

# NASTANEK KONDENZACIJSKIH SLEDI ZA LETALI

MANCA FIFNJA

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

V članku je pojasnjeno fizikalno ozadje nastanka kondenzacijskih sledi za letali. V prvem delu članka je opisana zgodovina raziskovanja kondenzacijskih sledi in različne teorije za njihovo nastajanje, v nadaljevanju pa je podrobneje predstavljena Schmidt/Appleman teorija. V drugem delu članka so predstavljeni vplivi kondenzacijskih sledi na ozračje in vplivi različnih pogojev na nastanek kondenzacijskih sledi. Predstavljen je potencial za nastanek kondenzacijskih sledi, prekritost s kondenzacijskimi sledmi zaradi letalskega prometa, vpliv višine leta in vpliv pogonskega izkoristka letala. V zadnjem delu je na kratko opisano še ravnovesje med vplivom izpustov ogljikovega dioksida in kondenzacijskih sledi na ozračje.

## CONTRAIL FORMATION FROM AIRCRAFT EXHAUSTS

The paper explains the theoretical background regarding contrails. The first part of the paper presents the history and theory of contrail formation, followed by a detailed presentation of the Schmidt-Appleman theory. The second part presents the impact of contrails on the atmosphere and reviews different conditions for contrail formation. The potential for contrail formation is presented, along with the coverage of contrails due to air traffic, the influence of flight elevation, and the influence of aircraft propulsive efficiency. The final part describes the balance between the influence of carbon dioxide emissions and the influence of contrails on the atmosphere.

### 1. Uvod

Dolgi in ozki oblaki, ki pogosto nastanejo za letali, se imenujejo kondenzacijske sledi, ang. contrails. Te nastanejo zaradi kondenzacije vodne pare, ki izhaja iz motorja letala, na že obstoječih trdih delcih v ozračju, aerosolu, ali na delcih iz izpusta letala. Za nastanek kondenzacijskih sledi mora biti okoliški zrak dovolj hladen, tipično hladnejši od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , točna mejna temperatura pa je odvisna od zračnega tlaka in relativne vlažnosti okolice, količine sproščene toplote in vodne pare izpuščene iz letala [1].

Letalski izpusti lahko na ozračje vplivajo na več različnih načinov, najbolj opazne pa so ravno kondenzacijske sledi. Tako kot izpuhi iz letalskih motorjev, tudi nastale kondenzacijske sledi povzročajo klimatološke spremembe, intenzivnost le-teh pa je odvisna od površine, ki jo prekrivajo kondenzacijske sledi, in njihove debeline. Nastali oblaki odbijajo del sončnega sevanja in s tem preprečijo delu sončnega sevanja, da prispe do tal in posledično se tla manj ogrejejo. Hkrati pa nastali oblaki tudi povečujejo efekt tople grede, saj vpijejo dolgovalovno sevanje od tal, ter ga oddajo nazaj in s tem segrevajo tla. Vsota teh dveh učinkov je seveda odvisna od mnogih spremenljivk, vendar večinoma velja, da je sevalni učinek teh dveh prispevkov pozitiven in kondenzacijske sledi prispevajo k ogrevanju ozračja [2].

Globalni potencial prekritosti, ki predstavlja pogosto stanje ozračja nad nekim območjem, na katerem bi kondenzacijske sledi lahko nastale, in območje dejanske prekritosti s kondenzacijskimi sledmi sta izračunana na podlagi analiz meteoroloških spremenljivk in porabe goriva. Izračunan globalni potencial prekritosti znaša približno 16 %. Pri izračunu dejanske prekritosti je potrebno upoštevati, da je le-ta odvisna od območja, kjer bi kondenzacijske sledi sploh lahko nastale (potencialne prekritosti), ter od gostote dejanskega letalskega prometa. Te vrednosti na letni ravni ponavadi dosežejo maksimum pri malo več kot 5 % in se ravnaajo po letnem ciklu, kjer so večje vrednosti značilne za zimске mesece, manjše pa za poletne [3].

## 2. Zgodovina in teorije o nastanku kondenzacijskih sledi

Raziskovanje nastanka kondenzacijskih sledi za letali se je začelo leta 1919. Avstrijski fizik Ettenreich je tistega leta objavil prvo poročilo [4] o opazovanju kondenzacijskih sledi, v katerem je opazovanje iz leta 1915 na Južnem Tirolskem opisal kot: "kondenzirana kumulusna črta iz izpušnih plinov letala je bila nekaj časa vidna na nebu". Čeprav je veliko raziskovalcev predlagalo pravilno razlago za nastanek, je ta ostala nepotrjena še dolgo časa. Med drugim so razlago za nastanek iskali v zmanjšanju zračnega tlaka, kar naj bi vodilo do nasičenosti, v vibracijah motorja, v spremembah električnih lastnosti in v turbulenci, ki jo povzroči vrtenje propelerjev in je vzrok za mešanje zraka, ter v oddani toploti, ki bi lahko povzročila konvektivne oblake. Velika količina različnih predlogov za nastanek je posledica pomanjkanja znanja o procesu nastanka oblakov v tistem času [1].

Letalo med letom porablja energijo, ki nastane pri izgorevanju ogljikovodikov, med katerim se sprošča tudi vodna para. Reakcijo izgorevanja lahko zapišemo kot



Možnost, da vodna para, izločena iz motorjev, povzroča prenasičenost<sup>1</sup>, ki vodi v nastanek oblakov, je bila predstavljena že zelo zgodaj. Dolgo časa te možnosti niso sprejeli, saj so predvidevali, da je okoliški zrak presuh za nastanek oblakov in količina vodne pare izpuščene iz motorja premajhna, da bi z njo lahko razložili velike razsežnosti nastalih oblakov.

Temperatura, pri kateri lahko nastanejo kondenzacijske sledi, je odvisna od zračnega tlaka, relativne vlažnosti okoliškega zraka, količine sproščene toplote in vodne pare izpuščene iz letala, pogosto pa velja mejna vrednost  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  na višini približno 10 km. Pri dovolj nizkih temperaturah lahko kondenzacijske sledi nastanejo tudi v popolnoma suhem zraku.

Kondenzacijske sledi nastanejo blizu za letali (10-20 m za koncem letala) in niso obstojne, kadar se mešajo s suhim okoliškim zrakom. Obstojnejše kondenzacijske sledi nastanejo, kadar je okoliški zrak prenasičen glede na ledeno površino, ter obstajajo, dokler relativna vlaga zaradi mešanja z okoliškim zrakom ne pade pod 100 %.

Veliko avtorjev je predlagalo tudi, da delci aerosola iz izpusta letala delujejo kot kondenzacijska jedra<sup>2</sup>, na katerih v prenasičenem zraku nastanejo kapljice ali ledeni delci. Opazovanja kažejo, da najprej nastanejo tekoči hidrometeorji<sup>3</sup>, ki nato zamrznejo. Agregatno stanje hidrometeorjev ima velik vpliv na razvoj kondenzacijskih sledi, saj ledeni delci rastejo veliko hitreje kot vodne kapljice. S poskusi so ugotovili, da kondenzacijska sled izgine, ko se zmanjša moč motorja. S tem se namreč zmanjša količina izpustov vodne pare, oddana toplota pa ostane približno enaka zaradi vročega motorja z veliko toplotno kapaciteto. Ker pri tem za letalom še vedno ostajajo delci aerosola iz izpustov, na njih pa se ne razvijejo oblaki, lahko potrdimo, da kondenzacijske sledi nastajajo zaradi izpustov vodne pare in ne zaradi delcev aerosola, na katerih bi se lahko voda kondenzirala. Ta trditev je bila kasneje potrjena tudi z dejstvom, da "sajenje" čistega zraka s prašnimi delci ni povzročilo formacije ledenih oblakov, tudi na območjih, kjer so obstajali pogoji za nastanek kondenzacijskih sledi.

