

Tehničko-tehnološke karakteristike sustava za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja

Rožić, Dorotea

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:972125>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**TEHNIČKO TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE SUSTAVA ZA
ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA PROTIV
ZALEĐIVANJA**

**TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF THE DE-ICING AND ANTI-ICING SYSTEM FOR
AIRCRAFT PROTECTION**

Mentor: doc. dr. sc. Igor Štimac

Student: Dorotea Rožić
JMBAG: 1191218505

Zagreb, studeni 2024.

Zagreb, 24. travnja 2024.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Tehnologija prihvata i otpreme zrakoplova**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7426

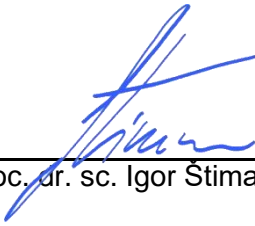
Pristupnik: **Dorotea Rožić (1191218505)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Tehničko-tehnološke karakteristike sustava za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je izraditi strukturu rada te napraviti pregled dosadašnjih istraživanja u predmetnoj problematici. U narednim poglavljima potrebno je prikazati na koji način utječe zaleđivanje zrakoplova na performanse leta s posebnim osvrtom na sigurnost leta zrakoplova. U cilju utvrđivanja na koji način se može osigurati siguran let zrakoplova pod prethodno navedenim uvjetima, potrebno je opisati opremu i procedure kojima se provodi odleđivanje i zaštita od zaleđivanja zrakoplova. U predzadnjem dijelu rada potrebno je napraviti pregled alternativnih tehnologija koje se koriste u procesu odleđivanja i zaštite od zaleđivanja zrakoplova. U posljednjem dijelu završnog rada potrebno je prikazati zaključna razmatranja.

Mentor:



doc. dr. sc. Igor Štimac

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Zahvala

Želim izraziti iskrenu zahvalnost svom mentoru i profesorima koji su me podržavali tijekom studija, pružajući mi ne samo stručno vodstvo, već i samopouzdanje da vjerujem u svoje sposobnosti i ostvarim svoje ciljeve. Njihova pomoć i vjerovanje u mene u svakom su trenutku bili neprocjenjivi.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj mami, koja mi je tijekom svih godina studiranja bila neizmjerena podrška, bez koje ne bih bila ovdje gdje jesam danas. Također, želim zahvaliti svojoj prijateljici koja mi je bila ogromna pomoć u mnogim segmentima fakultetskih obaveza, dijeleći dragocjene savjete i materijale. Njeno vjerovanje u mene i ponos prema mojim postignućima značili su mi više nego što mogu riječima opisati.

Sažetak

Zaleđivanje zrakoplova predstavlja značajan izazov u zrakoplovstvu, jer naslage leda smanjuju uzgon i stabilnost te ugrožavaju sigurnost letenja. Razvijene su različite metode i sustavi koji omogućuju sigurno uklanjanje leda s površina zrakoplova, uključujući primjenu tekućina na bazi glikola, vrućeg zraka, infracrvenih grijača, te alternativnih tehnologija poput specijaliziranih robota za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja. S obzirom na sve strože ekološke standarde, zračna industrija usmjerena je prema održivijim rješenjima, kao što su metode bez glikola i inovativni sustavi za grijanje površina, koji poboljšavaju sigurnost i smanjuju kemijski otisak, te recikliranja upotrijebljenih tekućina kako bi se dodatno smanjio negativan utjecaj na okoliš i očuvala sigurnost i u uvjetima kada nije moguće izbjeći štetne materijale. Zrakoplovna industrija zajedničkim snagama pokušava pronaći rješenja koja bi u budućnosti kombinirala visoku učinkovitost, ekološku prihvatljivost i prilagođavanje međunarodnim standardima.

Ključne riječi: odleđivanje i zaštita zrakoplova od zaleđivanja, fluidi i oprema za odleđivanje/zaštitu, standardne i alternativne metode odleđivanja/zaštite, ekološka održivost, sigurnost u zračnom prometu

Summary

Aircraft de-icing is a significant challenge in aviation, as ice buildup reduces lift and stability, compromising flight safety. Various methods and systems have been developed to safely remove ice from aircraft surfaces, including the application of glycol-based fluids, hot air, infrared heaters, and alternative technologies such as specialized de-icing robots. Given increasingly strict environmental standards, the aviation industry is shifting toward more sustainable solutions, such as glycol-free methods, innovative surface heating systems that enhance safety while reducing chemical impact, and fluid recycling to further minimize environmental harm and maintain safety when harmful substances cannot be entirely avoided. The aviation industry is working collectively to find solutions that, in the future, will combine high efficiency, environmental sustainability, and compliance with international standards.

Keywords: aircraft de-icing and anti-icing, de-icing/anti-icing fluids and equipment, standard and alternative de-icing/anti-icing methods, environmental sustainability, aviation safety

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. UTJECAJ ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA NA PERFORMANSE LETA..... | 2 |
| 2.1. Aerodinamički utjecaj..... | 3 |
| 2.1.1. Utjecaj pri polijetanju | 4 |
| 2.1.2. Utjecaj pri slijetanju | 4 |
| 2.2. Zaleđivanje upravljačkih površina..... | 5 |
| 2.3. Zaleđivanje instrumenata i motora..... | 6 |
| 3. OPREMA I FLUIDI ZA ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA OD ZALEĐIVANJA | 8 |
| 3.1. Oprema za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja | 8 |
| 3.1.1. Oprema za primjenu fluida | 8 |
| 3.1.2. Oprema za sigurnost..... | 10 |
| 3.1.3. Oprema za alternativne metode zaštite od zaleđivanja..... | 11 |
| 3.1.4. Oprema za grijanje..... | 11 |
| 3.2. Fluidi za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja | 12 |
| 3.2.1. Boje fluida | 12 |
| 3.2.2. Skladištenje..... | 13 |
| 3.2.3. Prijenos fluida | 13 |
| 3.2.4. Grijanje fluida | 14 |
| 3.2.5. Primjena fluida | 14 |
| 3.2.6. Vrijeme zadržavanja tekućine | 15 |
| 4. POSTUPCI I METODE ZA ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA OD ZALEĐIVANJA | 19 |
| 4.1. Standardi i regulatorni okvir..... | 19 |
| 4.2. Postupci provođenja odleđivanja i zaštite zrakoplova..... | 21 |
| 4.3. Metode provođenja odleđivanja i zaštite zrakoplova | 25 |
| 4.3.1. Primjena fluida | 26 |
| 4.3.2. Mehaničke metode..... | 29 |
| 4.3.3. Primjena vrućeg zraka | 31 |
| 4.4. Specifične prakse u industriji | 32 |
| 5. ALTERNATIVNE TEHNOLOGIJE U PROCESU ODLEĐIVANJA I ZAŠTITE OD ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA | 34 |
| 5.1. Infracrvena metoda..... | 34 |
| 5.2. Primjena robota u svrhu odleđivanja zrakoplova | 37 |

| | |
|---|----|
| 5.3. Elektromagnetska tehnologija | 38 |
| 5.4. Lasersko odleđivanje..... | 39 |
| 5.5. Hibridni sustav odleđivanja | 40 |
| 5.6. Hidrofobne površine i premazi..... | 40 |
| 5.7. Kompozitni materijali s ugrađenim grijanim slojevima | 42 |
| 5.8. Ultrazvučna tehnologija | 43 |
| 6. ZAKLJUČAK | 44 |
| LITERATURA | 45 |
| POPIS SLIKA | 48 |
| POPIS TABLICA..... | 49 |
| POPIS GRAFIKONA | 49 |

1. UVOD

U suvremenoj zrakoplovnoj industriji, odleđivanje i zaštita zrakoplova od zaleđivanja predstavljaju temeljne postupke koji osiguravaju sigurnost letenja, posebno u zimskim mjesecima kada su vremenski uvjeti nepovoljni. Zaleđivanje na površinama zrakoplova, uključujući krila, stabilizatore i upravljačke površine, može uzrokovati ozbiljne probleme u performansama zrakoplova. Nakupljeni led može ometati protok zraka, smanjujući uzgon i stabilnost, što povećava rizik od nesreća. Kako bi se to spriječilo razvijeni su postupci i metode kojima se osigurava učinkovito uklanjanje leda, kao i zaštita od njegovog ponovnog formiranja tijekom letenja i na zemlji.

