

Utjecaj zaleđivanja na letne značajke zrakoplova

Janković, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:985279>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ ZALEĐIVANJA NA LETNE ZNAČAJKE ZRAKOPLOVA INFLUENCE OF ICING ON AIRCRAFT FLIGHT PERFORMANCE

Mentor: prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Filip Janković

JMBAG: 0135257415

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 5. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Osnove tehnike zračnog prometa**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7075

Pristupnik: **Filip Janković (0135257415)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Utjecaj zaleđivanja na letne značajke zrakoplova**

Opis zadatka:

U uvodu završnog rada potrebno je obrazložiti predmet istraživanja, navesti svrhu i cilj istraživanja, prikazati dosadašnja istraživanja o predmetnoj tematici te predočiti kompoziciju rada. Elaborirati utjecaj atmosferskih uvjeta na letne značajke zrakoplova. Detaljno prikazati metode zaštite od zaleđivanja zrakoplova te objasniti princip rada sustava za odleđivanje zrakoplova. Poseban naglasak u diplomskom radu staviti na analizu utjecaja zaleđivanja površina zrakoplova na letna svojstva. U zaključnom dijelu završnog rada predočiti konkretne zaključke o tematici istraživanja.

Mentor:

Andrija Vidović

prof. dr. sc. Andrija Vidović

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

SAŽETAK

Zaleđivanje zrakoplova je pojava koja se javlja tijekom cijele godine na zemlji i u letu. Zaleđivanje negativno utječe na letne značajke zrakoplova. Kako bi se to spriječilo zračni prijevoznici, zračne luke i konstruktori zrakoplova razvili su sustave za zaštitu od zaleđivanja i sustave za sprječavanje zaleđivanja. Zaštita od zaleđivanja se postiže različitim metodama, a jedna od metoda je upotreba tekućina za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja. Ako se led već stvorio jedna od učinkovitih metoda uklanjanja leda je upotrebom vrućeg zraka, dok se inovativna i ekološki prihvatljiva metoda odleđivanja temelji na korištenju infracrvenih hangara. Kako bi se osigurale čiste površine za manevriranje, te održala sigurnost zrakoplova prilikom polijetanja i slijetanja moguće ih je očistiti mehanički, kemijskim tekućinama ili pomoću toplinske energije. Zaleđivanje zrakoplova također ima negativan utjecaj na sve vrste motora, stoga je potrebno zaštititi svaki motor od utjecaja zaleđivanja.

KLJUČNE RIJEČI: zaleđivanje zrakoplova; odleđivanje/zaštita od zaleđivanja; tekućine za odleđivanje/zaštitu zrakoplova od zaleđivanja; rad motora u zimskim uvjetima

SUMMARY

Aircraft icing is a phenomenon that occurs throughout the year, both on the ground and during flight. Icing adversely affects the flight characteristics of aircrafts. To prevent this, airlines, airports, and aircraft manufacturers have developed anti-icing and de-icing systems. Protection against icing is achieved through various methods, and one of them involves the use of de-icing/anti-icing fluid. If ice has already formed, one of effective method to remove it is by using hot air, while an innovative and environmentally friendly de-icing method involves the use of infrared hangars. To ensure clean maneuvering surfaces and maintain safety during take-off and landing, they can be cleaned mechanically, with chemical fluids, or using thermal energy. Aircraft icing also has a negative impact on all types of aircraft engines, making it necessary to protect each engine from the effects of icing.

KEYWORDS: aircraft icing; de-icing/anti-icing; de-icing/anti-icing fluids; engine operation in winter conditions

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O ATMOSFERSKIM POJAVAMA	3
2.1. Vremenske prilike i neprilike	4
2.2. Meteorološke zrakoplovne službe	6
2.2.1. Procjena i izvješće o stanju površine USS-e	7
2.2.2. SNOWTAM	7
3. ZAŠTITA OD ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA	9
3.1. Zaštita od zaleđivanja zrakoplova toplim zrakom	9
3.2. Električni način zaštite od zaleđivanja	10
3.2.1. Električni način zaštite krila	11
3.2.2. Električni način zaštite antena i sonde	11
3.2.3. Električni način zaštite propelera	12
3.2.4. Električni način zaštite staklenih površina	13
3.3. Tekući (kemijski) način za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja	13
3.3.1. Vrijeme trajanja zaštite od zaleđivanja	14
3.3.2. Način primjene tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja	16
3.3.3. Mjesta namijenjena za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja	18
3.4. Aerodinamički dizajn zrakoplova	20
4. SUSTAVI ZA ODLEĐIVANJE ZRAKOPLOVA	21
4.1. Mehaničko odleđivanje	21
4.1.1. Metlice i gumene lopatice za skidanje kontaminata sa zrakoplova	21
4.1.2. Užadi za skidanje kontaminata sa zrakoplova	23
4.2. Toplinsko odleđivanje	24
4.3. Pneumatsko odleđivanje	25
4.4. Inovativne tehnologije za odleđivanja zrakoplova	26
4.4.1. Infracrvene zrake	27
4.4.2. Robotski način odleđivanja zrakoplova	28
5. UTJECAJ ZALEĐIVANJA NA LETNA SVOJSTVA ZRAKOPLOVA	29
5.1. Aerodinamička učinkovitost u zimskim uvjetima	29
5.2. Slijetanje i polijetanje u zimskim uvjetima	31
5.2.1. Mehaničko čišćenje manevarskih površina	32

5.2.2. Kemijsko čišćenje manevarskih površina	32
5.2.3. Termičko čišćenje manevarskih površina	33
5.3. Rad motora u zimskim uvjetima.....	34
6. ZAKLJUČAK	37
LITERATURA.....	38
POPIS SLIKA	40
POPIS TABLICA	41
POPIS GRAFIKONA	42

1. UVOD

Bez obzira na značajne godišnje poraste letnih operacija, zrakoplovstvo je i danas okarakterizirano kao jedna od najsigurnijih prijevoznih grana. Negativan utjecaj na sigurnost leta može imati zaleđivanje, koje se može pojaviti za vrijeme svih faza leta ili stajanja zrakoplova na tlu. Zaleđivanje ima ozbiljan negativan utjecaj na letna svojstva zrakoplova, te se kao takvo mora spriječiti ili ako se već dogodi zrakoplov je potrebno u što kraćem roku odlediti.

U radu su prezentirane metode koje osiguravaju siguran i učinkovit let zrakoplova u zimskim uvjetima u kojima se zbog zaleđivanja površina zrakoplova smanjuje aerodinamička učinkovitost i sigurnost leta. Cilj završnog rada je analizirati utjecaj zaleđivanja zrakoplova na njegova letna svojstva, detaljno prikazati metode zaštite od zaleđivanja zrakoplova, te objasniti princip rada sustava za odleđivanje zrakoplova. Svrha rada je ukazati na metode zaštite kako bi se smanjili rizici koji nastaju prilikom zaleđivanja, te kako bi se poboljšala aerodinamička učinkovitost i osigurao optimalan rad motora u zimskim uvjetima.

Ovaj rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Općenito o atmosferskim pojavama
3. Zaštita od zaleđivanja zrakoplova
4. Sustavi za odleđivanje zrakoplova
5. Utjecaj zaleđivanja na letna svojstva zrakoplova
6. Zaključak

U drugom djelu završnog rada prikazane su različite atmosferske pojave i vremenski uvjeti koji mogu uzrokovati zaleđivanje. Isto tako prikazana je važnost meteoroloških zrakoplovnih službi koji moraju pravovremeno pružati sve potrebne informacije kako bi se osigurala sigurnost letnih operacija.

U trećem poglavlju prikazani su sustavi koji sprječavaju zaleđivanje zrakoplova, odnosno koji služe za sprječavanje formiranja leda na površinama zrakoplova. Objasnjeni su načini sprječavanja zaleđivanja korištenjem električne energije, toplog zraka i tekućina.

U četvrtom poglavlju prikazani su sustavi za odleđivanje zrakoplova koji su ključni u borbi kada se zaleđivanje dogodi. Prikazane su različite metode koje se koriste, uključujući upotrebu toplog zraka, električnih sustava, te upotrebu inovativnih tehnologija poput infracrvenih zraka i robotskog sustava za odleđivanje.

Peto poglavlje obrađuje problematiku utjecaja zaleđivanja na letna svojstva zrakoplova. Točnije prikazano je kako zaleđivanje utječe na aerodinamičku učinkovitost tijekom leta, na slijetanje i polijetanje, te na rad motora u takvim uvjetima.

U šestom, zaključnom poglavlju, izvedeni su konkretni zaključci o istraživanoj problematici u ovom završnom radu.

2. OPĆENITO O ATMOSFERSKIM POJAVAMA

Atmosfera je zrak, odnosno smjesa plinova koja okružuje planetu i istodobno sudjeluje u njezinoj rotaciji. Atmosfera Zemlje se sastoji od sljedećih elemenata [1]:

1. dušik (78,08%),
2. kisik (20,95%),
3. argon (0,93%),
4. vodena para (0 do 4%) koja je u promjenjivim količinama, a ovisi o temperaturi i nadmorskoj visini,
5. ugljični dioksid (0,03%), te
6. ostali plinovi u malim količinama (kao što su: vodik, helij, metan i drugi).

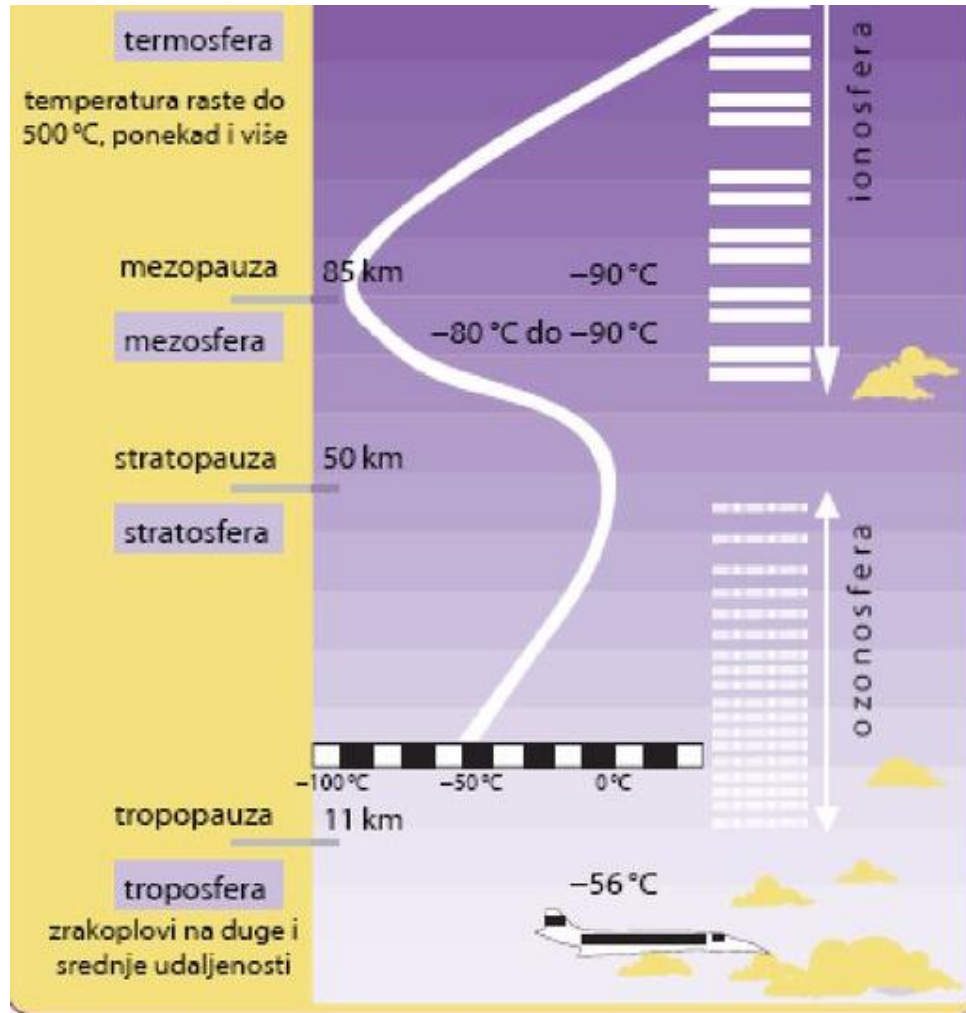
Sastav same atmosfere se u homosferi u većini slučajeva ne mijenja. Ona se nalazi do visine od 90 km, a nakon nje dolazi heterosfera. U heterosferi zbog slabljena gravitacijske sile Zemlje prevladavaju nešto lakši plinovi (vodik i helij) [1].