Kondenzacijske sledi pa lahko nastanejo tudi pri višjih temperaturah, tudi nad  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zaradi aerodinamičnih vzrokov. Za krili letala namreč nastopi zmanjšanje zračnega tlaka, maksimalno zmanjšanje pa se pojavi pri koncih kril. Padeč tlaka je načeloma premajhen oziroma traja premalo časa, da bi bil pomemben za nastanek daljših in obstojnejših kondenzacijskih sledi, nastanejo pa lahko manjše sledi, ki jih lahko opazujemo na nizkih višinah v vlažnem zraku.

<sup>1</sup>Do prenasičenja pride, kadar je delni tlak vodne pare (parni tlak) višji od nasičenega parnega tlaka, ki je funkcija temperature in ga opiše Clausius-Clapeyronova relacija.

<sup>2</sup>Kondenzacijska jedra so nujno potrebna za nastanek vodnih kapljic. V čistem zraku, kjer ni kondenzacijskih jeder, bi kapljice namreč nastale pri veliko večji relativni vlažnosti.

<sup>3</sup>Izraz hidrometeorji se uporablja za vse vrste padavin, ki padajo z oblakov.

## 2.1 Lastnosti delcev

Obstanek kondenzacijskih sledi je v veliki meri odvisen tudi od agregatnega stanja hidrometeorjev. Stanje, število in velikost hidrometeorjev vplivajo na vidnost kondenzacijskih sledi, na čas potreben za izhlapevanje kondenzacijskih sledi, na sevalno bilanco ozračja in na sedimentacijo hidrometeorjev. Hidrometeorji morajo za sedimentacijo zrasti do dovolj velike mere, ki je omejena s količino vode v okoliškem zraku, ta pa je odvisna od relativne vlažnosti in temperature okolice. Sedimentacija lahko vodi v sušenje zgornje troposfere in lahko povzroči padavine iz podhlajenih vodnih oblakov<sup>4</sup> pod kondenzacijskimi sledmi.

## 2.2 Opazovanja in eksperimenti

Projekt Cloud Trail je predstavil statistiko, bazirano na opazovanjih kondenzacijskih sledi na 23 višinskih postajah v ZDA. Opazovanja so trajala eno leto, med decembrom leta 1954 in decembrom leta 1955. Opazovanja so izvajali piloti, ki so vsakodnevno letali v okolici izbranih postaj ter se pri tem dvigali vse do dovoljene višine [5]. Rezultati so bili predstavljeni kot verjetnost za nastanek kondenzacijskih sledi v primerjavi s temperaturo na različnih višinskih nivojih in kot linije konstantnih verjetnosti za nastanek kondenzacijskih sledi na p-T diagramu za različne letne čase. Kasneje so bila razvita tudi pravila za napovedovanje pojava kondenzacijskih sledi in njihovega trajanja. Območja, ki so primerna za nastanek kondenzacijskih sledi, so:

1. območja nizkega zračnega pritiska v zgornji troposferi in območja visokega zračnega pritiska v spodnji stratosferi
2. celotna 200 hPa ploskev v zimskem času
3. severno od 35° pozimi in severno od 60° poleti na severni polobli na 300 hPa ploskvi
4. v vetrovnih strženih na desni strani glede na smer vetra
5. 600 m gor in dol od višine tropopavze
6. območja, kjer nastajajo cirusni oblaki

Kasneje so bila ponovno izvedena opazovanja, ki so trajala eno leto. V tem času je bilo izvedenih 4387 opazovanj pri višinah pod 12 km in 1040 opazovanj pri višinah nad 12 km vse do 20 km. Kondenzacijske sledi so se pojavile tudi zelo nizko, že na 3 km višine. Leti nad višino 10.7 km so povzročili nastanek kondenzacijskih sledi v več kot 50 % primerov in 85 % pri letih nad 12 km. Leti v zraku toplejšem od -40 °C so povzročili nastanek kondenzacijskih sledi le v 20 % primerov, delež pa je presegel vrednost 73 % pri temperaturah pod -50 °C. Verjetnost za nastanek kondenzacijskih sledi je približno dvakrat večja v območjih z vertikalnim dviganjem zraka. Vertikalno dviganje namreč pomeni prenos zraka z določeno količino vlage v višje ležeče območje, kjer se ta delec zraka adiabatno razpne, pri tem opravi delo na račun notranje energije, ter se ohladi. Pri tem se zmanjša nasičen parni tlak in poveča relativna vlažnost [1].

Opazovanja so primerjali z Applemanovim kriterijem, ki je opisan v nadaljevanju v poglavju 3, pri čemer so privzeli relativno vlažnost troposfere 40 % , 70 % v bližini tropopavze in 10 % v stratosferi. Za opazovanja pri višinah manjših od 12 km je metoda pojasnila 98 % primerov brez pojava kondenzacijskih sledi in le 27 % primerov, kjer so se kondenzacijske sledi pojavile. Izkazalo se je, da je metoda podcenjevala nastanek kondenzacijskih sledi v troposferi. Vzrok za to sledi iz dejstva, da se le del toplote sproščene pri izgorevanju v obliki kinetične energije odda za poganjanje letala. Delež  $\eta$ , ki ga imenujemo pogonski izkoristek letala, predstavlja količino dela porabljenega za premikanje letala v primerjavi z vso sproščeno energijo pri izgorevanju goriva in ga lahko izračunamo za vsak motor posebej. Z upoštevanjem tega popravka so se rezultati izboljšali - 71 % pravilno

<sup>4</sup>V podhlajenih vodnih oblakih je voda v tekočem stanju pri temperaturah pod zmrziščem, saj v njih ledeni kristalčki ne morejo nastati, zaradi odsotnosti kondenzacijskih delcev.

napovedanih pojavov kondenzacijskih sledi in 82 % pravilno napovedanih dogodkov brez nastanka. Pogonski izkoristek  $\eta$  se izračuna po formuli

$$\eta = FV/Q\dot{m}_F \quad [\%], \quad (2)$$

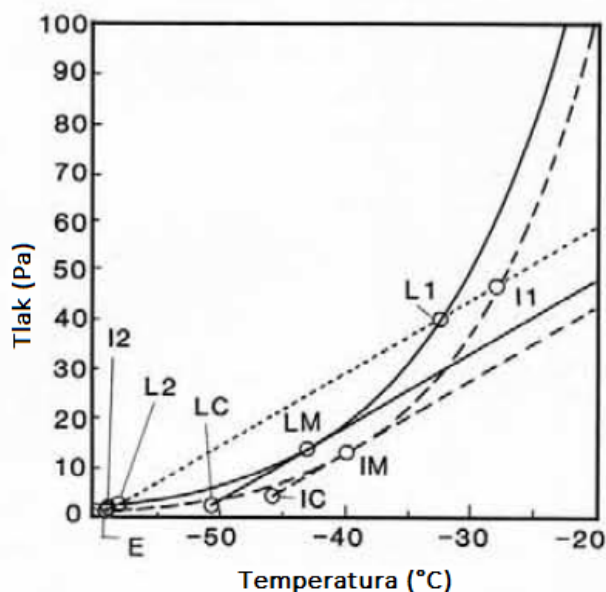
pri čemer je  $F$  [N] sila potiska,  $V$  [m/s] hitrost letala,  $Q$  [J/kg] specifična toplota pri izgorevanju goriva in  $\dot{m}_F$  [kg/s] masni pretok goriva. Vrednost  $\eta$  znaša za moderne motorje približno 0.3 - 0.4 in je višja v primerjavi s starejšimi. Pogonski izkoristek letala je opisan tudi v Dodatku 2.

