

Primjećujete li sve više tragova na nebu: Zašto se ponekad pojave, a ponekad ne?

Bojan Lipovščak



Pixabay / Ilustracija

Kondenzacijski tragovi iza zrakoplova, poznati i kao contrails, nisu "kemikalije iz aviona", nego oblaci ledenih kristala koji nastaju kada se vrući i vlažni ispuh mlaznog motora naglo ohladi u hladnoj troposferi.

Takav trag može nestati nakon nekoliko minuta, ali se može zadržati i satima te postupno proširiti u veći sloj oblaka. Hoće li se uopće pojaviti i koliko će dugo trajati, ovisi prije svega o temperaturi, vlažnosti i strujanju zraka na visini na kojoj zrakoplov leti.

Kondenzacijski tragovi najčešće nastaju na visinama na kojima krstare komercijalni zrakoplovi, otprilike između osam i 12 kilometara iznad Zemljine površine. Tlak zraka na tim visinama znatno je niži nego pri tlu i iznosi približno između 260 i 190 hektopaskala, dok je temperatura obično niža od -40 Celzijevih stupnjeva.

Da bi se kondenzacijski trag formirao, u mlazu ispušnih plinova motora mora privremeno doći do zasićenja s obzirom na tekuću vodu. Nastale kapljice zatim se gotovo trenutačno smrzavaju i pretvaraju u ledene kristale. Pri tome nastaje trag kakav opisuje Schmidt-Applemanov kriterij, koji uzima u obzir temperaturu, tlak i vlažnost okolnog zraka te karakteristike motora, odnosno odnos topline i vodene pare u ispuhu.

Pojednostavljeno, Schmidt-Applemanov kriterij predstavlja prag koji mora biti prijeđen kako bi se pojavio kondenzacijski trag. Mješavina vrućeg ispuha i okolnog zraka mora se dovoljno ohladiti da nakratko postane zasićena s obzirom na tekuću vodu. Kapljice koje tada nastanu odmah se smrzavaju i stvaraju vidljivu ledenu prugu.

Zbog toga nekoliko uvjeta mora biti istodobno ispunjeno. Okolni zrak mora biti dovoljno hladan, a ispušni

plinovi motora moraju sadržavati dovoljno vodene pare. Mlazni motori izbacuju vruće plinove bogate vodenom parom, a njihovim širenjem i miješanjem s hladnim okolnim zrakom temperatura naglo pada.

Ako je okolni zrak presuh ili nedovoljno hladan, mješavina neće dosegnuti zasićenje pa neće doći do kondenzacije, stvaranja leda ni pojave vidljivog traga. Ako je zrak hladniji i vlažniji, prag se lakše prelazi, nastaju sitne kapljice koje se odmah smrzavaju u ledene kristale i iza zrakoplova ostaje bijeli trag.

Postoje i aerodinamički tragovi

Zbog toga se kondenzacijski tragovi mogu ponašati gotovo poput sustava koji se "uključuje" i "isključuje". Relativno mala promjena temperature ili vlažnosti na visini leta može biti dovoljna da se prijeđe prag potreban za njihovo stvaranje. Obrnuta promjena može uzrokovati njihov nestanak.

Osim kondenzacijskih tragova povezanih s radom motora postoje i aerodinamički tragovi, primjerice oko vrhova krila ili propelera. Oni nastaju zbog lokalnog pada tlaka i posljedičnog hlađenja zraka u strujanju oko površine zrakoplova. Češće se pojavljuju na nižim visinama i u specifičnim uvjetima temperature i količine vlage u atmosferi.

Hoće li kondenzacijski trag brzo nestati ili će se održati satima ponajprije ovisi o relativnoj vlažnosti s obzirom na led, odnosno RH_i, kao i o dinamici atmosferskog sloja kroz koji zrakoplov prolazi.

Ako je okolni zrak podzasićen s obzirom na led, odnosno ako je RH_i manji od 100 posto, ledeni kristali ubrzo sublimiraju i trag može nestati nakon samo nekoliko minuta. Ako je sloj prezasićen s obzirom na led, odnosno RH_i je veći od 100 posto, kristali mogu nastaviti rasti. Trag se tada pod utjecajem smicanja vjetra i turbulencije širi te može prijeći u takozvani contrail-cirrus, odnosno cirus nastao iz kondenzacijskog traga, koji može trajati satima i prekriti veliku površinu neba.

Na životni ciklus takvih tragova utječe i vertikalna struktura atmosfere. Tanak vlažan sloj smješten između suhih slojeva, primjerice, može utjecati na njihovo trajanje, kao i radijacijsko hlađenje vrha oblaka. Zbog toga jedan zrakoplov na određenoj ruti može ostaviti vrlo kratak trag, dok zrakoplov koji istom rutom prođe sat vremena poslije može iza sebe ostaviti širok i dugotrajan sloj. U međuvremenu su se mogli promijeniti vlažnost, smicanje vjetra ili vertikalni sloj kroz koji zrakoplov prolazi.

Posebno je zanimljiva pojava isprekidanih kondenzacijskih tragova. Zrakoplov pritom može letjeti na gotovo konstantnoj visini, dok se trag iza njega naizmjenično pojavljuje i nestaje. Razlog nisu nužno promjene u ispuhu motora, nego vertikalni valovi i lokalne razlike u temperaturi i vlažnosti atmosfere.

