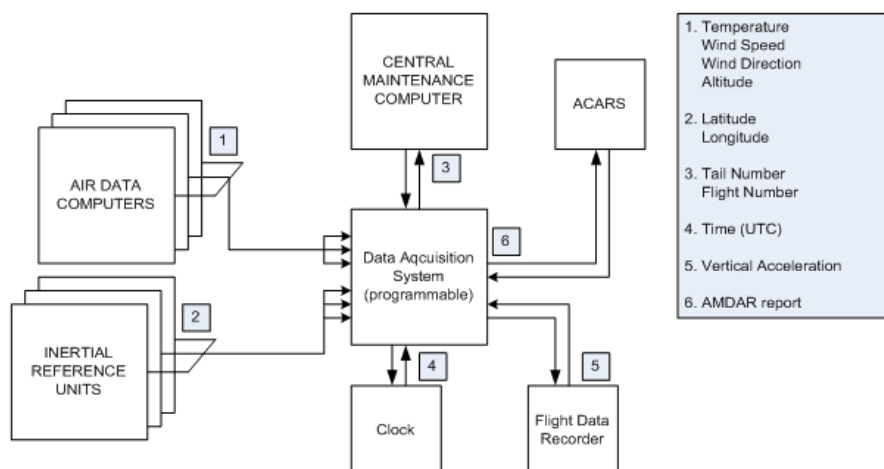
Kromě výše uvedeného jsou měřeny hodnoty relativní vlhkosti, podélný sklon letounu (zejména pro opravu hodnoty statického tlaku), turbulence a námrazy na nosných a řídicích plochách (pokud jsou letadla adekvátně vybavena).

Dopočítávány jsou hodnoty: tlakové výšky, statické teploty vzduchu, aktuální rychlost a směr větru. Výsledná zpráva odesílaná z paluby letadla pozemní stanici pak obsahuje následující položky:

- fáze letu,
- identifikace letadla v programu AMDAR,
- čas měření a zeměpisnou šířku a délku,
- směr a rychlost větru,
- statickou teplotu,
- tlakovou výšku,
- a pokud lze tak i turbulence a námraza.

Menší počet letadel je také vybaven senzorem vlhkosti, v Evropě je takto vybaveno 9 letadel rodiny A320 společnosti Lufthansa, v Severní Americe je senzorem osazeno

139 letadel společností Southwest Airlines a UPS. Na obrázku 6 je znázorněno typické uspořádání palubní části systému AMDAR. [30]



Obrázek 7 Palubní část systému AMDAR [30]

Systém AMDAR autonomně provádí kontrolu kvality dat v reálném čase, a to na třech úrovních. První úroveň kontroly nastává již při měřicí fázi na palubě letounu. Každá nově naměřená hodnota je odečtena od předchozí naměřené hodnoty a absolutní hodnoty rozdílů jsou porovnány s referenční hodnotou. Tato referenční hodnota je pevně dána a určena tak, aby nedocházelo k nesmyslným náhlým odchylkám od převažujících hodnot. Druhá fáze je prováděna při převodu přijaté zprávy AMDAR do formátu GTS. Poslední stupeň kontroly dat v reálném čase je prováděn při přizpůsobení dat pro jejich použití v aplikacích běžících v reálném čase. První dva zmíněné stupně kontroly jsou nezbytné pro zajištění požadované kvality dat následně zpřístupněným pro všeobecné použití. Třetí stupeň kontroly je žádoucí, avšak jeho provedení je závislé na konkrétní aplikaci, kterou může být i archivace. [30]

Data AMDAR mohou doplňovat informace o kondenzačních stopách, bohužel ve většině případů bez hodnot vlhkosti, vzhledem k počtu letadel vybavených tímto senzorem v Evropě. Pro probíhající výzkum nebylo s těmito daty počítáno vzhledem k jejich velmi náročnému získávání a zpracování.





### 5.3 ADS (Automatic Dependent Surveillance)

Vlastní definice pojmu „Automatic Dependent Surveillance“ podle ICAO zní: „A surveillance technique in which aircraft automatically provide, via a data link, data derived from on-board navigation and position-fixing systems, including aircraft identification, fourdimensional position, and additional data as appropriate.“ (zdroj: ICAO Circular 256- AN/152). Definici lze v češtině zjednodušeně interpretovat, že ADS je přehledová technologie, prostřednictvím které letadla poskytují datovým spojením data odvozená z palubních systémů letadel. Pro ADS je stěžejní spolupráce s globálním navigačním satelitním systémem (GNSS) pro určení přesné polohy v prostoru (poloha a výška).

Jednou kategorií je ADS – B (Broadcast). Prostřednictvím satelitní navigace zjištěná poloha je pravidelně „všesměrově“ vysílána, takže letadlo je možné „trackovat“. Polohová informace může být přijímána pozemním přijímačem, který může posloužit jako náhrada za (mnohem nákladnější) sekundární radar. „Automatic“ (automatický) v názvu v tomto případě znamená, že není požadován žádný vstup či akce dalšího subjektu k tomu, aby byla informace vyslána. „Dependent“ (závislý) v tomto případě představuje závislost na datech z palubních navigačních systémů. Ačkoliv jsou tato data velmi snadno dostupná a hojně rozšířená, ve zprávách ADS-B nejsou obsaženy přímé meteorologické informace (některé lze odvodit). Výhodou těchto dat je, že nejsou zpoplatněna. Konkrétní využitou technologií pro přenos v rámci ADS-B je využito „1090 ES“ (extended squitter).

Podstatný pro sběr informací je také fakt, že pro letadla se schválenou MTOW nad 5700 kg nebo cestovní TAS nad 250 kt letící ve FIR Praha podle pravidel IFR, platí povinnost vybavení letadla technologií ADS-B OUT. Výjimky a detaily pro povinné vybavení ve FIR Praha jsou uvedeny v AIP GEN 1.5 a v Prováděcím nařízení komise (EU) č. 1207/2011 ve znění pozdějších nařízení. [43,44]

Povinně přenášené parametry jsou:

- nadmořská výška zvolená na MCP/FCU,
- úhel příčného náklonu,
- traťová úhlová rychlost,
- traťová rychlost,
- magnetický kurz,
- indikovaná rychlost letu nebo Machovo číslo,
- barometrická nebo baroinerciální vertikální rychlost,
- nastavení barometrického tlaku (po odečtení 800 hPa),



- rychlost změny traťového úhlu nebo pravá vzdušná rychlost, pokud není rychlost změny traťového úhlu k dispozici.

Kromě výše uvedených požadavků v evropském vzdušném prostoru platí, že odpovídače IFR letů letadel se schválenou MTOW nad 5700 kg nebo cestovní TAS nad 250 kt musí být schopné ADS-B vysílání prostřednictvím protokolu rozšířeného dotazovacího signálu ES (Extended Squitter), mj. musí být schopné tímto protokolem přenášet:

- ICAO 24bitovou adresu,
- Identifikaci letadla,
- kód módu A,
- číslo verze ADS-B,
- kategorii vysílače ADS-B,
- geodetickou horizontální polohu v souladu s WGS84 a to ve vzduchu i na zemi,
- tlakovou nadmořskou výšku,
- geometrickou výšku v souladu s WGS84,
- a další. [44]

Po získání zpráv módu S a zpráv ADS-B z konkrétního odpovídače letadla tvořícího kondenzační stopu je nutné tyto zprávy dekodovat a z těchto dekodovaných zpráv je pak možné získat letová data (rychlosti, výšky, pozice). Tyto data byla využita pro doplnění informací k naměřeným kondenzačním stopám.

## 5.4 BDS registry

Aerometrická data naměřená letadly za letu poskytují informace, které je možné používat pro meteorologické předpovědní modely. Problémem využití těchto dat je, že letadlo podává informace jen na provedený dotaz ze země pomocí sekundárního radaru. Díky využití vhodných metod lze zprávy sekundárního radaru využít i pasivně. Při využití znalosti přibližné očekávané struktury některých zpráv lze dedukcí odhadnout typ zachycené odpovědi a v určitém procentu zpráv dekodovat obsah sdělení jen pasivním odposlechem frekvence. [14]

Existuje tedy možnost získat meteorologická data z letadla přímo nebo nepřímo. Prvním předpokladem pro získání meteorologických dat je, že palubní senzory jsou schopny měřit meteorologická data. Mezi základní senzory patří Pitot-statická trubice a teplotní sonda (teploměr). Naměřená data lze dále zpracovat a odvodit další prvky, jako je rychlost a směr větru, tlaková nadmořská výška atd. Množství dat, která



můžeme získat použitím sekundárního radaru pracujícího v režimu Mode-S, je mnohem větší a levnější než ve srovnání s daty z aerogických sond. V budoucnu lze očekávat, že se počet meteorologických dat získaných z letadel zvýší s modernizací letadel, která budou lépe vybavena meteorologickými senzory (např. vlhkoměrem).

Meteorologické informace obsažené v registrech BDS mohou být použity ke zkoumání kondenzačních stop. Registr BDS 4,4 obsahuje tzv. Meteorologickou rutinní zprávu letadla, která obsahuje základní meteorologické informace. Hlavní výhodou této metody je, že tento registr již obsahuje přímé informace o větru a teplotě, tlaku, vlhkosti a turbulenci, které jsou získány přímo ze snímačů instalovaných na draku letadla. Nevýhodou této metody je skutečnost, že jen malý počet letadel v krytí radarů, zhruba okolo 3-4 %, reaguje na žádost o výpis z registru BDS 4,4, který je vyhrazen pro meteorologická data. [15]

Registr BDS 4,5 Meteorological Hazard Report (MHR) obsahuje informace o nebezpečných meteorologických jevech (turbulence, námraza, stříh větru, microburst, turbulence v úplavu). Znalost těchto informací je zásadní pro bezpečnost letového provozu, avšak aktuálně v rámci vzdušného prostoru České republiky není registr BDS 4,5 dotazován.[15]

## 5.5 Další zdroje dat

Aktuální meteorologická data z pozemních meteorologických stanic o teplotě, vlhkosti, tlaku, směru a rychlosti větru pro území České republiky a synoptickou situaci lze získat na webových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu. Na stejných stránkách je možno najít i historická data týkající se přechodu front na území ČR (aktuálně do konce února 2023) a typizaci povětrnostních situací na území ČR do konce roku 2022.

Velmi kvalitním zdrojem informací o počasí včetně meteorologických prvků a jevů je webová stránka Německé meteorologické služby ([wetterzentrale.de](http://wetterzentrale.de)), kde lze dohledat i archivní synoptickou situaci. Přehled o aktuálním počasí a podrobnou předpověď počasí a nebezpečných jevů lze získat s vysokou přesností z leteckých meteorologických zpráv (metar), letištních předpovědí (taf), předpovědí pro oblast (gamet), přepověď nebezpečných jevů (sigmet, airmet), synoptické mapy a mapy význačného počasí, které jsou k dispozici např. na webových stránkách Aviation Weather ([avwx.info](http://avwx.info)), ty nabízejí široké spektrum informací nejen o počasí.

ČHMÚ pro své potřeby vytváří tzv. pseudotemp, jedná se o numerický předpovědní model vertikálních hodinových profilů meteorologických veličin v modelových



hladinách. Vstupní veličiny jsou z reálného měření aerologické sondáže, analýza dat probíhá variační metodou porovnáváním předběžné analýzy a reálné hodnoty, je vypočítáván 4x denně pro několik výškových hladin s predikcí na 6 hod dopředu. Pseudotemp je vytvářen pro několik míst v České republice a předpověděné hodnoty tlaku, teploty, teploty rosného bodu, směru a rychlosti větru. Pseudotemp je zatím určen jen pro odborné pracovníky ČHMÚ, není veřejně dostupný. Pro potřeby dizertační práce byly bezplatně získány data pro měřicí stanici Ústí nad Labem pro všechny dny, kdy probíhaly měření kondenzačních stop. Výhodou dat z pseudotempu je, že jsou předpovězena pro oblast, která je blízko místa měření kondenzačních stop, nevýhodou jsou data v časovém rozlišení po hodině a jen omezené tlakové hladiny.

## 5.6 Systém sběru kondenzačních stop na FD ČVUT

Stávající systém pro sběr dat výzkumu kondenzačních stop FD ČVUT se začal připravovat v roce 2014, od října 2015 probíhá sběr dat. Základ systému tvoří sběr kamerových záznamů, sběr dat z přijímačů zpráv módu S, a následné párování zaznamenaných kondenzačních stop s daty z přijímačů. Systém prošel několika změnami především ohledně nastavení kamer, postupné optimalizace programu pro dekódování a zpracování zpráv, zachycenými přijímači zpráv módu S. [8]

Tři kamery jsou umístěné na střeše budovy ČVUT v Děčíně, každá z kamer je fixně nastavená do požadovaného směru a zaznamenává část oblohy. Původní směřování kamer se několikrát změnilo, přičemž poslední známé nastavení kamer respektovalo změnu v používání horního vzdušného prostoru ve FIR Praha v souvislosti s přechodem na koncept volných tratí.

Kamerový systém automaticky nahrává a ukládá videa denně od 04:15 UTC do 16:00 UTC. Uložené záznamy jsou poté filtrovány a analyzovány. Videa pořízená během zatažených dnů se dále nezpracovávají, protože kondenzační stopy vzniklé během těchto dnů nejsou pozorovatelné ve viditelném spektru, protože se tvoří nad přirozenou oblačností, která je zakrývá. Vhodné dny pro pozorování kondenzačních stop jsou dny s jasnou oblohou. Každá objevená kondenzační stopa je sledována společně s časem vzniku, životností kondenzačních stop a případně poznámka, kdy rozptýlení kondenzačních stop nemůže být pozorováno; jinými slovy, když není možné změřit přesnou životnost kondenzačních stop. K tomu dochází, když je kondenzační stopa, obvykle dlouhodobá, překryta přirozenou oblačností resp unášena větrem z obrazu.

Obraz kamer je možné sledovat v reálném čase pomocí vzdáleného přístupu přes webové rozhraní dodávaným výrobcem kamer, nebo je možné záznamy sledovat

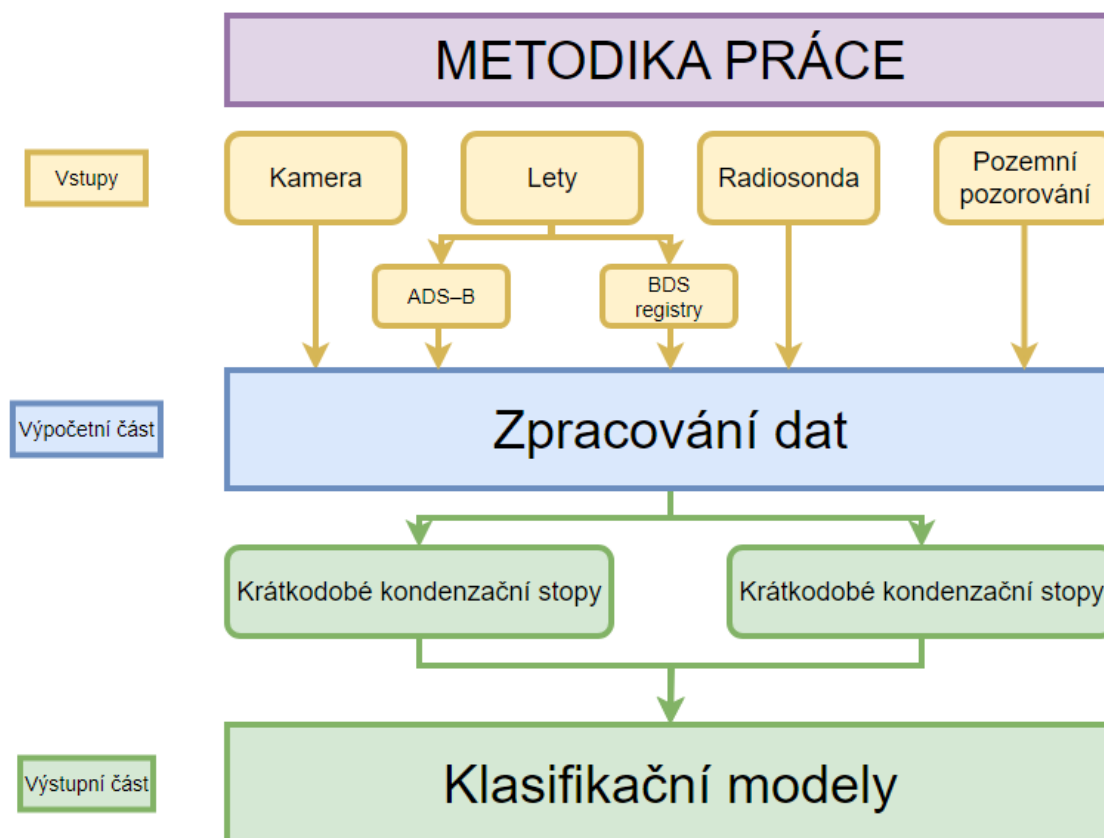


zpětně po stažení ze serveru pomocí vhodného přehrávače. Detekce vzniklých kondenzačních stop probíhá manuálně a je velmi časově náročná, při dobrých meteorologických podmínkách je nutné analyzovat 8 hodin záznamu z každé kamery, nejnáročnější je tento proces u kamery č. 1, která zabírá více letových cest. Výstupem je soubor objevených kondenzačních stop s údaji o čase vzniku stopy (UTC, zobrazovaný v záznamu), číslem kamery a o naměřených vlastnostech kondenzačních stop, zaznamenaný v různých formách dle jednotlivých uživatelů.