### 3. Schmidt/Appleman teorija

V gorivu, ki se uporablja v letalstvu, prevladujejo molekule ogljika in vodika. Pri izgorevanju takega goriva nastane  $EI_{H_2O}$  enot mase vodne pare na enoto mase goriva, kjer  $EI_{H_2O}$  [g/kg] predstavlja t.i. emisijski faktor za vodno paro. Vodna para iz izpušnih plinov se meša z okoliškim zrakom in doda k koncentraciji vodne pare (t.i. specifični vlagi  $q_E$  [g/kg]) v okolici. Koncentracija vodne pare (specifična vlaga) v izpušnih letala  $q_P$  je povezana s parcialnim tlakom vodne pare v izpustu  $e_P$  [Pa] preko enačbe

$$q_P = \epsilon \frac{e_P}{p} \quad [\text{g/kg}], \quad (3)$$

pri čemer je  $\epsilon = M_{H_2O}/M_{\text{air}} = 0.622$  in  $p$  [Pa] zračni tlak.



**Slika 1.** Graf parcialnega tlaka vodne pare v odvisnosti od temperature z linijama nasičenosti nad vodo (polna krivulja) in nasičenosti nad ledom (črtkana krivulja), ter linijami ohlajanja zraka iz izpuštov, pri čemer v primeru dolge črtkane črte ne pride do nastanka kondenzacijskih sledi, v primeru polne črte pride do nastanka v eni točki, v primeru kratke črtkane črte pa pride do močnega nasičenja z vodo in s tem nastanka kondenzacijske sledi [1].

Nadaljnja izpeljava, ki je opisana v članku [1], nas pripelje do pomembne enačbe:

$$\frac{\Delta e}{\Delta T} = \frac{e_P - e_E}{T_P - T_E} = G, \quad \text{kjer je} \quad G = \frac{EI_{H_2O}c_p p}{\epsilon Q(1 - \eta)} \quad [\text{Pa/K}] \quad (4)$$

gradient linije mešanja, ki ga potrebujemo za izračun mejnih vrednosti temperature. Pri izračunu predpostavimo konstantno vrednost specifične toplotno pri konstantnem tlaku  $c_p^5$  [J/kgK] in plinasto fazo. V enačbi  $Q$  predstavlja specifično toploto, ki nastane pri izgorevanju,  $T_P$  temperaturo

<sup>5</sup>Specifična toplotna kapaciteta pri konstantnem tlaku  $c_p$  je v splošnem funkcija temperature, za veliko razredčenje, kjer se temperatura izpušnih plinov spusti pod 50 °C pa uporabimo konstantno vrednost  $c_p = 1004$  J/kgK.

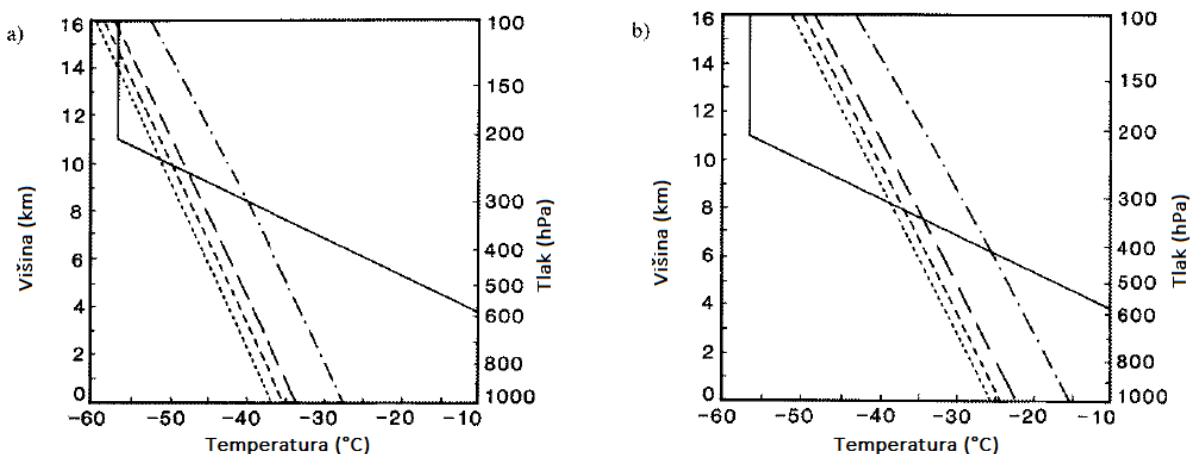
izpustov,  $T_E$  in  $e_E$  pa predstavljata temperaturo in parcialni tlak vodne pare v okoliškem zraku. Linija ohlajanja lahko seka krivuljo nasičenosti nad vodo (nad ledom), če je temperatura okolice  $T_E$  nižja od mejne vrednosti temperature  $T_{LC}$  ( $T_{IC}$ ). Pri mejnih pogojih  $T_E = T_{LC}$  ( $T_{IC}$ ) se linija ohlajanja dotakne krivulje nasičenosti pri temperaturi  $T_{LM}$  ( $T_{IM}$ ). Te kritične vrednosti temperature lahko izračunamo preko enačb

$$T_{LC} = T_{LM} - \frac{e_L(T_{LM}) - Ue_L(T_{LC})}{G} \quad \text{in} \quad T_{IC} = T_{IM} - \frac{e_I(T_{IM}) - Ue_I(T_{IC})}{G}. \quad (5)$$

V zgornjih enačbah  $U$  predstavlja vrednosti relativne vlage okoliškega zraka, tako da pri  $U = 1$  velja  $T_{LC,IC} = T_{LM,LC}$ , pri  $U = 0$  pa zavzameta vrednosti minimume.

Slika 1 prikazuje graf parcialnega tlaka vodne pare v odvisnosti od temperature. Polna krivulja prestavlja linijo nasičenosti nad vodo, črtkana krivulja pa linijo nasičenosti nad ledom. Ostale tri črte predstavljajo adiabatno ohlajanje izpustov s temperaturo  $T_P$  in parcialnim tlakom  $e_P$  do temperature  $T_E$  in parcialnega tlaka  $e_E$  okoliškega zraka. Pri tem opazujemo, ali bo linija sekala katero od krivulj nasičenosti. Če linija seka krivuljo nasičenosti nad vodo, je do nastanka kondenzacijskih sledi prišlo. Razlog, zakaj sekanje krivulje za nasičenost nad ledom ni dovolj za nastanek kondenzacijskih sledi, izhaja iz dejstva, da lahko kapljice vode nastanejo na večini delcev aerosola, led pa le na določenih. Na sliki 1 so torej prikazani 3 različni dogodki. Pri prvem, ki ga opisuje dolga črtkana črta, do nastanka kondenzacijskih sledi ne pride, pri drugem, ki ga opisuje polna črta, lahko nastane kondenzacijska sled le v eni točki, pri dogodku prikazanem s kratko črtkano črto pa pride do močnega nasičenja z vodo in s tem tudi nastanka kondenzacijske sledi. Na grafu so označene tudi točke, ki so bile omenjene zgoraj.

Slika 2 prikazuje Schmidt-Applemanov diagram z mejno temperaturo  $T_{LC}$  pri različnih relativnih vlažnostih in profilom temperature in tlaka iz standardne atmosfere. Standardna atmosfera je opisana v Dodatku 1.