Atmosfera je fluid koji neprestano oscilira i kroz koji se šire horizontalni i vertikalni valovi različitih valnih duljina i amplituda. U uzlaznom dijelu vertikalnog vala zrak se podiže, tlak pada, a zrak se adijabatski hladi. Zrakoplov koji održava istu geometrijsku visinu tako može ući u hladniji i često vlažniji dio vala. Uvjeti tada mogu prijeći prag potreban za kondenzaciju i smrzavanje, zbog čega se trag pojavljuje.

U silaznom dijelu vala događa se suprotno. Zrak se spušta, tlak raste i dolazi do adijabatskog zagrijavanja. Relativna vlažnost tada pada, ledeni kristali sublimiraju i trag nestaje.

Mogu trajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta

Budući da su takvi atmosferski valovi često prostorno organizirani, primjerice u blizini planina ili slojeva uz temperaturne inverzije, iza zrakoplova može ostati naizgled isprekidana pruga ili niz odvojenih segmenata. Drugim riječima, zrakoplov ne "ispušta malo pa malo ne", nego atmosferski sloj kroz koji prolazi oscilira oko praga zasićenja, zbog čega se vidljivi trag pojavljuje i nestaje.

Kratkotrajni kondenzacijski tragovi mogu trajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, ponajprije u suhim slojevima u kojima je RH_i manji od 100 posto. Tragovi srednjeg trajanja mogu opstati desecima

minuta, uz umjereno smicanje vjetra i vlažnost blizu zasićenja. Dugotrajni tragovi mogu ostati vidljivi satima kada je sloj prezasićen s obzirom na led i kada vjetar razvlači trag u širi cirusni sloj. Njihovo trajanje stoga ponajviše ovisi o relativnoj vlažnosti s obzirom na led, smicanju vjetra, turbulenciji i vertikalnoj stabilnosti atmosferskog sloja.

Kondenzacijski tragovi svoje su mjesto dobili i u klasifikaciji oblaka Svjetske meteorološke organizacije (WMO). Međunarodni atlas oblaka razlikuje prirodne oblake od oblaka koji nastaju kao posljedica ljudske aktivnosti. Među njima je i oznaka Cirrus homogenitus, koja se odnosi na cirus nastao ljudskim djelovanjem, a pod tu klasifikaciju mogu potpasti i dugotrajni kondenzacijski tragovi.

Razlog je, među ostalim, njihova fizička sličnost s prirodnim cirusima. Dugotrajni kondenzacijski tragovi mikrofizički su i optički vrlo slični prirodnim visokim oblacima jer ih čine ledeni kristali.

Važan je i njihov klimatski utjecaj. Cirusni oblaci nastali iz kondenzacijskih tragova doprinose radijacijskom učinku zrakoplovstva na klimu, zbog čega ih je potrebno pratiti u opažanjima i klimatskim modelima. Njihovo razlikovanje važno je i u operativnoj meteorologiji, među ostalim za praćenje i prognožiranje naoblake i insolacije.

Uvrštavanjem takvih oblaka u klasifikaciju WMO stoga ih prepoznaje kao antropogene oblake kako bi se njihova pojava i uloga u atmosferi mogle sustavno pratiti i proučavati.

Količina vodene pare koju proizvode zrakoplovni motori također objašnjava kako može nastati vidljiv ledeni trag. Prosječni putnički zrakoplov na visini krstarenja, prema izračunu iz navedenih podataka, troši između 2500 i 5000 kilograma goriva na sat. Izgaranjem jednog kilograma kerozina nastaje približno 1,25 kilograma vodene pare. To bi značilo da se izgaranjem goriva proizvede između 3125 i 6250 kilograma vodene pare na sat, odnosno približno između 0,9 i 1,7 kilograma u sekundi. Kao srednja vrijednost za ilustraciju može se uzeti približno 1,4 kilograma u sekundi.

Količina ledene vode i do 35 kilograma

Za usporedbu se može uzeti prirodni cirusni oblak u obliku valjka polumjera 15 metara i duljine deset kilometara. Takav bi oblak imao volumen od približno 7,07 milijuna prostornih metara. Ako se pretpostavi sadržaj ledene vode od dvije do pet miligrama po prostornom metru, ukupna količina ledene vode u takvom oblaku iznosila bi približno od 14 do 35 kilograma.

Zrakoplov koji leti brzinom od približno 240 metara u sekundi deset kilometara prijeđe za oko 42 sekunde. Ako se za ilustraciju uzme proizvodnja od oko 1,4 kilograma vodene pare u sekundi, tijekom tog vremena izgaranjem goriva nastalo bi približno 59 kilograma vodene pare.

Prema takvom pojednostavljenom izračunu, količina vodene pare proizvedena izgaranjem goriva tijekom leta od deset kilometara bila bi približno 1,7 do 4,3 puta veća od ukupne količine ledene vode u zamišljenom tankom cirusnom oblaku navedenih dimenzija.

Kondenzacijski tragovi tako su posljedica poznatih fizikalnih procesa: vodena para nastala izgaranjem goriva miješa se s izrazito hladnim okolnim zrakom, nakon čega se, kada su ispunjeni odgovarajući uvjeti temperature i vlažnosti, stvaraju ledeni kristali. Hoće li iza zrakoplova ostati kratka bijela crta, isprekidan trag ili cirusni sloj koji će se širiti satima, u velikoj mjeri određuje stanje atmosfere kroz koju zrakoplov prolazi.