Standardne metode odleđivanja uključuju primjenu specifičnih tekućina na bazi glikola, koje otapaju led i sprečavaju ponovno zaleđivanje kritičnih dijelova zrakoplova. Ovi postupci podrazumijevaju korištenje kemijskih otopina koje djeluju kroz kombinaciju toplinske energije i kemijskih reakcija, čime osiguravaju da površine ostanu čiste dovoljno dugo da zrakoplov može sigurno poletjeti. Primjena tekućina podliježe strogim regulatornim smjernicama postavljenim od strane Međunarodne organizacije civilnog zrakoplovstva (eng. *International Civil Aviation Organization* – ICAO) kako bi se standardizirala sigurnost zrakoplova u svim klimatskim uvjetima.

S obzirom na sve veću svijest onečišćenja okoliša, sve je veći naglasak na smanjenju ekološkog otiska tih postupaka, posebno zbog uporabe glikola koji može imati štetan utjecaj na okoliš kada dospije u vodene sustave. Istražuju se nove, ekološki prihvatljive alternative, kao što su tekućine bez glikola i tehnologije koje smanjuju potrebu za kemijskim tretmanom. Primjerice, infracrvena (IR) tehnologija za odleđivanje koristi toplinsko zračenje za brzo uklanjanje leda s površina zrakoplova, čime smanjuje potrebu za konvencionalnim tekućinama. Osim smanjenja kemijskog opterećenja, ove tehnologije omogućuju učinkovitiji i sigurniji rad, s potencijalom da smanje troškove i vremensko trajanje samog postupka odleđivanja.

Na modernim aerodromima također se sve više primjenjuju integrirani sustavi za upravljanje otpadnim vodama i reciklažu, posebno na aerodromima s velikim volumenom prometa gdje je potreba za sustavima s visokim kapacitetom ključna. Postavljeni sustavi omogućuju prikupljanje i obradu otpadnih voda koje sadrže glikol, čime se sprječava njihovo ispuštanje u okoliš bez prethodne obrade.

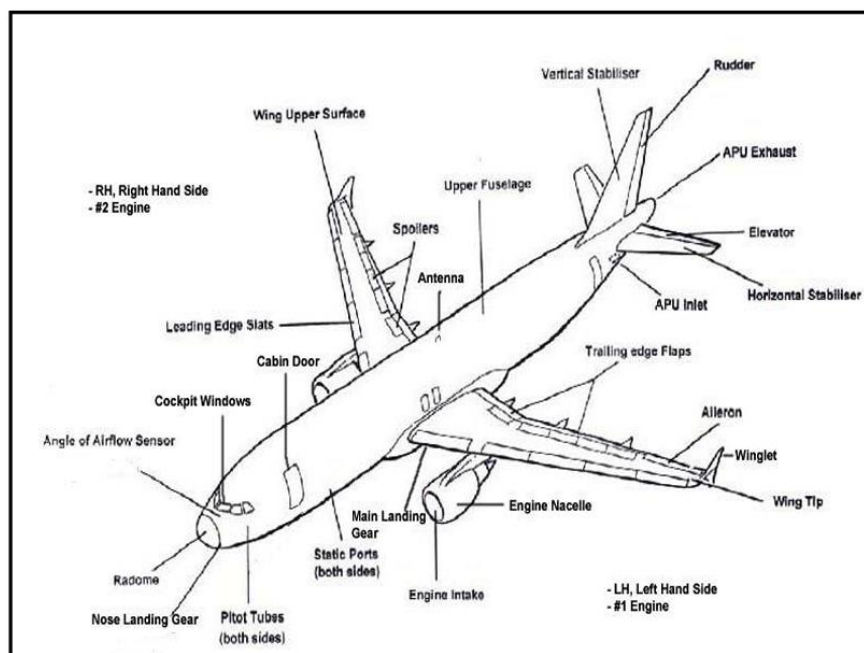
U ovom radu analizirat će se tehničko-tehnološke karakteristike sustava za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja s naglaskom na sigurnosne, ekološke i operativne aspekte postupaka. Istražit će se postojeće metode, oprema i regulative, kao i alternative koje bi mogle poboljšati učinkovitost i smanjiti ekološki otisak postupaka odleđivanja u zrakoplovnoj industriji.

2. UTJECAJ ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA NA PERFORMANSE LETA

Zaleđivanje zrakoplova predstavlja prijetnju te može značajno utjecati na performanse leta. Do zaleđivanja zrakoplova dolazi zbog fizikalnih svojstava atmosfere i mogućnosti postojanje vode u obliku vodenih kapljica u atmosferi koje ostaju tekuće čak i na temperaturama ispod 0°C , ali se pri dodiru s čvrstom površinom, poput krila ili motora zrakoplova, trenutno zaleđuju [1].

Zaleđivanje zrakoplova dovodi do ozbiljnih problema s aerodinamikom, masom, upravljanjem i sigurnošću zrakoplova što je detaljnije objašnjeno u nastavku. Zaleđivanje može uvelike smanjiti sposobnost zrakoplova da ostane stabilan i kontroliran tijekom leta, osobito u kritičnim fazama kao što su polijetanje i slijetanje. Moderni zrakoplovi posjeduju sustave zaštite od zaleđivanja, ali rizik i dalje postoji, osobito za manje zrakoplove.

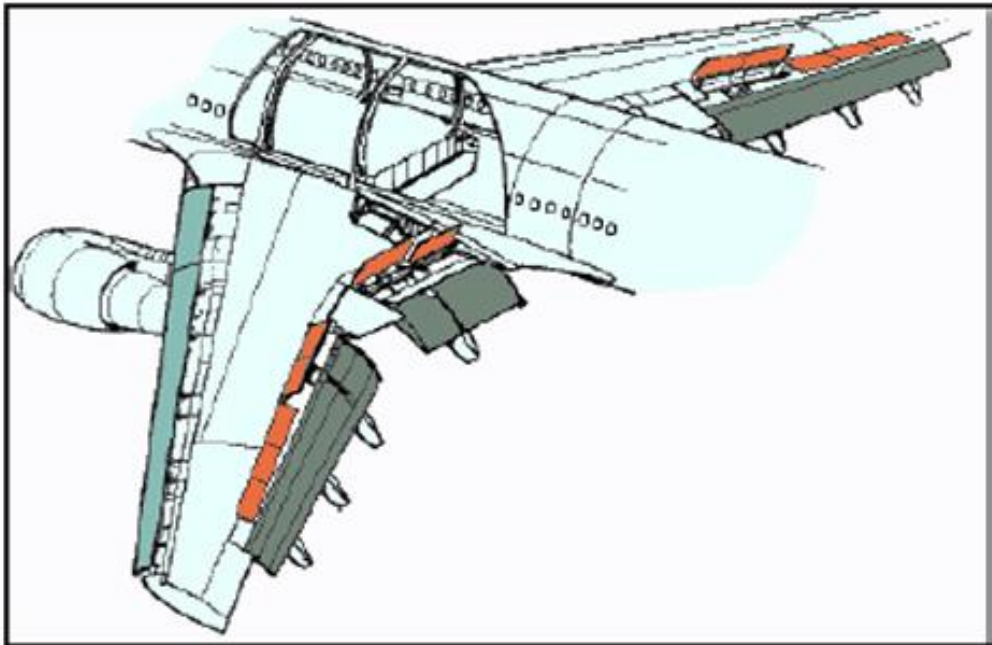
Zrakoplov je složen sustav čije operacije zahtijevaju koordinaciju različitih tehničkih sredstava kako bi cijeli sustav funkcionirao ispravno. Kvar ili smanjenje učinkovitosti bilo kojeg dijela podsustava može imati značajan utjecaj na performanse zrakoplova. Za planiranje operacije odleđivanja i zaštite od zaleđivanja zrakoplova i važni su meteorološki pojmovi kao što su aktivni mraz, čisti led, hladna fronta, sumaglica, sumaglica koja se ledi, ledena magla, mraz/inje, grad, ledene sitne kuglice, lagana ledena kiša, umjerena i jaka ledena kiša, kiša, kiša i snijeg, snijeg, snježne kuglice, bljuzga, pothlađene vodne kapljice i vodena para. Ključni podsustavi osjetljivi na kontaminante, vidljivi na slici 1, odgovorni su za održavanje optimalnih performansi leta [2].