**Slika 2.** Schmidt-Applemanov diagram z mejno temperaturo  $T_{LC}$  pri različnih relativnih vlažnostih ( $U = 0$  pikčasta črta,  $U = 30\%$  kratko črtasta črta,  $U = 60\%$  dolgo črtasta črta,  $U = 100\%$  črtasta in pikčasta črta) in profilom temperature in tlaka iz standardne atmosfere (polna črta). Slika (a) prikazuje graf za kerozin in učinkovitost pogona  $\eta = 0.3$ , slika (b) pa za vodikovo gorivo in enako vrednost  $\eta$ . [1]

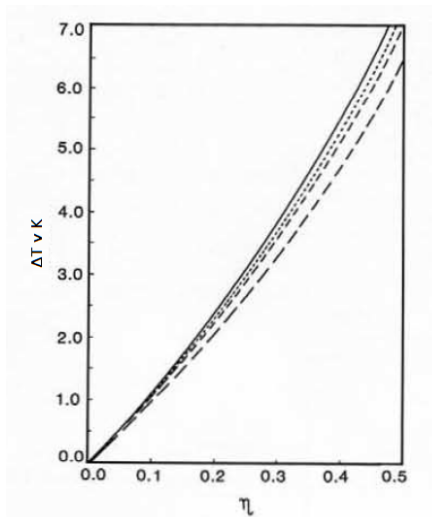
V območjih nizkih temperatur kondenzacijske sledi za letali nastanejo tudi v povsem suhem zraku. Za temperaturo okolice med vrednostjo  $T_{LC}$  pri  $U = 0$  in  $100\%$  nastanejo kondenzacijske sledi, če vlažnost okolice doseže določeno vrednost. Pri temperaturah nad  $T_{LM}$  ( $T_{LC}$  za  $U = 100\%$ ) se kondenzacijske sledi ne bodo pojavile. Za standardno atmosfero tako velja, da kondenzacijske sledi nastanejo v višinah nad 8.4 km in pod 14 km. Nastanek obstojnih kondenzacijskih sledi pričakujemo

v območjih, kjer okoliška relativna vlaga presega vrednost nasičenosti glede na led. To je mogoče pri vseh temperaturah pod  $T_{LM}$ .

Iz Slike 2 lahko opazimo, da je nastop kondenzacijskih sledi pri višjih temperaturah mogoče pričakovati pri uporabi goriv tekočega vodika ali tekočega metana, in sicer nastopijo mejne temperature pri približno 10 K višjih temperaturah pri uporabi vodikovega goriva. Pri pogojih standardne atmosfere bi se kondenzacijske sledi tako lahko pojavile med 6.3 km in 19.5 km višine. Pri uporabi tekočega metana bi se kondenzacijske sledi pojavile pri 4.5 K višjih temperaturah v primerjavi s kerozinom. Manj kondenzacijskih sledi je pričakovati pri gorivih z malo vsebnostjo vodika.

Na Sliki 3 je prikazano naraščanje kritične temperature z  $\eta$  pri relativni vlagi 100 % in na različnih nivojih zračnega tlaka. Kritična temperatura narašča za približno 1.4 K na 10 % povišanja pogonskega izkoristka letala. Iz tega lahko sklepamo, da novejša letala, ki imajo višje vrednosti  $\eta$ , povzročajo kondenzacijske sledi pri nižjih višinah kot starejša letala. Za 10 % večji pogonski izkoristek letala in profil standardne atmosfere se kondenzacijske sledi pojavijo pri približno 280 m nižjih višinah v troposferi in približno 800 m višje v stratosferi.

Kondenzacijske sledi nastanejo, kadar velja  $T_E < T_{LM}$ . V nasprotnem primeru so lahko zgodni, da motor odda več toplote kot vlage in s tem zmanjša relativno vlažnost v zraku za letalom. Takrat za letali nastanejo disipacijske sledi, ang. distrails, pri čemer izhlapijo oblaki na poti letala.



**Slika 3.** Graf naraščanja mejne vrednosti temperature z učinkovitostjo pogona  $\eta$ . Črte predstavljajo vrednosti pri relativni vlagi  $U = 100\%$ , pri čemer črtkana črta z dolgimi črtami predstavlja vrednosti pri  $p = 100$  hPa, polna črta vrednosti pri  $p = 400$  hPa, med njima pa ležijo še vrednosti pri  $p = 200$  hPa in  $p = 300$  hPa. [1]

#### 4. Vpliv na ozračje

Izpusti izločeni iz letala vplivajo na naše ozračje na veliko načinov:

1. izpusti vsebujejo snovi, ki so sevalno aktivne
2. izpusti vsebujejo snovi, ki povzročijo nastanek ali uničijo snovi, ki so sevalno aktivne
3. izpusti povzročijo nastanek kondenzacijskih sledi

Kondenzacijske sledi imajo lahko velik vpliv na ozračje, pri čemer pa je intenziteta vpliva odvisna od velikosti območja, ki ga kondenzacijske sledi prekrivajo, ter njihove debeline. Prav tako je vpliv kondenzacijskih sledi na ozračje odvisen od razmerja odbitega sončnega sevanja nastalih oblakov in povečanega efekta tople grede.

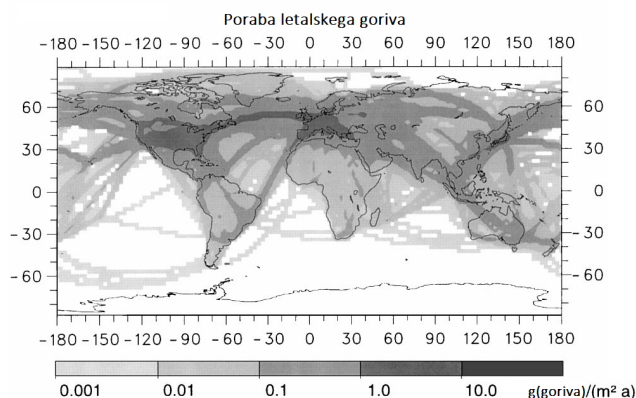
Za analizo v nadaljevanju so se uporabljali meteorološki podatki iz meteorološkega modela ECMWF in popis letalskih emisij DLR-2 za podatke o letalskem prometu [3].

### ECMWF reanalize

Numerične meteorološke analize so odvisne od meritev, katerih gostota in kvaliteta se spreminjata skozi čas. Načini merjenja so se skozi čas spreminjali in nastajali so novi zaradi želje po izboljšanju natančnosti in s tem povečanjem možnosti za dobro napovedovanje vremena. Te spremembe povzročijo nehomogenosti v nizu podatkov. Za analizo so bili uporabljeni podatki iz let 1983-1993, ki so bili ponovno analizirani. Podatki so bili interpolirani na nivoje zračnega tlaka 150, 200, 250, 300 in 400 hPa.

### DLR-2 podatki letalskega prometa

V času izvajanja teh analiz niso obstajali podatki o gostoti letalskega prometa, zato so uporabili podatke o porabi letalskega goriva. Slika 4 prikazuje letno porabo goriva nad 500 hPa ploskvo.



Slika 4. Graf letne porabe goriva nad 500 hPa ploskvo [3]

Kadar poznamo podatke o zračnem tlaku in temperaturi ter privzamemo pogonski izkoristek  $\eta = 0.3$ , lahko izračunamo kritično vrednost relativne vlage okolice, da nastanejo kondenzacijske sledi. Tako lahko poiščemo območja, kjer obstaja možnost za nastanek kondenzacijskih sledi. Ta vrednost predstavlja zgornjo mejo (maksimum) prekritosti, ki bi ga dosegli, če bi količina letalskega prometa narasla v neskončnost.

Da bi določili resnično vrednost prekritosti, moramo upoštevati še frekvenco letalskega prometa na določeni točki ob določenem času. Kadar je gostota letalskega prometa majhna, lahko predvidevamo, da vsak let linearno prispeva k opazovani prekritosti, kadar je gostota velika, pa bo to povzročilo efekt nasičenosti. Če je nebo že močno prekrito s kondenzacijskimi sledmi, bo nov let dodal manj k celotni vrednosti prekritosti, kot bi dodal pri letenju nad še popolnoma neprekritim delom. Zato uvedemo dve pomembni predpostavki:

1. pri majhnih gostotah prometa je pokritost sorazmerna s porabo goriva
2. pri velikih gostotah prometa je pokritost sorazmerna s korenem porabe goriva.