ÚLD FD ČVUT provozuje přijímače zpráv odpovídáček sekundárního radaru módu S Radarcape, které jsou rozmístěné v Praze v lokalitách Strahov, Pankrác, Letňany a Albertov. Přijaté zprávy na server jsou ukládány do souborů s příponou .dat po 20min blocích, k souborům lze přistupovat vzdáleným přístupem. V těchto souborech jsou v řádcích uloženy jednotlivé zachycené zprávy, přičemž řádek obsahuje unixový čas přijetí zprávy na server, číslo přijímače, časovou značku UTC přijetí zprávy přijímačem a vlastní zprávu v hexadecimálním tvaru. Přijímače umožňují i stream surových dat, který podporuje formáty odpovědí DF0, DF4, DF5, DF11, DF17, DF18, DF20 a DF21. K dekódování zpráv se používá program *filtrace\_ADSB\_SSR\_v11\_CRC\_v7*, vytvořený v prostředí MATLAB. Po vložení .dat souboru do složky Archiv a spuštění programu jsou zprávy dekódovány, výsledkem je určitý počet souborů s příponou .csv, nacházejících se ve stejné složce Archiv, každý soubor .csv obsahuje chronologicky řazený záznam jednotlivých zpráv patřících letadlu se stejnou ICAO adresou, které se pohybovalo v definovaných prostorech záběru kamer. Soubory .csv obsahují ve sloupcích unixový čas, nedekódovanou zprávu v hexadecimálním tvaru, a dekódované informace z jednotlivých zpráv, jako je poloha, rychlost, výška a také případné informace z registru BDS 44<sub>hex</sub>. Pro usnadnění další práce s těmito soubory je v názvu souboru zahrnuto datum a čas vstupu letadla do sledovaného prostoru a také jeho ICAO adresa. Úpravou výše zmíněného skriptu vznikla varianta programu pro dekódování pouze těch průletů letadel, které vysílaly obsah meteorologického registru BDS 44<sub>hex</sub>.

Poslední fází přípravy dat pro následný výzkum kondenzačních stop je manuální spojení informací objevených kondenzačních stop s dekódovanými informacemi z letadel. To se většinou provádí na základě porovnávání času vzniku zaznamenané kondenzační stopy a času uvedeným v názvu .csv souboru. Poté je otevřen předpokládaný soubor a z dekódovaných informací obsažených v souboru je rozhodnuto o správnosti souboru, nejčastěji na základě ověření času a magnetického směru. Tento proces je rovněž velice časově náročný. Spárované objevené stopy s informacemi z letadel jsou ukládány na server v podobě tabulkových souborů. [46]

Získáním dostatečného počtu dat o kondenzačních stopách a výběr potřebných meteorologických informací z ověřených zdrojů a následném ověření jejich kvality, byla poté pro výzkumnou část práce navržena metodika práce, která je schematicky znázorněna na obrázku 8.



Obrázek 8: Navržená metodika práce

## 6. Kontrola kvality dat

V rámci výzkumu kondenzačních stop bylo dílčím cílem získat pokud možno co nejpřesnější informace o stavu okolního prostředí, ve kterém měřené kondenzační stopy vznikly. Z dosavadního stavu poznání problematiky vzniku a vývoje kondenzačních stop vyplývá, že jedním z nejdůležitějších parametrů pro vývoj kondenzační stopy a případné indukované oblačnosti je teplota a vlhkost vzduchu. Vlhkost vzduchu však není letadly běžně snímána a případné informace z meteorologických BDS registrů nejsou buď dotazovány, nebo na dotazy sekundárních radarů odpovídače většinou nereagují, vlhkost vzduchu nelze ani nepřímou vypočítat z ostatních známých parametrů. Přílišné zlepšení by ohledně vlhkosti nepřineslo ani využití dat z programu AMDAR, neboť v evropském vzdušném



prostoru je senzorem vlhkosti vybaveno pouze 9 letadel společnosti Lufthansa a navíc jejich senzor vlhkosti nebývá při letu v cestovních hladinách aktivní a je používán pouze pro sestavování vertikálních profilů v místech vzletu a přistání. Jedinou možností (ve smyslu běžně dostupných zdrojů informací) je tak ke kondenzačním stopám přiřazovat údaje z aerologické sondáže, která je však prováděna pouze ve standardních synoptických termínech 3krát denně a u které existuje předpoklad snížení výpovědní hodnoty měřených veličin vzhledem k časovému odstupu od měření a vzhledem ke vzdálenosti měřených kondenzačních stop od sondy, protože obsah vodní páry může být v atmosféře časově i prostorově velmi proměnlivý.

## 6.1 Oblast pro přijímání meteorologických zpráv

Vzhledem k tomu, že povrch České republiky je většinou plochý, ve vyšších nadmořských výškách nad územím naší republiky nedochází k výrazným změnám jednotlivých meteorologických prvků s relativně velkou vzdáleností, která zahrnuje celé území České republiky. Proto jsou pro aerologická měření stanoveny pouze dvě stanice, které pokryjí celé území České republiky ve vyšších nadmořských výškách. Ve volné atmosféře neexistuje bezprostřední interakce mezi atmosférou a zemským povrchem. Tyto interakce zahrnují vertikální přenos hybnosti, tepelné energie a vlhkosti, tření proudícího vzduchu se zemským povrchem a specifický denní i roční průběh teplotního zvrstvení atmosféry. Denní tok parametrů teploty a vlhkosti v mezní vrstvě je ovlivněn povrchem. Výška hraniční vrstvy atmosféry se zvyšuje se zvyšující se drsností povrchu, rychlostí větru a zvyšující se nestabilitou teplotního zvrstvení ovzduší. [11]

Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že významné změny v meteorologických prvcích v horní troposféře lze zaznamenat na poměrně velkou vzdálenost v řádu sta kilometrů. Výjimkou je situace, kdy přes naše území přechází atmosférická fronta. Pro účel přijímání meteorologických zpráv z letadel lze rozšířit oblast na celé Čechy, případně je možné získávat též zprávy z letadel letících severně a západně od našich hranic s Německem a Polskem do 100 km od Děčína.

V rámci posouzení kvality získaných dat z Flightradaru24 byly porovnávány přímo naměřené teploty z letadel letících ve stejné letové hladině v oblasti Děčína a Prahy ve dnech, kdy nad naším územím byla zaznamenána tlaková výše. Bylo zjištěno, že teploty nad Děčínem i Prahou se lišily jen o 1°C a v rámci celé oblasti byla průměrná směrodatná odchylka pouze 1,1073. Z toho je patrné, že rozložení teplotního pole v zájmové oblasti je celkem rovnoměrně rozloženo ve vyšších hladinách kromě situací,



kdy přechází atmosférická fronta a pak se nasouvá vzduchová hmota s jinými teplotními a vlhkostními vlastnostmi.

## 6.2 Kvalita dat BDS registrů

Zhodnocení přesnosti meteorologických dat získaných pomocí BDS registrů přímo z letadel bylo hlavním cílem v rámci studentského grantu orientovaného na problematiku dizertační práce: [**Kameníková I. Odpovědi sekundárního radaru jako zdroje dat pro meteorologii.** Interní grant Českého vysokého učení technického v Praze, SGS19/126/OHK2/2T/16].

Prvním dílčím cílem bylo vytvořit postup sběru meteorologických dat z BDS registrů 4,4 a 4,5. Tento cíl byl naplněn. V rámci projektu byl vytvořen nástroj v Matlabu pro dekódování registrů BDS 4,4 a 4,5. Správná funkčnost algoritmu byla otestována na vzorku dat z ADS-B přijímačů provozovaných laboratoří ATM na Ústavu letecké dopravy ČVUT v Praze, Fakultě dopravní. Vyhodnocení úspěšnosti algoritmu bylo provedeno porovnáním ekvivalentních dat z reálného provozu poskytnutých ŘLP ČR s.p. Byla vytvořena databáze záznamů za 74 kalendářních dnů. Tento soubor obsahoval celkem 4 472 765 kódovaných zpráv, z nichž pouze 82 468 obsahovalo zprávy registru BDS 4,4. Všechny tyto meteo zprávy obsahovaly informaci o naměřené teplotě, jen některé údaj o směru a rychlosti větru, ani jedna zpráva neobsahovala informaci o vlhkosti. Byla identifikována pouze 4 letadla, která vysílala registr BDS 4,4 a zároveň ADS-B. Nebylo zachyceno žádné letadlo, které by disponovalo vlhkostním čidlem. Oproti původnímu předpokladu se nepodařilo získat žádná data z registru BDS 4,5, jelikož v Evropě zatím žádné letadlo tímto registrem nedisponuje. Výše uvedené přispělo ke skutečnosti, že se nepodařilo shromáždit dostatečně velký soubor meteorologických dat z BDS registrů. Byl stanoven postup pro zhodnocení přesnosti meteorologických dat. Vzhledem k malému množství získaných meteorologických zpráv z registru BDS 4,4 nebylo možné zanalyzovat jejich přesnost.

Řešení jakožto i dosažení dílčích cílů bylo pravidelně konzultováno s Českým hydrometeorologickým ústavem a s experty na oblast letecké meteorologie z Řízení letového provozu, s. p. Tímto se zajistila maximální relevantnost a vhodnost řešení projektu pro případnou budoucí aplikaci výsledků do praxe. Po získání většího souboru meteorologických zpráv z registru BDS 4,4 a ověření jejich dostatečné přesnosti, bude navrženo jejich využití v předpovědních modelech Českého hydrometeorologického ústavu. ČHMÚ by tato data získaná z letadel mohl částečně využívat místo finančně nákladných radiosondážních měření. Problematika využití ADS-B zpráv pro leteckou meteorologii má potenciál nahradit některé současné meteorologické měření a může



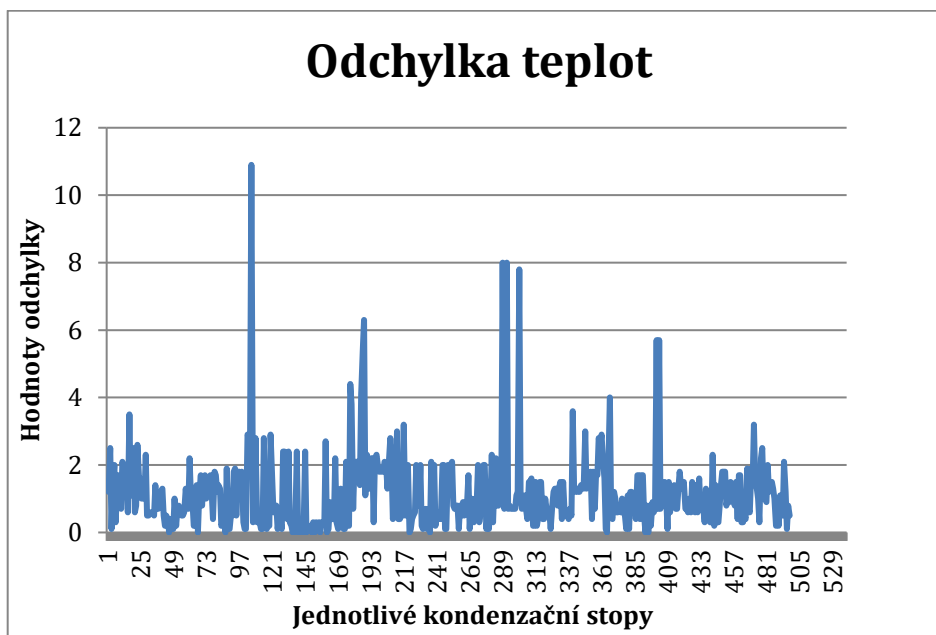


umožnit detekci některých nebezpečných meteorologických jevů pro letectví. Aerometrická data naměřená letadly za letu poskytují informace, které by bylo možné používat pro meteorologické předpovědní modely.

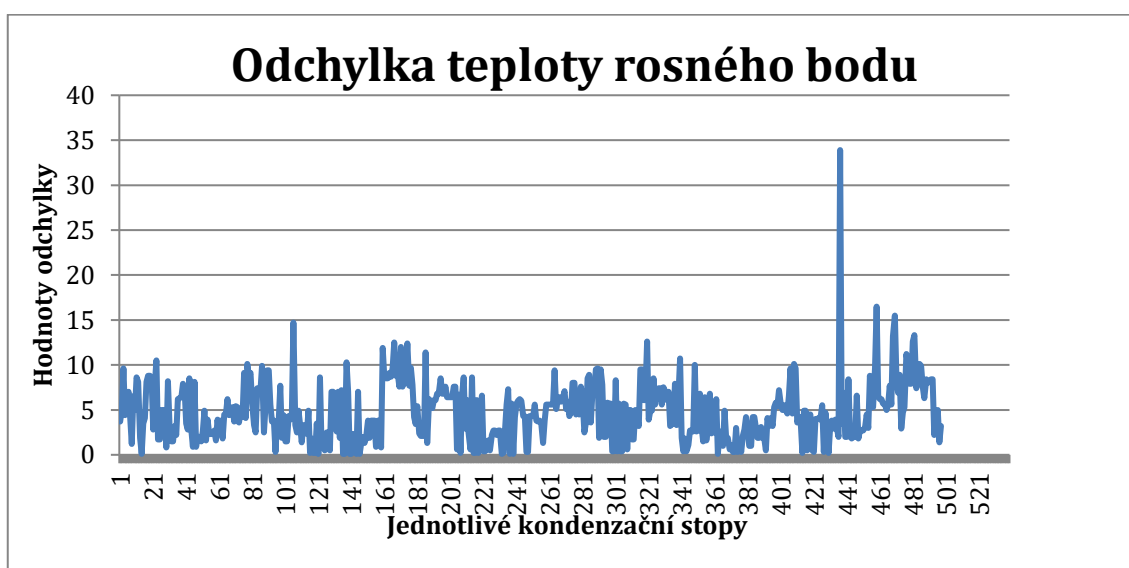
Pro ověření možnosti získání kvalitních dat o vlhkosti přímo měřených letadly pro aktuální výzkum byla navázána spolupráce s ŘLP. Byla poskytnuta data MRAR z BDS registrů 4,4, která byla získána dotazováním radarů ŘLP každou druhou otočku. Soubor obsahoval data za 6 měsíců (11/2022 - 04/2023), skládal se z 26 780 souborů s 10 minutovými přírůstků, kde každý obsahoval přes 33 000 záznamů. Na tomto velkém souboru dat byl navržen postup pro získání dat o vlhkosti. Bohužel se podařilo získat jen ojedinělých 15 záznamů, a pokaždé od jiného letadla. Tedy letadlo vyslalo jen jednou údaj o vlhkosti během celého letu. Tato nízká četnost získaných údajů o vlhkosti není použitelná pro další výzkum.

### 6.3 Kvalita dat z pseudotempu

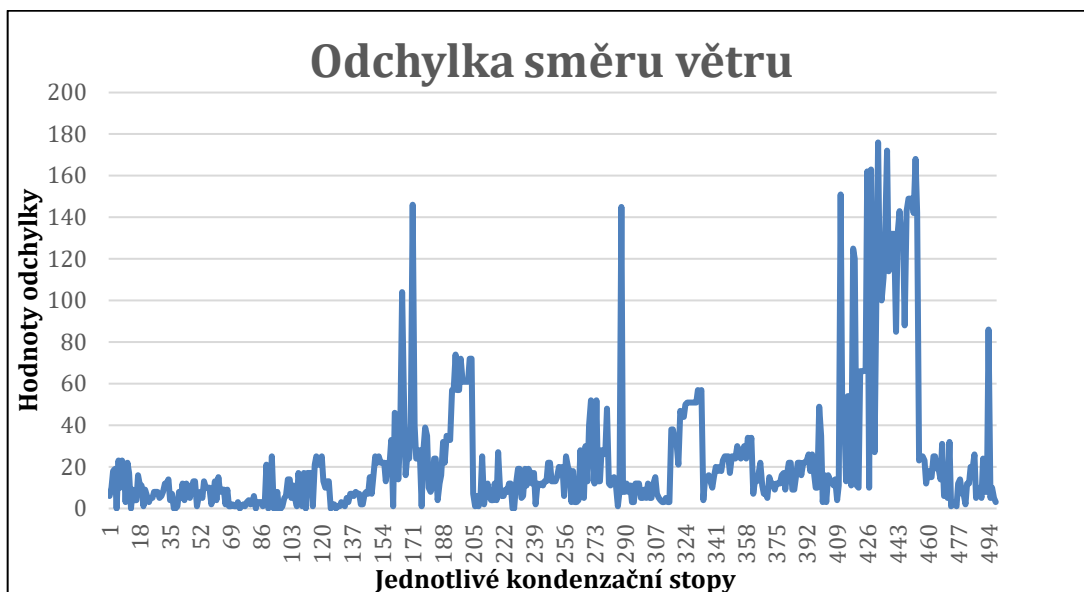
Soubor dat pseudotempu obsahuje meteorologická data, ze kterých lze získat údaje o vlhkosti, proto by se mohla použít pro výzkum. Vzorek těchto dat je uveden v příloze. Jelikož se jedná o data předpovězená, bylo nutné zkontrolovat jejich přesnost. Porovnání proběhlo se srovnatelnými daty z reálné radiosondáže. Jelikož v pseudotempu jsou předpovězené hodnoty po každou celou hodinu denně, vybírala se data, která se časově nejvíce blížila času naměření kondenzační stopy a k porovnání se použila data z nejvíce odpovídající tlakové hladiny. Zjišťovala se hodnota odchylky předpovídané veličiny z pseudotempu od skutečných naměřených veličin z aerosondáže. Výsledky analýzy jsou na obrázcích 9, 10, 11, 12.