Slika 1. Sustavi i dijelovi sustava na zrakoplovu osjetljivi na zaleđivanje
Izvor: [2]

Sve površine zrakoplova koje imaju aerodinamičke ili upravljačke funkcije, kao i one zadužene za prikupljanje podataka ili mjerenje, moraju biti u potpunosti čiste kako bi se osigurala njihova ispravna funkcionalnost. Osim aktivnih sustava zaštite, moderni pristupi u dizajnu zrakoplova uključuju korištenje specijalnih materijala i aerodinamičkih materijala. Korištenjem kompozitnih materijala i optimiziranih oblika osigurava se bolja otpornost na stvaranje leda, čime se dodatno poboljšavaju performanse i sigurnost zrakoplova [3].

Na slici 2 prikazane su upravljačke površine i međuprostori na zrakoplovu koji su osjetljivi na zaleđivanje. Ove površine, uključujući krilca i stabilizatore, zahtijevaju posebnu zaštitu od zaleđivanja zbog njihove kritične uloge u upravljanju zrakoplovom i održavanju stabilnosti. Prikazane površine dizajnirane su tako da smanjuju nakupljanje leda, osiguravajući optimalne letne performanse i sigurnost u otežanim vremenskim uvjetima [3].



Slika 2. Prikaz površina i međuprostora na upravljačkim površinama osjetljivim na zaleđivanje
Izvor: [2]

2.1. Aerodinamički utjecaj

Nakupljanje leda na aerodinamičkim površinama zrakoplova, poput krila, repnih površina i trupa, narušava osnovna aerodinamička svojstva. Aerodinamičke površine moraju biti glatke kako bi omogućile optimalno strujanje zraka. Kada se led akumulira na krilima, povećava se otpor zrakoplova jer led stvara neravnine koje ometaju glatko strujanje zraka oko zrakoplova. Povećanje otpora ne samo da smanjuje brzinu leta, već povećava i opterećenje na motore, što uzrokuje veću potrošnju goriva [3].

Led na napadnim ivicama krila dovodi do smanjenja ili čak potpunog gubitka uzgona, što može rezultirati smanjenjem sposobnosti zrakoplova da ostane u zraku. To je posebno opasno pri nižim brzinama, koje zrakoplov postiže tijekom faza polijetanja i slijetanja, pri kojima krila gube sposobnost stvaranja uzgona što dovodi do potpunog gubitka uzgona (eng. *Stall*). Čak i tanak sloj mraza na krilima može smanjiti kritični kut napada, dovodeći do gubitka uzgona prije nego što se očekuje, bez ikakvog upozorenja u pilotskoj kabini te može smanjiti uzgon za do 30% i povećati otpor za do 40% [4]. Zaleđivanje koje ometa laminarno strujanje zraka i stvara turbulentno strujanje dramatično smanjuje učinkovitost krila u generiranju uzgona, što povećava rizik od opasnih situacija tijekom leta [5].

2.1.1. Utjecaj pri polijetanju

Pri polijetanju, zrakoplov mora postići dovoljnu brzinu kako bi generirao potreban uzgon za uzlijetanje, ali prisutnost leda na krilima smanjuje sposobnost krila da stvaraju uzgon, što znači da zrakoplov mora postići veću brzinu nego inače. Povećani otpor uzrokovan ledom produžava duljinu uzletne staze, povećavajući rizik od neuspješnog polijetanja. Nakupljeni led ne samo da povećava otpor zbog narušavanja aerodinamičkog profila, već povećava i ukupnu masu zrakoplova, zahtijevajući dulju uzletnu stazu i veću brzinu za uzlijetanje, što povećava potrošnju goriva. Ako zrakoplov ne može postići potrebnu brzinu unutar raspoložive duljine uzletne staze, postoji veći rizik od neuspješnog polijetanja, što može dovesti do nezgoda ili nesreća. Na kontaminiranim pistama, dodatni otpor uzrokovan slojevima vode, bljuzge ili snijega smanjuje trenje, što može usporiti ubrzanje tijekom polijetanja i zahtjeva produljenje staze za sigurno postizanje brzine uzlijetanja. U uvjetima niskog trenja preporučuje se povećano vrijeme zagrijavanja fluida kako bi se osigurala optimalna zaštita kritičnih površina prije uzlijetanja [6].

2.1.2. Utjecaj pri slijetanju

Led na upravljačkim površinama povećava masu zrakoplova te može premašiti maksimalnu dozvoljenu masu zrakoplova pri slijetanju. Također, može uzrokovati nestabilnost pri nižim brzinama, čineći zrakoplov manje predvidljivim i otežavajući kontrolu nad zrakoplovom. Zaleđeni sustavi kočenja mogu smanjiti učinkovitost kočenja na zaleđenim stazama, čime se povećava rizik od klizanja i nesreća tijekom slijetanja. Zbog smanjene učinkovitosti kočenja, povećanog otpora i dodatne mase zbog nakupljenog leda zrakoplovu je potrebna dulja staza za zaustavljanje, što povećava rizik od izlaska zrakoplova izvan uzletno-sletne staze. Tijekom slijetanja na kontaminirane staze proizvođač zrakoplova Airbus preporučuje aktivnu upotrebu spojlera za povećanje aerodinamičkog otpora i smanjenje uzgona, čime se poboljšava prijanjanje kotača [6] dok, s druge strane, Boeing-ovi postupci uključuju korištenje

obrnutog potiska za dodatno usporavanje, što je posebno korisno na klizavim pistama gdje standardno kočenje može biti neučinkovito [7].

2.2. Zaleđivanje upravljačkih površina

Led na upravljačkim površinama, kao što su zakrilca, kormila pravca i visine, predstavlja ozbiljan sigurnosni problem. Ove površine su ključne za kontrolu zrakoplova, a kada se zalede, mogu postati nefunkcionalne ili smanjiti sposobnost pilota da pravilno upravlja zrakoplovom. Osim izravnog zamrzavanja upravljačkih površina, može doći do nakupljanja leda između pokretnih (upravljačkih) i nepokretnih dijelova zrakoplova, poput krila i repa. Ova pojava ima isti učinak kao i direktno zamrzavanje upravljačkih površina, što rezultira smanjenom upravljivošću i otežava kontrolu zrakoplova [2].

Povećana masa uzrokovana ledom također može pridonijeti ovim problemima jer otežava normalno kretanje ovih površina što u ekstremnim slučajevima može dovesti do potpunog gubitka kontrole nad zrakoplovom, što je dovelo do ozbiljnih nesreća u prošlosti. Zaleđeni senzori brzine, poput Pitotovih cijevi, doveli su do pada Airbusa A330 tvrtke Air France nad Atlantikom 2009. godine [8]. Pad zrakoplova ATR-72 tvrtke American Eagle 1994. godine u okolini Chicaga uzrokovan je nakupljenim naslagama leda na upravljačkim površinama. Posljedice ove katastrofalne nesreće u kojoj je poginulo svih 68 putnika i članove posade vidljive su na slici 3, a jedini dio koji se nije u potpunosti raspao je dio repa [9].



Slika 3. Ostaci repa i ostali dijelovi zrakoplova ATR-72 nakon pada
Izvor: [9]

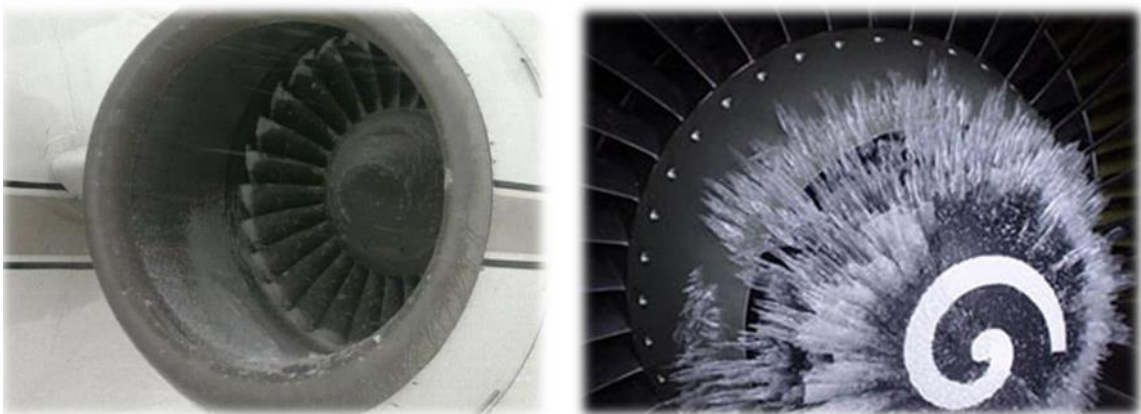
2.3. Zaleđivanje instrumenata i motora

Zaštita od zaleđivanja motora i instrumenata jedan od ključnih sigurnosnih aspekata modernih zrakoplova.