Za pridobitev celotne prekritosti s kondenzacijskimi sledmi moramo sešteti delne prekritosti posameznih nivojev:

$$b_{\text{sum}} = 1 - \prod_k (1 - b_k), \quad (6)$$

pri čemer gre  $k$  čez vse vertikalne nivoje zračnega tlaka in so  $b_k$  delne prekritosti, ki se nanašajo na posamezen nivo. Kadar nastane vrzel (eden ali več nivojev kjer je  $b_k = 0$ ) lahko privzamemo

naključno prekrivanje za objekte, ki jih ločuje vrzel. Takrat sledi enačba

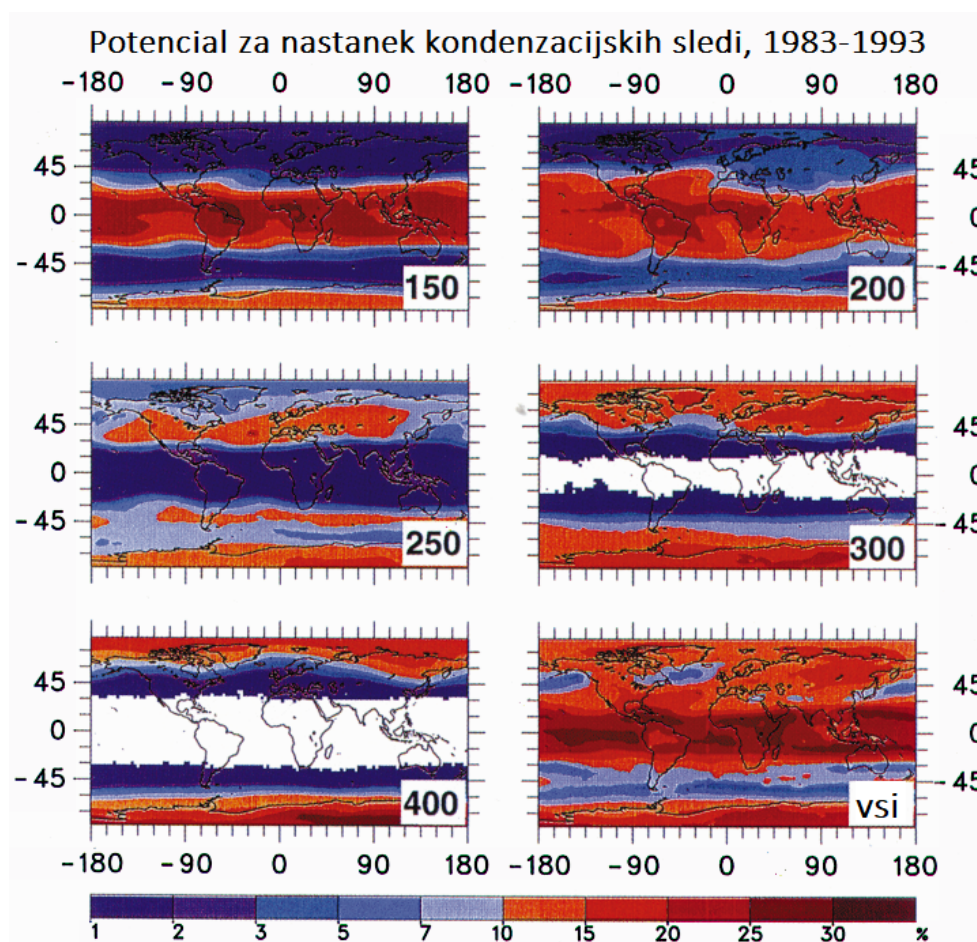
$$b_{\text{sum}} = 1 - (1 - b_1) \prod_{k>1} \frac{1 - \max(b_k, b_{k-1})}{1 - \min(b_{k-1}, 1 - \epsilon)}, \quad (7)$$

kjer je  $\epsilon$  zelo majhno pozitivno število.

## 5. Rezultati in diskusija

### 5.1 Potencial za nastanek kondenzacijskih sledi

Potencial za nastanek kondenzacijskih sledi ali potencialna prekritost je mera za zmožnost atmosfere, da v njej nastanejo kondenzacijske sledi. Slika 5 prikazuje povprečne vrednosti potencialne prekritosti s kondenzacijskimi sledmi (iz analize 11 let podatkov od 1983-1993). Rezultati so predstavljeni za 5 različnih nivojev zračnega tlaka (150, 200, 250, 300 in 400 hPa) ter sešteti skupaj po 7 nivojih zračnega tlaka (dodana sta še nivoja 100 in 500 hPa).



**Slika 5.** Graf letnega povprečja potenciala za nastanek kondenzacijskih sledi [%] na različnih nivojih zračnega tlaka in skupaj v plasti med 100 in 500hPa [3]

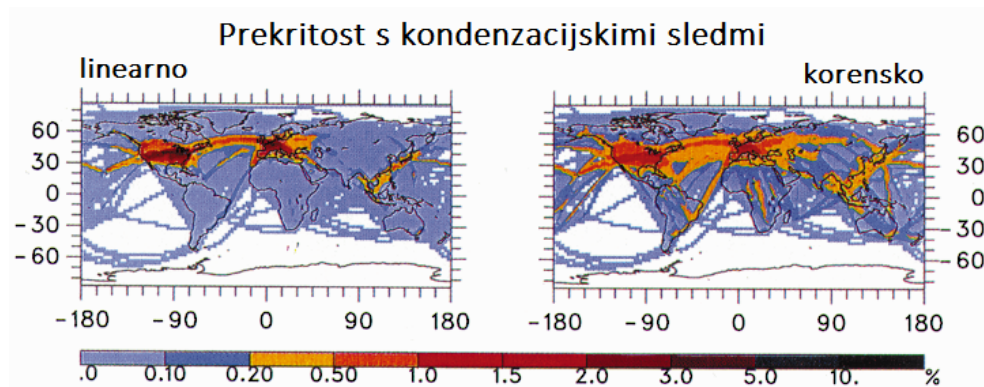
Kondenzacijske sledi ponavadi nastanejo v plasti pod tropopavzo, kjer je zrak dovolj hladen in vlažen, da zadovolji Schmidt-Applemanovem kriteriju. Nižje od te plasti je zrak pogosto pretopel, višje v stratosferi pa presuh, da bi lahko prišlo do nastanka kondenzacijskih sledi. Potencial za nastanek kondenzacijskih sledi je največji visoko (150-200 hPa) nad tropi, kjer je temperatura zelo nizka, hkrati pa je relativna vlažnost visoka zaradi tropske konvekcije. Povprečne in maksimalne vrednosti



potenciala za nastanek kondenzacijskih sledi v tropih so veliko večje (skoraj 30 %) v primerjavi z vrednostmi v zmernih širinah in polarnih območjih. Povprečna vrednost za sloj med 100 in 500 hPa je 16 %. Ta številka je primerljiva z globalno povprečno vrednostjo prekritosti z visokimi oblaki, ki znaša 23 % nad kopnim in 13 % nad oceani. To pomeni, da bi se količina visokih oblakov (kondenzacijske sledi in ostali visoki oblaki) lahko skoraj podvojila, če bi bila pogostost letal zelo velika na vseh geografskih lokacijah. Povprečna vrednost nad Evropo znaša 12 %.

Potencial za nastanek kondenzacijskih sledi niha z letnimi časi. Razlog za to leži v nihanju temperature skozi leto, ki je negativno korelirana z nihanjem relativne vlage nad 850 hPa v zmernih širinah. Iz tega sledi, da območja z veliko relativno vlažnostjo, ki ustrezajo nastanku kondenzacijskih sledi, pogosteje nastanejo v zimskem času, zato je tudi verjetnost za nastanek kondenzacijskih sledi v zimskem času večja, poleti pa manjša. Iz dejstva, da je gostota letalskega prometa skozi leto približno konstantna, lahko zaključimo, da so nihanja v potencialu prekritosti zares pogojena z letnimi časi.