Atmosfera se može podijeliti ovisno o temperaturi zraka na više slojeva [1]:

1. Troposfera je najniži sloj atmosfere u kojem temperatura zraka pada za svakih 1 km visine za 6,5 °C. U ovom sloju se nalaze oblaci, padaju oborine, odnosno zbivaju se sve promjene koje se vide s površine Zemlje. Na površini Zemlje prosječna temperatura iznosi 15 °C. Ako ne bi bilo same atmosfere, prosječna temperatura bi bila niža za 33 °C. Visina troposfera također varira, ovisno o poziciji na Zemlji koja se promatra. Tako ona u tropskim predjelima doseže visinu do 16 km, gornji sloj ima temperaturi od oko - 80°C, dok u umjerenim i polarnim predjelima ima visinu između 7 i 11 km, te na gornjim granicama temperatura je od oko -40 do -60 °C.
2. Tropopauza je prijelazni sloj koji se prostire 2 km iznad troposfera. U ovom sloju sama temperatura zraka se gotovo ne mijenja.
3. Stratosfera prostire se od tropopauze do 50 km visine iznad zemljine površine. U ovom sloju temperatura se mijenja. U donjim slojevima ona lagano raste, zatim temperatura naglije raste, te na vrhu dostiže prosječnu temperaturu od 15°C.
4. Mezosfera je sloj u atmosferi koji se prostire od 50 do 80 km. U njoj temperatura s visinom opada, te može dostići temperaturu do -90 °C.

5. Termosfera koja se nalazi na visini između 80 i 500 km. U ovom sloju temperatura raste s visinom.

Na slici 1 prikazani su pojedini dijelovi atmosfere, te dijagram promjene temperatura s porastom visine.



Slika 1. Podjela atmosfere s porastom visine

Izvor: [1]

2.1. Vremenske prilike i neprilike

Za komercijalno zrakoplovstvo najbitniji sloj je troposfera jer se većina komercijalnog zračnog prometa odvija na visini između 9 i 11 km. Zrakoplov na ovim visinama leti iz više razloga. Glavni razlog je bolja učinkovitost leta. Odnosno, s porastom visine smanjuje se gustoća zraka,

samim time otpor zraka je sve manji, te zrakoplov može letjeti većom brzinom uz manju potrošnju goriva [2].

Visina na kojoj zrakoplov leti mijenjat će se ovisno o vremenskim prilikama i neprilikama. Obavijest o stanju vremenskih prilika i neprilika daju zrakoplovne meteorološke službe. Najopasnija meteorološka pojava za zrakoplovstvo je grmljavinska oluja. Ona predstavlja opasnost iznad, ispod, pored i unutar grmljavinskog oblaka. Nju može uzrokovati jedan oblak ili oblaci u nizu. Ti oblaci se nazivaju Kumulonimbusi koji mogu se mogu protezati i do 15 km visine, te otežati letenje pilotima. Piloti ih u pravilu zaobilaze kako bi se održala sama sigurnost leta [3].

Osim grmljavinske oluje postoji opasnost letenja kroz oblak. Oblak smanjuje vidljivost, a u kombinaciji s niskim temperaturama može doći do zaleđivanja zrakoplova u zraku. Ako dođe do zaleđivanja, zrakoplovu se smanjuju aerodinamička svojstva, te može doći do naglog gubitka letnih svojstava. Kako bi se zaleđivanje zrakoplova dogodilo, potrebno je zadovoljiti slijedeće uvjete [3]:

1. voda,
2. temperatura zraka ispod 0 °C i
3. temperatura konstrukcije zrakoplova ispod 0 °C.

U zraku se uvijek nalazi određena količina vodene pare, iako u malim količinama, ali da bi zaleđivanje bilo moguće potrebna je kondenzacija vodene pare u obliku [3]:

1. magle,
2. mraza,
3. kiše,
4. susnježice ili
5. snijega.

Tako se na samom zrakoplovu mogu stvoriti različite vrste leda s obzirom na različite meteorološke pojave, kao što su [3]:

1. Ledena kiša koja nastaje prilikom pada kiše, koje se u trenutku dodira s hladnom oplatom zrakoplova zaledi. Ovaj led je proziran i relativno gladak.
2. Snijeg koji može stvoriti velike naslage na zrakoplovu, ako je zrakoplov u stanju mirovanja, također se može stvoriti led ispod snijega.
3. Inje koje se najčešće stvaraju na spremnicima zrakoplova ako su oni izuzetno hladni. Inje se može stvoriti iako je temperatura zraka iznad 0 °C.

4. Zamrznuta magla koja je opasna ako zrakoplov prolazi kroz maglu u zimskim uvjetima. Na oplati zrakoplova se stvara tanak led koji nastaje zbog kapljica magle u dodiru s hladnom oplatom zrakoplova.
5. Kao u primjeru iznad, ali u ovom slučaju letenjem kroz oblak u zimskim uvjetima, može se dogoditi zaleđivanja zrakoplova radi kapljica u samom oblaku s dodirrom hladne površine zrakoplova.

Vjetar ima značajan utjecaj na let zrakoplova. Jak prizemni vjetar prilično je opasan prilikom slijetanja jer smanjuje stabilnost zrakoplova, naročito ako se radi o bočnom vjetru (vjetar okomit na smjer zrakoplova). U ovim situacijama piloti najčešće moraju ponoviti pokušaj slijetanja. U letu jak vjetar može biti vrlo koristan, odnosno let niz vjetar ubrzava zrakoplov, te je potrebna manja snaga motora za održavanje brzine, dok jak čeon vjetar usporava zrakoplov. Smicanje vjetra je također opasno. Smicanje nastaje kada na različitim točkama puše vjetar različitih brzina i/ili smjera. U tim situacijama zrakoplov naglo mijenja aerodinamičke postavke leta, pa se naglo propinje ili naglo pada, a ako je blizu tla postoji mogućnost neželjenog kontakata s tlom [3].

Na aerodinamička svojstva zrakoplova također utječe i kiša, jer stvara sloj vode na površini zrakoplova i remeti glatki protok zraka preko krila i drugih aerodinamičkih površina. To može dovesti do smanjena stvaranja uzgona. Isto tako ako se voda zadržava na površini zrakoplova, težina zrakoplova je veća. U slučaju obilne kiše smanjuje se vidljivost pilota, a samim time otežano je praćenje okoline. Kiša također povećava rizik od turbulencija, a samim time potrebna je dodatna pažnja od strane pilota [3].

2.2. Meteorološke zrakoplovne službe

Meteorološke zrakoplovne službe posjeduju odgovarajuća sredstva i uređaje koji su neophodni za pružanje meteoroloških usluga u zračnom prometu. Te usluge su definirane od strane Organizacije međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization* - ICAO) [4].

U ove usluge spadaju promatranja, priprema i distribucija meteoroloških izvještaja i prognoza, kao i bilo kojih drugih meteoroloških informacija i podataka koje su neophodne za sigurno odvijanje zračnog prometa. U nastavku je dan popis korisnika meteoroloških usluga [4]:

1. službe upravljana zračnim prometom,
2. zrakoplovni operateri,

3. piloti,
4. službe potrage i spašavanja,
5. aerodromi i
6. ostale zainteresirane strane.

Meteorološka situacija promatra se neprekidno, a osoba koja ju promatra naziva se meteorološki motritelj. Meteorološko izvješće gleda se u redovnim vremenskim ciklusima koji su u rasponu od 30 minuta ili jednog sata (ovisi o veličini zračne luke i intenzitetu zračnog prometa). Ako se u tom razdoblju meteorološka situacija drastično promijeni moguće je izdati novo meteorološko izvješće [4].

2.2.1. Procjena i izvješće o stanju površine USS-e

Sigurnost uzletno-sletnih staza (USS) jedna je od kategorija koje je izrazito važna za sigurno manevriranje zrakoplova po zemlji. Zato je operator aerodroma nužan izdati procjenu i izvješće o stanju površine USS-e (engl. *Runway Surface Condition Assessment and Reporting - RWYCC*). Na USS-i se mogu nalaziti različite vrste kontaminata, te tako postoji više vrsta kodova RWYCC-a, koji su dani u nastavku [4]:

1. RWYCC 6 označava suhu USS-u, odnosno USS na čijoj se površini ne nalazi vlaga i ako ona nije kontaminirana u području predviđenom za korištenje,
2. RWYCC 5 označava mokru USS-u, odnosno stazu na kojoj je vidljiva vlažnost ili koja je prekrivena vodom dubine do 3 mm ili manje,
3. RWYCC 3 označava sklisko mokra USS-u, to jest stazu na kojoj je utvrđeno da je koeficijent trenja na značajnom djelu USS-e degradiran, a
4. RWYCC 2 označava USS-u na kojoj se nalazi više od 3 mm stajaće vode.

2.2.2. SNOWTAM

U zimskim uvjetima često se izdaje NOTAM (engl. *Notice to Airmen*) sa šifrom SNOWTAM. NOTAM sadrži sve informacije koje se odnose na uspostavu, stanje ili promjenu na bilo kojem zrakoplovnom uređaju, usluzi, proceduri ili na opasnost čije je pravovremeno saznanje ključno za osoblje koje je povezano s letnim operacijama [5].

Šifra SNOWTAM označava da se na površinama aerodroma nalazi snijeg, bljuzgavica, led ili voda. Ova informacija je ključna za letačko osoblje pogotovo u fazama slijetanja kada je smanjeno trenje između kotača zrakoplova i podloge, s čime je smanjena i mogućnost kočenja zrakoplova. SNOWTAM se izdaje ako je [5]:

1. promjena kvalitete osvjetljenja uzletno-sletne staze uzrokovana zbog snijega, bljuzgavice, leda ili vode,
2. promjena u debljini nanosa na konstruktivnim površinama veća za: 20 mm za suhi snijeg, 10 mm za mokri snijeg ili 3 mm za bljuzgavicu i
3. promijenjena raspoloživa duljina USS-e za 10% zbog nepovoljnih meteoroloških uvjeta.