Instrumenti zrakoplova čija je svrha davanje informacija o brzini, visini i smjeru leta posebno su osjetljivi na zaleđivanje. Netočni podaci mogu dovesti do pogrešnih odluka koje ugrožavaju sigurnost leta. Najugroženiji su [2]:

- Pitotove cijevi koje mjere brzinu i kada postanu zaleđene, daju netočne podatke o brzini zrakoplova, što je iznimno opasno, osobito tijekom kritičnih faza leta (polijetanje i slijetanje), jer može dovesti do pogrešnih procjena pilota
- Statički otvori koji služe za mjerenje visine i brzine penjanja ili spuštanja zrakoplova i ako se zalede dolazi do netočnih očitavanja visinomjera i vertikalne brzine, a ti podaci su ključni u svim fazama leta, posebice prilikom prilaza uzletno-sletnoj stazi
- Senzori nagiba koji pružaju podatke o njegovoj orijentaciji i zaleđivanje može uzrokovati neispravne informacije o nagibu ili rotaciji zrakoplova, što može ometati orijentaciju pilota i uzrokovati opasne situacije, posebno u uvjetima smanjene vidljivosti.

Zaleđivanje motora (slika 4), osobito na usisnicima zraka i lopaticama kompresora, može smanjiti protok zraka u motore, što rezultira smanjenjem snage motora. Led može ometati protok zraka na usisnicima, što dovodi do nepravilnog usisa zraka uzrokujući vibracije i smanjenje učinkovitosti motora. U najgorem slučaju, zaleđivanje može uzrokovati oštećenje unutarnjih dijelova motora ili potpuni otkaz motora, što može imati katastrofalne posljedice [2].



Slika 4. Zaleđeni motor zrakoplova
Izvor: [10]

Zaleđivanje propelera nije jednoliko po cijeloj površini propelera, već je izraženije na nižim kracima, što također uzrokuje vibracije i pomicanje centra gravitacije pa čak i deformaciju osovine ili pucanje propelera (slika 5) [2].



Slika 5. Zaleđivanje propelera zrakoplova
Izvor: [10]

3. OPREMA I FLUIDI ZA ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA OD ZALEĐIVANJA

Učinkovito odleđivanje i zaštita zrakoplova od zaleđivanja ključni su za sigurnost zračnog prometa. Primjenom napredne opreme i specijaliziranih fluida, zrakoplovne kompanije osiguravaju sigurne operacije u zimskim uvjetima. Razvoj novih materijala, poput superhidrofobnih površina, može dodatno doprinijeti smanjenju rizika od zaleđivanja [8].

3.1. Oprema za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja

Za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja koristi se raznolika oprema koja obuhvaća sustave za primjenu fluida, spremnike, mlaznice i grijače. Oprema se koristi kako bi se osigurala učinkovita primjena fluida i održavanje optimalnih temperatura [5].

Redovito održavanje opreme ključno je za njezinu ispravnost i sigurnost. Oprema za odleđivanje mora biti u skladu s općim sigurnosnim standardima, a kompetentni odjel upravlja rasporedom održavanja. To uključuje provjere kvalitete korištenih tekućina i mjerenje temperature fluida, što je važno za osiguranje učinkovitosti operacija tijekom zimskih uvjeta [11].

3.1.1. Oprema za primjenu fluida

Oprema za primjenu fluida sastoji se od raznih komponenti, uključujući pokretne rampe, spremnike i sustave za prijenos, koji su ključni za osiguranje pravilnog nanošenja i učinkovite primjene tekućina. Dijele se na [5]:

- Pokretne rampe koje se koriste za prskanje tekućina za odleđivanje i zaštitu zrakoplova. Mogu biti opremljene otvorenim (slika 6) ili zatvorenim košarama za operatera, omogućujući mu pristup različitim dijelovima zrakoplova.



Slika 6. Vozilo za provođenja procesa odleđivanja zrakoplova tekućinom tip I
Izvor: [12]

- Spremnici za fluide i vodu (slika 7), u kojima se čuvaju tekućine za odleđivanje, obično izrađeni od materijala otpornih na koroziju. Spremnici moraju biti prilagođeni specifičnim fluidima koji se koriste (npr. etilen glikol, propilen glikol).



Slika 7. Spremnici za čuvanje fluida tip I
Izvor: [12]

- Sustavi za prijenos fluida, koji uključuju cijevi, ventile i mlaznice koje omogućuju efikasan prijenos fluida od spremnika do površina zrakoplova. Ova oprema mora biti projektirana za brzu i preciznu primjenu tekućine (slika 8).



Slika 8. Sustav za prijenos fluida do površine zrakoplova
Izvor: [13]

- Sustavi za grijanje fluida, koji održavaju fluide na optimalnoj temperaturi za učinkovitost. Grijanje je ključno za sprječavanje smrzavanja fluida tijekom skladištenja i primjene.
- Mlaznice za prskanje koje su specijalizirane da kontroliraju protok i raspodjelu fluida na površinama zrakoplova (slika 9). Odabir pravilnih mlaznica ključan je za osiguranje ravnomjernog nanošenja i sprečavanje prekomjernog trošenja fluida.



Slika 9. Mlaznice za prskanje tekućine za odleđivanje / zaštitu od zaleđivanja
Izvor: [13]

- Sustavi za čišćenje koji osiguravaju da sustavi za primjenu fluida ostanu čisti i operativni. To uključuje redovite preglede i održavanja svih komponenti koje dolaze u kontakt s ljudima
- Kontrolni sustavi koji omogućuju operateru da prati i kontrolira proces primjene fluida, uključujući mjerenje temperature fluida, protok i tlak.

3.1.2. Oprema za sigurnost

Za sigurno rukovanje tekućinama i zaštitu osoblja te zrakoplova koristi se sljedeća oprema [5]:

- Vatrogasni aparati koji su obavezni na svim vozilima i stanicama za primjenu fluida trebaju biti lako dostupni i redovito pregledavani kako bi se osigurala njihova ispravnost u slučaju nužde
- Sustavi za suzbijanje požara koji mogu uključivati automatske sustave za gašenje požara koji koriste različite tehnike (npr. Prskanje pjene ili kemikalija)

kako bi se brzo reagiralo na požare uzrokovane curenjem fluida ili drugim opasnostima

- Sustavi za zaustavljanje u slučaju opasnosti na vozilima ili opremi koji omogućuju brzo isključivanje opreme ili automatsko zaustavljanje operacije u slučaju nužde (oprema mora biti opremljena jasno označenim prekidačima za hitne slučajeve)
- Komunikacijska oprema koja omogućuje koordinaciju između zemaljskog osoblja i letačke posade što uključuje radio uređaje, interkom sustave i mobilne telefone
- Oprema za osobnu zaštitu kao što su kacige, rukavice, zaštitne naočale i zaštitna odijela koja osiguravaju sigurnost osoblja tijekom rada sa tekućinama i opremom
- Planovi evakuacije s kojima su upoznati svi radnici uključeni u procese odleđivanja i obuke koje su dužni proći što uključuje i redovite vježbe

3.1.3. Oprema za alternativne metode zaštite od zaleđivanja

Alternativne metode koriste zrak umjesto fluida, što je korisno u određenim situacijama. Uređaji za primjenu zraka pod tlakom uklanjaju zaleđene naslage bez potrebe za tekućinom, a mogu se koristiti s ugrijanim ili hladnim zrakom, ovisno o potrebama. Korisne su posebno u situacijama kada je brza reakcija ključna za održavanje sigurnosti i operativne efikasnosti zrakoplova [5]. Alternativne metode detaljnije su objašnjene u poglavlju 5. ovog rada.

3.1.4. Oprema za grijanje

Grijanje se koristi kao dodatna mjera za uklanjanje leda ili sprječavanje njegovog nakupljanja na površinama. Dije se na [11]:

- Grijači fluida održavaju tekućinu za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja na optimalnoj temperaturi za primjenu prema uputama proizvođača. Redovito provjeravanje grijanja fluida je ključno jer gubitak vode može uzrokovati neželjene aerodinamičke efekte, osobito kod tekućine tip I, a za tipove II i IV toplinska izloženost i/ili gubitak vode mogu dovesti do viskoznosti i otežanog nanošenja fluida
- Uređaji za primjenu infracrvene energije koji koriste infracrvenu energiju koja se usmjerava na površine zrakoplova, čime se brzo i učinkovito uklanjaju nakupljene naslage leda. Uređaji omogućuju preciznu primjenu topline bez potrebe za kemijskim sredstvima, čime se smanjuje rizik od oštećenja površina zrakoplova
- Sustavi za primjenu toplog zraka, koji se često koriste za osjetljive dijelove zrakoplova poput usisnika motora. Ovi sustavi mogu biti integrirani s motorima zrakoplova ili koristiti vanjske izvore topline. Primjena toplog zraka učinkovito

otapa led i sprječava njegovo ponovno stvaranje, čime se poboljšavaju aerodinamičke karakteristike zrakoplova tijekom leta.