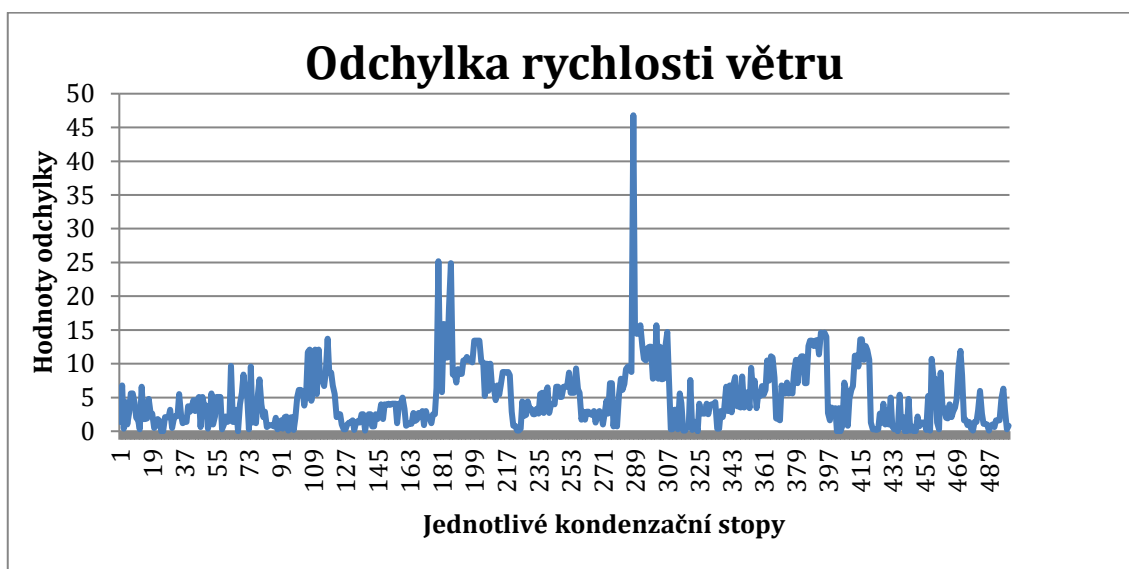
Obrázek 9: Odchylka předpovězené teploty od naměřené teploty



Obrázek 10: Odchylka předpovězené teploty rosného bodu od naměřené teploty rosného bodu



Obrázek 11: Odchylka předpovězeného směru větru od naměřeného směru větru



Obrázek 12: Odchylka předpovězené rychlosti větru od naměřené rychlosti větru

Ze všech grafů je patrné, že rozdíly skutečných hodnot a predikovaných hodnot jsou velmi rozkolísané. Nejlepších výsledků bylo změřeno u teploty, kde rozdíly ve většině případů byly do 2 °C, větší odchylky v průměrném rozmezí 5 -10 °C byly zjištěny u teploty rosného bodu a největší rozkolísání bylo vypočteno u směru větru, kde maximální odchylka byla téměř 180°, tzn. předpovězený vítr měl přesně opačný směr než jeho skutečná hodnota. Směrodatná odchylka u teploty je rovna 1,6, pro teplotu rosného bodu 5,8, pro směr větru 40,9 a u rychlosti větru 6,6. Výše zmíněné dokazuje,



že předpovězené hodnoty z pseudotempu nejsou vhodné pro použití vlhkosti ve výzkumu.

Porovnáním obou datových souborů a zjištěním průměrných odchylek se jeví jako nejlepší data z aerologických sondáží Praha – Libuš. Jde o data velmi detailní a přesná, která jsou opravdu naměřená a s dobrým výškovým rozlišením. Jejich nevýhodou je malá četnost měření jen 3x za den a vzdálenost od místa měření (v některých případech může být odlišné proudění než v blízkosti Děčína).

## 7 Zpracování dat a jejich statistické vyhodnocení

Pro potřeby dizertační práce byla využita nashromážděná data o kondenzačních stopách, jejichž pozorování probíhá pomocí kamerového systému, který monitoruje letové tratě vedoucí kolem Děčína. K dispozici jsou letová data obsahující informace o letadlech, které vytvořily konkrétní kondenzační stopu. Výsledkem jsou soubory ve formátu csv. Soubor pro každé letadlo obsahuje tyto údaje: zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku, výšku, kurz, traťovou rychlost, pravou vzdušnou rychlost, Machovo číslo.

Z párování dat z kamer a ADS-B byl získán soubor dat pro hodnocení výskytu kondenzačních stop, který obsahuje videozáznamy a zprávy v režimu S z 85 dnů. Celkem bylo 1864 kondenzačních tras pozorováno v těchto náhodně vybraných dnech: 2. 9. 2018–12. 9. 2018, 14. 9. 2018–16. 9. 2018, 19. 9. 2018–22. 9. 2018, 25. 9. 2018–30. 9. 2018, 11. 10. 2018–14. 10. 2018, 18. 10. 2018, 20. 10. 2018–21. 10. 2018, 4. 2. 2019–5. 2. 2019, 19. 3. 2019–23. 3. 2019, 25. 3. 2019–26. 3. 2019, 6. 11. 2019–7. 11. 2019, 14. 11. 2019, 16. 11. 2019, 29. 11. 2019, 4. 12. 2019, 6. 12. 2019, 10. 12. 2019–11. 12. 2019, 1. 1. 2020–2. 1. 2020, 5. 1. 2020, 12. 1. 2020, 16. 1. 2020–17. 1. 2020, 21. 1. 2020, 30. 1. 2020–31. 1. 2020, 23. 3. 2020–24. 3. 2020, 1. 7. 2020, 4. 7. 2020, 7. 7. 2020, 13. 7. 2020–14. 7. 2020, 19. 7. 2020, 21. 7. 2020 a 27. 7. 2020, 14. 1. 2022, 23. 3. 2022, 30. 8. 2022, 2. 9. 2022, 5. 9. 2022, 12. 9. 2022, 22. 9. 2022, 23. 9. 2022, 17. 10. 2022, 31. 10. 2022, 12. 11. 2022, 25. 11. 2022 a 9. 2. 2023,

Z celkového počtu 1864 kondenzačních stop u 1649 známe jejich přesnou životnost, protože byly naměřeny až do jejich rozptýlení. U zbývajících 215 nebyla indikována doba zániku kondenzační stopy, a to buď kondenzační čára byla zakryta oblakem nebo proto, že se odklonila od zorného kužele kamery pomocí větru.

Pro zajištění výzkumu byla získána vhodná meteorologická data, která byla ověřena z hlediska kvality, dále probíhal sběr dalších meteorologických informací o meteorologických zprávách, synoptických situacích, přechodu atmosférických front a



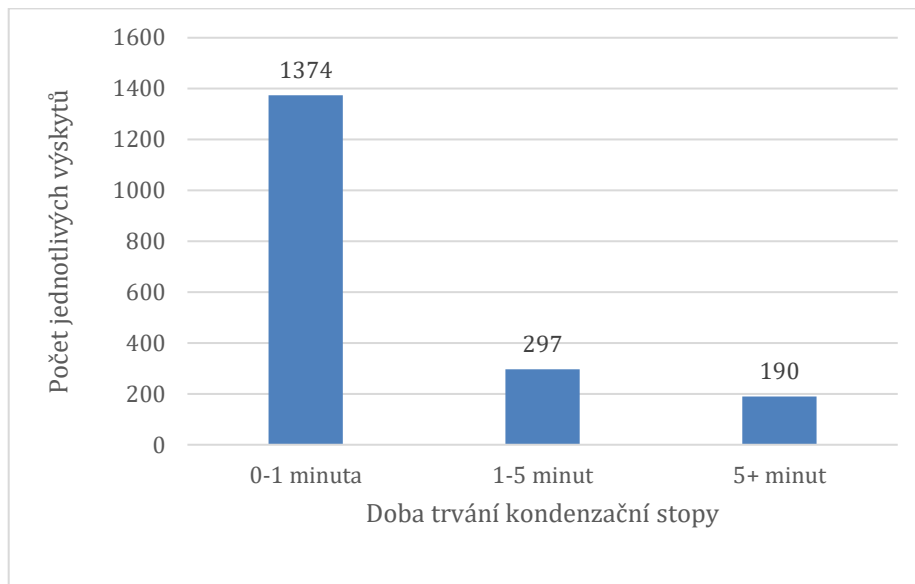
pozemní pozorování kondenzačních stop v okolí Prahy. Jako základní zdroj meteorologických dat bylo použito aerologické měření, které poskytuje základní meteorologické prvky i ve výškách v blízkosti tropopauzy a jedná se o nejpřesnější zdroj přímo měřených meteorologických dat. Z ostatních dříve diskutovaných zdrojů meteorologických informací nebyla data dostatečně přesná pro výzkum a hlavně neobsahovala v dostatečném počtu vlhkostní data.

Byla vytvořena matice meteorologických dat z aerologické sondáže ČHMÚ, která byla získána na webových stránkách <https://ruc.noaa.gov/raobs/>, kde jsou k dispozici neřaděná data sondážních měření od roku 2018. V této matici jsou v jednotlivých řádcích uloženy záznamy přijatých hodnot meteorologických prvků ze sondážního měření ČHMÚ, vztažené ke geopotenciální nadmořské výšce. Pro potřeby této práce je možné geopotenciální výšku považovat za výšku geometrickou, rozdíl mezi oběma výškami na území ČR činí ve výšce 10 km asi 10 m. Ve sloupcích matice jsou uloženy příslušné hodnoty tlaku, teploty, teploty rosného bodu, směru a rychlosti větru pro jednotlivé udané výšky. V rámci vytvoření klasifikačních modelů pro určení závislosti kondenzačních stop, byly vypočteny v programu Scilab pro každý záznam stopy další meteorologické veličiny a to relativní vlhkost k vodě, relativní vlhkost k ledu dle vzorce (2.7), teplotu ledového bodu dle vzorce (2.9).

Ve výstupní matici kondenzačních stop jsou do jednotlivých řádků zaznamenávány objevené jednotlivé kondenzační stopy v kamerovém záznamu. Základní údaje o kondenzační stopě jsou čas zaznamenání UTC (zobrazovaný v záznamu) a doba trvání kondenzační stopy. Na základě zaznamenaného času vzniku stopy mohou být při analýze kamerových záznamů nabídnuty obsluze dostupné ICAO adresy spolu s údajem o vypočítaném směru pohybu v obraze, který lze na základě znalosti směřování kamery, vypočítaného prostoru pro filtraci zpráv módu S a zpráv módu S početně odhadnout. V případě, kdy se v prostoru pohybuje více letadel po stejné trajektorii, je možné rozhodovat na základě času vstupu do prostoru. Záznam ve výstupní matici lze po výběru vhodné ICAO adresy automaticky doplnit o vybrané údaje z časově nejbližších zpráv módu S s příslušnou ICAO adresou a podle tlaku spočítaného dle ISA dle vzorce (3.1) pro barometricky udanou výšku ze zpráv módu S je možné automaticky doplnit meteorologické prvky z matice sondážního měření.

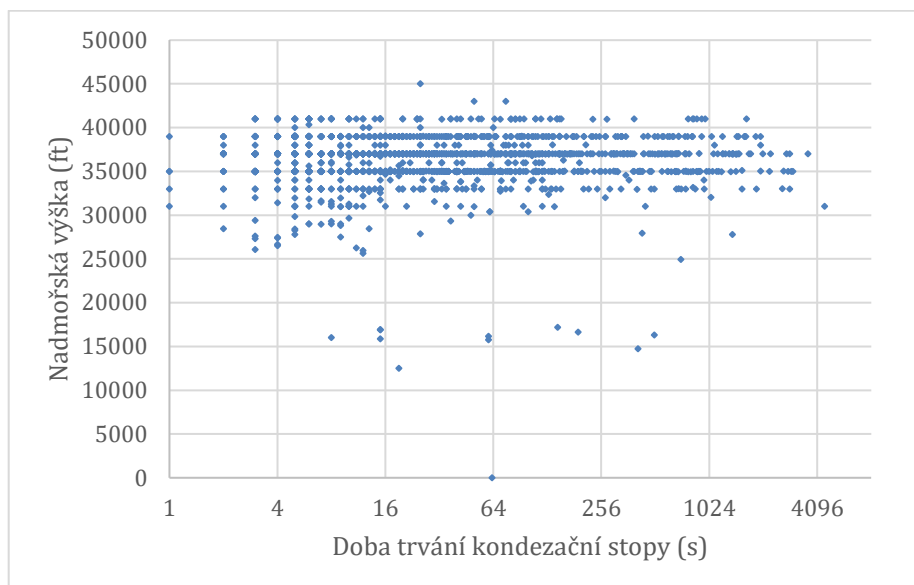
Získaná analyzovaná data o kondenzačních stopách a meteorologická data byla ukládána do excelovské tabulky, následně proběhla filtrace pro různé vstupní podmínky a bylo provedeno základní a pokročilé statistické zpracování. Cílem je hledání závislostí mezi parametry kondenzačních stop a meteorologickými veličinami.

Ze základního statistického zpracování vyplývá, že většina naměřených kondenzačních stop byla krátkodobá. Na obrázku 13 je znázorněno ve sloupcovém grafu rozdělení výskytu kondenzačních stop dle jejich doby trvání. Počet krátkodobých kondenzačních stop se životností do 1 minuty je 1374 (74 % z celkového počtu stop), 297 kondenzačních stop do 5 minut a 190 kondenzačních stop nad 5 minut.



Obrázek 13: Výskyt kondenzačních stop dle doby trvání

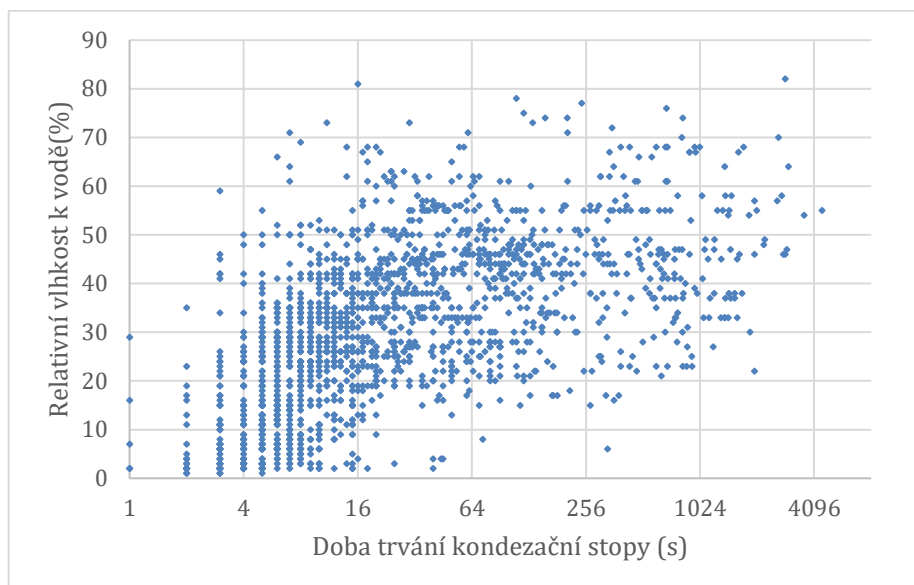
Z pohledu letových hladin se většina pozorovaných kondenzačních stop (95 %) vytvořila v hladinách mezi FL330 až FL410. Letová hladina byla přiřazena každé naměřené kondenzační stopě podle dekódované tlakové výšky převzaté z dat ADS-B. Bylo zjištěno, že na FL 370 se vytvořilo 694 kondenzačních čar, to je 37 % ze všech naměřených kondenzačních stop. Na obrázku 14 je vidět v bodovém grafu rozložení doby trvání jednotlivých kondenzačních stop v závislosti na hladině.



Obrázek 14: Doba trvání kondenzační stopy v závislosti na nadmořské výšce

Průměrná hladina pro krátkodobé kondenzační stopy (do 1 minuty) byla 36 257 stop. Průměrná hladina všech pozorovaných kondenzačních stop s životností 1 – 5 minut byla 36 970 stop a pro kondenzační stopy s dobou trvání nad 5 minut byla průměrná hladina 36 126 stop. Celková průměrná hladina výskytu kondenzačních stop byla 36 346 stop, což odpovídá nejčastěji používaným letovým hladinám.

Pro vyjádření závislosti životnosti kondenzačních stop na vlhkosti byla zvolena relativní vlhkost k vodě. Její hodnota je důležitá hlavně pro vznik kondenzační stopy. Byla vypočtena doba trvání jednotlivých kondenzačních stop v závislosti na relativní vlhkosti k vodě a znázorněna jako bodový graf na obrázku 15. V grafu je na horizontální ose x znázorněna doba trvání kondenzační stopy, pro větší názornost je v logaritmické škále, na vertikální ose y je relativní vlhkost vzhledem k vodě v prostředí, v němž se kondenzační stopy vytvořily. Z grafu je patrné, že krátkodobé kondenzační stopy (do 1 minuty) se tvořily v celém rozsahu relativní vlhkosti vzhledem k vodě dokonce i nulové. V tomto případě musí být vlhkost dodaná vodními parami z leteckých motorů a teplota musí být velmi nízká. Dlouhodobé kondenzační stopy se tvořily převážně při relativních vlhkostech vzhledem k vodě nad 20 %.



Obrázek 15: Doba trvání kondezační stopy v závislosti na relativní vlhkosti vzhledem k vodě

## 7.1 Ověření Schmidt-Applemanova kritéria

Dalším krokem bude ověření spojitosti meteorologických podmínek s Schmidt-Applemanovým kritériem (SAC). Oblast v blízkosti tropopauzy se vyznačuje nízkou teplotou a vysokou vlhkostí, což jsou podmínky vhodné pro vznik kondezačních stop. Pro její zjištění vypočítáme dvě hraniční křivky, které udávají mez nasycení vzduchu vodní párou vzhledem k vodě (křivka kondezační) a vzhledem k ledu (křivka sublimační).

Pro výpočet těchto křivek budou využita data z radiosondážních měření a použit vzorec (7.1) [20].