SNOWTAM je dokument koji se sastoji od zaglavlja i tijela dokumenta. U zaglavlju se nalazi datum i vrijeme izdavanja, te serijski broj SNOWTAM-a. U tijelu dokumenta nalaze se sve relevantne informacije koje su poredane kao stavke od A do T. U tablici 1 prikazane su stavke SNOWTAM-a, te njihovo objašnjenje [5].

Tablica 1. Stavke SNOWTAM-a

1: Odjeljak o performansama zrakoplova	2: Odjeljak pregleda situacije
Polje A – ICAO lokacijska oznaka aerodroma	Polje I - Smanjena duljina USS-e
Polje B - Datum i vrijeme pregleda	Polje J – Niska vijavica na USS-i
Polje C – Niži broj oznake USS-e	Polje K – Rasuti pijesak na USS-i
Polje D – RWYCC <u>kod</u> (za svaku trećinu USS-e)	Polje L – Kemijsko tretiranje na USS-i
Polje E - <u>Postotak</u> pokrivenosti za svaku trećinu USS-e	Polje M – Nanosi snijega na USS-i
Polje F - Dubina kontaminiranosti za svaku trećinu USS-e	Polje N – Nanosi snijega na stazi za vožnju
Polje G - Opis stanja/naslage za svaku trećinu USS-e punim nazivom	Polje O – Nanosi snijega uz USS-u
Polje H - Širina USS-e na koju se primjenjuju RWYCC-ovi	Polje P - Uvjeti na stazi za vožnju
	Polje R - Uvjeti na <u>stajanci</u>
	Polje S - Izmjereni koeficijent trenja
	Polje T - Napomene

Izvor: [5]

3. ZAŠTITA OD ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA

Zaštita od zaleđivanja zrakoplova (engl. *Anti-Icing*) vrlo je važna radi očuvanja sigurnosti leta zrakoplova u hladnim vremenskim uvjetima. Cilj zaštite od zaleđivanja je sprečavanje mogućnosti stvaranja leda, mraza i naslaga snijega na zrakoplovnim površinama za neko ograničeno vrijeme. Zaleđivanje negativno utječe na aerodinamička svojstva zrakoplova, zbog povećanja otpora i smanjenja uzgona [6].

Postupci zaštite od zaleđivanja mogu se koristiti neposredno prije leta, nakon postupka odleđivanja ili tijekom leta kada postoji mogućnost zaleđivanja (engl. *anti-icing in flight*) [6].

Postoje nekoliko metoda zaštite od zaleđivanja zrakoplova, a oni su [6]:

1. topli zrak,
2. električni način zaštite,
3. tekući (kemijski) način zaštite, i
4. aerodinamički dizajn zrakoplova.

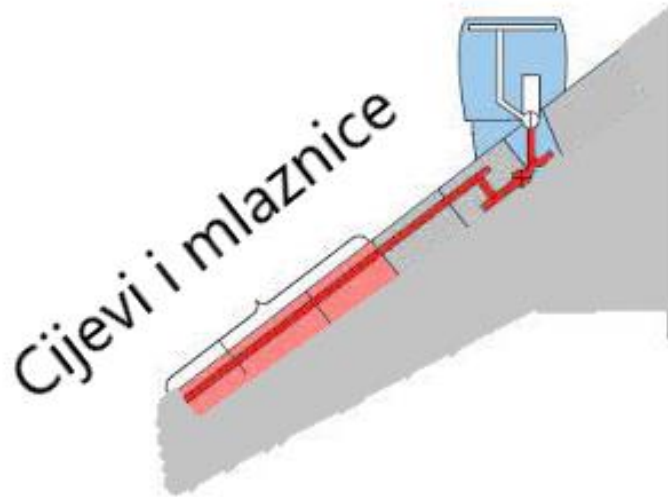
3.1. Zaštita od zaleđivanja zrakoplova toplim zrakom

Zaštita od zaleđivanja zrakoplova toplim zrakom jedna je od učinkovitijih metoda sprječavanja zaleđivanja zrakoplovnih površina (slika 2). Ova metoda se većinom koristi kod turbo-ventilatorskih zrakoplova za sprječavanje zaleđivanja: uvodnika motora, krila i repnih površina [7].

Sam postupak zaštite od zaleđivanja toplim zrakom dan je u nastavku [7]:

1. izvor toplog zraka je najčešće motor ili u manjim vjerojatnostima poseban generator topline,
2. topli zrak se usmjerava kroz cijevi koje se nalaze unutar oplata zrakoplova, te su smještene blizu same površine, koju je potrebno zaštititi od zaleđivanja. Cijevi su izgrađene od materijala koji ima visoku otpornost na toplinu,
3. na cijevima se nalaze male mlaznice koji topli zrak ispuštaju i kod nekih zrakoplova se one mogu kontrolirati, odnosno postoji mogućnost otvaranja i zatvaranja mlaznica, dok se na nekim zrakoplovima na početku cijevi u blizini motora nalazi poseban ventil koji omogućuje protok toplog zraka i

4. toplina koju topli zrak prenosi sprečava zaleđivanje zrakoplova, odnosno održava oplatu zrakoplova iznad temperature zaleđivanja.



Slika 2. Shematski prikaz zaštite od zaleđivanja toplim zrakom

Izvor: [7]

Ovaj način zaštite od zaleđivanja sadrži kontrolni sustav koji regulira protok zraka prema potrebi. On može biti automatski ili ručni, a njegov rad se bazira pomoću senzora koji prepoznaju vanjsku temperaturu zraka, odnosno ako postoje uvjeti zaleđivanja, pilot prima informaciju koliko toplog zraka je potrebno ispustiti da se led ne formira na površinama zrakoplova [7].

Takav način sprječavanja zaleđivanja se pokazao kao vrlo učinkovit, ali je zato potrebno dodatno održavanje zrakoplovnih cijevi, mlaznica i senzora [7].

3.2. Električni način zaštite od zaleđivanja

Električni način zaštite od zaleđivanja koristi električnu energiju koja se pretvara u toplinsku, odnosno zagrijava se određena površina, a zbog zagrijavanja površine sprječava se formiranje leda. Električnim načinom mogu se zaštititi [8]:

1. krila,
2. antene i sonde,
3. propeleri i
4. staklene površine.

3.2.1. Električni način zaštite krila

Električni način zaštite od zaleđivanja krila zrakoplova koristi električne grijače koji su ugrađeni unutar strukture krila zrakoplova. Grijači generiraju toplinu, te tako sprječavaju formiranje leda na površinama krila tijekom leta. Ovaj način zaštite se u većini slučajeva koristi kod turbo-propelerskih motora, a u konstrukciji zrakoplova se mogu nalaziti [8]:

1. električne ploče koje su ravnomjerno raspoređene unutar strukture krila, te istovremenom griju svaku površinu jednakom razinom topline. Ova vrsta električne zaštite koristi se na većim površinama [8] i
2. električne trake to jest električni kablovi koji su postavljeni duž površine krila. Oni su fleksibilni i mogu se prilagoditi različitim kutovima, a koriste se na manjim površinama krila ili na dijelovima koje je teže zaštititi električnim pločama. Trake su izgrađene od materijala s visokom razinom toplinske vodljivosti, te su obložene zaštitnim slojem kako bi se osigurala sigurnost od požara [8].

Oba sustava imaju integrirane senzore za otkrivanje leda koji mogu biti termički i optički. Kada senzori otkriju mogućnost stvaranja leda, električne trake i/ili ploče se uključe, te počinju grijati površinu. Sami senzori su povezani s kontrolnim sustavom koji može biti automatski. Kao takav, sustav regulira njihov rad, odnosno on ih automatski aktivira/deaktivira. Takav kontrolni sustav osigurava da je površina krila uvijek iznad točke zaleđivanja, te se istovremeno ne troši električna energija na odleđivanje kada ono nije potrebno [8].

3.2.2. Električni način zaštite antena i sondi

Sonde na zrakoplovima su namijenjene za mjerenje raznih parametra, poput brzine, temperature i tlaka. Važno je održavati sonde zaštićenima od zaleđivanja kako bi prikazale točne parametre. Sama zaštita provodi se upotrebom grijanih elemenata smještenih unutar sondi ili na njihovim površinama. Grijalice su izrađene od tankih električnih žica koje su otporne na visoke temperature [8].

Antene zrakoplova su elementi namijenjeni za komunikaciju, navigaciju i radarsko praćenje. Grijalice antena su smještene s vanjske strane antene. Obično su izgrađene od tankih električnih žica koje su isto tako otporne na visoke temperature [8].

Njihov kontrolni sustav radi neprekidno, te aktivira grijalicu samo kada je to potrebno, čime se smanjuje potrošnja električne energije. Vrlo je bitno da ovi uređaji cijelo vrijeme budu

zaštićeni od zaleđivanja kako bi njihov rad bio konstantan, a još je bitnije da pokažu točne parametre [8].

3.2.3. Električni način zaštite propelera

Električni način zaštite propelera pruža učinkovito rješenje za održavanje, sigurnost i funkcionalnost propelera tijekom leta. Iako je ovaj sustav namijenjen prvobitno za odleđivanje, može se koristiti i kao zaštita od zaleđivanja. U slučaju zaleđivanja propelera postoji mogućnost pucanja lopatica zbog velikog opterećenja, ali upotrebom grijača, led s lopatica se topi i uz pomoć centrifugalne sile on sklizne s propelera.

Sustavi zaštite od zaleđivanja projektirani su da brzo reagiraju na uvjete zaleđivanja. Time se osigurava konstantna optimalna temperatura u kojoj formiranje leda nije moguće. Samim time se povećava pouzdanost leta. Električni način zaštite propelera zrakoplova od zaleđivanja provodi se električnim grijačima koji mogu biti izvedeni na sljedeće načine, to jest da su [9]:

1. grijalice smještene na unutarnjoj površini propelera,
2. grijalice smještene unutar rotorske glave propelera. Rotorska glava je dio propelera koji povezuje lopatice s vratilom i
3. grijalice smještene na vanjskoj površini propelera (slika 3).



Slika 3. Propeler s grijalicama

Izvor: [9]

Ovaj sustav u većini slučajeva ima ugrađenu samo-dijagnostiku, te sustav upozoravanja. Ovim načinom provjerava se ispravnost senzora i grijalica, te u slučaju neispravnosti automatski šalju upozorenje pilotu [9].

3.2.4. Električni način zaštite staklenih površina

Ovi sustavi koriste električnu energiju kako bi staklenu površinu održavali iznad temperature formiranja leda. Staklena površina koja se uvijek zaštićuje je vjetrobransko staklo, a osim vjetrobranskog stakla, neki zrakoplovi imaju postavljenu zaštitu i na bočne prozore pilotske kabine, te prozore koji se nalaze u putničkoj kabini. Kod manjih zrakoplova, i u uvjetima na kojima se ne leti pretežito ispod točke ledišta, staklene površine moguće je zaštititi uz pomoć tekućina, a većinom se koristi alkohol radi njegove ekonomičnosti [10].

Električni sustav se sastoji od tankih vodljivih materijala koji se nalaze na unutarnjoj stijenci staklenih površina. Vodljivi materijali su povezani s električnim izvorom napajanja i kontrolnim sustavom. Pilot može aktivirati sustav kada primijeti mogućnost zaleđivanja ili kada primi meteorološko izvješće u kojem se nalazi informacija o mogućnosti zaleđivanja. Prilikom aktivacije, struja prolazi kroz vodljivi materijal koji se zagrijava, te sprječava formiranje leda [10].