## 5.2 Prekritost s kondenzacijskimi sledmi zaradi letalskega prometa



**Slika 6.** Letno povprečje prekritosti s kondenzacijskimi sledmi [%] z linearnim (levo) in korenskim (desno) uteževanjem [3]

Prekritost s kondenzacijskimi sledmi je, kot smo že omenili, določena z meteorološkimi parametri (termodinamičnim stanjem atmosfere) in frekvenco letalskega prometa. Slika 6 prikazuje letno povprečje prekritosti s kondenzacijskimi sledmi, ki so jo dobili z linearnim in korenskim uteževanjem porabe goriva. Povprečna globalna vrednost prekritosti znaša 0.09 % za linearno in 0.13 % za korensko uteževanje. Z linearnim uteževanjem so maksimalne vrednosti višje, tudi več kot 5 % nad določenimi območji ZDA. V obeh primerih najbolj izstopajo območja ZDA, Evrope in jugo-vzhodne Azije s povprečnimi delnimi vrednostmi prekritosti (pri linearnem uteževanju) 1.44 %, 1.07 % in 0.12 %. Bolj podrobne vrednosti so prikazane v Tabeli 1.

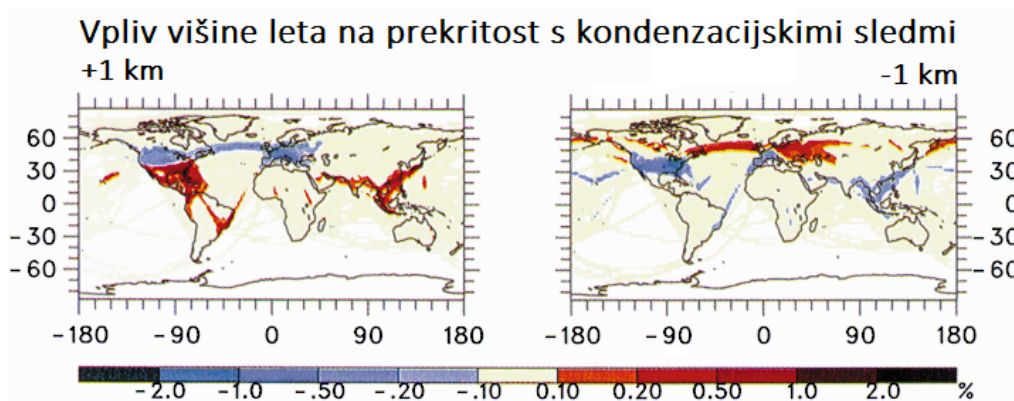
Opazimo lahko, da možnost za nastanek dodatnih kondenzacijskih sledi zaradi povečanja letalskega prometa še vedno ostaja. To lahko opazimo tudi s primerjavo slik 5 in 6. Ponekod, kjer obstaja potencial za nastanek kondenzacijskih sledi, te namreč ne nastanejo, saj tam ne potekajo linije letalskega prometa (razvidno iz slike 4).

Tudi dejanska prekritost s kondenzacijskimi sledmi je odvisna od letnih časov, tako da doseže minimum v juliju in maksimum v oktobru.

## 5.3 Vpliv višine leta

V tem delu raziskujemo, kakšen vpliv na nastanek kondenzacijskih sledi bi imela sprememba višine leta za 1 km višje ali nižje. Rezultat je prikazan na spodnji sliki (Slika 7) za linearno uteževanje.

Sprememba v višini leta za 1 km višje v zmernih širinah povzroči zmanjšanje nastanka kondenzacijskih sledi, saj letalo tako leti v stratosferi, ki je občutno manj vlažna. Pri letih nad ZDA in Evropo, ki so večinoma za kratke razdalje, bi znižanje višine letenja prav tako povzročilo zmanjšanje nastanka kondenzacijskih sledi, saj bi letalo letelo v toplejšem zraku. Zvišanje višine v tropih bi povzročilo večje število kondenzacijskih sledi, znižanje višine leta pa bi povzročilo zmanjšanje možnosti za nastanek, saj bi podobno kot v zmernih geografskih širinah letalo zaneslo v pretopen zrak. V tem primeru bi delna prekritost v tropih znašala manj kot 0.1 %, kar bi pomenilo, da bi kondenzacijske sledi skoraj popolnoma izginile iz tropskih območij. Nad jugo-vzhodno Azijo bi zvišanje višine pomenilo skoraj podvojenje trenutne letne vrednosti.



**Slika 7.** Sprememba prekritosti s kondenzacijskimi sledmi, kadar je višina letalskega poleta zvišana (levo) in znižana (desno) za 1 km [3].

V primeru višanja višine leta bi se nihanja potenciala na nastanek z letnim časom nad ZDA obrnila, tako da bi dosegla maksimum v poletnih mesecih in minimum v zimskih, medtem ko znižanja višine leta ne bi vplivala na nihanja z letnim časom. Znižanje ali zvišanje višine leta nad Evropo nima vpliva na nihanja z letnimi časi.

#### 5.4 Vpliv pogonskega izkoristka letala

Poleg lastnosti okoliškega zraka Schmidt-Applemanov kriterij temelji tudi na lastnostih goriva in pogonskega izkoristka letala  $\eta$ . Več kot je toplote porabljene za pogon, manj toplote je oddane v izpušnih plinih in pri višjih temperaturah lahko pride do nastanka kondenzacijskih sledi. Mejna temperatura na nastop kondenzacijskih sledi se poveča za približno 1.4 K za 10 % povečanja pogonskega izkoristka letala, kar pomeni, da lahko kondenzacijske sledi nastanejo tudi pri nekoliko nižjih in višjih višinah leta (kot je bilo že omenjeno v 3. poglavju). Pri boljših motorjih lahko torej pričakujemo več kondenzacijskih sledi. Povprečna vrednost pogonskega izkoristka letala je bila v času izvajanja analize  $0.3 \pm 0.05$ , zato sta bili za analizo uporabljeni vrednosti  $\eta = 0.25$  in  $\eta = 0.35$ . Izračunana relativna sprememba prekritosti s kondenzacijskimi sledmi zaradi variacij pogonskega izkoristka letala je reda 10 % za vsa območja. Absolutni vpliv teh variacij na prekritost s kondenzacijskimi sledmi pa je v resnici manjši kot  $\pm 0.1$  %. Razlog za tak rezultat je dejstvo, da večina letalskega prometa poteka pri temperaturah, ki niso blizu mejnih vrednosti. Območja, kjer je absolutni vpliv pogonskega izkoristka na prekritost večji, so območja, kjer prevladujejo kratki leti, ki potekajo pri nižjih višinah. Okoliška temperatura je takrat bližje mejni temperaturi, kot pri letih na velikih višinah in nizkih temperaturah.

	Evropa	Severno-Atlantski letalski koridor	ZDA	JV Azija	Svet
Potencialna letna prekritost	12.1	12.3	14.1	21.1	16
Letna prekritost pri linearnem uteževanju	1.07	0.43	1.44	0.12	0.09
Letna prekritost pri korenskem uteževanju	0.84	0.42	0.89	0.23	0.13
Prekritost v januarju	1.16	0.46	1.63	0.13	0.09
Prekritost v aprilu	1.1	0.49	2.04	0.13	0.11
Prekritost v juliju	0.63	0.3	0.5	0.1	0.06
Prekritost v oktobru	1.38	0.48	1.6	0.13	0.1
Višina leta 1 km višje	0.74	0.38	1.36	0.23	0.1
Višina leta 1 km nižje	1.04	0.4	1.04	0	0.07
Učinkovitost pogona $\eta = 0.25$	1	0.41	1.35	0.1	0.08
Učinkovitost pogona $\eta = 0.35$	1.13	0.46	1.53	0.13	0.09

**Tabela 1.** Tabela prikazuje prekritost in potencialno prekritost s kondenzacijskimi sledmi [%] za različne dele sveta. [3]

V zgornji tabeli (Tabela 1) so prikazane vrednosti potencialne prekritosti in izračunane prekritosti (podane v %) pri različnih zgoraj obravnavanih pogojih za različne dele sveta. Če ni drugače navedeno, je privzeto linearno uteževanje, običajna višina letenja in učinkovitost pogona  $\eta = 0.3$ .