3.2. Fluidi za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja

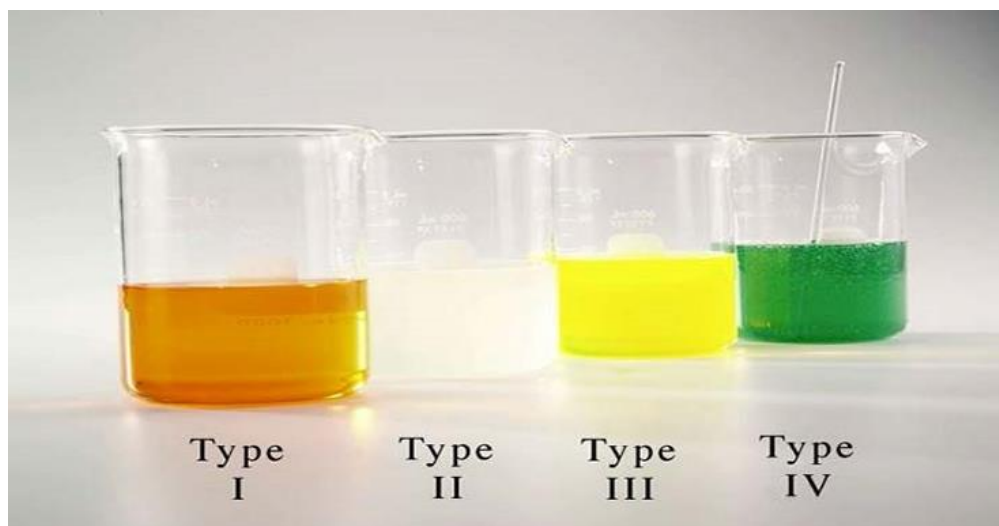
Fluidi za odleđivanje i zaštitu zrakoplova uklanjaju naslage leda, snijega i drugih kontaminanata s površine te snižavaju točke smrzavanja, čime odgađaju nakupljanje novih naslaga i osiguravaju sigurno polijetanje u zimskim uvjetima. Tekućine za odleđivanje uklanjaju postojeće kontaminante, dok se tekućine za zaštitu primjenjuju nakon odleđivanja kao barijera protiv stvaranja novih naslaga leda tijekom čekanja na polijetanje. Za očuvanje učinkovitosti ovih tekućina važno je da se pravilno skladište i prenose.

Fluidi za odleđivanje i zaštitu zrakoplova moraju biti prihvaćeni prema specifikacijama koje uključuju trajanje zaštite, aerodinamička svojstva i kompatibilnost s materijalima zrakoplova. Tekućine koje se koriste u procesima odleđivanja i zaštite od zaleđivanja podijeljene su u nekoliko kategorija [2]:

- **Tekućina tip I** koja sadrži visoki udio glikole, otprilike 80%, a može uključiti monoetilen glikol, dietilen glikol, monopropilen glikol ili kombinaciju različitih vrsta glikola, a ostatak čine voda te aditivi poput inhibitora korozije i agensa za vlaženje. Tekućina Tip I koristi se zagrijana, pri čemu je minimalna temperatura primjene na mlaznici 60°C kako bi se osigurala učinkovitost u uklanjanju naslaga leda.
- **Tekućina tip II** koja sadrži oko 50% glikole i koristi dodatne tvari koje pomažu u regulaciji viskoznosti te je namijenjena dugotrajnoj zaštiti površina zrakoplova s višim brzinama polijetanja, stvarajući deblji zaštitni sloj koji omogućuje produženo vrijeme zadržavanja.
- **Tekućina tip III** koja je slična tekućini tip II, ali prilagođena za zrakoplove s nižim brzinama polijetanja, poput regionalnih zrakoplova.
- **Tekućina tip IV** koja po sastavu i izgledu nalikuje tekućini tip II, ali ima drugačiji sastav inhibitora, agensa za vlaženje i regulatora debljine kako bi osigurala dulje vrijeme djelovanja i maksimalno zadržavanje na površinama.

3.2.1. Boje fluida

Boje fluida standardizirane su radi lakšeg prepoznavanja – dok je glikol koji je glavni sastojak svih tekućina prirodno bezbojan, suvremeni fluidi su obojeni. Tekućina Tip I obično je narančasta, Tip II svijetlo žuta, Tip III žuta, a Tip IV zelena (slika 10) no u nekim slučajevima tekućine mogu biti i bezbojne. Laboratorijska ispitivanja provode se u kontroliranim uvjetima kako bi se potvrdila kompatibilnost s materijalima, aerodinamička svojstva u zračnim tunelima te trajanje zaštite u različitim uvjetima. Bojanje služi za bolju vidljivost tijekom primjene te omogućuje lakše provjeravanje sloja fluida koji pokriva zrakoplov nakon primjene [5].



Slika 10. Boje tekućina za odleđivanje / zaštitu zrakoplova od zaleđivanja
Izvor: [14]

3.2.2. Skladištenje

Svaka tekućina čuva se u zasebnim, specifičnim uvjetima temperature i skladištenja. Spremnici trebaju biti namijenjeni isključivo fluidima za odleđivanje i zaštitu kako bi se spriječila kontaminacija, te moraju biti izrađeni od materijala koji su kompatibilni s fluidima, prema specifikacijama proizvođača. Ako je potrebno zagrijavanje tekućine treba paziti na otpornost plastičnih spremnika na ekstremne temperature. Prozirne ultraljubičaste posude treba prekriti neprozirnim materijalom kako bi se izbjeglo povećanje temperature – svjetlije boje ako su izložene suncu, a različiti metali ne bi trebali biti u kontaktu jedni s drugim jer mogu izazvati koroziju i degradaciju tekućine.

Preporučuje se održavanje visokog nivoa fluida u spremnicima kako bi se smanjila korozija na granici fluida i pare, iako sami fluidi nisu korozivni, njihove pare mogu biti. Spremnici trebaju biti udaljeni od izvora topline i redovito pregledani na koroziju, zagađenja i curenja, a zapisnici održavanja čuvaju se prema propisima [5].

3.2.3. Prijenos fluida

Prijenos fluida provodi se isključivo pomoću pumpi i prijenosnih sustava koji su odobreni od strane proizvođača tekućine, čime se osigurava kompatibilnost. Cjevovodi, ventili, crijeva i mlaznice moraju biti izrađeni prema preporukama proizvođača kako bi se spriječila kontaminacija i omogućio siguran prijenos tekućine.

Sustavi za prijenos različitih tipova ili proizvođača tekućine trebaju biti odvojeni kako bi se izbjeglo nenamjerno miješanje tekućine. Sve priključke za punjenje i ispuštanje tekućine potrebno je jasno označiti, a ulazi za punjenje moraju biti zaštićeni kako bi se spriječilo onečišćenje unutrašnjosti sustava [5].

3.2.4. Grijanje fluida

Tekućine Tip II, III i IV osjetljive su na razgradnju zbog prekomjernog mehaničkog smicanja i toplinskih utjecaja. Kako bi se spriječila degradacija, fluide je potrebno zagrijati prema preporukama proizvođača, uz periodične provjere integriteta nakon zagrijavanja. Važno je kontrolirati brzinu i cikluse zagrijavanja, pri čemu bi tekućina trebala cirkulirati u spremniku tijekom i nakon zagrijavanja kako bi se spriječilo pregrijavanje.

Prilikom grijanja, cirkulacija se može održavati sporim miješanjem ili niskom smičnom pumpom, gdje bi ulaz i izlaz tekućine trebali biti na suprotnim krajevima spremnika. Pregrijavanje i produljeno zagrijavanje mogu smanjiti viskoznost tekućine i smanjiti trajanje zaštite, pa ih treba izbjegavati. Kod skladištenja razrijeđenih fluida, maksimalna temperatura ne smije prelaziti 60°C dulje od dva tjedna.

Na degradaciju fluida posebno utječu mala potrošnja, dugotrajno stanje pripravnosti s uključenim grijačem, visoka temperatura u spremnicima te nedostatak izolacije između spremnika fluida i vode [5].