Električni sustav zaštite staklenih površina zrakoplova mora biti pravilno projektiran, instaliran i održavan, a vodljivi elementi moraju biti dovoljno tanki kako pilotu ne bi smanjili vidljivost. Ako se provodi zaštita i na putničkim prozorima, putnik se osjeća sigurnije i udobnije, a njegov stres je znatno manji [10].

3.3. Tekući (kemijski) način za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja

Osnovna funkcija tekućine za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja je uklanjanje kontaminanta te snižavanje točke smrzavanja kako bi se odgodilo njihovo nakupljanje na kritičnim površinama zrakoplova, kao što su krila i repne površine [11].

Postoje 4 vrste tekućina za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja, a one su:

1. *Type I* tekućine koje su najslabije tekućine za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja. Glavni element u smjesi s vodom je glikola ili propilen glikola koji se nanosi vruć na površine zrakoplova. Tekućina je narančaste boje i koristi se uglavnom za skidanje snijega i leda. Ako su uvjeti s padalinama ili ako je vanjska temperatura dosta ispod 0 °C ova tekućina se najčešće ne koristi.
2. *Type II* tekućine su gušće od *Type I* tekućina i sastoje se od glikola i polimernih dodataka koji pružaju dulje vrijeme zaštite od zaleđivanja, te povećavaju sposobnost „sklizanja“ padalina sa zrakoplova. *Type II* tekućine su bezbojne boje i koriste se u srednjim uvjetima zaleđivanja. Prilikom polijetanja tekućina opada sa zrakoplova kako bi površina bila glatka, odnosno kako se ne bi stvorio dodatan otpor.

3. *Type III* je slična *Type II* tekućini, ali je žute boje. Prednost *Type III* tekućine je ta, što se lakše očisti od krila zrakoplova, te kao takva je primjenjiva na zrakoplovima manjih brzina polijetanja.
4. *Type IV* su najgušće tekućine i pružaju najdugotrajniju zaštitu od zaleđivanja. Tekućine su zelene boje i koriste se u ekstremnim uvjetima zaleđivanja, te kada je intenzitet prometa na zračnoj luci velik, odnosno kada je potrebno duže vrijeme čekanje za polijetanje. Također se koristi prilikom visoke koncentracije padalina u zimskim uvjetima.

3.3.1. Vrijeme trajanja zaštite od zaleđivanja

Posebnu pažnju potrebno je obratiti na vrijeme koje tekućina štiti zrakoplov protiv zaleđivanja, ali isto tako i dozvoljenu brzinu polijetanja koja je potrebna da tekućina sklizne s površine zrakoplova. U tablici 2 nalaze se informacije o tekućinama za zaštitu od zaleđivanja [12].

Tablica 2. Tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja

TEKUĆINA	BOJA	VRIJEME TRAJANJA ZAŠTITE U SATIMA	BRZINA POLIJETANJA
TYPE I	NARANČASTA	0:06 – 0:11	BEZ MINIMUMA
TYPE II	BEZBOJNA	0:20 – 0:45	100 ČVOROVA
TYPE III	ŽUTA	0:10 – 0:20	60 ČVOROVA
TYPE IV	ZELENA	0:35 – 1:15	100 ČVOROVA

Izvor: [12]

Da bi se ostvario maksimalan učinak tekućine, potrebno je uzeti u obzir nekoliko faktora koji su dani u nastavku [12]:

1. tekućinom se mora pravilno rukovati,
2. osoblje mora pravilno nanositi tekućinu,
3. osoblje i piloti moraju biti upoznati s tablicom koja pokazuje vrijeme i uvjete u kojima tekućina štiti zrakoplov od zaleđivanja (engl. *Holdover time* - HOT), te
4. piloti prije polijetanja moraju provjeriti jesu li krila i druge površine čiste od naslaga snijega.

Tekućine štite zrakoplov tijekom ograničenog vremena u uvjetima mraza i u uvjetima smrzavanja s padalinama. Vrijeme tijekom kojeg se očekuje da će tekućina štiti zrakoplov naziva se vrijeme zadržavanja tekućine. Ove tekućine štite zrakoplov samo na zemlji, a na slici 4 prikazan je način korištenja kemijskih tekućina za zaštitu od zaleđivanja [11].



Slika 4. Tekući (kemijski) način zaštite od zaleđivanja

Izvor: [12]

Vrijeme trajanja zaštite tekućine mjeri se od trenutka kada je tekućina nanosena na površinu zrakoplova. Kako bi se točno odredilo vrijeme trajanje zaštite koja tekućina omogućava napravljen su dvije vrste tablica [11]:

1. generičke tablice, koje se koriste za više vrsta tekućina i
2. originalne tablice, koje se koriste samo za jedan tip tekućine za točno određene uvjete.

Tablice su podijeljene u dva dijela. Prvi dio opisuje odgovarajuće procedure i primjenu tekućina, te omjer smjese s obzirom na okolnu temperaturu. Drugi dio opisuje zavisnost vremena zadržavanja s obzirom na okolnu temperaturu, vrstu kontaminata, ostalog dijela i polja označenih crvenom bojom (ako se ne može odrediti vrijeme zadržavanja tekućine). Primjer za tekućinu *Type I* u različitim meteorološkim uvjetima nalazi se u tablici 3 [13].

Tablica 3. Vrijeme zadržavanja tekućine Type I u različitim meteorološkim uvjetima

Temperatura vanjskog zraka	Magla koja se smrzava	Padaline s vrlo malo snijega	Padaline s malo snijega	Padaline s umjerenim snijegom	Padaline sa slabom kišom	Padaline s umjerenim vjetrom	Ostalo
do -3 °C	0:09 - 0:16 (vrijeme)	0:12 – 0:15	0:06 – 0:12	0:03 – 0:06	0:02 – 0:05	0:01 – 0:05	
od -3 °C do 6 °C	0:06 - 0:08	0:11 – 0:13	0:05 – 0:11	0:02 – 0:05	0:02 - 0:05		
od -6 °C do -10 °C	0:04 – 0:08	0:09 – 0:12	0:05 – 0:09	0:02 – 0:05	0:02– 0:05		
Ispod -10 °C	0:04 – 0:07	0:07 – 0:08	0:04 – 0:07	0:02 – 0:04			

Izvor: [13]

U tablicama su uvjeti testirani i vrijeme zadržavanja tekućine trebalo bi biti kako je i navedeno. Međutim, postoje uvjeti koji mogu smanjiti učinkovitost tekućine čak i unutar same tablice. Zato je potrebno pratiti uvjete koji mogu smanjiti njenu učinkovitost, a oni su [13]:

1. temperatura vanjskog zraka, odnosno što je hladnije, brže će tekućina izgubiti učinkovitost,
2. vrsta i intenzitet padalina, odnosno što je veća vlažnost i veća količina padalina, tekućina će brže izgubiti učinkovitost i
3. vrsta i količina tekućine, odnosno što je tekućina manje viskozna, brže će izgubiti učinkovitost.

3.3.2. Način primjene tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja

Tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja dolaze do zrakoplova uz pomoć odgovarajućih vozila, a nanose se na zrakoplov uz pomoć posebnih prskalica koje se nalaze na tim istim vozilima. Tekućine se moraju nanositi na čistu površinu. To znači da je postupak odleđivanja završen unutar otprilike 3 minute, ili je zrakoplov izveden čist iz hangara. Tako postoje dva načina postupka zaštite od zaleđivanja [11]:

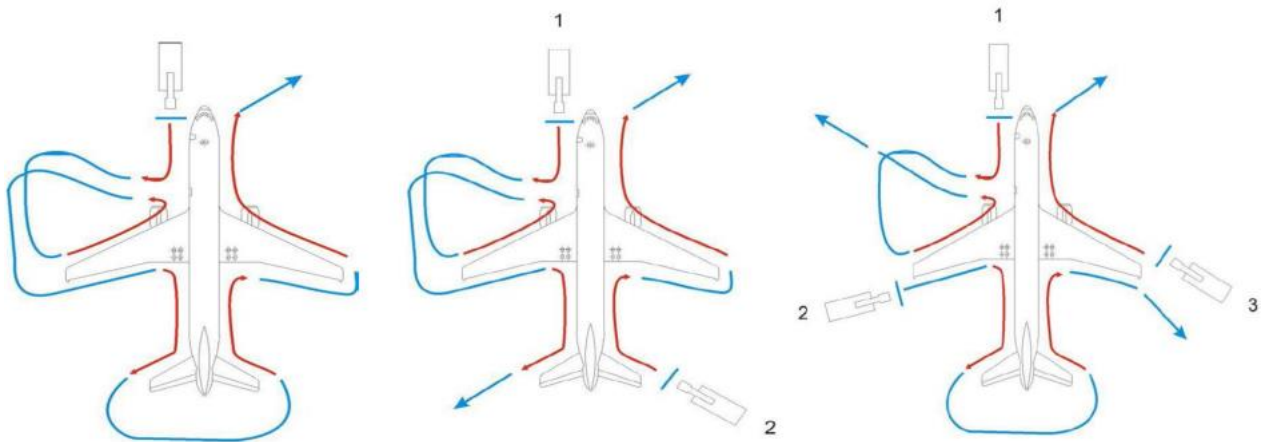
1. jedno-stupanjski postupak, koji se koristi kada na zrakoplovu nema mnogo kontaminata. Samim time nije potreban poseban postupak čišćenja površine zrakoplova. U ovom

slučaju se koristi većinom ugrijana *Type IV* tekućina koja istovremenom uklanja naslage s površine zrakoplova i istovremeno štiti zrakoplov od zaleđivanja i

2. dvo-stupanjski postupak, koji se koristi, ako se na zrakoplovu nalaze veće naslage snijega i/ili leda. U većini slučajeva vrši se tako da se zrakoplov „odledi“ tekućinom *Type I* koja je ugrijana na 60 °C, a zatim se za zaštitu od zaleđivanja nanosi *Type II* tekućina.

U procesu odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja mogu sudjelovati jedno, dva ili tri vozila. O količini vozila ovisi veličina zrakoplova i uvjeti zadržavanje tekućine. Ovisno o broju vozila postoje nekoliko načina kretanja vozila oko zrakoplova (slika 5). Neovisno o veličini zrakoplova potrebno je očistiti i zaštititi cijelu njegovu površinu, pod koju spada [11]:

1. trup zrakoplova,
2. krila,
3. uvodnici motora,
4. elise,
5. nos zrakoplova i
6. horizontalne i vertikalne repne površine.



Slika 5. Načini kretanja vozila za odleđivanje/zaštitu za zaleđivanje oko zrakoplova

Izvor: [11]

Također postoje nekoliko površina na zrakoplovu koja ne bi smjela doći u doticaj s kemikalijama radni negativnog utjecaja istih, a ona su [11]:

1. vjetrobransko staklo,
2. kotači i kočnice,

3. kompresor motora,
4. usisnik pomoćne energetske jedinice (engl. *Auxiliary Power Unit* – APU) i
5. na statičke otvore i Pitot cijev.

Prije nanošenja tekućine za odleđivanje na površinu zrakoplova zapovjednik je dužan izdati odobrenje o nanošenju. O načinu nanošenja tekućine odgovorno je aerodromsko osoblje koje posjede priručnik u kojem se nalaze upute za nanošenje [11].