Tlak nasycení vodní páry vzhledem k vodě  $e_w(T)$  je potom možné určit jako

$$e_w(T) = 100^{\frac{a_1}{T} + a_2 + a_3 T + a_4 T^2 \times 10^{-5} + a_5 \ln(T)}, \quad (7.1)$$

Kde  $T$  je teplota [°C] a konstanty  $a_{1...5}$  nabývají následující hodnoty:  $a_1 = -6096.93$ ,  $a_2 = 16.63$ ,  $a_3 = -0.027$ ,  $a_4 = 1.67$ ,  $a_5 = 2.43$ . Tlak nasycení vodní páry vzhledem k ledu  $e_{ice}(T)$  je pak možné vyjádřit podobně, jako v případě rovnice (2) avšak konstanty  $a_{1...5}$  nabývají hodnoty:  $a_1 = -6024.52$ ,  $a_2 = 24.72$ ,  $a_3 = 0.0106$ ,  $a_4 = -1.31$ ,  $a_5 = -0.49$ . Tyto výpočty lze použít pro teploty do  $-100$  °C.





Podmínkou pro vznik kondenzační stopy dle Schmidt-Applemanova kritéria je nižší teplota vzduchu v atmosféře než prahová (kritická) teplota  $T_T$ . Kritická teplota pro tvorbu kondenzačních stop je závislá na tlaku okolní atmosféry, relativní vlhkosti a faktorech letadla (motor, provozní podmínky, palivo), její hodnoty lze získat pro každou vrstvu z radiosondážních dat a sestavit graf kritické teploty jako funkce výšky (tlaku) a relativní vlhkosti vzduchu [20]. Tímto lze získat potenciální oblast pro tvorbu kondenzačních stop.

Pro nalezení této konkrétní hodnoty prahové teploty je nutné nejprve vypočítat teplotu  $T_F$ . Tato teplota je definována jako teplota v bodě F (viz obrázek 2). Bod F je společným bodem křivky kondenzace a tečnou, kterou představuje křivka mísení (přímka) se sklonem  $G$  a koncovým bodem  $T$  (bod odpovídající prahové teplotě  $T_T$ ). Teplotu  $T_F$  v bodě dotyku  $F$  lze spočítat dle vztahu [7]:

$$T_F = -44,46 + 9,43 \cdot \ln(G - 0,053) + 0,72 \cdot [\ln(G - 0,053)]^2, \quad (7.2)$$

kde  $G$  je sklon křivky mísení. Vztah je platný pro teploty  $T_F$  v rozmezí od  $-10^\circ\text{C}$  do  $-60^\circ\text{C}$ . Pro výpočet prahové teploty pro vznik kondenzační stopy platí vzorec (7.3) [7]:

$$T_T = T_F - \frac{e_w(T_F) - U_w e_w(T_T)}{G}, \quad (7.3)$$

kde  $T_F$  je teplota, která se spočítá podle vztahu (7.2),  $e_w$  je parciální tlak nasycené vodní páry vzhledem k vodě (při teplotě  $T_F$  a  $T_T$ ),  $U_w$  je relativní vlhkost vzduchu vzhledem k vodě a  $G$  je sklon křivky mísení. Sklon křivky mísení je obecně definován jako poměr změny parciálního tlaku vodní páry  $\Delta e$  ke změně teploty  $\Delta T$ . Výpočet lze provést podle vzorce (7.4) [7]:

$$G = \frac{EI_{H_2O} p c_p}{\epsilon Q (1 - \eta)} \quad (7.4)$$

kde,  $p$  je tlak vzduchu v atmosféře ( $[p] = \text{Pa}$ ),  $\epsilon$  je bezrozměrná konstanta udávající poměr mezi molárními hmotnostmi vodní páry a suchého vzduchu ( $\epsilon = 0.622$ ),  $c_p$  je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku ( $c_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),  $EI_{H_2O}$  index emise vodní páry, který vyjadřuje množství vyprodukované vodní páry na jeden kilogram spáleného paliva ( $[EI_{H_2O}] = \text{kg/kg}$ ),  $Q$  spalné teplo ( $[Q] = \text{MJkg}^{-1}$ ) a celková účinnost  $\eta$ .

Prahová teplota je unikátní pro každý pár parciálních tlaků vodní páry a sklonu křivky mísení. Problém je, že tlak nasycené vodní páry nad vodou v teplotě  $T_T$  je funkcí



prahové teploty. Prahová teplota daná rovnicí (7.3) musí být počítána opakovaně. Toho je docílenou Newton metodou. [50, 54]

Ze vzorců vyplývá, že prahová teplota, která umožňuje proces vývoje kondenzačních stop závisí na celkové účinnosti motoru, která je také závislá na spotřebě paliva a na stavu atmosféry z hlediska relativní vlhkosti a okolního tlaku. Všechny ostatní veličiny lze považovat za konstantní. Okolní tlak a celková účinnost může být určena na základě údajů přenášených letadlem. Teplotu okolního vzduchu, která je nezbytná pro srovnání s prahovou teplotou, lze snadno vypočítat také. Jedinou neznámou, ale také nutnou veličinou je relativní vlhkost.

Pro základní stanovení podmínek vzniku kondenzačních stop dle výstupu z radiosondáže byly pro výpočty zvoleny parametry letadla, jehož motory spalují kerosin, který má index emise vodní páry 1.223 a spalné teplo  $43.2 \text{ MJkg}^{-1}$ , pracují s celkovou účinností 0.3.

Pro výpočet kritické teploty byl vytvořen program v Scilabu a následně bylo provedeno zhodnocení kolik naměřených kondenzačních stop vyhovovalo Schmidt-Applemanovu kritériu. Pro každý záznam stopy byla vypočtena kritická teplota a porovnána s okolní teplotou. SAC splnilo 1672 z 1864 stop. Nesplnění tohoto kritéria u zbývajících stop může mít několik důvodů. Oblast pozorování kondenzačních stop není na stejném místě, kde probíhá aerologické měření. Aktuální vertikální profil atmosféry v okolí Děčína nemusí odpovídat výsledkům z aerosondáže. Celková účinnost u letadel může být jiná než pro výpočet navržené hodnoty celkové účinnosti motoru.

Konkrétně byly prověřeny tři záznamy stop, které odporovaly SAC. Jednalo o kondenzační stopu vytvořenou dne 17. 10. 2022 v 12.37 UTC. Podle registrační značky bylo dohledáno příslušné letadlo Boeing 777F. Hodnota prahové teploty byla o  $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$  nižší než změřená teplota prostředí, stopa by se tedy neměla utvořit, přesto byla pozorována slabá kondenzační stopa trvající 33 s. Dále dne 22. 9. 2022 byly pozorovány v časech 12.34 a 12. 36 UTC dvě kondenzační stopy trvající 4 s a 5 s, které by se opět v daných podmínkách neměly vytvořit, rozdíl v teplotách byl opět  $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , jednalo se o letadla Airbus A350. Jedním z možných vysvětlení by mohlo být použití ve výpočtu univerzální hodnoty celkové účinnosti oproti skutečné hodnotě. Nicméně bylo spočítáno, že aby se hodnota kritické teploty posunula při daných podmínkách nad teplotu prostředí, musela by mít celková účinnost hodnotu asi 0,5. Této účinnosti je však možné u moderních vysokoobtokových motorů dosáhnout [27].



## 7.2 Závislost kondenzačních stop na meteorologické situaci

Analýza pozorování záznamů kondenzačních stop z kamer a jejich závislost na zjištěné meteorologické situaci, typu počasí probíhala po dobu jednoho roku, aby byla zajištěna komplexní roční statistika výskytu kondenzačních stop. Za každý měsíc bylo vybráno několik dní. Jako alternativní zdroj dat bylo využito denní vizuální pozemní pozorování kondenzačních stop na obloze na území města Prahy a v jeho okolí v časech blízkých v době měření aerologické sondy. Expertně bylo odhadnuto rozlišení krátkodobých a dlouhodobých stop dle 1 minuty a současně byla pozorována oblačnost vysokého patra, jelikož ta je velmi přesným indikátorem vyšší relativní vlhkosti ve výškách blízkosti tropopauzy. Cílem vizuálního pozorování je ověření podmínek vzniku a vlastností kondenzačních stop na základě pozorování jejich aktuálního výskytu.

Porovnání kondenzačních stop, které byly zaznamenány sledováním pomocí kamer, a výsledek vizuálního pozorování ve stejných dnech, se shodovalo v 82 %, v 18 % nebyly v okolí Prahy zpozorovány kondenzační stopy, za to bylo rozlišeno více dlouhodobých kondenzačních stop (jejich počet byl 585) než v okolí Děčína. Rozdíl je dán odlišnou polohou pozorování a zjištěným výskytem atmosférické fronty.

Tabulka 1: Počet kondenzačních stop a jejich doba trvání v závislosti na ročním období

Kondenzační stopy						
ROČNÍ OBDOBÍ	počet pod 1 min	počet nad 1 min	podíl pod 1 min (%)	podíl nad 1 min (%)	MEAN doby trvání (s)	MAX doby trvání (s)
JARO	203	99	67,22 %	32,78 %	32	1980
LÉTO	25	3	89,29 %	10,71 %	8	195
PODZIM	846	270	75,81 %	24,19 %	12	4500
ZIMA	293	118	71,29 %	28,71 %	20	2940

Z nasbíraných dat o kondenzačních stopách byla provedena základní statistika jejich rozložení v průběhu roku, výsledek je uveden v tabulce 1. Nejvíce kondenzačních stop i dlouhodobých bylo shledáno na podzim (v tomto ročním období proběhl nejvyšší počet měření), kdy atmosféra je ještě prohřátá z léta a obsahuje vysokou relativní vlhkost. Největší podíl (29-33) perzistentních stop z celkového počtu byl změřen v zimě a na jaře, kdy atmosféra je velmi chladná, obsahuje méně vodních par než na podzim, ale při nízkých teplotách je relativní vlhkost vysoká. V létě byl zjištěn nejmenší podíl perzistentních stop z důvodu prohřáté atmosféry a nízké relativní vlhkosti. Nejvyšší



průměrná doba trvání kondenzačních stop byla vypočtena na 32 s pro jarní období, maximální doba trvání kondenzačních stop 4500 s pro podzim.

Pokud je stabilní zvrstvení atmosféry v případě výskytu tlakových výší a hřebene vysokého tlaku vzduchu, odpovídá rozložení teplot a vlhkostí s výškou podmínkám MSA a výsledky měření atmosférické sondáže jsou platné na větší horizontální území, tedy i pro oblast v okolí Děčína. V těchto synoptických situacích lze nejlépe předpovědět výskyt a délku trvání kondenzačních stop na základě klasifikačních modelů. V případě instabilního zvrstvení při vzniku bouřek a přechodu atmosférických front dochází k atmosféře poměrně rychlým změnám meteorologických veličin vertikálně i horizontálně. V těchto podmínkách bude předpověď kondenzačních stop pomocí klasifikačních modelů méně přesná. Výskyt oblačnosti vysokého patra ve výškách 6 -11 km je velmi dobrým indikátorem pro možnost tvorby kondenzačních stop z důvodu zvýšeného obsahu atmosférické vlhkosti. Vysoká oblačnost je typická pro pozici teplé fronty ve výšce, v teplém vzduchu vytlačeném okluzní frontou do vysokých poloh, v zadní části studené fronty 1. typu ve vysokých výškách. Pozorováním ve dnech, kdy probíhalo sledování kondenzačních stop kamerami, byla vizuálně pozemním pozorováním zjištěna vysoká oblačnost u 84 % dlouhodobých stop a 59 % krátkodobých stop.

Analýza synoptických situací a přechodu atmosférických front v 80 dnech, kdy byly zaznamenány kondenzační stopy, přinesla zajímavé výsledky. Bylo zaznamenáno 36 dní s přechodem atmosférické fronty, tedy téměř polovina z celkového počtu sledovaných dní. Bylo zpozorováno 24 hřebenů vysokého tlaku vzduchu, 28 tlakových výší, 18 nevýrazných tlakových polí, 10 tlakových níží. Rozložení tlakových útvarů bezprostředně ovlivňuje proudění v horní troposféře a výskyt perzistentních kondenzačních stop tak souvisí především s původem vzduchové hmoty a jejím obsahem vodních par, která je nad dané místo prouděním přesouvána. Vyšší obsah vodních par obsahují především oceánské vzduchové hmoty a tropické vzduchové hmoty.

### **7.3 Statistické vyhodnocení dat**

V dizertační práci se využily základní a pokročilé statistické metody v souvislosti s vyhodnocením měřených a získaných dat. Aplikovat statistické metody a postupy znamená sledovat určité jevy a zaznamenávat o nich data, která se následně zpracovávají. Jedná se o třídění dat, jejich vyhodnocování a interpretaci.



Pro výzkum stop byla využita lineární regresní analýza, pomocí této metody odhadujeme hodnotu jisté náhodné veličiny (takzvané závisle proměnné, nazývané též cílová proměnná, regresand anebo vysvětlovaná proměnná) na základě znalosti jiných veličin (nezávisle proměnných, spojitých či kategorických prediktorů, anebo vysvětlujících proměnných). Ke zjištění vazeb mezi veličinami se využívají korelační koeficienty, jejichž hodnoty se pohybují v intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$  s tím, že čím vyšší je hodnota koeficientů, tím silnější je vztah mezi proměnnými. [18] Tato metoda byla využita při zjišťování významu vhodných vstupních proměnných ovlivňujících tvorbu kondenzačních stop.

Klasifikace a predikce jsou procesy data miningu, které jsou zaměřeny právě na konstrukci a využití modelů pro třídění a doplnění dat založené na jejich informačním obsahu. Klasifikace neboli zařazování dat do existujících tříd. Na základě úrovně cílové proměnné a kombinace vstupů, které vedou ke konkrétnímu výsledku, je vytvořen model, který dokáže klasifikovat data. Proces klasifikace se skládá ze dvou kroků:

1. *učení*: tvorba klasifikačního modelu schopného klasifikovat data pomocí trénovacích dat (vzorků dat u nichž známe výsledek klasifikace, tj. třídu, do které patří),
2. *vlastní klasifikace*: použití modelu pro klasifikaci nových dat (jejich zařazení do tříd)

Predikce je odhad neznámé hodnoty veličiny. Pokud je veličina diskrétní, lze predikci interpretovat jako klasifikaci. Jedním z druhů predikce je výše zmiňovaná *vlastní klasifikace*, kdy se určuje dodatečný atribut představující třídu objektu (atribut diskrétního charakteru). Regrese poskytuje predikci modelované veličiny. [21]

Metoda odhadu směsi distribucí je specifický přístup v tom, že co je neznámé, to lze postupně vymodelovat komponentami směsi. Tedy dříve nepodchycené změny v modelované veličině budeme vysvětlovat změnami pracovního modu sledovaného systému. [18]

Klastrování a klasifikace jsou metody, často využívané v oboru data mining pro analýzu měřených dat. Mějme datový soubor

$$X = \{x_i\}_{i=1}^N \quad (7.5)$$

kde  $x_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}_i$  jsou jednotlivé záznamy dat.



Geometrická interpretace říká, že jednotlivé datové záznamy jsou body v  $n$ -rozměrném vektorovém prostoru.

Klastrováním rozumíme hledání podprostorů v datovém prostoru, kde prvky mají nějaké podobné vlastnosti. Podobnost je vyjádřena určitou mírou podobnosti. Většinou se jedná o „blížkost“ bodů, která je vyjádřena nějakou metrikou (Euclid, Manhattan a podobně). Podobnost může mít ale i nematematickou podobu jako např. barva, tvar a tak. Výsledkem klastrování je množina shluků dat nebo pravidlo, podle kterého jsou data tříděna.

Klasifikací rozumíme situaci, kdy měříme nová data (nové body v datovém prostoru) a ty zařazujeme do klastrů. Zařazování může být buď deterministické (určíme právě jeden klast, do kterého bod patří) nebo pravděpodobnostní, kdy jsou ve hře všechny klastry a pravděpodobnosti, že do nich nový bod patří. [51]

K rozlišení jednotlivých tříd kondenzačních stop bylo zvoleny metody strojového učení pro klasifikaci délky kondenzačních stop na základě sesbíraných dat. Vstupní dataset se skládal z parametrů, které díky základní statistické analýze vykazovaly statisticky výrazné rozdíly mezi vstupními parametry. Takto byly vybrány následující parametry s největší importancí: typ letadla, počáteční hladina letadla, GS, TAS, tlak měřený, geopotenciální výška sondy, teplota, teplota rosného bodu, teplota ledového bodu, směr větru, rychlost větru. Ostatní parametry nezvyšovaly přesnost klasifikace, jen by rozšiřovaly datovou sadu. Cílovou kategorickou proměnnou  $y$  je délka kondenzačních stop rozdělena na krátkodobé a dlouhodobé.

K získání co nejpřesnější klasifikace bylo provedeno porovnání několika metod, zpracování a modelování probíhalo v programu Scilab 6.1.1. ([www.scilab.org](http://www.scilab.org)) a v programu Klime ([www.klime.com](http://www.klime.com)). Pro tvorbu a ověření vhodného klasifikačního modelu kondenzačních stop bylo zvoleno 6 metod pro spojitě veličiny – Lineární regrese, Naivní Bayes, Logistická regrese, Neuronové sítě, Rozhodovací stromy a Nearest-neighbour klasifikace. Nakonec byla ještě použita metoda pro diskrétní veličiny a to Kategorický diskrétní model. [21]

Cílem statistického zpracování bylo zjištění závislosti časové délky kondenzačních stop na vlastnostech letadla a meteorologických prvcích. Nejprve byly rozděleny délky kondenzačních stop na intervaly po minutách. Výzkumem jejich závislosti bylo zjištěno, že pro většinu pokusů vyhovuje jejich rozdělení na krátkodobé s dobou trvání do 1 minuty a dlouhodobé s dobou trvání nad 1 minut. Pro lineární regresi bylo použito i rozdělení s hranicí 3 minut. Jen pro Kategorický diskrétní model bylo rozdělení na krátkodobé do 5 minut a dlouhodobé nad 5 minut.