3.2.5. Primjena fluida

Za primjenu tekućine za odleđivanje i zaštitu koriste se različiti uređaji, prilagođeni jednostupanjskom ili dvostupanjskom postupku [5]:

1. **Jednostupanjski postupak** : Primjenjuje se zagrijana tekućina, obično Tip I, koja se nanosi u jednom koraku za uklanjanje leda i pružanje kratkotrajne zaštite. Ovaj postupak provodi se pomoću odleđivača s pumpama i mlaznicama za zagrijavanje i ravnomjerno prskanje tekućine po površinama zrakoplova. Priključci za punjenje i mlaznice prilagođeni su za održavanje konstantne temperature i optimalnog raspodjele tekućine, osiguravajući brzo otjecanje nakon primjene.
2. **Dvostupanjski postupak** : Sastoji se od dva koraka. Prvo se koristi Tip I tekućina za uklanjanje leda, a zatim zgusnuta tekućina (Tip II, III ili IV) za dugotrajnu zaštitu. Uređaji za ovaj postupak uključuju sustave za precizno prskanje tekućine, kao i dodatne spremnike i pumpne sustave za drugi korak, koji omogućuju ravnomjernu primjenu tekućine na očišćene površine. Oprema uključuje i kontrole za praćenje temperature tekućine, posebno u fazama čekanja na polijetanje. Kod ovog postupka, svi priključci i mlaznice prilagođeni različitim vrstama fluida, a upravljački sustavi omogućuju sigurnu i učinkovitu primjenu, prilagođenu potrebama specifičnih zrakoplova i uvjetima na terenu.

3.2.6. Vrijeme zadržavanja tekućine

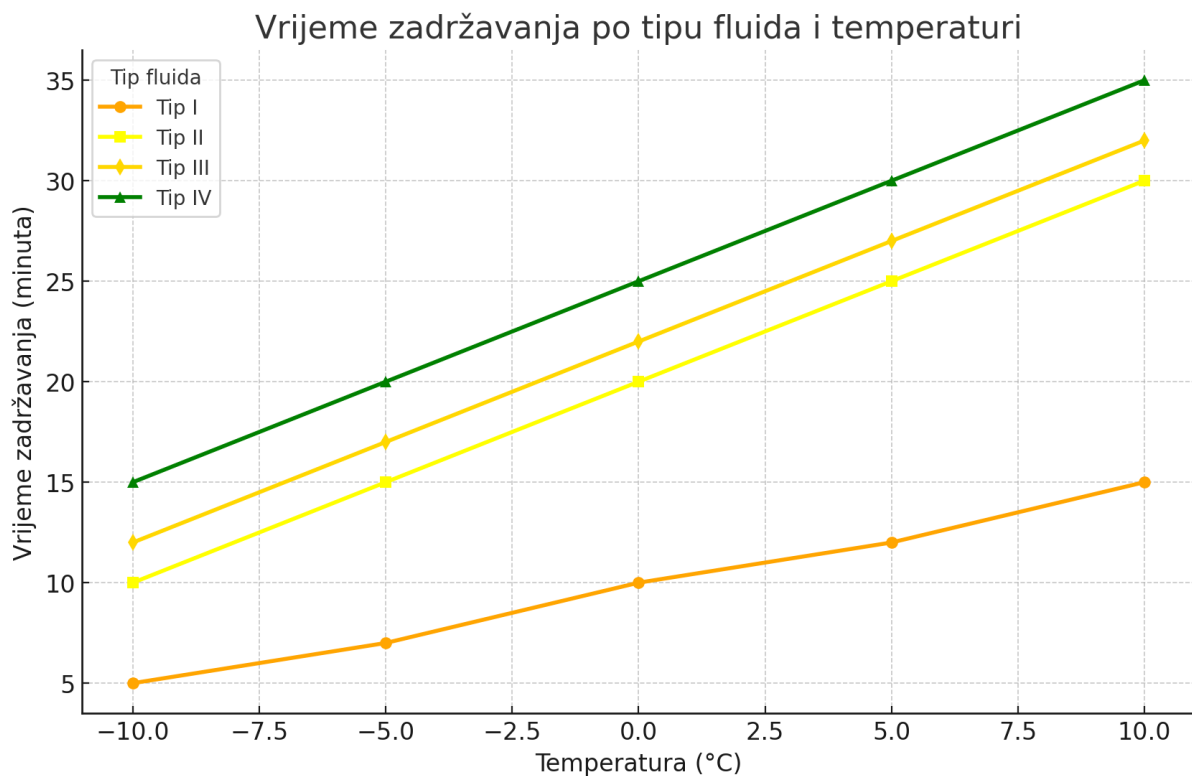
Vrijeme zadržavanja tekućine (eng. *Holdover Time* - HOT), označava procijenjeno vrijeme trajanja tekućine za zaštitu od zaleđivanja, nakupljanja leda, mraza ili snijega na površinama zrakoplova. Ovo vrijeme počinje od trenutka nanošenja tekućine i traje sve dok se ne pojave smrznuti nanosi na tretiranim površinama. Vrijeme zadržavanja ovisi o različitim uvjetima, uključujući vrstu padalina, temperaturu zraka i intenzitet vremenskih prilika [5].

Osim vremenskih uvjeta, vrijeme zadržavanja ovisi i o najnižoj operativnoj temperaturi – LOU (eng. *Lowest Operational Use Temperature*) za pojedini tip fluida. LOU označava najnižu temperaturu pri kojoj fluid ostaje učinkovit i ne smrzava se na površinama zrakoplova, što je ključno pri uporabi fluida u ekstremnim hladnim uvjetima. Svaki tip fluida ima specifičan LOU, koji se uzima u obzir prilikom planiranja zimske operativne zaštite zrakoplova.

Kako bi se osigurala optimalna zaštita, koriste se generičke i specifične tablice vremena zadržavanja za svaki tip tekućine i vremenske uvjete. Tablice vremena zadržavanja razlikuju se ovisno o specifičnim vremenskim uvjetima kao što su snijeg, ledena magla, lagana smrznuta kiša, ili kombinirani uvjeti (npr. snijeg pomiješan s ledenom maglom). Razlike u vremenima zadržavanja naglašavaju potrebu za prilagodbom procedura odleđivanja specifičnim padalinama i vremenskim uvjetima, čime se dodatno osigurava sigurnost operacija [15].

Graf 1 prikazuje vrijeme zadržavanja po tipu fluida i temperaturi te omogućuje usporedbu tekućina za svaki tip koji se koristi u procesu odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja (tip I – označen narančastom bojom, tip II – označen svjetlo žutom bojom, tip III – označen žutom bojom i tip IV – označen zelenom bojom) u ovisnosti o temperaturi.

Iz grafa je jasno vidljivo kako se vrijeme zadržavanja mijenja u ovisnosti o vanjskoj temperaturi odnosno s porastom temperature te da najdulje vrijeme zadržavanja ima tekućina tipa IV, a najkraće vrijeme tekućina tipa I [5].



Graf 1. Vrijeme zadržavanja po tipu fluida i temperaturi
Izvor: [5]

Tekućine Tip I stvara tanak sloj koji omogućuje kratkotrajno zadržavanje, pogodno za jednostavnije uvjete bez intenzivnih padalina. Vrijeme trajanja zaštite tekućine Tip I, prikazano u tablici 1, započinje primjenom i procjenjuje se u skladu s intenzitetom padalina i temperaturama, pri čemu jači vremenski uvjeti, poput jakog vjetra i visoke brzine motora, mogu značajno skratiti njihovo trajanje. Vrijeme trajanja zaštite Tip I fluida se ne smatra dugotrajnim rješenjem, a upotrebljava se prvenstveno kada se očekuju lakši uvjeti ili u pripremi za brzo polijetanje [5].