Nakon završetka nanošenja tekućine, osoblje koje je vršilo zaštitu, dužno je obavijestiti zapovjednika zrakoplova o [11]:

1. vrsti tekućine,
2. početku trajanja zaštite i
3. postotku vode koja se nalazi u smjesi s kemikalijom.

Nakon dobivanja ovih obavijesti, zapovjednik je dužan provjeriti jesu li površine adekvatno očišćene, a zatim ove podatke upisati u tehničku knjigu zrakoplova. Tek nakon ovih postupaka zapovjednik može krenuti s postupcima za polijetanje [11].

3.3.3. Mjesta namijenjena za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja

Nanošenje tekućine za odleđivanje se može vršiti na stajanci, parkirnoj poziciji, na proširenju vozne staze i stajanci namijenjenoj za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja [14].

Na zračnim lukama u kojima je promet intenzivan i na kojima su uvjeti zaleđivanja, može se nalaziti stajanka posebno namijenjena za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja (slika 6). Na ovoj stajanci se nalazi posebna površina za parkiranje zrakoplova i posebna površina za kretanje vozila. Stajanka se u većini slučajeva nalazi daleko od putničkog terminala, te je smještena tako da ne ometa kretanje ostalih zrakoplova. Manje zračne luke u većini slučajeva nemaju posebnu stajanku za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja, te one sve postupke vrše na stajanci za prihvat i otpremu zrakoplova [14].



Slika 6. Stajanka za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja

Izvor: [14]

Prednosti korištenja stajanke za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja je ta, što ne uzrokuje usporenje procesa prijema i otpreme zrakoplova, a samim time ne dolazi do mogućih kašnjenja. Druga prednost je ta, što vozila za odleđivanje imaju veću manevarsku slobodu, te je lakše istima upravljati, a mogućnost za sudare između zrakoplova, vozila i objekta je svedena na minimum. Također se na površini stajanke za prihvata i otpremu zrakoplova ne zadržava tekućina za odleđivanje koja je vrlo skliska, čime se osigurava veća sigurnost zemaljskog osoblja [14].

Ako se tekućina nanosi neposredno prije uzletno-sletne staze na zrakoplov, vrijeme potrebno za taksiranje od stajanke (koja se nalazi kod putničkog terminala) do uzletno-sletne staze se gubi, što znači da, ako zrakoplov ostane duže na zemlji, kemijske tekućine za odleđivanje će i dalje imati svoja svojstva. Sve više aerodroma koristi ovaj način primjene tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja [14].

Vrijeme i količina kemikalija potrebnih za postupak odleđivanja i zaštitu od zaleđivanja ovise o veličini zrakoplova. Kako se mnogo kemijske tekućine troši na zaštitu zrakoplova, a sama tekućina je štetna za okoliš, neki aerodromi na svojim lokacijama za nanošenje kemikalija u podzemlju imaju posebne spremnike. Oni služe za sakupljanje kemijskih tekućina. Na ovaj način zaštićuje se okoliš, te postoji mogućnost ponovnog korištenja tekućine, što je ekološki i ekonomski prihvatljivije [14].

3.4. Aerodinamički dizajn zrakoplova

Zrakoplovi su zaštićeni od zaleđivanja i putem aerodinamičkog dizajna. Na nekim će se zrakoplovima led formirati ranije (tijekom leta). Formiranje leda ovisi o konstrukciji zrakoplova, koja može smanjiti i odgoditi formiranje leda na kritičnim površinama [15].

Jedan od glavnih načina zaštite je glatka površina zrakoplova. Zrak koji struji po glatkoj površini zrakoplova ima bolji protok kroz samu površinu, odnosno stvara se takvo strujanje koje ometa stvaranje leda [15].

Osim glatke površine u ovaj dio se ubraja i oblik kritičnih površina, kao što su krila i rep zrakoplova. Krila mogu imati posebne profilne oblike koje smanjuju turbulenciju, a potiču bolji protok zraka, smanjujući mogućnost formiranja leda. Led će se kasnije formirati na aeroprofilima koja su tanka i imaju „oštre“ prednje rubove (jer imaju manju površinu i volumen, a tanji rubovi stvaraju bolje uvjete za protok zraka), u usporedbi s velikim transportnim zrakoplovima koji imaju deblje površine aeroprofila [15].

Osim dizajna aeroprofila na stvaranje leda utječe i brzina penjanja. U većini slučajeva zrakoplovi s turbo-propelerskim i klipnim motorom se penju mnogo sporije u odnosu na ostale verzije zrakoplovnih motora (mlazni zrakoplovi s većom količinom potiska). Kako su uvjeti zaleđivanja većinom veći na nižim visinama, ti će zrakoplovi biti izloženiji uvjetima zaleđivanja. Mlazni zrakoplovi s većom količinom potiska poput turbo-ventilatorskih motora obično provode manje vremena u području uvjeta zaleđivanja, te se na njima u pravilu stvara manja količina leda [15].

Zakrilca su uređaji za povećanje uzgona koja pozitivno utječu na performanse zrakoplova. Dokazano je da, ako zrakoplov ima izvučena zakrilca, a na njegovom krilu se formirao led, zrakoplov će imati bolju stabilnost u letu, nego zrakoplov bez zakrilca [15].

Sam aerodinamički dizajn ne može u potpunosti spriječiti nastanak zaleđivanja, pogotovo ne u ekstremno hladnim uvjetima, ali kombinacijom aerodinamičkog dizajna i neke druge metode zaštite od zaleđivanja osigurat će se sigurnost zrakoplova na prihvatljivoj razini [15].

4. SUSTAVI ZA ODLEĐIVANJE ZRAKOPLOVA

Sustavi za odleđivanje zrakoplova (engl. *De-icing*) su vrlo važni sigurnosni sustavi koji se koriste, ako se na zrakoplovu formira mraz, led ili je zrakoplov prekriven snijegom. Ako se led formira na površinama krila, repu i drugim površinama zrakoplova on smanjuje aerodinamičku učinkovitost, te ga je potrebno ukloniti [6].

Osim tekućeg (kemijskog) načina otklanjanja leda koji je naveden u prošlom poglavlju, za odleđivanje zrakoplova se mogu koristiti i sljedeće metode odleđivanja [6]:

1. mehaničko,
2. toplinsko,
3. pneumatsko, te
4. inovativni načini odleđivanja.

Sustavi za odleđivanje zrakoplova moraju biti vrlo pouzdani i učinkoviti pogotovo ako se led formira tijekom leta. Danas zrakoplovi koriste složene senzore koji prepoznaju otkrivanje leda, a ti sustavi za odleđivanje se u većini slučajeva automatski aktiviraju [6].

4.1. Mehaničko odleđivanje

Mehaničko odleđivanje koristi mehaničke uređaje poput metlica, gumenih lopatica ili užadi koje se koriste za skidanje nakupljenih kontaminata s površina zrakoplova. Ova se tehnika odleđivanja većinom koristi samo na manjim zrakoplovima. Također se preporučuje da se ova metoda primjenjuje u grijanom hangaru radi bolje učinkovitosti [16].

4.1.1. Metlice i gumene lopatice za skidanje kontaminata sa zrakoplova

Metlice i/ili gumene lopatice su dobri alati za čišćenje većeg dijela površina manjih zrakoplova. Način primjene je da se krilo čisti s prednje prema stražnjoj strani. Ako se ova tehnika koristi potrebno je paziti da se sve praznine na upravljačkim površinama očiste, te da se ne oštete senzori i antene koje se nalaze na tim površinama [16].

Ako se na površini zrakoplova nalazi led u većini slučajeva će biti potrebno koristiti i neku dodatnu metodu odleđivanja kao što je topli zrak ili korištenje tekućine za odleđivanje, jer postoji

možnost da se led neće moći mehanički ukloniti s površine zrakoplova. Na slici 7 je prikazana metoda uklanjanja snijega metlom [16].



Slika 7. Mehaničko skidanje snijega metlom

Izvor: [16]

Ako se koristi ova metoda postoje određeni savjeti, kako da se lakše, brže i sigurnije uklone kontaminanti s površina zrakoplova, a ona su dana u nastavku [16]:

1. kako bi se zaštitila površina zrakoplova od ogrebotina i udubljenja preporučuje se da je drška obložena mekanom spužvom,
2. ako se koriste metle za čišćenje poda i čišćenje površina zrakoplova potrebno je napraviti separaciju i označiti koja se metla za što koristi, kako se na zrakoplovu ne bi pojavile nečistoće poput masnoća s poda,
3. kako bi se snijeg lakše uklonio s površina zrakoplova, četka bi trebala biti u odnosu na dršku metle okrenuta pod kutom od 90° i
4. metle s čvrstim smeđim čekinjama će trajati duže od metli s plastičnim čekinjama, te će se s njima lakše ukloniti lagane nakupine mraza.

4.1.2. Užadi za skidanje kontaminata sa zrakoplova

Uklanjanje snijega uz pomoć užadi je jednostavna, ali učinkovita metoda za čišćenje snijega s površina zrakoplova. Ova tehnika se koristi u većini slučajeva na manjim zrakoplovima ili u hitnim situacijama kada nije moguće koristiti neke bolje sustave za odleđivanje [16].

Postupak uklanjanja snijega pomoću užadi (slika 8) se vrši najmanje uz pomoć dvije osobe, ali broj osoblja može varirati ovisno o veličini zrakoplova i količini snijega koji se nalazi na istome. Kako bi se pravilno očistio zrakoplov od snijega potrebno je pratiti sljedeći postupak [16]:

1. potrebno je koristiti dovoljno dugu užad koja može obuhvatiti cijelu površinu koju je potrebno očistiti. Također uže mora biti dovoljno izdržljivo kako ne bi puklo prilikom povlačenja,
2. dvije osobe primaju kraj užadi i nalaze se na suprotnim krajevima površine koju je potrebno očistiti,
3. osobe povlače užad naprijed-natrag preko površine koju je potrebno očistiti, te se tako guraju nakupine snijega prema rubovima krila i
4. nakon što se uže povuklo preko cijele površine potrebno je napraviti vizualnu provjeru, te se preporučuje ručno dodirivanje površine, kako bi se ustanovilo da je cijela površina adekvatno očišćena od nakupina snijega.



Slika 8. Metoda uklanjanja kontaminata uz pomoć užadi

Izvor: [16]

Ova metoda uklanjanja snijega ima svoja ograničenja, a glavni nedostatak ovog načina uklanjanja je taj što ova metoda nije najučinkovitija ako se na zrakoplovu formirao deblji sloj leda, tada je potrebno upotrijebiti neku drugu metodu za odleđivanje [16].

4.2. Toplinsko odleđivanje

Toplinsko odleđivanje, odnosno odleđivanje vrućim zrakom (slika 9) dobiva se od uređaja koji su namijenjeni za zagrijavanje motora zrakoplova, te za odleđivanje dijelovima zrakoplova koji se ne mogu zbog nepovoljnog utjecaja sredstva u tekućinama odlediti. Ova metoda se koristi prvenstveno za odleđivanje [12]:

1. uvodnika motora,
2. lopatica kompresora,
3. lopatica ventilatora i
4. podvozja.

Osim ovih nabrojanih dijelova može se koristiti i za odleđivanje ostalih površina. Kod ove metode odleđivanja potrebno je pripaziti da se vrući zrak ne zadrži predugo na jednom mjestu, jer postoji mogućnost oštećenja konstrukcije zrakoplova [12].