Pro vyjádření závislosti vzniku kondenzačních stop je sledována délka intervalu  $y$  (min) po který jsou vidět kondenzační stopy za letadly v závislosti na veličinách  $x$ :

1. Typ letadla
2. Počáteční hladina letadla
3. GS
4. TAS
5. Tlak měřený
6. Geopotenciální výška sondy
7. Teplota
8. Teplota rosného bodu
9. Teplota ledového bodu
10. Směr větru
11. Rychlost větru

U všech použitých metod strojového učení byl proveden proces učení a následné klasifikace. Data byla náhodně rozdělena tak, že 80 % vybraných dat bylo využito pro trénování a zbylých 20 % pro testování. Tento poměr byl zachován pokaždé, ale výběr dat pro trénink byl náhodný, aby byl zachován podíl vybraných dat vzhledem k cílové kategorii. Zbývající data byla použita k testování modelu z hlediska přesnosti a správnosti. Výsledek schopnosti klasifikovat cílovou proměnnou probíhal na základě výsledného klasifikátoru. Ověření proběhlo na zbývajících datech, která nebyla využita pro trénování. Proces trénování a testování zajišťuje ohodnocení objektivitu konkrétního klasifikačního modelu, určení správného fungování modelu a zda jeho přesnost není zatížena náhodným výběrem dat.

Pro hodnocení natrénovaných modelů klasifikátorů a výběru nejlepšího modelu byla u všech modelů vypočtena konfuzní matice (matice záměn), ve které jsou uvedeny hodnoty  $TP$ ,  $FN$ ,  $FP$ ,  $TN$ . Z těchto hodnot se zjistí průměrná správnost klasifikace, která shrnuje výkon modelů klasifikace jako počet správných předpovědí dělený celkovým počtem předpovědí. Dále byly zjištěny výpočtem přesnost ( $P$ ) a senzitivita ( $R$ ) všech modelů:

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (7.6)$$

$$R = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (7.7)$$



kde  $TP$  představuje počet skutečně pozitivních klasifikací,  $FN$  počet falešně negativních klasifikací,  $FP$  počet falešně pozitivních klasifikací a  $TN$  počet skutečně negativních klasifikací. Přesnost a senzitivita umožňují zhodnocení natrénovaných klasifikačních modelů a výběr nejlepšího modelu.

Při měření přesnosti predikce se často používá velikost relativní prediktivní chyby ( $rpe$ ), která je definována jako absolutní hodnota poměru chyby ke skutečné pozorované hodnotě. Vypočteme odchylku  $e = y - y_p$  a spočteme  $er1 = \text{mean}(\text{abs}(e))$ , a spočteme  $er2$  (směrodatná odchylka  $e$ ) =  $\text{stdev}(e)$ , kde  $y$  je skutečná hodnota,  $y_p$  je predikovaná hodnota.

První využitou metodou byl **Lineární regresní model**. Je to základní model pro spojité data. Ve Scilabu byl naprogramován statický model multivarietní regrese. Má tvar diferenční rovnice s náhodnou částí. Jeho rovnice je:

$$y_t = \psi_t' \Theta + e_t, \quad (7.8)$$

kde  $y_t$  je modelovaná veličina v čase  $t$ ,  $\psi_t$  je regresní vektor (vektor veličin, které vysvětlují  $y_t$ ),  $\Theta$  je parametr modelu (zahrnuje regresní koeficienty  $\theta$  a rozptyl šumu  $r$ ),  $e_t$  je šum s normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a konstantním rozptylem  $r$ .

Odhad regresního modelu probíhá dle rovnice:

$$y_t = b_0 u_t + \dots + a_n y_{t-n} + b_n u_{t-n} + k + e_t, \text{ pro } t = 1, 2, \dots, N$$

Vytvoří se model pro každý čas měření:

$$y_1 = b_0 u_1 + \dots + a_n y_{1-n} + b_n u_{1-n} + k + e_1, \text{ pro } t = 1, 2, \dots, N$$

$$y_2 = b_0 u_2 + \dots + a_n y_{2-n} + b_n u_{2-n} + k + e_2, \text{ pro } t = 1, 2, \dots, N$$

.....

$$y_N = b_0 u_N + \dots + a_n y_{N-n} + b_n u_{N-n} + k + e_N, \text{ pro } t = 1, 2, \dots, N$$

Tímto způsobem je získán následující maticový tvar modelu se všemi naměřenými daty.  $Y = X \theta + E$ , kde  $\theta$  je neznámý parametr náhodné veličiny. Optimalizace modelu minimalizuje kritérium nejmenších čtverců. Dávkový odhad nejmenších čtverců je metoda pro získání odhadu pro parametrový vektor  $\theta$ , takže index výkonu, který je funkcí tohoto parametru,  $J = J(\theta)$ , je minimalizován. Výkonnostní index je vážený součet druhých mocnin reziduí. [18].

Druhou využitou metodou byl **Naivní Bayes**, je také známý jako pravděpodobnostní klasifikátor, protože je založen na Bayesově teorému se silnými (naivními) předpoklady





nezávislosti mezi vysvětlujícími proměnnými. Algoritmus Naive Bayes používá Bayesovu větu k výpočtu pravděpodobnosti události, která nastane, za předpokladu sady známých podmínek.

Bayesovo pravidlo, nám umožňuje „převrátit“ podmíněné pravděpodobnosti. Používá se k určení pravděpodobnosti hypotézy s předchozími znalostmi. Záleží na podmíněné pravděpodobnosti. Tedy představují pravděpodobnost události za předpokladu, že nastala nějaká jiná událost.

Pro každou proměnnou bude nyní vyžadována pouze jedna pravděpodobnost, což zase usnadňuje výpočet modelu. Navzdory tomuto nerealistickému předpokladu nezávislosti funguje klasifikační algoritmus dobře, zejména při malých velikostech vzorků. Klasifikátor Naive Bayes je řízený algoritmus strojového učení, který se používá pro klasifikační úlohy, jako je klasifikace textu. Je také součástí rodiny generativních algoritmů učení, což znamená, že se snaží modelovat distribuci vstupů dané třídy nebo kategorie. [18].

Třetím přístupem byla **Logistická regrese**, která je jedním z nejpoužívanějších algoritmů strojového učení, který spadá pod techniku supervizovaného učení. Používá se pro predikci kategorické závislé proměnné pomocí dané množiny nezávislých proměnných. Logistická regrese předpovídá výstup kategorické závislé proměnné. Proto musí být výsledkem kategorická nebo diskretní hodnota. Modelovaná veličina je diskretní (dvouhodnotová)  $y_t \in \{0, 1\}$  a předpoklad je, že její hodnota závisí na veličinách  $\psi_t = [1, x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{n,t}]'$ , které mohou být jak diskretní, tak i spojité. Jednička v regresním vektoru představuje opět respektování konstanty modelu.

Logistická regrese je významný algoritmus strojového učení, protože má schopnost poskytovat pravděpodobnosti a klasifikovat nová data pomocí spojitych a diskretních datových sad. Logistickou regresi lze použít ke klasifikaci pozorování pomocí různých typů dat a lze snadno určit nejefektivnější proměnné použité pro klasifikaci. Křivka z logistické funkce ukazuje pravděpodobnost něčeho, zda jev existuje nebo ne na základě určitých vlastností. Hodnota logistické regrese musí být mezi 0 a 1, která nemůže překročit tuto hranici, takže tvoří křivku jako tvar „S“. Křivka tvaru S se nazývá sigmoidní funkce nebo logistická funkce, která předpovídá dvě hodnoty 0 nebo 1.

Logistický model popisuje diskretní veličinu  $y_t$  v závislosti na spojité veličině  $z_t$  která je vypočtena na základě lineární regrese z veličin, které mohou být diskretní i spojité. Logistický model má tvar:

$$f(y_t|z_t) = \frac{\exp(y_t z_t)}{1 + \exp(z_t)}, \quad (7.9)$$

kde je použita lineární regrese  $z_t = \psi_t' \Theta + e_t$  (7.10)



Princip fungování tohoto modelu je následující. Lineární regrese (7.10) mapuje regresní vektor tor  $\psi_t$  na veličinu  $z_t$ , která přirozeně nabývá hodnot z celé reálné osy. Funkce (7.9) potom transformuje tuto reálnou osu do intervalu (0, 1), takže nakonec dostaneme hodnotu ve tvaru pravděpodobnosti. Hodnoty této pravděpodobnosti blízké 1 ukazují na hodnotu  $y_t = 1$ , hodnoty blízké 0 mluví pro  $y_t = 0$  [18].

Čtvrtou využitou metodou byly **Neuronové sítě**. Je to metoda, která spadá do tzv. data miningu. Umělé neuronové sítě se inspirovaly strukturou lidské nervové soustavy. Základním prvkem přirozené i umělé neuronové sítě je neuron. Neurony jsou navzájem propojeny a předávají si signály. Platí přitom, že každý neuron může mít více vstupů, ale jen jeden výstup (tento výstup ale může být poslán i více než jednomu dalšímu neuronu). Vstupem neuronu může být buď výstup z jiného neuronu nebo informace z vnějšku (v našem případě se jednalo o naměřené parametry kondenzačních stop).

Každý vstup má určitou váhu. Poté, co neuron přijme vstupy, tak jejich hodnoty vynásobí váhami. Následně tyto součiny sečte a pokud je výsledek větší než stanovený práh, tak se výsledek transformuje předem danou přenosovou funkcí a pošle na výstup. Hlavní předností neuronové sítě je schopnost učit se, zapamatovat si kombinace, které vedly k požadovanému výstupu a u nových vstupů a u nových vstupů se obracet na svou paměť a na základě zkušeností odhadovat nový výsledek. Je to princip generalizace (zevšeobecnování), která je předností algoritmu neuronových sítí. Učení s učitelem probíhá tak, že máme množinu vstupů a požadovaných výstupů (sadu parametrů kondenzačních stop a letadla). Vstupy se pustí do sítě, výstup se porovná s požadovaným výstupem a následně se provede korekce (změna vah a prahů) tak, aby byl rozdíl mezi skutečným a požadovaným výstupem co nejmenší. Síť se tedy učí ze svých chyb. Na základě vah mohou být jednotlivé vstupy potlačeny, nebo naopak zvýhodněny. Funkční část zpracuje informace ze vstupů a vygeneruje výstup. Výstupní část přivede výslednou informaci na vstup jiných neuronů.

Vícevrstvá neuronová síť je algoritmus učení pod dohledem, který se učí trénováním na souboru dat, přičemž sám učí nelineární aproximátor funkce pro klasifikaci nebo regresi. Neurony jsou propojeny mezi sebou do větších struktur. Neurony jsou uspořádány do vstupní vrstvy, několik nelineárních, tzv. skrytých vrstev a výstupní vrstvy. Algoritmus se trénuje pomocí zpětného šíření. Neuronové sítě mají (někdy až pozoruhodnou) schopnost extrahovat pravidla a trendy z komplikovaných průběhů v datech. Další vlastností je, při správné aplikaci, schopnost velmi přesně předpovědět údaje, které nebyly součástí trénovacích dat, tedy schopnost zobecňovat. [18]



Pátým přístupem byly **Rozhodovací stromy**, jsou další z data miningových technik. Mají jednoduchý algoritmus, který rozdělí data do uzlů podle informačního zisku pro kategorické a střední kvadratické chyby pro číselné cílové proměnné. Cílem rozhodovacích stromů je identifikovat objekty, popsané různými atributy, do tříd. Představit si je můžeme jako řádky v tabulce, kde jednotlivé sloupce jsou atributy (parametry letadla a meteorologických veličin). Jelikož se jedná o strom, algoritmus je velmi rychlý. Rozhodovací strom se musí nejprve vytvořit z množiny daných objektů, které musí někdo (učitel, jiný algoritmus) zařadit do skupin (skupina se obvykle označuje jako závislý atribut a zapisuje se do tabulky do posledního sloupce). Jedná se tedy o učení s učitelem.

Každý uzel stromu představuje rozhodování podle jedné (vybrané) vlastnosti objektu, z tohoto uzlu vede konečný počet hran. Proto je nutné vlastnosti nejdříve diskretizovat (např. z reálných čísel do konečného počtu intervalů). Strom musí co nejlépe objekty od sebe odlišit. Pro kořenový uzel se vybírá takový atribut, který objekty od sebe maximálně odliší. Využívá se proto entropie (míra informační hodnoty atributu). Vytváření stromů je dobře popsáno ve známých algoritmech.

Rozhodovací (klasifikační) strom je funkce, které dáme na vstup vektor atributů a která vrátí „rozhodnutí“ – jednu z možných výstupních hodnot. K rozhodnutí dochází sekvencí testů. Každý vnitřní uzel stromu reprezentuje podmínku, každý list stromu reprezentuje rozhodnutí. Model popisuje vzájemné vztahy mezi pozorovanými veličinami. Modelujeme závislost kategoriální závisle proměnné na jedné či více nezávislých proměnných, prediktorech (kategoriálních, spojitých). Cílová funkce má diskrétní hodnoty (jedná se o klasifikační problém). Trénovací data mohou být zašuměná, obsahovat chybějící hodnoty.

V učícím setu dat  $X = \{[x_1, x_2, \dots, x_n]_t\}_{t=1}^T$ ,  $c_t$  je proměnný ukazatel,  $x_1, x_2$  jsou zaznamenaná data. Pro vybranou proměnnou  $x_1$  získáme dvě tabulky. Když převod  $x_1 \rightarrow c$  není unikátní, tak se pokračuje. Když není proměnný, tak se končí. Strom je jedinečný (rozhodnutí bude deterministické). Záleží na pořadí výběru proměnných. [18]

Další použitou metodou byla **K-nearest neighbour klasifikace (KNN)** je jedním z nejjednodušších algoritmů strojového učení založených na technice supervizovaného učení. Algoritmus K-NN funguje tak, že najde nejbližší sousedy k danému bodu v datové sadě a poté bod klasifikuje na základě štítku jeho sousedů. Předpokládá podobnost mezi novým případem/daty a dostupnými případy a zařadí nový případ do kategorie, která je nejvíce podobným dostupným kategoriím. Algoritmus hledá  $k$  nejbližších trénovacích příkladů v prostoru atributů a používá jejich průměr jako



predikci. Tímto je nalezeno  $k$  nejbližších datových bodů a jejich kategorií je využito k předpovědi kategorií nových datových bodů.

Algoritmus K-NN ukládá všechna dostupná data a klasifikuje nový datový bod na základě podobnosti. To znamená, že když se objeví nová data, lze je snadno zařadit do kategorie well suite pomocí algoritmu K-NN. Algoritmus K-NN lze použít pro regresi i pro klasifikaci, ale většinou se používá pro klasifikační problémy. K-NN je neparametrický algoritmus, což znamená, že nevytváří žádné předpoklady o základních datech. Algoritmus KNN ve fázi tréninku pouze ukládá datovou sadu a když získá nová data, klasifikuje tato data do kategorie, která je velmi podobná novým datům.

Postup klasifikace je následující: Nejprve se vypočte vzdálenost nového bodu  $y$  od všech bodů  $z$   $x_i \in X$ . Pak označí  $k$  body  $x_i$ ,  $i=1,2,\dots,k$  nejbližší k  $y$ . Přiřazení  $y$  ke shluku, do kterého patří většina nejbližších bodů. Pokud existuje více než jeden takový shluk, bude použit první z nich.

Poslední využitou metodou byl **Diskrétní kategorický model**. Pokud mají všechny veličiny vstupující do modelu konečný počet hodnot, hovoříme o diskretním modelu. Modelovaná veličina je určitou klasifikací nějakého jevu. Seřadíme-li tyto veličiny do vektoru (tzv. rozšířený regresní vektor). Nezávislé veličiny (v regresním vektoru) označují okolnosti, které doprovázejí naměřenou hodnotu modelované veličiny.

$$\Psi_t = [y_t, \psi_t'], \quad (7.11)$$

kde  $\Psi_t$  je regresní vektor obsahující hodnoty proměnných, které ovlivňují modelovanou veličinu,  $y_t$  je modelovaná veličina v čase  $t$

Pak realizací náhodných veličin v tomto vektoru dostaneme určitou konfiguraci jejich hodnot. Diskrétní systém má konečný počet takových konfigurací, které nazýváme módy. Popis diskretního systému proto můžeme provést velmi obecně, a to tak, že každé konfiguraci hodnot veličin v rozšířeném regresním vektoru přiřadíme její pravděpodobnost, tedy

$$f(y_t | \psi_t, \Theta) = \Theta_{y_t | \psi_t}, \quad (7.12)$$

kde  $\Theta$  je model parametrů regresních koeficientů a rozptylu šumu.

Multi-index (vektor s diskretními hodnotami)  $y_t | \psi_t = [y_t, \psi_{1;t}, \psi_{2;t}, \dots, \psi_{n\psi;t}]$  je vektor indexů (hodnot diskretních veličin).