Tablica 1. Vrijeme zadržavanja tekućine tip I s obzirom na meteorološke uvjete

| Procijenjeno vrijeme trajanja zaštite Tip I fluida s obzirom na meteo uvjete (kompozitne površine) (FAA) | | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--------------------------------|------------------|---------------------------------------|--|
| Vanjska temperatura ^{1,2} °C | Magla/sumaglica koja se ledi ³ ili kristali leda ⁴ | Vrlo slab snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,6,7} | Slab snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,6,7} | Umjeren snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,7} | Rosa koja se ledi ⁸ | Laka ledena kiša | Kiša na pothlađeno krilo ⁹ | Ostalo ¹⁰ |
| -3° i iznad | 0:09 - 0:16 | 0:12 - 0:15 | 0:06 - 0:12 | 0:03 - 0:06 | 0:08 - 0:13 | 0:02 - 0:05 | 0:01 - 0:05 | OPREZ: Ne postoje smjernice vremena |
| ispod -3° do -6° | 0:06 - 0:08 | 0:11 - 0:13 | 0:05 - 0:11 | 0:02 - 0:05 | 0:05 - 0:09 | 0:02 - 0:05 | | |
| ispod -6° do -10° | 0:04 - 0:08 | 0:09 - 0:12 | 0:05 - 0:09 | 0:02 - 0:05 | 0:04 - 0:07 | 0:02 - 0:05 | | |
| ispod -10° | 0:04 - 0:07 | 0:07 - 0:08 | 0:04 - 0:07 | 0:02 - 0:04 | | | | |

¹ Točka zaleđivanja mješavine fluida Tipa I i vode mora biti najmanje 10°C ispod vanjske temperature.

² Mora se poštivati najmanjatemperatura primjene (LOUT).

³ Sumaglica koja se ledi najbolje se potvrđuje promatranjem. Ova informacija se nikada ne nalazi u meteo izvještaju "METAR", a do nje može doći kada je prisutna sumaglica pri 0 ° C i nižim temp..

⁴ U uvjetima ledenih kristala pomiješanih s ledenom maglom ili maglom koriste se vremena magle koja se ledi.

⁵ Za procjenu intenziteta padalina mora se koristiti Tabela **Intenzitet snijega u određivanju prevladavajuće vidljivosti**.

⁶ U uvjetima vrlo lakog i lakog snijega sa slabom ledenom kišom koriste se vremena pod "Laka ledena kiša".

⁷ U uvjetima vrlo slabog, slabog ili umjerenog snijega pomiješanog s kristalima leda koriste se vremena pod "Snijeg".

Kada se ne može procijeniti jačina "Rosa koja se ledi" koriste se vremena pod "Laka ledena kiša".

⁸ Uključuje slabu, umjerenu i jaku ledenu kišu. Treba koristiti vremena ledene kiše ako pozitivna identifikacija "Rose koja se ledi" nije moguća.

⁹ Ne postoje procijenjena vremena trajanja zaštite pri temperaturama 0° i ispod.

¹⁰ Jaki snijeg, palete snijega, umjerena i jaka ledena kiša, tuča.

Izvor: [5]

Zgusnute tekućine Tip II, III i IV (tablica 2), zbog svoje viskoznosti i sadržanih sredstava za zgušnjavanje, stvaraju deblji zaštitni film u usporedbi s tekućinom Tip I, pružajući duže vrijeme zadržavanja. Ove tekućine koriste se za zrakoplove s višim brzinama polijetanja (Tip II i IV) ili s nižim brzinama (Tip III, koji je prilagođen regionalnim zrakoplovima) [5].

Tablica 2. Procijenjeno vrijeme trajanja zaštite tekućine tip IV s obzirom na meteorološke uvjete

| Procijenjeno vrijeme trajanja zaštite Tip IV fluida s obzirom na meteo uvjete (općenita tabela) (FAA) | | | | | | | | | |
|---|------------------------|--|---|--|---|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|
| Vanjska temp. ² °C | Fluid/voda mješavina % | Magla/sumaglica ³ koja se ledi ili kristali leda ⁴ | Vrlo slab snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,6,7} | Slab snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,6,7} | Umjeren snijeg, zrnati snijeg ili "krpe" snijega ^{5,7} | Rosa koja se ledi ⁸ | Laka ledena kiša | Kiša na pothlađeno krilo ⁹ | Ostalo ¹⁰ |
| -3° i iznad | 100/0 | 1:15 - 2:40 | 1:55 - 2:20 | 1:00 - 1:55 | 0:30 - 1:00 | 0:40 - 1:10 | 0:20 - 0:35 | 0:08 - 1:05 | OPREZ: Ne postoje smjernice vremena trajanja zaštite |
| | 75/25 | 1:25 - 2:40 | 2:05 - 2:25 | 1:15 - 2:05 | 0:40 - 1:15 | 1:00 - 1:20 | 0:30 - 0:50 | 0:09 - 1:20 | |
| | 50/50 | 0:30 - 0:55 | 1:00 - 1:10 | 0:25 - 1:00 | 0:10 - 0:25 | 0:15 - 0:40 | 0:09 - 0:20 | | |
| ispod -3° do -8° | 100/0 | 0:20 - 1:35 | 1:45 - 2:05 | 0:55 - 1:45 | 0:25 - 0:55 | 0:25 - 1:10 | 0:20 - 0:25 | | |
| | 75/25 | 0:30 - 1:20 | 1:50 - 2:10 | 1:05 - 1:50 | 0:30 - 1:05 | 0:20 - 1:05 | 0:15 - 0:25 | | |
| ispod -8° do -14° | 100/0 | 0:20 - 1:35 | 1:30 - 1:50 | 0:50 - 1:30 | 0:25 - 0:50 | 0:25 - 1:10 ¹¹ | 0:20 - 0:25 ¹¹ | | |
| | 75/25 | 0:30 - 1:20 | 1:40 - 2:00 | 0:55 - 1:40 | 0:25 - 0:55 | 0:20 - 1:05 ¹¹ | 0:15 - 0:25 ¹¹ | | |
| ispod -14° do -18° | 100/0 | 0:20 - 0:35 | 0:30 - 0:45 | 0:09 - 0:30 | 0:02 - 0:09 | | | | |
| ispod -18° do -25° ¹² | 100/0 | 0:20 - 0:35 | 0:10 - 0:20 | 0:03 - 0:10 | 0:01 - 0:03 | | | | |
| ispod -25° to LOU ¹² | 100/0 | 0:20 - 0:35 | 0:07 - 0:10 | 0:02 - 0:07 | 0:00 - 0:02 | | | | |

¹ Za korištenje vremena trajanja zaštite u tabeli treba provjeriti je li su fluid i njegove mješavine koje se koriste unesene u "FAA HOLDOVER TIME GUIDELINES Table 57"

(Tip IV fluidi testirani za postupak odleđivanja i zaštite od zaleđivanja i aerodinamičke vrijednosti.). Bilo koje ograničenje mora biti zabilježeno i primijenjeno.

² Mora se poštivati najmanjatemperatura primjene (LOUT). Razmotriti uporabu Tip I fluida kada se Tip IV ne može koristiti.

³ Sumaglica koja se ledi najbolje se potvrđuje promatranjem. Ova informacija se nikada ne nalazi u meteo izvještaju "METAR", a do nje može doći kada je prisutna sumaglica pri 0 ° C i nižim temp..

⁴ U uvjetima ledenih kristala pomiješanih s ledenom maglom ili maglom koriste se vremena magle koja se ledi.

⁵ Za procjenu intenziteta padalina mora se koristiti Tabela **Intenzitet snijega u određivanju prevladavajuće vidljivosti**.

⁶ U uvjetima vrlo lakog i lakog snijega sa slabom ledenom kišom koriste se vremena pod "Laka ledena kiša".

⁷ U uvjetima vrlo slabog, slabog ili umjerenog snijega pomiješanog s kristalima leda koriste se vremena pod "Snijeg".

Kada se ne može procijeniti jačina "Rosa koja se ledi" koriste se vremena pod "Laka ledena kiša".

⁸ Uključuje slabu, umjerenu i jaku ledenu kišu. Treba koristiti vremena ledene kiše ako pozitivna identifikacija "Rose koja se ledi" nije moguća.

⁹ Ne postoje procijenjena vremena trajanja zaštite pri temperaturama 0° i ispod.

¹⁰ Jaki snijeg, palete snijega, umjerena i jaka ledena kiša, tuča.

¹¹ Ispod -10° ne postoje procijenjena vremena trajanja zaštite.

¹² Ako je najmanja temp. primjene (LOUT) nepoznata, ispod -23,5° ne postoje procijenjena vremena trajanja zaštite.

Izvor: [5]

Dodatno vrijeme zaštite tekućina tip II, III i IV može se produžiti povećanjem koncentracije u mješavini s vodom (najčešće se koriste mješavine omjera 75/25 ili 50/50 s vodom), a najduže vrijeme postiže se nerazrijeđenim fluidom. Važno je napomenuti da koncentracija u mješavini ponajviše ovisi o vanjskoj temperaturi i postoje jasno definirane smjernice u ovisnosti o tom čimbeniku. Smjernice za tekućine tip II i IV prikazane su u tablici 3. Kako vanjski čimbenici poput padalina, vjetra i temperature mogu dodatno utjecati na trajanje HOT vremena preporučuje se korištenje vizualne provjere prije polijetanja kako bi se potvrdila pokrivenost i učinkovitost fluida s obzirom na trenutno stanje [5].