Slika 9. Odleđivanje motora vrućim zrakom

Izvor: [12]

Kod nekih aerodroma postoji mogućnost korištenja mlaznih motori kao izvor vrućeg zraka (slika 10) koji služe za odleđivanje zrakoplova. Nedostatak ove metode je taj što je potrebno brzo reagirati kada se zrakoplov odledi, jer dodatno zagrijavanje utječe negativno na osjetljive instrumente, koji prelaze iz ledenih uvjeta u iznimno vruće u svega nekoliko sekundi [11].



Slika 10. Mlazni motor kao izvor vrućeg zraka za odleđivanje zrakoplova

Izvor: [11]

4.3. Pneumatsko odleđivanje

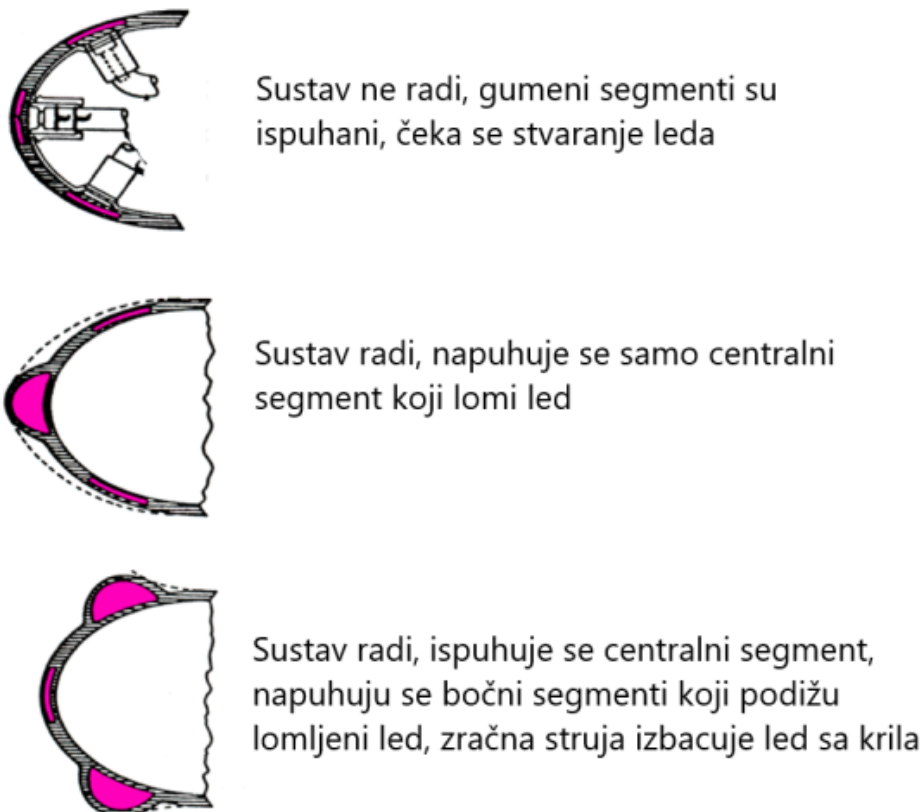
Pneumatski način odleđivanja se koristi u većini slučajeva kod zrakoplova s klipnim i turbo-propelerskim motorom, jer im nije potrebna velika količina zraka za rad [17].

Ovaj sustav se sastoji od [17]:

1. uređaja koji proizvodi zrak,
2. sustava raspodjele zraka,
3. gumenih segmenata i
4. sustava za kontrolu i indikaciju.

Kada se sustav uključi zrak koji se proizvodi iz uređaja dovodi se do gumenih segmenata koji se napuhavaju, te se tako led lomi. Nakon što se led slomio gumeni segmenti se ispuhaju, odnosno zrak koji se u njima nalazio ispušta se u atmosferu. U uvjetima zaleđivanja ovaj sustav radi na određenom vremenskom ciklusu koji se sastoji da je sustav uključen 30 sekundi, pa je

isključen 120 sekundi. Ovim načinom „osigurava“ se da se sustav uključuje samo kada se led stvorio. Na slici 11 prikazan je shematski prikaz pneumatskog načina odleđivanja [17].



Slika 11. Shematski prikaz pneumatskog načina odleđivanja gumenim segmentima

Izvor: [17]

Kada je sustav isključen vakuum se neprestano osigurava kako ne bi došlo do neželjenog napuhavanja gumениh segmenata, odnosno kako ne bi došlo do neželjenih otpora koji ovi segmenti stvaraju kada su napuhnuti. Nedostatak ovog načina je taj što je guma osjetljiva na sunčevo svjetlo, te je potrebno češće održavanje gumениh segmenata, ako se oni nalaze često u tim uvjetima [17].

4.4. Inovativne tehnologije za odleđivanja zrakoplova

Inovativne tehnologije su nove ideje, proizvodi, procesi ili metode koje donose promjene, poboljšanja i napretke u određenom području ili industriji. Pod pojmom inovativne tehnologije za odleđivanje zrakoplova može se smatrati korištenje infracrvenih zraka ili robotske tehnologije [18].

4.4.1. Infracrvene zrake

Infracrvene zrake koriste se za zagrijavanje površine zrakoplova, a to zagrijavanje naziva se infracrveno grijanje. Infracrveno grijanje radi na principu emitiranja elektromagnetskih valova koji generiraju toplinu kada se apsorbiraju od strane tvari. Korištenjem ove tehnologije ne zagrijava se okolni zrak, već samo površinu koju je potrebno odlediti, te ne prodire kroz površinu zrakoplova, odnosno ne utječe u znatnoj mjeri na temperaturu unutar kabine [18].

Infracrveni hangar (slika 12) je otvoren i prohodan, te se u njemu izvodi odleđivanje uz pomoć infracrvenih zraka. Ovaj hangar se sastoji od infracrvenih generatora koji su napunjeni prirodnim plinom koji proizvode infracrvenu energiju potrebnu za odleđivanje zrakoplova. Infracrveni generatori se nalaze na stropu i bočnim zidovima hangara [18].



Slika 12. Infracrveni hangar

Izvor: [18]

Ovisno o uvjetima zaleđivanja, debljini kontaminata i veličini zrakoplova, operater na računala bira razinu infracrvenog zračenja i vremena koje će infracrveno zračenje zračiti. Također može birati ciljano koji generatori će proizvoditi veću količinu zračenja, što omogućava ciljano zagrijavanje površine zrakoplova na koje se led više nakupio. Infracrveno zračenje otapa led i snijeg koji se nalaze na površini zrakoplova, a kada se on lagano otopio moguće je brže maknuti led i snijeg s površina zrakoplova pomoću mlaznica s vodom pod pritiskom ili zračnom strujom [18].

Nedostatak ove tehnologije je taj što infracrveno zračenje ne prodire do podvozja zrakoplova, te je potrebno zagrijavati pod hangara. Također postoje dijelovi na zrakoplovu koji se možda nisu odledili ovim načinom, te je onda potrebna neka druga metoda odleđivanja [18].

Nakon procesa odleđivanja letaćka posada mora provjeriti jesu li sve površine zrakoplova čiste, te odlučiti je li potrebna tekućina za zaštitu od zaleđivanja, jer postoji opasnost da se led stvori tijekom taksiranja [18].

Infracrveni hangar u usporedbi s drugim metodama odleđivanja imaju visoke početne troškove, ali kada se isti izgrade oni su znatno ekonomičniji, jer je potrebno manje energije za odleđivanje u usporedbi s ostalim metodama odleđivanja. Također pružaju mogućnost manjeg oštećenja zrakoplova, jer nije potreban nikakav kemijski materijal ili fizički dodir s površinom zrakoplova. Iako infracrveni hangari pružaju brže odleđivanje ovaj sustav nije baš praktičan na zračnim lukama s velikim intenzitetom prometa jer ograničava kapacitet obrade zrakoplova, a to može dovesti do zastoja u prometu [18].

4.4.2. Robotski način odleđivanja zrakoplova

Upotreba robotskog načina odleđivanja (slika 13) još nije u potpunosti u funkciji, ali se izvode određeni testovi na zračnoj luci Oslo. Robotska tehnologija ima potencijal znatno smanjiti potrebno vrijeme procesa odleđivanja, odnosno uklanjanje snijega i leda s površina zrakoplova [19].



Slika 13. Korištenje robotske tehnologije za odleđivanje zrakoplova

Izvor: [19]

Osim odleđivanja zrakoplova ova će tehnologija moći izvoditi pranje zrakoplova i osnovne tehničke preglede. Kako ova tehnologija omogućava vanjsko pranje zrakoplova, a čisti zrakoplov stvara manje otpore, dodatna prednost je i smanjena potrošnja goriva od oko 2%. Isto tako ako se zrakoplov redovito čisti njegov trup se manje troši, a to opet rezultira nižim troškovima održavanja [19].

5. UTJECAJ ZALEĐIVANJA NA LETNA SVOJSTVA ZRAKOPLOVA

Letna svojstva zrakoplova obuhvaćaju različite performanse i karakteristike koje su važne za siguran i učinkovit let. Zaleđivanje može imati značajan utjecaj na letna svojstva zrakoplova i predstavlja ozbiljan sigurnosni problem. Zaleđivanje se događa kada se tekućina smrzava na hladnoj površini zrakoplova. Ako dođe do zaleđivanja zrakoplova, zrakoplov [20]:

1. gubi na aerodinamičkoj učinkovitosti,
2. otežano mu je slijetanje i polijetanje, te
3. postoji mogućnost oštećenja motora i propelera.

5.1. Aerodinamička učinkovitost u zimskim uvjetima

Prilikom određivanja oblika aeroprofila, oblika i veličine uređaja za povećanje uzgona, te materijale za izradu aeroprofila, konstruktori uzimaju u obzir potpuno čist aeroprofil, odnosno aeroprofil bez ikakvih kontaminata [20].