Odhad regresního modelu probíhá, že se vypočítají bodové odhady následovně:

$$\theta_{y_t | \psi_t} = \frac{v_{y_t | \psi_t}}{\sum_i v_i | \psi_t} \quad (7.13)$$



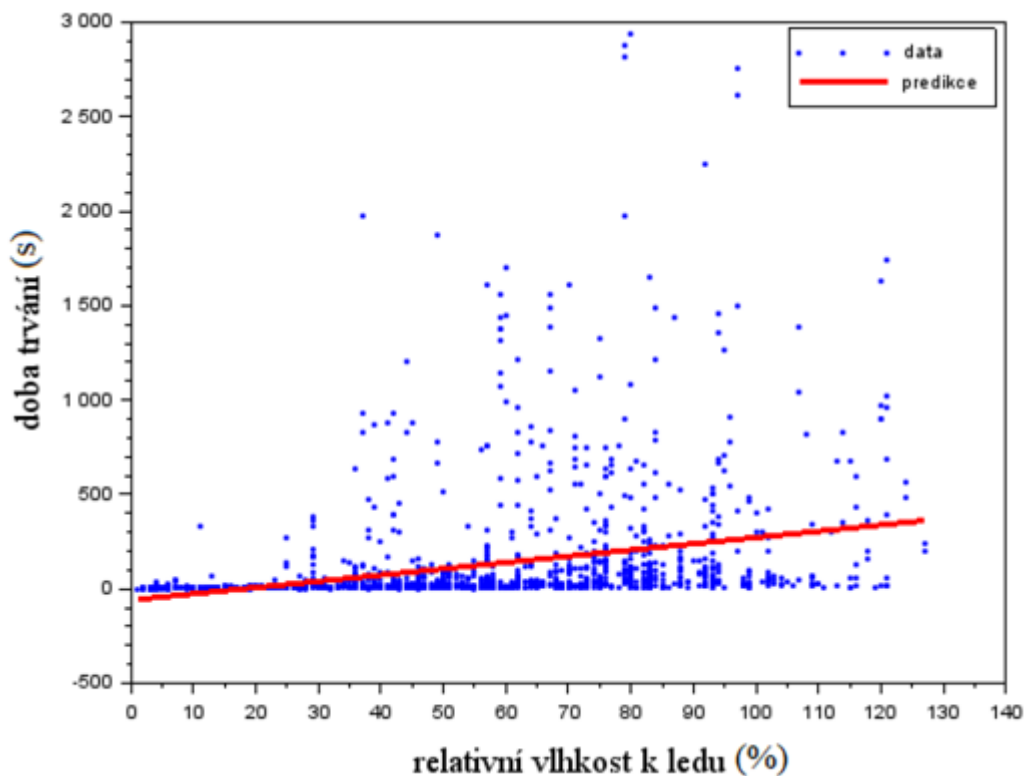
Normalizuje se statistická matice tak, aby součet jejích řádkových položek byl roven jedné. Z odhadnutého modelu lze sestavit predikci výstupu pomocí prediktivní pravděpodobnosti. [18]

## 8. Výsledky

### 8.1 Lineární regrese

Postupně byly vyzkoušeny závislosti doby trvání kondenzačních stop  $y$  na jednotlivých zkoumaných veličinách pomocí lineární regrese. Nejprve bylo ověřeno, že neexistuje význačná závislost vstupních veličin  $x$ . Nejlepší výsledek závislosti byl zaznamenán pro relativní vlhkost k ledu.

Pro zjištění, zda je vhodná regrese pro vybrané veličiny, byl použit  $f$ -test regression na vysvětlení rozptylů. Ověřovala se nulová hypotéza, že  $x$  a  $y$  jsou nezávislé. Jako nejvhodnější veličina pro zjištění regrese byla zjištěna relativní vlhkost vzhledem k ledu. Pro ní vypočtená  $p$ -hodnota =  $4,905 \cdot 10^{-38}$  dokazuje, že nulová hypotéza velice silně zamítá nevhodnost regrese. Z toho vyplývá, že regrese je vhodná pro vyjádření závislosti vybrané veličiny. Vypočtené parametry regrese dosahovaly těchto hodnot:  $t_h = 3,3186640, -59,877766$ . Závislost doby trvání kondenzačních stop vzhledem k relativní vlhkosti k ledu je znázorněna na obrázku 16. Na grafu byly skutečné hodnoty  $y$  vyjádřeny bodově a predikce pomocí spojitě čáry. Z grafu je patrné, že predikce velmi dobře vystihne krátkodobé stopy do 1 minuty, u dlouhodobých stop nad 1 minutu mají hodnoty větší rozptyl. V podstatě tento průběh je podobný jako v dále použitých klasifikačních modelech.



Obrázek 16: Závislost doby trvání kondenzačních stop na relativní vlhkosti vzhledem k ledu.

Dalším pokusem ve scilabu byla vypočtena lineární regrese pro všechna data a byla vymodelována klasifikace.  $Y$  bylo diskretizováno na 1 (krátká) a 2 (dlouhá) dle 1 minuty. Vypočtené parametry dosahovaly těchto hodnot:  $th = 0,0002223, 0,0001791, -0,0006650, 0,0024178, 0,0085974, -0,0002112, -0,0404844, 0,2526430, -0,2213209, 0,0001947, 0,0018299, -4,9246744$ . Velikost relativní prediktivní chyby ( $rpe$ ) byla pro průměr z odchylek  $0,3247822$ , pro směrodatnou odchylku  $11,093595$ . Konfuzní matice hodnot  $y$  a  $y_p$  nabyla těchto hodnot:  $252, 7, 69, 17$ . Správnost modelu klasifikace vyšla  $77,97101\%$ . Z matice záměn byla vypočtena citlivost modelu  $= 0,9729729$ , přesnost modelu  $= 0,7850467$ . Model správně určil  $252$  krátkodobých stop a  $17$  dlouhodobých stop. Ze zjištěných výkonových charakteristik vyplývá, že tento model pro diskretizaci  $y$  na 1 minutu patří k přesnějším.

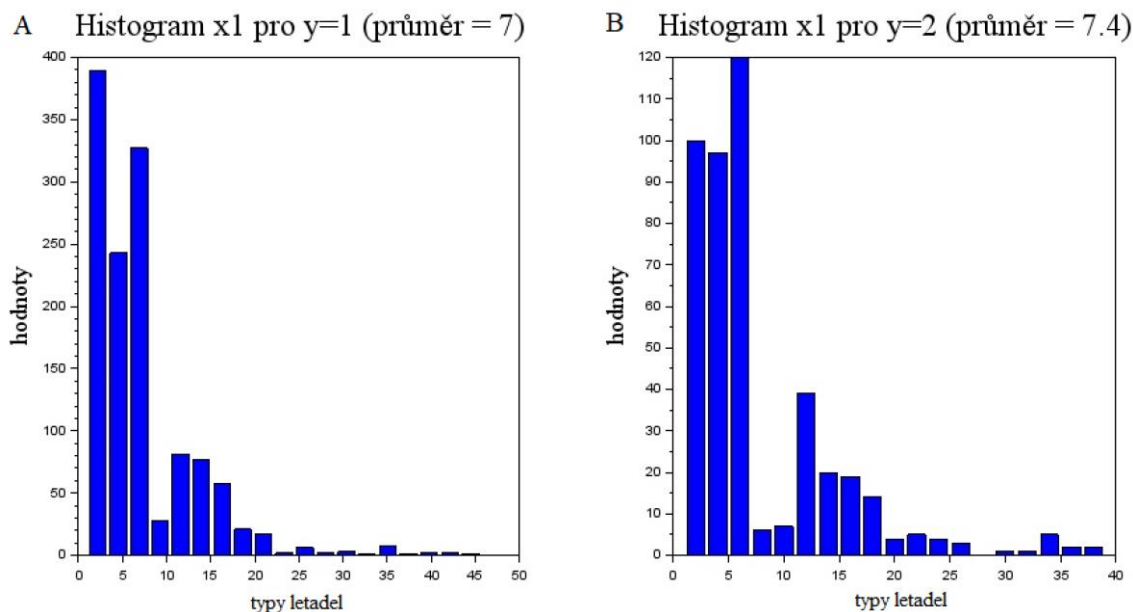
Nepatrně lepších výsledků bylo dosaženo v případě lineární regrese, kde byla diskretizace  $y$  na 1 (krátká) a 2 (dlouhá) dle 3 min. Vypočtené parametry měly tyto hodnoty:  $th = -0,0013058, 0,0001797, -0,0001022, 0,0020430, 0,0065719, -0,0002573, -0,0287188, 0,2463769, -0,2178577, 0,0002268, 0,0012615, -3,6263822$ . Velikost relativní prediktivní chyby ( $rpe$ ) byla pro průměr z odchylek  $0,2871589$ , pro směrodatnou odchylku  $0,3599032$ . Konfuzní matice hodnot  $y$  a  $y_p$  měla tyto hodnoty:



285, 3, 54, 3. Správnost modelu klasifikace je 83,47826 %. Z matice záměn byla určena citlivost modelu = 0,989583, přesnost modelu = 0,8407079. Model správně odhadne 285 krátkodobých stop a jen 3 dlouhodobé stopy. Výkonové charakteristiky modelu pro 3 minuty byly trochu lepší než pro u modelu 1 minutu, určil méně dlouhodobých stop. Pro další zvyšování doby trvání stop nad 3 minuty, model začne predikovat jen samé (1) tedy krátkodobé stopy, neodhadne žádné dlouhodobé stopy.

Jako další možnost se nabízelo vymodelování závislosti doby trvání kondenzačních stop na typu letadla. Ten je především charakterizován celkovou účinností motoru, průměrnou spotřebou paliva za sekundu ovlivňují a množstvím vyprodukované vodní páry na jeden kilogram spáleného paliva, které jsou důležitým vstupním parametrem pro vznik kondenzačních stop, pokud vyhovují SAC. Jejich významný vliv na životnost stop nebyl prokázán ve studii [49]. V datovém souboru kondenzačních stop bylo identifikováno celkem 48 typů letadel, z nichž většina kromě 7 základních typů (A320 family, A330, A350, A380, B737, B787, B777), obsahovala malé množství záznamů a to byl důvod, proč nebylo možné vytvořit model pro každý typ letadla. Jednotlivé typy byly zakódovány do numerické řady čísel, použité kódování je vloženo do přílohy.

Pro zjištění vlivu typu letadla byla použita metoda klastrování, která rozděluje data podle hodnoty dané veličiny. Klastry by měly rozlišovat rozdělení délky stop a následně určit, kam zařadí  $y$  (výstupní délku kondenzačních stop). Postupně byly vytvořeny grafy pro všechna  $x$ . Výsledky byly velmi podobné pro krátké i dlouhé kondenzační stopy. V podstatě ukazují stejné výsledky pro  $y_1, y_2$  u všech 11 veličin, tedy rozhodování klastrů není jednoduché. Metoda klastrování veličiny  $x_1$  - typ letadla je ukázána na obrázku 17.



Obrázek 17: Pravděpodobnostní funkce náhodné veličiny typy letadel pro počet naměřených dob kondenzačních stop pro A krátkodobé kondenzační stopy, B dlouhodobé kondenzační stopy. V histogramu jsou na ose x jednotlivé typy letadel a na ose y počet naměřených dob příslušných kondenzačních stop.

Z obrázku je patrné, že oba grafy vykazují velmi podobné výsledky, téměř všechny typy letadel produkují krátkodobé i dlouhodobé stopy. Nepatrně více krátkodobých stop vykazují letadla A320 family, dlouhodobé stopy jsou nejčastěji zaznamenány u A330 a B737-800.

## 8.2 Metody strojového učení pro klasifikační modely

První použitá metoda **Naivní Bayes** byla naprogramována v prostředí Klime pro všechny vstupní spojité veličiny  $x_{1-11}$  a diskrétní  $y$  děleno podle doby trvání kondezačních stop 1 minuty na 1 (krátkodobé) a 2 dlouhodobé. Výsledný klasifikátor, který vyjadřuje vztah mezi skutečnou hodnotou  $y$  a hodnotou  $y_p$ . dosáhl relativně slabších hodnot než předchozí model lineární regrese. Správnost této metody byla 75,94 %. Konfuzní matice výstupů  $y$  a  $y_p$  nabyly těchto hodnot: 251, 6, 77, 11. Z matice záměn byla určena přesnost modelu 0,7652 a citlivost modelu 0,9766. Model správně odhadne 251 krátkodobých stop a 11 dlouhodobých stop, což je více než u lineární regrese.

Druhá metoda **Logistická regrese** byla naprogramována v prostředí Klime pro stejné vstupní spojité veličiny  $x_{1-11}$  a diskrétní  $y$  bylo opět rozděleno podle doby trvání kondenzačních stop na krátkodobé do 1 minuty a na dlouhodobé nad 1 minutu. Byla





zjištěna správnost logistické regrese na 73,40 %. Matice záměn výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 245, 12, 81, 7. Z nich byla zjištěna přesnost modelu 0,7515 a citlivost modelu 0,953. Model správně odchytl 245 krátkodobých stop a 7 dlouhodobých stop. Ze všech naprogramovaných modelů měla Logistická regrese nejhorší výsledky výkonových charakteristik ze všech klasifikačních modelů. Jen citlivost modelu, která vyjadřuje, kolik skutečných kondenzačních stop bylo klasifikováno správně, dosáhla průměrné úrovně.

Třetí metoda byla naprogramována dle **Neuronové sítě**. K její modelaci bylo využito prostředí Klime. Vstupní veličiny byly spojité  $x_{1-11}$  a diskrétní  $y$  bylo opět rozděleno podle doby trvání kondenzačních stop na krátkodobé do 1 minuty a na dlouhodobé nad 1 minutu. Neuronová síť (PNN) byla velmi složitá, skládala se z 33 000 pravidel ve více vrstvách. Správnost tohoto modelu byla vypočtena na 77,39 %. Konfuzní matice výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 246, 11, 67, 21. Následně byla určena přesnost modelu 0,7859 a citlivost modelu 0,9572. Model správně určí 246 krátkodobých stop a poměrně hodně 21 dlouhodobých stop. Překvapivě tato metoda nedosáhla oproti původnímu předpokladu nejlepšího výsledku z uvažovaných klasifikačních modelů.

Další klasifikační metodou, která byla naprogramována v Klime, byly **Rozhodovací stromy**. K modelaci byly použity spojité vstupní veličiny  $x_{1-11}$  a diskrétní  $y$  bylo znovu rozděleno podle doby trvání kondenzačních stop na krátkodobé do 1 minuty a na dlouhodobé nad 1 minutu. Rozhodovací stromy vytvořily 21 pravidel, na základě kterých probíhalo dělení, pro kompresi dat byla použita pruning metoda. Obrázek rozhodovacího stromu, kde je znázorněn celý jeho popis a testovací pravidla, je umístěn v příloze práce. Tato metoda dávala celkem nadprůměrné výsledky na základě správnosti 80,58 %. Konfuzní matice výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 230, 27, 40, 48. Následně byla vypočtena přesnost modelu 0,8518 a citlivost modelu 0,8949. Model správně určí 230 krátkodobých stop a nejvíce 48 dlouhodobých stop ze všech klasifikačních modelů. Omezením byla jen dosažená citlivost, její hodnota je poměrně vysoká, ale byla nejhorší ze sledovaných modelů.

Pátým použitým přístupem byla **K-nearest neighbour klasifikace**. Tato metoda byla naprogramována v Klime. Byly použity spojité vstupní veličiny  $x_{1-11}$  a diskrétní  $y$  bylo rozlišeno podle doby trvání kondenzačních stop na krátkodobé do 1 minuty a na dlouhodobé nad 1 minutu. V KNN bylo použito 10 klastrů (shluků), podle vypočítané vyšší pravděpodobnosti je pak přiřazeno příslušné  $y$ . Správnost KNN byla vypočtena na 77,68 %. Matice záměn výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 234, 23, 54, 344. Následně byla vypočtena přesnost modelu 0,8096 a citlivost modelu 0,9105. Model



správě určí 234 krátkodobých stop a 34 dlouhodobých stop. Vypočtená správnost téměř 78 % patří mezi průměrné výsledky využitých modelování.

Poslední metodou použitou pro vytvoření klasifikace byl **Diskrétní kategorický model**, který byl naprogramován v Scilabu, program je vložen do přílohy. Z důvodu velké náročnosti výpočtu pro více vstupních veličin, byly vybrány tři nejdůležitější veličiny  $x$  – teplota, teplota rosného bodu, teplota ledového bodu. Tyto  $x$  byly diskretizovány do čtyř intervalů podle střední hodnoty ( $m$ ) a směrodatné odchylky ( $s$ ) takto:  $(\min, m-s)$ ,  $(m-s, m)$ ,  $(m, m+s)$ ,  $(m+s, \max)$ . Nejprve byla zkoumána výstupní veličina  $y$  s rozdělením 1 minuty na krátkodobé a dlouhodobé. Výsledek nebyl nijak výrazný. Proto byla následně provedena modelace pro  $y$  s rozdělením 5 minut na krátkodobé a dlouhodobé. Výsledek dosáhl největší správnosti 90,43 % ze všech sledovaných metod. Konfuzní matice výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 310, 2, 31, 2. Následně byla vypočtena přesnost modelu 0,9091 a citlivost modelu 0,9935. Model správně určí 310 krátkodobých stop a 2 dlouhodobé stopy. Má velmi málo 33 chybných odhadů. Vysoká správnost 90 % znamená, že je možné dobu trvání kondenzačních stop na základě vstupních veličin poměrně dobře klasifikovat s rozlišením 5 minut.

Modelace pro 5minutové dělení stop byla ještě pro srovnání dosažených výsledků nejuspěšnějšího Diskrétního kategorického modelu provedena v Knime pro ostatní modely s diskrétními veličinami. Ve všech modelech byla použita trénovací a testovací sada. Vstupní proměnné  $x$  byly rozděleny na 4 intervaly,  $y$  nad a pod 5 minut. Jen Naive Bayes dokázal odhadnout krátké i dlouhé kondenzační stopy s výsledkem správnosti 84,06 %. Konfuzní matice výstupů  $y$  a  $y_p$  byla vypočtena na hodnoty 280, 33, 22, 10. Model správně určil 280 krátkodobých stop a 10 dlouhodobých stop, ale má více 55 chyb v porovnání s diskrétním modelem. Všechny ostatní modely mají správnost vyšší než 90 %, ale určují jen krátkodobé kondenzační stopy.