## 5.5 Omejitve raziskave

Rezultati so odvisni od točnosti podatkov o temperaturi in relativni vlagi iz meteorološkega modela ECMWF. V realnosti obstojnost kondenzacijskih sledi ni odvisna le od termodinamičnih pogojev in porabe goriva, temveč tudi na dviganja in spuščanja zraka, striženja vetra, turbulence, količine vode na voljo za formacijo ledenih delcev in mikro-fizikalnih procesov pri nastanku kondenzacijskih sledi in oblakov. Vseh teh stvari v članku niso preučevali, kljub temu pa so lahko podali grobi oceni globalnega potenciala za nastanek kondenzacijskih sledi in izračunane prekritosti s kondenzacijskimi sledmi.

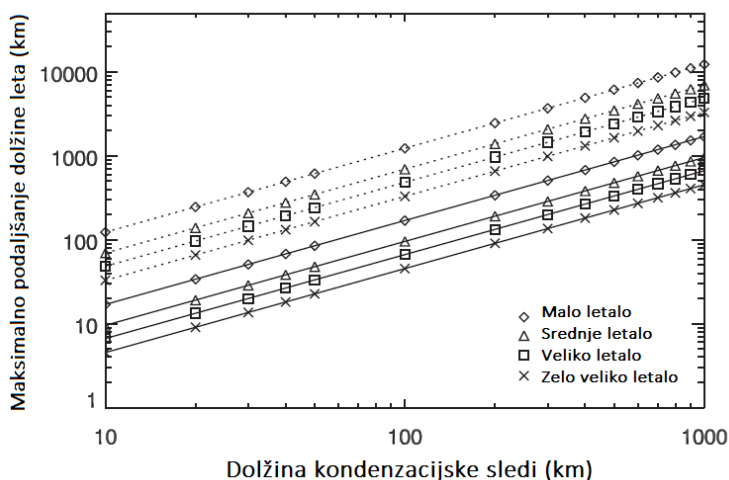
## 6. Ravnovesje med vplivom izpustov ogljikovega dioksida in kondenzacijskih sledi na ozračje

V zadnjem delu članka se bomo posvetili še vplivu letalskega prometa in s tem kondenzacijskih sledi na ozračje na Zemlji. Nastali oblaki odbijajo del sončnega sevanja in s tem ohlajajo tla, hkrati pa tudi povečujejo efekt tople grede, saj vpijejo dolgovalovno sevanje od tal, ter ga oddajo nazaj in s tem segrevajo tla. Vsota teh dveh učinkov je seveda odvisna od mnogih spremenljivk, vendar večinoma velja, da kondenzacijske sledi pozitivno vplivajo na sevalno bilanco in tako segrevajo ozračje. Ker pa dokaj hitro izginejo, je njihov učinek kratkotrajnejši, v primerjavi z učinkom izpustov  $\text{CO}_2$  [2]. Že v prejšnjem poglavju smo prišli do spoznanja, da bi znižanje višine leta povzročilo zmanjšanje kondenzacijskih sledi, vendar pa bi za tak let porabili tudi več goriva in povzročili večjo količino izpuščenega  $\text{CO}_2$ . Boljši način, da se izognemo nastanku kondenzacijskih sledi, bi bila spremenjena pot letala, ki bi nekoliko podaljšala razdaljo leta, vendar pa omogočila, da letalo pri tem ohrani svojo višino leta. Zaradi tega bi bila poraba goriva manjša, kot če bi se kondenzacijskim sledem izognili z nižanjem višine leta [6].

Z napovedovanjem območij, kjer bi kondenzacijske sledi nastale, bi se jim tako lahko izognili z malo daljšo potjo in s tem malo večjim izpustom CO<sub>2</sub>. Nova pot bi bila boljše le, če bi bil vpliv na ozračje zaradi večje količine izpustov CO<sub>2</sub> manjši od vpliva kondenzacijskih sledi, ki bi nastale, če bi ohranili prvotno pot. Zavedati pa se moramo, da povečanje dolžine leta pomeni, da mora letalo prevažati dodatno količino goriva, zaradi večje teže pa letalo porablja večjo količino goriva. Za določanje meje uporabimo formulo

$$dx_{max} = \frac{L_{con} * W_{con} * M_{con}(H) * E}{FF * EI_{CO_2} * M_{CO_2}(H)} \quad [km] \quad (8)$$

kjer velja, da spremenimo pot v primeru, ko je podaljšanje dolžine leta  $dx$  manjše od izračunanega  $d_{max}$ . V formuli  $L_{con}$  in  $W_{con}$  predstavljata dolžino in širino kondenzacijske sledi,  $E$  klimatsko učinkovitost [%],  $FF$  je poraba goriva izražena v enotah kg/m in  $EI_{CO_2}$  emisijski faktor za CO<sub>2</sub>. Vpliv na podnebje merimo z emisijsko metriko  $M$  in časovnim horizontom  $H$ , ki opisuje čas do konca procesa. Metrika  $M$  ima v primeru CO<sub>2</sub> enote X/kg, v primeru CON (kondenzacijskih sledi) pa X/km<sup>2</sup>, pri čemer je  $X$  odvisen od izbire metrike. Pri raziskavi so uporabljali metriko AGWP (potencial globalnega segrevanja) in AGTP (absolutni globalni temperaturni potencial). AGWP daje večji poudarek na kratkotrajni učinek kondenzacijskih sledi, AGTP pa na dolgotrajni učinek obstojnejših izpustov CO<sub>2</sub>. Slika 8 prikazuje izračunane vrednosti  $dx_{max}$  za metriki AGWP (črtkane črte) in AGTP (polne črte) pri  $H = 100$  let,  $W_{con} = 1$  km in  $E = 1$ , ter za 4 različne velikosti letal. Opazimo lahko, da  $dx_{max}$  za izbrano metriko in velikost letala narašča linearno z dolžino kondenzacijske sledi. Velja tudi, da je  $dx_{max}$  večji za metriko AGWP, kjer so vrednosti 3-10 krat večje kot pri AGTP, in za manjša letala, kjer je  $dx_{max}$  približno 4x večji kot pri velikem letalu.



**Slika 8.** Graf prikazuje izračunane vrednosti  $dx_{max}$  za metriki AGWP (črtkane črte) in AGTP (polne črte) pri  $H = 100$  let,  $W_{con} = 1$  km in  $E = 1$ , za 3 različne velikosti letal. [6]

Vpliv CO<sub>2</sub> na ozračje lahko izračunamo precej natančno, večji problem pa predstavlja vpliv kondenzacijskih sledi. Kot sem že omenila kondenzacijske sledi namreč hkrati ohlajajo in segrevajo Zemljo, vsota teh dveh učinkov pa je odvisna od mnogih spremenljivk. Za uporabo take strategije v realnosti, bi potrebovali zelo natančne napovedi območij, kjer bi kondenzacijske sledi lahko nastale, ter informacije o tem, kakšen bi bil njihov vpliv na ozračje.

## 7. Zaključek

Raziskovanje kondenzacijskih sledi se je začelo že pred 100 leti, teorije o njihovem nastanku pa so nastale šele okoli leta 1940. Med teorijami osnovne termodinamike kondenzacijskih sledi je najbolj sprejeta Schmidtova. Kondenzacijske sledi nastanejo zaradi kondenzacije dodatne vodne pare, ki se sprosti pri izgorevanju goriva, na že obstoječih delcih aerosola ali delcih iz izpusta letala. Nastanek je odvisen od sproščene toplote in vodne pare iz letala, okoliškega tlaka, temperature in relativne vlažnosti, pogosto pa velja mejna vrednost  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  na višini približno 10 km. Mejna vrednost temperature, pod katero je dosežena nasičenost, je funkcija tlaka ali višine in relativne vlažnosti v okoliškem zraku. Pri nizkih temperaturah lahko kondenzacijske sledi nastanejo tudi v popolnoma suhem zraku. Kondenzacijske sledi so lahko obstojne ali neobstojne.