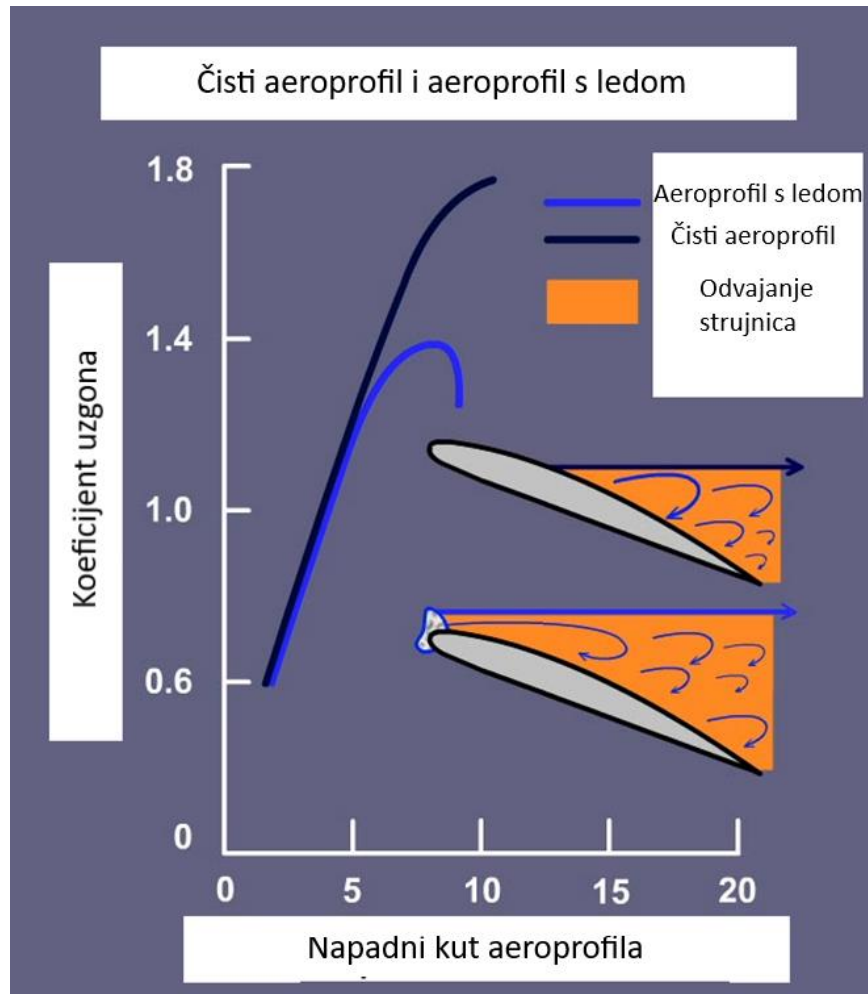
Prilikom leta na zrakoplovu se uvijek nalaze određene nečistoće koje mu smanjuju aerodinamičku učinkovitost poput kukaca i prašine, ali se isti ne uzimaju u obzir radi izrazito male promjene. Međutim, led na krilu, repu i ostalim površinama zrakoplova značajno utječe na promjenu profila krila i uzrokuje značajne promjene kod aerodinamičke učinkovitosti. Jedan od problem kod stvaranja led je taj što je on na svakom dijelu neravnomjeran, odnosno na nekom dijelu ga ima više, dok ga na nekom možda neće ni biti što utječe na promjenu centra težišta zrakoplova [20].

Ako se led na površini zrakoplova formirao, stvaraju se određene nepravilnosti, odnosno neravnine koje povećavaju otpor zraka tijekom leta, jer aeroprofil nije u potpunosti čist. Povećanjem otpora povećava se i potrebna snaga motora kako bi se održala ista razina brzine leta. Ako se poveća snaga motora povećava se i potrošnja goriva, a to rezultira smanjenjem doleta zrakoplova [20].

Također stvaranje leda rezultira promjenom strujanja zraka preko krila što može dovesti do podrhtavanja (engl. *Buffeting*). Podrhtavanjem dolazi do brze i nepravilne promjene u aerodinamičkoj učinkovitosti. To je vrsta turbulencije koja se događa kada strujnice zraka postanu nestabilne i uzrokuju određene oscilacije u upravljanu zrakoplova. Podrhtavanje može dovesti do [20]:

1. vibracija koje su neugodne za putnika i posadu,

2. smanjenja stabilnosti koje uzrokuje teže održavanje smjera zrakoplova,
3. povećanja opterećenja zrakoplova i
4. gubitka uzgona, a ponekad i potpunog sloma uzgona.



Grafikon 1. Odnos koeficijenta uzgona i napadnog kuta aeroprofila u ovisnosti o čistom i zaleđenom aeroprofilu

Izvor: [20]

Iz grafikona 1 vidljivo je da ako dođe do zaleđivanja aeroprofila, maksimalni koeficijent uzgona na zaleđenom aeroprofilu je manji od nezaleđenog aeroprofila pri istom napadnom kutu. Također se iz grafikona vidi da ako se pojave male količine leda na napadnoj ivici krila, dolazi do znatnog povećanja odvajanja strujnica od aeroprofila, koja može dovesti do potpunog sloma uzgona [20].

Kako bi se aerodinamička učinkovitost održala u određenim granicama, odnosno u granicama da ne dođe do značajnih promjena u aerodinamičkoj učinkovitosti potrebno je pažljivo pratiti uređaje koje pokazuju mogućnost zaleđivanja, te upaliti uređaje za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja tijekom leta kako bi se to spriječilo [20].

5.2. Slijetanje i polijetanje u zimskim uvjetima

Slijetanje i polijetanje u zimskim uvjetima mogu biti znatno izazovnije nego u drugim vremenskim uvjetima zbog hladnih temperatura, snijega i leda na USS-i, kao i na ostalim površinama aerodroma. Također može doći i do zimskih oluja koje dodatno otežavaju upravljivost zrakoplova, ali i smanjuju vidljivost. Samim time piloti se ponekad moraju osloniti u potpunosti na instrumentalno letenje. U određenim zimskim uvjetima, ako su snježne oluje izrazito velike, postoji mogućnost zatvaranja aerodroma. Stoga se planiraju i alternativni aerodromi kao mjere predostrožnosti [21].

Pojava kontaminata na površinama aerodroma značajno otežava i usporava zrakoplovne operacije zbog [21]:

1. smanjenog koeficijenta trenja,
2. težeg održavanja kontrole upravljanja za vrijeme slijetanja i polijetanja, osobito u slučaju bočnog vjetra i
3. kašnjenja rotiranja gume pri dodiru USS-m.

Kako bi se ove pojave spriječile ili barem umanjile aerodromi moraju redovito čistiti manevarske površine od leda, snijega i ostalih kontaminata. Površine se uobičajeno počinju čistiti od početka padanja snijega, ili najkasnije pri odleđenoj visini koja za mokri snijeg iznosi 2 cm, a za suhi snijeg 5 cm. Manevarske površine moguće je osposobiti [21]:

1. mehanički,
2. kemijski i
3. termički.

5.2.1. Mehaničko čišćenje manevarskih površina.

Mehaničkim načinom čišćenja kontaminata s manevarskih površina može se vršiti raznim vrstama vozila kao i opremom, a ona ovisi o vrsti i količini kontaminata. Za čišćenje manevarskih površina zračnih luka koriste se [21]:

1. čistači za snijeg - posebna vozila s rotirajućim četkama koja se koriste za uklanjanje suhog snijega s manevarskih površina,
2. snježni plugovi - vozila koja se koriste za uklanjanje mokrog snijega. Ova vozila imaju široke plugove na prednjem dijelu kojim guraju snijeg prema naprijed. Također ova vozila mogu sadržavati i plugove otraga kako bi uklonili preostali snijeg koji im je možda ostao i
3. bacači snijega - vozila koja imaju sposobnost prikupljanja snijega i bacanja istoga sa strane.

5.2.2. Kemijsko čišćenje manevarskih površina

Kemijska sredstva uključuju primjenu posebnih sredstva koja služe kako bi odgodili formiranje leda (postupak snižavanja temperature ledišta vode) ili kako bi se rastopio trenutni snijeg i led koji se nalaze na manevarskim površinama. U ovim kemikalijama se obično nalazi karbamid, urea, amonijski nitrat ili glikol. Kemikalije trebaju biti neutralne, odnosno ne smiju naštetiti prirodi, ljudima, te konstrukciji zrakoplova. Zbog toga aerodromi imaju posebne protokole za primjenu kemijskih sredstava kako bi se osigurale sigurne operacije zrakoplova tijekom njihove primjene [22].

Postupak primjene kemijskih sredstava vrši se posebnim *De-Icer* vozilima (slika 14) koja su opremljena cisternom u kojoj se nalazi kemikalija, pumpom, cijevima i prskalicama. Prilikom primjene potrebno je obratiti pozornost da se površina koja se tretira u potpunosti prekrije tekućinom kako bi cijela bila zaštićena i/ili odleđena [22].



Slika 14. De-Icer vozilo

Izvor: [22]

Nakon primjene kemijskih sredstva u određenim meteorološkim uvjetima postoji mogućnost da kemijska sredstva slabije djeluju, te je potrebna ponovna primjena ili neki drugi način čišćenja. Zbog toga je bitno redovno nadzirati uvjete na manevarskim površinama u nepovoljnim meteorološkim uvjetima [22].

5.2.3. Termičko čišćenje manevarskih površina

Termičko čišćenje manevarskih površina moguće je upotrebom tople vode, električne energije ili mlaznih motora. Topla voda kao sredstvo uklanjanja snijega i leda se koristi kada je vanjska temperatura iznad nule. Postupak čišćenja toplom vodom se obično izvodi pomoću posebnih vozila ili strojeva koja zagrijavaju vodu. Prednosti korištenja tople vode je taj da ne šteti ni u kojoj mjeri okolišu u odnosu na ostale kemikalije koje se mogu koristiti za uklanjanje leda. Također je moguće izvodi termičko čišćenje toplom vodom tako da su cijevi ispod određene površine kroz koje prolazi topla voda [21].

Termičko čišćenje uz pomoć električne energije obično se izvodi uz pomoć uređaja koji se nalaze ispod površine i pretvaraju električnu energiju u toplinsku i tako otapaju snijeg i led. Prednosti korištenja ovog sustava je taj što stvara manju buku i ne proizvode ispušne plinove [21].

Na nekim aerodromima kao sredstvo čišćenja koriste se prenamijenjeni stari mlazni motori kao sredstvo otapanja snijega i leda (slika 15). Radom mlaznog motora upravlja vozač. Kako mlazni motori proizvode veliku buku vozila moraju biti dobro zvučno izolirana. Glavni nedostatak ove metode je taj što troši relativno puno goriva u kratkom roku, te je potrebna velika cisterna. Također je potrebno paziti na temperaturu ispušnih plinova koji mogu dostići temperaturu preko 600 °C, a ako se zadrže dovoljno dugo na jednom mjestu može doći do oštećenja manevarske površine [23].



Slika 15. Vozilo s mlaznim motorom za čišćenje manevarskih površina

Izvor: [23]

5.3. Rad motora u zimskim uvjetima

Rad motora u zimskim uvjetima zahtjeva posebne mjere opreza kako bi se osigurala sigurnost leta na prihvatljivoj razini. Kako bi se osigurala učinkovitost motora, prije samog polijetanja potrebno je ukloniti sve nakupine koje se nalaze na i unutar motora [24].

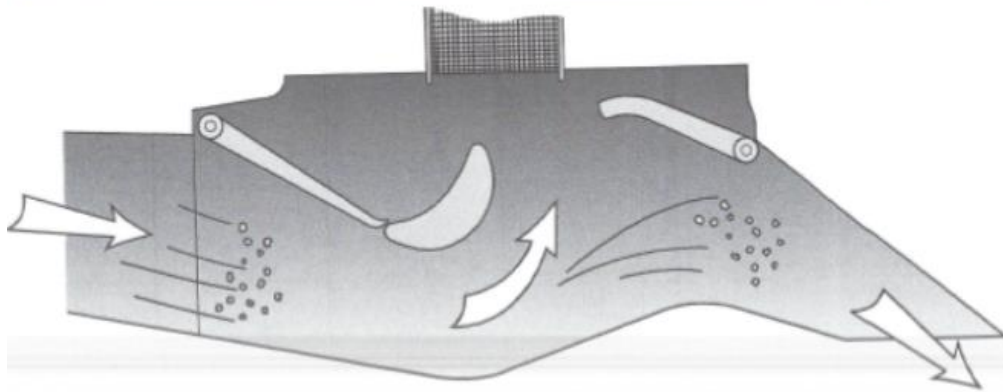
Ako je temperatura vanjskog zraka izrazito hladna u nekim slučajevima će biti potrebno ugrijati hladan motor kako bi on mogao upaliti. Grijanje motora se postiže korištenjem unutarnjih ili vanjskih grijalica koje zagrijavaju motor, te isto tako otapaju snijeg i led. Osim grijanja motora

u nekim situacijama će biti potrebno i grijanje goriva. Grijanje goriva izvodi se kako bi se izbjeglo stvaranje kristala u gorivu koji mogu začepiti dovod goriva do motora [24].