Výsledek schopnosti klasifikovat cílovou proměnnou na základě výsledného klasifikátoru založeného na strojovém učení a lineární regrese u všech výše zmíněných modelů byl souhrnně zaznamenán v tabulce 2. Namodelované prostředí klasifikace v programu Klime je vloženo do přílohy.



Tabulka 2: Výkonové charakteristiky klasifikačních modelů pro kondenzační stopy.

Výkonové charakteristiky klasifikačních modelů				
model	rozsah	správnost	přesnost	citlivost
Lineární regrese	1 min	0,7797	0,7850	0,9730
	3 min	0,8348	0,8407	0,9896
Naivní bayes	1 min	0,7594	0,7652	0,9766
Logistická regrese	1 min	0,7340	0,7515	0,9533
Neuronové síť	1 min	0,7739	0,7859	0,9572
Rozhodovací stromy	1 min	0,8058	0,8518	0,8949
KNN	1 min	0,7768	0,8096	0,9105
Diskrétní model	5 min	0,9043	0,9091	0,9935

Jako nejúspěšnější model vyšel Diskrétní kategorický model s rozlišením dělení kondenzačních stop na 5 minut. Měl nejvyšší kvantifikovanou úspěšnost. Správnost klasifikace byla větší než 90 %, tedy poměrně dobře je schopen klasifikovat dobu trvání kondenzačních stop s uvedeným rozlišením. Má též nejvyšší přesnost a citlivost 99 %. Je to velmi výborný výsledek, klasifikace byla úspěšná i přes chybné určení některých hodnot. Nejmenší úspěšnost měl klasifikátor Logistické regrese, vykazoval i tak obecně uspokojivou klasifikační schopnost.



## 9. Diskuse

Životnost kondenzačních stop závisí především na meteorologických proměnných, které se mohou během jednoho dne výrazně lišit. To také velmi ztěžuje predikci výskytu kondenzačních stop, protože pro takovou předpověď by byla nezbytná meteorologická data s mnohem vyšší přesností a latencí, než jsou poskytovány dnes. Nevyvážené zastoupení krátkodobých a dlouhodobých kondenzačních stop při různých vlhkostech vzduchu v souboru dat zkomplikovalo provedení klasifikace. Z naměřených dat se podařilo zjistit, že délka trvání kondenzační stopy je lineárně závislá na obsahu vodních par ve vzduchové hmotě a doba začíná znatelněji růst při hodnotách relativní vlhkosti vzhledem k ledu nad 30 %. Naopak se nepodařilo prokázat závislost délky doby trvání kondenzační stopy na typu letadla, směru a rychlosti větru.

Omezením systému pořizování kondenzačních stop kamerami je nemožnost pozorování kondenzačních stop v noci a během zamračených dnů, protože se tvoří nad přirozenou oblačností. Proto je ideální pořizování záznamu během jasných dní a ve dne co nejbližší času, kdy probíhá aerosodážní měření. Nevýhodou pozorování v bezoblačných dnech, tedy v nejčastější synoptické situaci výskytu tlakové výše nad územím, je menší obsah vlhkosti v atmosféře a tím se snižuje pravděpodobnost výskytu dlouhodobých kondenzačních stop.

Výrazné zlepšení v získávání přesnějších meteorologických dat pro sledování kondenzačních stop by mohl přinést alternativní systém monitorování kondenzačních stop kamerami co nejbližší poloze aerologické sondy v příslušné výšce. Navržený systém by přinesl výrazné zlepšení ohledně vzdálenosti přiřazovaných meteorologických údajů ke kondenzačním stopám.

Vyhodnocení zaznamenaných kondenzačních stop přineslo zjištění, že přetrvávající kondenzační stopy se vyskytovaly i v prostředí, které nebylo podle sondážního měření přesyceno vzhledem k ledu. Při podobných relativních vlhkostech vzhledem k ledu se však vyskytovaly i stopy výrazně kratší. V datech se nepodařilo nalézt souvislost, která by tuto skutečnost vysvětlovala. Možným objasněním výskytu dlouhodobých kondenzačních stop v nepřesyceném prostředí by mohla být skutečnost, uváděná v některých studiích [52, 53] zabývajících se přesností měření vlhkosti sondou Vaisala RS41 SG, že sonda má ve vyšších hladinách tendenci podceňovat úroveň relativní vlhkosti vzhledem k vodě v jednotkách procent, což by mohlo znamenat posun do oblasti přesycení vzhledem k ledu, nevysvětlovalo by to však výskyt takových případů při jednom měření.



Letadla létají v mnoha letových hladinách nad sebou. Podél vertikály se významně může měnit i obsah vlhkosti v atmosféře. Proto můžeme často vidět letadla v podobné výšce, jen o jednu nebo dvě hladiny nad sebou (rozstup mezi letovými hladinami je 300 m), a přitom jedno z letadel vytváří dlouhotrvající stopu, zatímco stopa za druhým letadlem se rychle rozpouští. Další výzkum výskytu a predikce kondenzačních stop by se měl zaměřit na nejčastěji používané letové hladiny FL330–410. Tím je dáno, že letadla v těchto letových hladin generují většinu krátkodobých i dlouhodobých kondenzačních stop.

Statistické zpracování dat prokázalo správnost použitých metod při rozdělení krátkých stop do 1 minuty a dlouhých stop nad 1 minutu vyšla okolo 73 – 80 % správných klasifikací. Výsledky pro spojitě veličiny nebyly plně uspokojivé, protože byly celkem vyrovnané ale nepřesvědčivé, všechny vykazují obdobný trend. Metoda klastrování i směsí selhaly. Zjistilo se, že většina zkoumaných veličin včetně směru a rychlosti větru, typu letadla, nadmořské výšky nejsou podstatné pro vysvětlení délky kondenzačních stop.

Následně byl ve Scilabu naprogramován Diskrétní kategorický model, kde byly veličiny  $x$ ,  $y$  diskrétní. Vybrané 3 veličiny (teplota, teplota rosného bodu a teplota ledového bodu) byly rozděleny na základě jejich středních hodnot a směrodatné odchylky na 4 intervaly. Na nich byla nejprve zkoumána výstupní veličina  $y$  s rozdělením na krátkodobé a dlouhodobé s hranicí 1 min. Výsledek nebyl výrazný. Následně byla provedena modelace pro 5 minutové dělení (délka krátkodobých stop je do 5 min, délka dlouhodobých nad 5 min). V tomto případě je výsledek ze všech pokusů je nejlepší, jeho správnost je 90 %. Jeho menším omezením je, že poznal jen 2 dlouhodobé kondenzační stopy z 33. V podstatě to vyjadřuje známý problém klasifikačních modelů s rozeznáním hodnot v souboru, kde je malý vzorek dat.

Z hlediska klasifikace se jedná o velmi dobrý výsledek a bez ohledu na dříve diskutované limitace je zřejmé, že jednotlivé modely rozlišují životnost kondenzačních stop s relativně vysokou přesností. Během všech modelových pokusů se prokázalo, že čím je vyšší nastavení hranice v minutách pro dělení krátkodobých a dlouhodobých stop, tím méně všechny modely správně predikovaly výskyt dlouhodobých stop, ale zvyšuje se jejich úspěšnost ve správnosti klasifikace.



## Závěr

Oblaka tvořící se v brázdě letadel se nazývají kondenzační stopy. Tvoří se z různých důvodů, ale nejdůležitější je emise vodní páry. Aby se vytvořily kondenzační stopy, vzduch musí být studený, obvykle chladnější než  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale přesná prahová hodnota závisí na tlaku, okolní vlhkosti, množství tepla a vodní páry vypouštěné z letadla, a na adiabaticko izobarickém promíchávání zplodin letadla s okolním vzduchem. Kvůli nízké teplotě se obvykle tvoří kondenzační stopy (mimo polární regiony) pouze ve vysokých nadmořských výškách. Teorie vzniku kondenzačních stop Schmidt-Appemanovo kritérium je splněno, když je okolní teplota nižší nebo rovna prahové teplotě, kterou lze vypočítat pro jednotlivé situace. Na zkoumaném vzorku dat tomuto kritériu vyhověla výrazná většina pozorovaných stop. Pravděpodobnost tvorby kondenzačních stop je různá v závislosti na nadmořské výšce a ročním období. V letových hladinách mezi FL 270 a FL 400, které jsou z hlediska leteckého provozu nejvíce důležité, okolní podmínky ve většině případů splňují Schmidt-Applemanovo kritérium. V posledních letech se objevuje otázka, jak dalece kondenzační čáry zvyšují množství vysoké oblačnosti a mění klimatologický nebo chemický stav atmosféry.

V práci je popsáno, jak postupovat v hledání závislostí kondenzačních stop na meteorologických veličinách a typu letadla. Bylo vytvořeno několik modelů pro simulaci a predikci vlastností velkého souboru kondenzačních stop jako funkce daného leteckého provozu a meteorologických podmínek. Modely jsou určeny pro predikci pokryvu kondenzačních dlouhodobých stop. Tato studie může být použita pro analýzu vlivu kondenzační stopy na klima, např. v rámci optimalizačních procesů leteckého systému. Model simuluje životní cyklus kondenzačních stop. V dostatečně chladných a vlhkých vzduchových masách se mezi traťovými body jednotlivých tratí letadel tvoří kondenzační segmenty. Počáteční kondenzační vlastnosti závisí na letadle a nasycení vodních par k vodě. Vývoj kondenzačních čar je sledován na základě okolních meteorologických podmínek, z nichž nejdůležitější je nasycení vodních par k ledu. Kondenzační stopa zmizí, když objemný obsah ledu sublimuje nebo se sráží. Jednoduchý model reprodukuje dobu trvání kondenzačních stop. Středně staré kondenzační stopy mají největší podíl na součinu optické hloubky a šířky kondenzačních stop, které jsou důležité pro dopad na klima. Model byl aplikován na případovou studii a porovnán s několika dalšími klasifikačními metodami pro popsání kondenzačních stop.

Jako nejvýraznější vliv na dobu trvání kondenzačních stop ze sledovaných veličin měla saturace vodních par vzhledem k ledu a pak k vodě. Výsledky studie pak



poukazují na jednoduchou možnost klasifikace závislosti doby trvání kondenzačních stop na meteorologických podmínkách pomocí modelů, s ohledem na unikátnost studie také nabízejí nový náhled do zkoumané problematiky. Na získaných datech porovnáním několika analytických a klasifikačních metod bylo ukázáno, že použití dalších metod již nemá smysl. Nejpřesnější výsledek modelování délky kondenzačních stop dával kategorický diskrétní model a pak lineární regrese. Pro dosažení lepších výsledků je třeba hledat další faktory, které vysvětlují délku kondenzačních stop. Zůstává otevřený problém pro pokračující výzkum a klasifikaci další veličiny, která se podílí na ovlivnění délky kondenzačních stop. Bylo by vhodné zvážit použití sezónnosti jako faktoru pro rozšířený vzorek zkoumání.

Vzhledem k limitacím je však nezbytné v problematice pokračovat a validovat koncept navržené klasifikace na dalším měření kondenzačních stop. V tomto případě by měl být zejména rozšířen soubor sledovaných kondenzačních stop. Dále by bylo vhodné získat meteorologická data, která by byla změřena v blízkosti výskytu kondenzačních stop. Výrazné zlepšení výsledků v budoucnosti by mohla přinést možnost sběru velmi přesných meteorologických dat měřených přímo letadly a to buď z registru BDS 4,4, až bude více letadel vybaveno vlhkostním čidlem a tuto zprávu vysílat. Další možností by bylo použití přesných meteorologických dat z AMDARu, a to v případě navázání spolupráce s ČHMÚ. Zlepšení přesnosti modelu by mohlo přinést sledování kondenzačních stop v blízkosti probíhajícího aerologického měření.

Na výzkumu se bude pokračovat s plánovanou spoluprací s ČHMÚ. Zpřesněná meteorologická data získaná z letadel by mohla poskytnout velmi cenný zdroj pro matematické modelování počasí, modelování oblastí saturovaných ledem a doplnění nezbytných údajů pro tvorbu a délku kondenzačních stop a jejich vlivu na klima.

Vyhodnocení testu hypotéz je následující:

**H1 Existuje statisticky významná závislost mezi vlastnostmi kondenzační stopy, charakterizované vybranými parametry a sledovanými meteorologickými veličinami, resp. klasifikovanými situacemi.**

Hypotéza byla odmítnuta. Závislost mezi kondenzačními stopami a meteorologickými veličinami se podařilo dokázat jen u relativní vlhkosti a omezeně u teploty. U jiných meteorologických veličin nebyla statistickou analýzou signifikantní závislost prokázána.



**H2 Z meteorologických dat lze na základě predikčních modelů odhadnout charakteristiku kondenzačních stop.**

Hypotéza byl přijata. Bylo vytvořeno několik modelů pro predikci a simulaci vlastností kondenzačních stop jako funkce daného leteckého provozu a meteorologických podmínek. Vybrané klasifikační metody dokázaly dostatečně kvalitně klasifikovat dobu trvání kondenzačních stop.





## Seznam použité literatury

- [1] SETVÁK, Martin. Kondenzační stopy za letadly. In: Český hydrometeorologický ústav[online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2009 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-azajimovosti/kondenzacni-stopy>
- [2] SCREEN, J. A. and MACKENZIE, A. R., Aircraft condensation trails and cirrus. *Weather*, May 2004, Vol. 59, No. 5 [online], s. 116–121 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1256/wea.140.03. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1256/wea.140.03/abstract>
- [3] BOUCHNER, Olivier, David RANDALL, Paulo ARTAXO, et al. Clouds and Aerosols: Supplementary Material. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*
- [4] NASA Langley Research Center's Science Directorate Education and Public Outreach Website [online]. Langley, Virginia: NASA, 2016 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://science-edu.larc.nasa.gov>
- [5] APPLEMAN, Herbert. The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft. *Bulletin American Meteorological Society*. 1953, (34), 14-20.
- [6] DUDA, David P.; MINNIS, Patrick. Basic diagnosis and prediction of persistent contrail occurrence using high-resolution numerical weather analyses/forecasts and logistic regression. Part II: Evaluation of sample models. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2009, 48.9: 1790-1802.
- [7] HOLTON, James R., Judith A. CURRY a J. A. PYLE. *Encyclopedia of atmospheric sciences*. Amsterdam; Boston: Academic Press, c2003. ISBN 01-222-7090-8. 71
- [8] HOSPODKA, Jakub. Kondenzační stopy = Contrails. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 24 s. Habilitační přednášky, 14/2016. ISBN 978-80-01-05965-4.
- [9] Contrails – Persistent. The Contrail Education Project. NASA [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://science-edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/contrailspersistent.php>
- [10] Aerodynamic and Rainbow contrails. *Contrail Science* [online]. 2008 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://contrailscience.com/aerodynamic-and-rainbow-contrails/>
- [11] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2004. ISBN 80-868-0809-2



[12] BURKHARDT, Ulrike a Bernd KÄRCHER. Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* [online]. [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1038/nclimate1068. ISSN1758-678x.

Dostupné z: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1068>)

[13] Informace o aerologických měřeních. Český hydrometeorologický ústav [online]. (c)2010-2011 [cit. 2019-04-14].

Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz\\_info.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_info.html)

[14] TOPKOVÁ, Tereza. Identifikace BDS registrů. Praha, 2017, Diplomová práce. ČVUT v Praze

[15] FREI, Jiří. Možnosti získání a využití meteo dat z BDS registrů pro potřeby uživatelů vzdušného prostoru. Praha, 2016. Dizertační práce. ČVUT v Praze.