Povečanje pogonskega izkoristka letala za 10 %, poveča območje, kjer kondenzacijske sledi lahko nastanejo. V motorjih kjer izgoreva tekoč vodik, nastane več vodne pare kot pri izgorevanju kerozina. Kondenzacijske sledi za letali, ki porabljajo tekoč vodik, zato nastanejo pri približno 10 K višjih temperaturah - pri nižjih troposferskih in višjih stratosferskih višinah ter lahko zrastejo do večjih razsežnosti preden izhlapijo. Lastnosti kondenzacijskih sledi, ki nastanejo pri izgorevanju tekočega metana, ležijo med lastnostmi za kerozin in vodikovim gorivom.

S pomočjo rezultatov meteorološkega modela ECMWF je bila določena globalna potencialna prekritost s kondenzacijskimi sledmi. Ta znaša 16 % za plast zraka med 100 in 500 hPa. Dejanska prekritost je bila izračunana z uporabo podatkov o porabi goriva. Maksimalna prekritost znaša okoli 5 % nad vzhodom ZDA, povprečna globalna vrednost pa 0.09 %. Prekritost ima letni cikel, kjer se v primeru zmernih geografskih širin višje vrednosti pojavljajo v zimskem času, nižje pa v poletnem. Prekritost s kondenzacijskimi sledmi je lokalno odvisna od spremembe višine leta, globalno povprečje pa je na znižanje oz. zvišanje leta precej neobčutljivo. Če bi letalo letelo višje (nižje), bi se vrednost prekritosti s kondenzacijskimi sledmi povečala (zmanjšala) v tropskih območjih, manj (več) kondenzacijskih sledi pa bi nastalo na območju zmernih geografskih širin. Sprememba pogonskega izkoristka letala za  $\pm 10\%$  ima na dejansko količino kondenzacijskim sledi majhen vpliv.

V zadnjem delu smo se posvetili še vplivu kondenzacijskih sledi na ozračje, in sicer spreminjanju poti letala, tako da se izogne nastanku kondenzacijskih sledi, pri tem pa ohrani višino leta, pri kateri je letalo najbolj učinkovito in varčno gorivom. Podana je bila formula, s katero smo lahko izračunali maksimalno razdaljo, ki bi še bila lahko dodana letu, preden bi vpliv dodatnih  $\text{CO}_2$  na ozračje presegel vpliv nastalih kondenzacijskih sledi. Odločitev za izbiro nove poti je v veliki meri odvisna od tipa letala, saj se poraba  $\text{CO}_2$  med njimi precej razlikuje.

## 8. Zahvala

Zahvaljujem se doc. dr. Gregorju Skoku za vse nasvete, kritike in pomoč pri pisanju članka.

## Dodatek 1: Standardna atmosfera po ICAO

Standardna atmosfera opisuje povprečni potek značilnih spremenljivk v ozračju in se uporablja za razvrščanje letal v nivoje letenja. Ob nekem času in v nekem kraju so razmere lahko tudi zelo različne od tega povprečja: pri tleh je lahko bistveno hladneje ali topleje. Troposfera, v kateri temperatura pada z višino za približno 6.5 K/km, sega lahko precej višje ali nižje od pričakovane vrednosti, v njej pa so lahko tudi plasti, kjer temperatura pada počasneje, je stalna ali celo naraščajoča. Med drugim to pomeni tudi, da višina, ki jo določamo po izmerjenem tlaku, ni skoraj nikoli prava višina, pa čeprav smo tlak izmerili povsem pravilno. [7]

Ker je tlak posledica teže, specifična sila teža  $g$  pa ni po vsej Zemlji enaka, pri natančnih izračunih ne upoštevamo standardne vrednosti  $g_0$  temveč dejansko vrednost  $g$  na določenem kraju. Ta v višino pada kot:

$$g(z) = g_0 \left( \frac{r_z}{r_z + z} \right), \quad (9)$$

kjer je  $z$  nadmorska višina,  $r_z$  pa povprečni radij Zemlje ( $r_z = 6370.949$  km). V meteorologiji se zato pogosto uporablja t.i. geopotencialna višina  $H$ :

$$H = \frac{1}{g_0} \int_0^z g(z) dz \quad (10)$$

pri čemer velja kot standardna vrednost specifične teže  $g_0 = 9.80665$  m/s<sup>2</sup>. Takšna natančnost je pomembna pri računanju sile gradienta tlaka.

Za povprečno standardno atmosfero, ki velja za Zemljo kot celoto, se krajevne razlike v vrednostih  $g$  zanemarijo in povsod velja kar standardna vrednost  $g_0$ , pri čemer pa je potrebno še vedno upoštevati upadanje pospeška  $g$  z višino. Za potrebe izračuna standardnega ozračja zato dovolj dobro velja tudi  $H = zr_z/(r_z + z)$ . Nadmorska in geopotencialna višina se po tej enačbi na višini 1 km od tal razlikujeta za dobrih 15 cm, na višini 10 km za 15 m, na višini 80 km pa že za dober kilometer, pri čemer je geopotencialna višina  $H$  vedno manjša od nadmorske višine  $z$ .

Pri tako imenovani standardni atmosferi ICAO uporabljamo za specifično plinsko konstanto za zrak vrednost  $R = 287.05$  J/kgK ter pri morskem nivoju privzete vrednosti:

$$p_0 = 1013,25 \text{ hPa}, \quad T_0 = 288,15 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{in} \quad \rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

## Dodatek 2: Pogonski izkoristek letala

Pogonski izkoristek letala  $\eta$  je mera za delo porabljeno za premikanje letala v primerjavi z vso sproščeno energijo pri izgorevanju goriva. Višji kot je pogonski izkoristek letala, nižja je temperatura izpušnih plinov in pri višjih temperaturah lahko pride do nastanka kondenzacijskih sledi. Povprečne vrednosti pogonskega izkoristka letala trenutno znašajo okoli 30 %, v prihodnosti pa lahko pričakujemo, da bodo narasle do 50 %. Povečanje  $\eta$  iz 30 % na 50 % bi v standardni atmosferi pomenilo nastanek kondenzacijskih sledi v 2.8 K toplejšem zraku oz. pri 770 m nižjih višinah leta. [3]

LITERATURA

- [1] U. Schumann, "On conditions for contrail formation from aircraft exhausts," *Meteorologische Zeitschrift / DLR, Inst. f. Physik der Atmosphäre, Report No. 44*, vol. 5, pp. 4–23, 01 1996.
- [2] D. Lister, J. Penner, D. Griggs, J. Houghton, D. Albritton, J. Begin, G. Bekebrede, J. Crayston, O. Davidson, R. Derwent, D. Dokken, J. Ellis, D. Fahey, J. Frederick, R. Friedl, N. Harris, S. Henderson, J. Hennigan, I. Isaksen, and H. Wesoky, *Aviation and the Global Atmosphere: Summary for Policy Makers*, pp. 1–12. 01 1999.
- [3] R. Sausen, K. Gierens, M. Ponater, and U. Schumann, "A diagnostic study of the global distribution of contrails part 1: Present day climateast;," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 61, pp. 127–141, Dec 1998.
- [4] R. Ettenreich, "Wolkenbildung über einer Feuersbrunst und an Flugzeugabgasen," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 36, pp. 355–356, 1919.
- [5] AWS, "Clear-air turbulence from 25,000 to 45,000 feet over the united states," Tech. Rep. 105-147, Air Weather Service, July 1957.
- [6] E. A. Irvine, B. J. Hoskins, and K. P. Shine, "A simple framework for assessing the trade-off between the climate impact of aviation carbon dioxide emissions and contrails for a single flight," *Environmental Research Letters*, vol. 9, p. 064021, may 2014.
- [7] Jože Rakovec, Tomaž Vrhovec in Gregor Gregorič, *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehniike*. Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, 2000.