Prilikom leta u izrazito hladnim uvjetima povećava se mogućnost turbulencije oko motora. To može dovesti do neželjenih vibracija i smanjenje stabilnosti zrakoplova. Osim turbulencije zrakoplov pri letu u izrazito hladnim uvjetima troši više goriva (radi povećanja otpora koje led stvara i/ili korištenja sustava za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja) [24].

Osim u hladnim uvjetima klipnim motorima se može dogoditi zaleđivanje rasplinjača i na temperaturi iznad 0 °C zbog prisutnosti vlage u zraku. To se u većini slučajeva događa kada zrakoplov ponire. U toj situaciji klipni motor se vrlo brzo hladi, a ako se led formira u cijevi ili na leptir gasu on ograničava protok zraka, te time mijenja omjer goriva i zraka i može doći do potpunog gašenja motora. Ova pojava može se spriječiti da zrakoplov koristi manji kut poniranja ili da pomoću ispušnih plinova motora zagrijava rasplinjač [18].

Kod turbo-propelerskih motora postoji mogućnost gašenja motora ako led, snijeg, voda ili pijesak uđu u motor. Kako bi se to spriječilo neki motori koriste odgovarajuće separatore za odvajanje nečistoća koji se koriste samo u uvjetima kada se oni očekuju jer smanjuju protok zraka. Jedan od primjera separatora je separator s pokretnom lopaticom (slika 16). Kada je pokretna lopatica spuštена ona sprječava ulazak snijega, pijeska ili vode u motor, odnosno uz pomoć inercije koja „drži“ čvrste tvari uz samu površnu, nečistoće izlaze iz uvodnika motora. Također istovremeno omogućuje protok zraka do motora. Pilot upravlja pokretnim lopaticama uz pomoć ručice u pilotskoj kabini koja je povezana sa sajlom na koju je ona spojena. Ovaj sustav se najviše koristi prilikom polijetanja, slijetanja i taksiranja [24].



Slika 16. Separator leda i pijeska na turbo-propelerskim motoru

Izvor: [24]

Kod zrakoplova s turbo-ventilatorskim motorom u hladnim uvjetima postoji mogućnost stvaranja leda na uvodniku, kompresoru i ventilatoru motora. Led smanjuje protok zraka u motor čime šteti omjeru gorivo/zrak. Također dolazi do vibriranja lopatica ventilatora koje mogu biti toliko velike da dođe do pucanja. Osim ovog načina oštećenja motora postoji mogućnost da se led na uvodniku odlomi i uđe u motor, te tako može oštetiti lopatice kompresora i ventilatora, isto tako se može ugasiti plamen u komori za sagorijevanje ako voda dođe do iste [18].

6. ZAKLJUČAK

Zaleđivanje zrakoplova je ozbiljan problem koji može utjecati na sigurnost i performanse zrakoplova tijekom leta u zimskim uvjetima. Atmosferski uvjeti, posebno niske temperature u prisutnosti vlage mogu uzrokovati formiranje leda na različitim dijelovima zrakoplova. Ako se na manevarskim površinama nalazi snijeg, led, bljuzgavica ili voda potrebno je pravovremeno procijeniti stanje manevarskih površina i izdati SNOWTAM koji pruža točno izvješće pilotima o istima.

Ako postoji mogućnost zaleđivanja određenih površina poput krila, sonde, propelera, uvodnika motora i ostalih površina, potrebno je uključiti sustave koji sprječavaju formiranje leda, kako ne bi došlo smanjene aerodinamičke učinkovitosti, te povećanja otpora koji narušavaju sigurnost leta.

Kako bi se osigurala zaštita zrakoplova i ako dođe do zaleđivanja, razvijeni su razni sustavi koji za cilj imaju da u što kraćem roku uklone formirani led sa zrakoplova. To uključuje električni način zaštite, toplinsko odleđivanje, pneumatsko odleđivanje, odleđivanje tekućinom i druge inovativne tehnologije poput odleđivanja uz pomoć infracrvenog zračenja, te robotske tehnologije (koja se još testira).

U zimskim uvjetima posebno su osjetljive performanse zrakoplova prilikom slijetanja i polijetanja, jer različiti kontaminanti smanjuju koeficijent trenja, a samim time se povećava duljina zaustavljanja, a smanjuje upravljivost zrakoplova pri taksiranju. Kako bi se to spriječilo potrebno je u takvim uvjetima redovito čistiti i štiti manevarske površine.

Svaki zrakoplovni motor zahtjeva zaštitu od zaleđivanja jer led može narušiti rad motora i smanjiti njegovu učinkovitost. Kako bi se motor zaštitio, konstruktori koriste posebne tehnike koje sprječavaju ulazak kontaminata u motor, dok piloti koriste posebne tehnike leta da smanje mogućnost zaleđivanja.

LITERATURA

- [1] Hrvatska Enciklopedija. *Atmosfera*. Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=4464> [Pristupljeno: 28. lipnja 2023.]
- [2] Croatian Aviation. *Na kojim visinama lete zrakoplovi?*. Preuzeto s: <https://croatianaviation.com/na-kojim-visinama-lete-zrakoplovi/> [Pristupljeno: 2. srpnja 2023.]
- [3] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. *Zrakoplovna meteorologija*. Preuzeto s: <https://www.crocontrol.hr/usluge/zrakoplovna-meteorologija/najznacajnije-meteoroloske-pojave-opasne-za-zrakoplovstvo/> [Pristupljeno: 2. srpnja 2023.]
- [4] Mihetec T. *Podjela usluga u zračnoj plovidbi*. [Prezentacija] Usluge u zračnoj plovidbi. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 15. listopada 2020.
- [5] Sky Brary. *SNOWTAM*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/snowtam> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
- [6] Sky Brary. *Aircraft Ground De/Anti-Icing*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/aircraft-ground-deanti-icing> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
- [7] Sky Diving. *Anti-Ice and Rain – Wings*. Preuzeto s: http://hibdz.skydiving.co.uk/757/767_tech/anti_ice_and_rain/wings.htm [Pristupljeno: 7. srpnja 2023.]
- [8] Aeronautics guide. *Thermal Electric Anti-Icing*. Preuzeto s: https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/wing-and-horizontal-and-vertical.html?utm_content=cmp-true [Pristupljeno: 7. srpnja 2023.]
- [9] Collins Aerospace. *Propeller De-Icers*. Preuzeto s: <https://www.goodrichdeicing.com/products/detail/propeller-de-icers> [Pristupljeno: 8. srpnja 2023.]
- [10] Sky diving. *Anti-Ice and Rain – Windows*. Preuzeto s: http://hibdz.skydiving.co.uk/757/767_tech/anti_ice_and_rain/windows.htm [Pristupljeno: 8. srpnja 2023.]
- [11] Bračić M. *Tehnologija prihvata i otpreme zrakoplova*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilište u Zagrebu; 2017.
- [12] Vincetić L. *Utjecaj zaleđivanja zrakoplova na letačke operacije*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2020. Preuzeto s: <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:1990> [Pristupljeno: 10. srpnja 2023.]

- [13] Aviator Zone. *De-Icing and Anti-Icing*. Preuzeto s: <https://www.aviator.zone/pireps/2021/2/20/de-icing-and-anti-icing> [Pristupljeno: 10. srpnja 2023.]
- [14] Aviation Services. *Aircraft De-Icing/Anti-Icing*. Preuzeto s: <https://an.aero/aircraft-de-icing-how-it-works/> [Pristupljeno: 10. srpnja 2023.]
- [15] Nasa. *Aircraft Design for Icing*. Preuzeto s: https://aircrafticing.grc.nasa.gov/1_1_3_4.html [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
- [16] Nasa. *Mechanical De-Icing*. Preuzeto s: https://aircrafticing.grc.nasa.gov/2_4_3_1.html [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
- [17] Plumley P. *De-Ice and Anti-Ice Systems*. Preuzeto s: <https://ftpcabair.files.wordpress.com/2011/04/ice-protection-v73.pdf> [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
- [18] Šoštar T. *Prihvat i otprema zrakoplova u zimskim uvjetima*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2020. Preuzeto s: <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1943> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
- [19] Aviation Week Network. *New Robotic Systems Targets Automated Aircraft De-Icing, Cleaning*. Preuzeto s: <https://aviationweek.com/mro/emerging-technologies/new-robotic-system-targets-automated-aircraft-de-icing-cleaning> [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
- [20] Nasa. *Aerodynamics of Icing*. Preuzeto s: https://aircrafticing.grc.nasa.gov/1_1_3_3.html [Pristupljeno: 22. srpnja 2023.]
- [21] Bračić M. *Održavanje aerodroma*. [Prezentacija] Osnove aerodrome. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 10. svibnja 2023.
- [22] Team Eagle. *Tyler Ice Controls*. Preuzeto s: <https://www.team-eagle.ca/tyler-ice> [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]
- [23] Kam Bus.info. *Kamioni za čišćenje snijega s mlaznim motorima*. Preuzeto s: <https://kam-bus.info/kamioni-za-ciscenje-snijega-s-mlaznim-motorima-ruski-obracun-s-ostrim-zimama/> [Pristupljeno: 29. srpnja 2023.]
- [24] BG Aerospace. *Preventing FOD using the Inertial Separator*. Preuzeto s: <https://www.bgaerospace.com/2019/12/04/preventing-fod-using-the-inertial-separator/> [Pristupljeno: 29. srpnja 2023.]

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela atmosfere s porastom visine	4
Slika 2. Shematski prikaz zaštite od zaleđivanja toplim zrakom	10
Slika 3. Propeler s grijalicama	12
Slika 4. Tekući (kemijski) način zaštite od zaleđivanja	15
Slika 5. Načini kretanja vozila za odleđivanje/zaštitu za zaleđivanje oko zrakoplova	17
Slika 6. Stajanka za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja	19
Slika 7. Mehaničko skidanje snijega metlom	22
Slika 8. Metoda uklanjanja kontaminata uz pomoć užadi.....	23
Slika 9. Odleđivanje motora vrućim zrakom	24
Slika 10. Mlazni motor kao izvor vrućeg zraka za odleđivanje zrakoplova	25
Slika 11. Shematski prikaz pneumatskog načina odleđivanja gumenim segmentima	26
Slika 12. Infracrveni hangar	27
Slika 13. Korištenje robotske tehnologije za odleđivanje zrakoplova	28
Slika 14. De-Icer vozilo.....	33
Slika 15. Vozilo s mlaznim motorom za čišćenje manevarskih površina	34
Slika 16. Separator leda i pijeska na turbo-propelerskim motoru	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Stavke SNOWTAM-a	8
Tablica 2. Tekućine za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja	14
Tablica 3. Vrijeme zadržavanja tekućine Type I u različitim meteorološkim uvjetima	16

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Odnos koeficijenta uzgona i napadnog kuta aeroprofila u ovisnosti o čistom i zaleđenom aeroprofilu 30

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojeg vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Utjecaj zaleđivanja na letne značajke zrakoplova, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 5. 8. 2023.

Filip Janjanić
(ime i prezime, potpis)