[16] K. Pstružina: Atlas filosofie vědy (Fond rozvoje MŠMT F5 1747/1999) (Fond rozvoje MŠMT F5 1588/2002)

[17] Metodika závěrečné práce. Lorenc.info [online]. c2007-2013. Dostupné z: <http://lorenc.info/zaverecne-prace/metodika.htm>

[18] Nagy, Ivan: Pokročilé statistické metody a jejich aplikace [online]. 2013. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/nagyivan/Doktorandi/LecturesPhD.pdf>

[19] Řezáčová a kol., Fyzika oblaků a srážek, Academia, 2007, ISBN 978-80-200-1505-1

[20] Schumann, U., On conditions for contrail formativ from aircraft exhausts. 1996, *Meteor Z.*, 5: 4-23

[21] Rychlý Marek: Klasifikace a predikce [online]. 2009. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~rychly/public/docs/classification-and-prediction/xhtml/classification-and-prediction.xhtml>

[22] Kopáček, J., Bednář, Žák, M.: Jak vzniká počasí, Univerzita Karlova 2019. ISBN: 978-80-246-4423-3

[23] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001. Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)



[24] Blažek J., Rábl V. Zpracování a využití ropy. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-619-2/pages-img/](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-619-2/pages-img/)

[25] HEYMSFIELD, Andrew, Darrel BAUMGARDNER, Paul DEMOTT, Piers FORSTER, Klaus GIERENS a Bernd KÄRCHER. Contrail Microphysics. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2010, **91**(4), 465-472 [cit. 2022-01-25]. DOI: 10.1175/2009BAMS2839.1. ISSN 0003-0007. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009BAMS2839.1>

[26] Aircraft Contrails Factsheet. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/media/contrails.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/contrails.pdf)

[27] SCHUMANN, Ulrich. Formation, properties and climatic effects of contrails. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2005, **6**(4-5), 549-565 [cit. 2022-01-28]. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.05.002. ISSN 16310705. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631070505000563>

[28] SCHUMANN, Ulrich. Influence of propulsion efficiency on contrail formation. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2000, **4**(6), 391-401 [cit. 2022-01-28]. DOI: 10.1016/S1270-9638(00)01062-2. ISSN 12709638. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1270963800010622>

[29] WMO, Instruments and Observing Methods Report No. 133. Tests, Comparisons and Operational Performance of the Water Vapor Sensing Systems (WVSS-II), WMO 2019

[30] WMO-No. 958, Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual, WMO 2003, ISBN 92-63-10958-3

[31] Post-COVID-19 Forecasts Scenarios, ICAO. Dostupné z: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Post-Covid-Forecasts-Scenarios.aspx>

[32] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001. Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)

[33] Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United



Kingdom and New York, NY, USA. Dostupné z: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)

[34] D.S. Lee, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestvedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, L.J. Wilcox, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, Volume 244, 2021, 117834, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>

[35] Wilkerson, J. T., Jacobson, M. Z., Malwitz, A., Balasubramanian, S., Wayson, R., Fleming, G., Naiman, A. D., and Lele, S. K.: Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6391–6408, <https://doi.org/10.5194/acp-10-6391-2010>, 2010. Dostupné z: <https://acp.copernicus.org/articles/10/6391/2010/acp-10-6391-2010.pdf>

[36] Bock, L. and Burkhardt, U.: Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8163–8174, <https://doi.org/10.5194/acp-19-8163-2019>, 2019. Dostupné z: <https://acp.copernicus.org/articles/19/8163/2019/>

[37] D.S. Lee, G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J.E. Penner, A. Petzold, M.J. Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Berntsen, D. Iachetti, L.L. Lim, R. Sausen, Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation, *Atmospheric Environment*, Volume 44, Issue 37, 2010, Pages 4678–4734, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009004956>)

[38] PENNER, Joyce E., David H. LISTER, David J. GRIGGS, David J. DOKKEN a Mack MCFARLAND. *IPCC Special Report - Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policymakers* [online]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999. Dostupné také z: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf>

[39] Global radiative forcing from contrail cirrus Ulrike Burkhardt\* and Bernd Kärcher. Dostupné z: <https://elib.dlr.de/69600/1/nclimate1068.pdf>

[40] Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, doi:10.1017/9781009157896.007 Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter05.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf)

[41] Mauro Masiol, Roy M. Harrison, Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review, *Atmospheric Environment*, Volume 95, 2014, Pages 409-455, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014004361>)



[42] Shonija, N. K., Popovicheva, O. B., Persiantseva, N. M., Savel'ev, A. M., and Starik, A. M. (2007), Hydratace částic sazí leteckých motorů za podmínek oblaku: Účinek zpracování kyseliny sírové a kyseliny dusičné, *J. Geophys. Res.*, 112, D02208, doi:10.1029/2006JD007217.

[43] ŘLP ČR s. p., LETECKÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA. AIP GEN 1.5-1. Dostupné také z: [https://aim.rlp.cz/ais\\_data/aip/data/valid/g1-5.pdf](https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/g1-5.pdf)

[44] Prováděcí nařízení Komise (EU) č. 1207/2011 ze dne 22. listopadu 2011, kterým se stanoví požadavky na výkonnost a interoperabilitu přehledu v jednotném evropském nebi. *Eur-lex.europa.eu* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1396865968400&uri=CELEX:32011R1207>

[45] Kärcher, B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nat Commun* 9, 1824 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>

[46] Lán, S., Topková, T., Kameníková, I. Aircraft Contrail Research. In Proceedings of the Young Transportation Engineers Conference 2018, Praha, Czech Republic, 1 November 2018

[47] GRECO, Christopher. *Data science tools: R, Excel, KNIME & OpenOffice*. Dulles, Virginia: Mercury Learning and Information, [2020]. ISBN 9781683925835.

[48] MALÝ, Marek. Vícevrstvé dopředné neuronové sítě: úvod do teorie a aplikací. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Přírodovědecká fakulta, 2007. ISBN 978-80-7044-915-8.

[49] Lán S, Hospodka J. Contrail Lifetime in Context of Used Flight Levels. *Sustainability*. 2022; 14(23):15877. <https://doi.org/10.3390/su142315877>

[50] Schrader, M.L. 1996. Calculations of Aircraft Contrail formation Critical Temperatures, *Journal of Applied Meteorology* 36(12): 1725-1729.

[51] Xu, D. and Tian, Y.A. (2015) Comprehensive Survey of Clustering Algorithms. *Annals of Data Science*, 2, 165-193. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s40745-015-0040-1>

[52] VAISALA. Vaisala Radiosonde RS41 Measurement Performance. 2013. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/White%20paper%20RS41%20Performance%20B211356EN-A.pdf>

[53] Radiosonde RS41-SG Datasheet. Vaisala.com [online]. Vaisala, 2020 [cit. 2023-05 28]. Dostupné z: <https://docs.vaisala.com/v/u/B211321EN-K/en-US>

[54] SCHUMANN, U. Atmospheric physics: background, methods, trends. New York: Springer, 2012. Research topics in aerospace. ISBN 36-423-0182-7.



[55] European Commission, Joint Research Centre, 'Předpojatost korigovaná vysokým rozlišením teploty a srážení pro Evropu v denním časovém rozlišení z regionálního klimatického modelu DMI HIRHAM5 poháněného mezními podmínkami globálního modelu oběhu ECHAM5 podle scénáře SRES A1B, 1961–2099 (ENSEMBLES), 2015 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: [http://data.europa.eu/89h/jrc-climate-dmi-hirham5\\_a1b\\_echam5\\_eobs\\_1961-1990\\_1961-2100](http://data.europa.eu/89h/jrc-climate-dmi-hirham5_a1b_echam5_eobs_1961-1990_1961-2100).

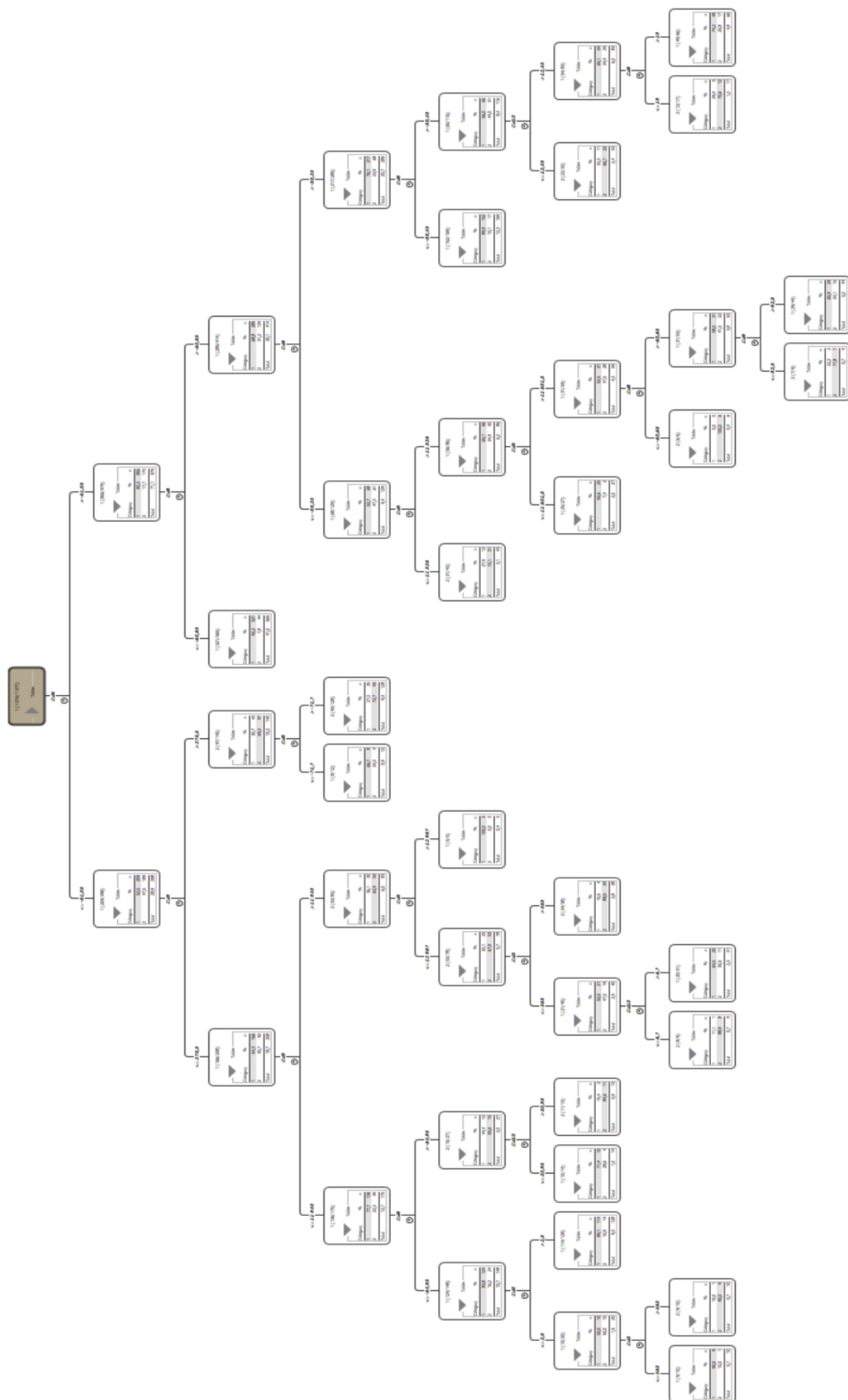


## Přílohy

- A Rozhodovací strom
- B Modely v Knime
- C Ukázka pseudotempu
- D Program Diskrétního kategorického modelu
- E Kódování letadel

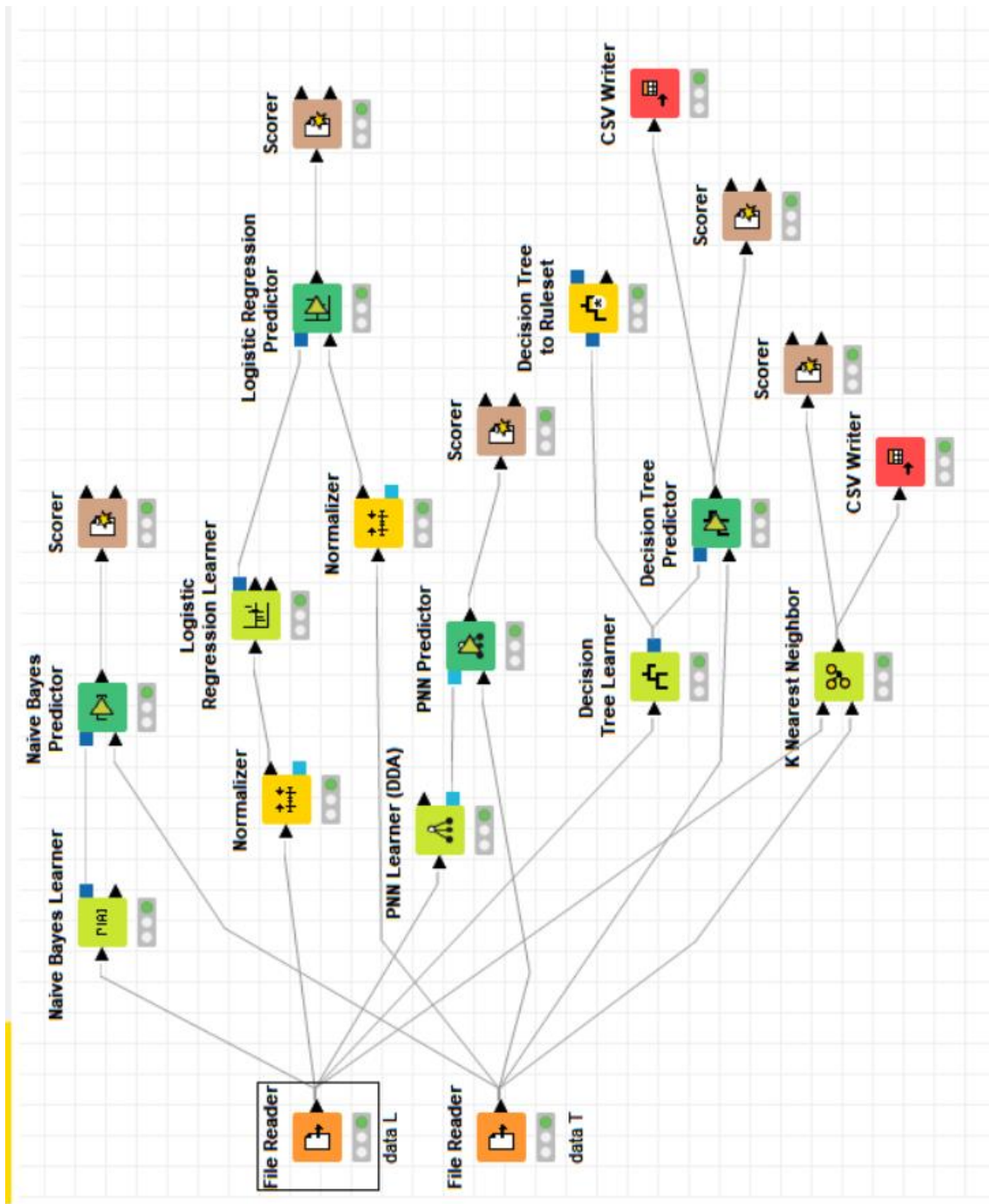


A Rozhodovací strom





B Modelování programu v prostředí KNIME





C Ukázka pseudotempu ze dne 27.7.2020 11 UTC

```
# ALADIN profile for station L0034 //// 'Usti nad Labem'
# (lon = 14.047deg, lat = 50.667deg, alt_model = 224m)
# start: 27-07-2020 11 UTC
# valid: 27-07-2020 11 UTC (analysis)
#lev // hhhhh pppp.p ttt.t HHH dddd.d DDD fff.f
#      [m] [hPa][deg C][%][deg C][deg] [m/s]
088 99 226 990.5 26.3 40 11.7 /// ////
087 99 234 989.5 24.7 44 11.5 129 1.1
086 99 257 987.0 24.0 45 11.2 129 1.2
085 99 282 984.2 23.5 45 11.0 130 1.3
084 99 311 980.9 23.1 46 10.9 132 1.3
083 99 344 977.2 22.7 47 10.7 134 1.3
082 99 381 973.1 22.2 48 10.6 136 1.3
081 99 421 968.6 21.7 49 10.4 139 1.3
080 99 465 963.7 21.3 49 10.3 142 1.4
079 99 512 958.4 20.7 51 10.1 145 1.4
078 99 563 952.8 20.2 52 9.9 148 1.4
077 99 618 946.7 19.6 53 9.8 152 1.4
076 99 676 940.4 19.0 54 9.6 156 1.5
075 99 738 933.6 18.4 55 9.4 159 1.5
074 99 803 926.6 17.8 57 9.1 163 1.5
073 99 872 919.1 17.1 59 8.9 166 1.6
072 99 944 911.3 16.4 60 8.6 170 1.6
071 99 1020 903.2 15.6 61 8.2 172 1.7
070 99 1100 894.7 14.9 62 7.8 176 1.7
069 99 1184 885.9 14.1 63 7.3 182 1.7
068 99 1272 876.8 13.4 64 6.8 190 1.8
```



D Program Diskrétního kategorického modelu

```
// Načtení a úprava dat

dat=csvRead('Tab.csv',';');

s=[];

for t=1:size(dat,1)

    if ~isnan(sum(dat(t,:)));

        s=[s t];

    end

end

dt=dat(s,:);

nd=length(s);

// Diskretizace

xp=dt(:,7:9);

xq=scal(xp);

x=ones(nd,3);

for i=1:3

    xi=xq(:,i);

    mxi=mean(xi);

    sxi=stdev(xi);

    s=find(xi>mxi-sxi); x(s,i)=2;

    s=find(xi>mxi); x(s,i)=3;

    s=find(xi>mxi+sxi); x(s,i)=4;

end

yy=dt(:,12);
```



```
y=ones(nd,1);  
  
s=find(yy>300);  
  
y(s)=2;  
  
  
// Kódování vysvětlujících veličin  
for t=1:nd  
    z(t)=xt2col(x(t,:),[2 2 2]);  
end  
  
  
// Diskrétní model  
[f,t]=pfXY(y,z,2,8);  
  
  
// Predikce  
for t=1:nd  
    r=xt2col(x(t,:),[2 2 2]);  
    fp=f(:,r);  
    yp(t)=amax(fp);  
end  
  
  
// Výsledky  
Accuracy = acc(y,yp)
```



E Kódování letadel

"1" "A321"	"25" "CL60"
"2" "A380"	"26" "B757-300"
"3" "A320"	"27" "A340"
"4" "B777-300"	"28" "CL5"
"5" "A330"	"29" "GLEX"
"6" "B737-800"	"30" "B767-400"
"7" "B767"	"31" "A318"
"8" "B767-300"	"32" "CS300"
"9" "B737-900"	"33" "E190"
"10" "E195"	"34" "B787-10"
"11" "B787-8"	"35" "B737-300"
"12" "B787-9"	"36" "B787-800"
"13" "A319"	"37" "B37-800"
"14" "B777-200"	"38" "E-3A"
"15" "B747-8"	"39" "Falcon 8X"
"16" "A350"	"40" "G-IV"
"17" "B757-200"	"41" "AW169 - vrtulník"
"18" "B737-700"	"42" "CHYBÍ"
"19" "FA7X"	"43" "BD700"
"20" "B747-400"	"44" ""
"21" "B777-F"	"45" "G650"
"22" "???"	"46" "An124"
"23" "B737-400"	"47" "E170"
"24" "C25C"	"48" "737-800"