Smjernice za vrijeme zadržavanja ažuriraju se svake godine kako bi odgovarale najnovijim istraživanjima i operativnim podacima. Primjerice, za sezonu 2024.-2025. uvedene su nove tablice vremena za specifične kombinirane uvjete padalina, poput snijega pomiješanog s ledenom maglom, te prilagođena HOT vremena za tekućine tipa II i IV u uvjetima jakog snijega i ledene magle. Također, za tekućine tipa II i IV, posebno pri korištenju 50/50 mješavine s vodom, smjernice upozoravaju da se ove mješavine ne koriste na hladnim krilima sa spremnicima goriva jer postoji mogućnost smrzavanja fluida na površini. U takvim situacijama prednost se daje korištenju nerazrijeđenog fluida ili tekućine tipa I, kako bi se osigurala optimalna zaštita [15].

Tablica 3. Smjernice za primjenu tip II i IV fluida

| Minimalna koncentracija Tip II i Tip IV fluid/voda mješavine prema VT u % | | | |
|---|---|---|---|
| Vanjska temperatura °C ⁽¹⁾ | Jedno-stupanjski postupak | Dvo-stupanjski postupak | |
| | De-icing/Anti-icing | Prvi korak: De-icing | Drugi korak: Anti-icing ⁽²⁾ |
| 0° C i iznad | 100/0, 75/25, 50/50 Ugrijana ³ Tip II ili IV mješavina fluida i vode | Ugrijana voda ili Tip I, II, III ili IV mješavina fluida i vode | 100/0, 75/25, 50/50 ugrijana/neugrijana Tip II ili IV mješavina fluida i vode |
| ispod 0° C do -3°C | 100/0, 75/25, 50/50 ugrijana ⁽³⁾ Tip II ili IV mješavina fluida i vode | Ugrijana Tip I, II, III ili IV mješavina fluida i vode s točkom zaleđivanja jednako ili manjoj od vanjske temperature zraka | 100/0, 75/25, 50/50 ugrijana/neugrijana Tip II ili IV mješavina fluida i vode |
| ispod -3 °C do -14°C | 100/0, 75/25 ugrijana ⁽³⁾ Tip II ili IV mješavina fluida i vode | | 100/0 ili 75/25 ugrijana/neugrijana Tip II ili IV mješavina fluida i vode |
| ispod -14 °C do LOAT °C | 100/0 ugrijanog ⁽³⁾ Tip II ili IV | | 100/0 ugrijana/neugrijana Tip II ili IV |

⁽¹⁾ Fluidi u jedno-stupanjskom postupku ili korišten u drugom stupnju ne smiju se koristiti pri temperaturama ispod njihove najniže temperature primjene (LOUT). Fluidi u prvom koraku ne smiju se koristiti ispod točke smrzavanja. Treba razmotriti korištenje tekućine Tipa I / III kada se fluidi Tipa II / IV ne mogu koristiti radi ograničenja LOU. LOU za dani fluid tip II / IV je viši (topliji) od:
a) Najniže temperature na kojoj fluid zadovoljava aerodinamični test primjene (prema AS5900) za određeni tip zrakoplova; ili
b) Stvarna točka smrzavanja fluida plus temperatura odbijanja od točke smrzavanja od 7 °C.
Neke najniže temperature primjene (LOUT) niže su od temperatura navedenih u tabelama vremena trajanja zaštite. Kada je zaštita od zaleđivanja ispod najniže temperature navedene u tablici vrijeme trajanja zaštite se ne primjenjuje.
⁽²⁾ Primjenjuje se prije nego se fluid iz prvog koraka počne zamrzavati, obično unutar 3 minute. (U nekim uvjetima ovo vrijeme može biti veće od 3 minute, ali i potencijalno niže u uvjetima teških padavina, hladnijim temperaturama ili osjetljivim površinama sastavljenim od kompozitnih materijala. Ako je potrebno, drugi korak se primjenjuje površina po površina.
⁽³⁾ Čisti zrakoplov može biti zaštićen hladnim ADF-om.

Izvor: [5]

4. POSTUPCI I METODE ZA ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA OD ZALEĐIVANJA

Svjesni koliko zaleđivanje može utjecati na performanse i stabilnost zrakoplova, osmišljene su detaljne procedure za njegovu prevenciju i uklanjanje. Ove procedure uključuju jasne smjernice za operativnu pripremu, primjenu specifičnih metoda i tehnika, kao i obaveznu regulativu i obuku osoblja, s ciljem da svi aspekti odleđivanja budu izvedeni prema standardima sigurnosti i ekološke odgovornosti.

4.1. Standardi i regulatorni okvir

Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva (ICAO) propisuje regulatorne odredbe vezane za provedbu sigurnosti, odgovornosti za okoliš i operativne dosljednosti u procesima odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja unutar ICAO Priručnika za operacije odleđivanja/zaštite zrakoplova od zaleđivanja (ICAO Doc 9640 Manual of Aircraft Ground De-icing/Anti-icing Operations) [4].

Priručnik ističe nekoliko regulatornih aspekata ključnih za standardizirane postupke za odleđivanje i sprječavanje zaleđivanja kao što su uloge i odgovornosti svih sudionika u procesu, program osiguranja kvalitete, provjere u svim fazama procesa, obuka i kvalifikacija osoblja te ekološke i komunikacijske standarde.

Svaki uključeni subjekt ima jasno definiranu ulogu i odgovornosti te vlasti za civilno zrakoplovstvo (CAA – eng. *Civil Aviation Authority*) svake države¹ moraju osigurati da svaki zračni operater ima sveobuhvatan program za odleđivanje/protiv zaleđivanja, koji je obično u skladu s "Konceptom čistog zrakoplova" (eng. *Clean Aircraft Concept – CAC*) i osigurava dostupnost meteoroloških podataka o uvjetima zaleđivanja na tlu. Osim osiguravanja programa, CAA provodi periodične inspekcije operatera kako bi se osigurala usklađenost sa standardima ICAO-a koje uključuju kontrole kvalitete fluida i opreme za odleđivanje te pridržavanje operativnih standarda u skladu sa sigurnosnim smjernicama [4].

CAA zahtijeva da operateri provode korektivne mjere ako se utvrde nepravilnosti, čime se dodatno jamči sigurnost i dosljednost u radu. Zračni operater ima zadatak implementacije i praćenja postupaka, održavanja sustava osiguranja kvalitete te osiguravanja odgovarajuće kvalifikacije i obuke osoblja kako bi svi procesi bili u skladu s propisanim standardima.

Sveobuhvatni programi obuke uspostavljeni su za uključeno osoblje, s ciljem prepoznavanja uvjeta zaleđivanja, svojstava tekućine, odgovor na hitne slučajeve te pitanja zdravlja i sigurnosti te osigurava da je osoblje opremljeno vještinama za odleđivanje/protiv zaleđivanja prema standardnim operativnim postupcima [4].

¹ U Republici Hrvatskoj odgovorna vlast je Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (CCAA – eng. Croatian Civil Aviation Agency) [16]

Računalne simulacije predstavljaju dodatak tradicionalnoj obuci osoblja koje u postupcima odleđivanja i zaštite od zaleđivanja, te omogućuju zaposlenicima stjecanje iskustva i vještina u kontroliranom okruženju, gdje mogu sigurno vježbati reagiranje na različite uvjete, uključujući intenzivne vremenske uvjete i tehničke poteškoće koje se mogu pojaviti tijekom zimskih operacija. Primjenom simulacija poboljšava se razumijevanje složenih procedura i specifičnih uvjeta rada, čime se osigurava veća pripremljenost za stvarne situacije. Ovaj pristup dodatno doprinosi sigurnosti i kvaliteti operacija, jer simulacije omogućuju vježbanje bez rizika za zrakoplov ili osoblje [14].

Program osiguranja kvalitete nalaže stalnu reviziju, vođenje evidencije i obuku osoblja radi usklađenosti s proceduralnim i regulatornim zahtjevima. Svaki aspekt odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja mora biti dokumentiran, uključujući ispitivanje tekućine, rad opreme i provjere kontaminacije, osiguravajući sigurnost i dosljednost u radu.

Provjere se dijele na provjere kontaminacije prije nanošenja tekućine, provjere nakon nanošenja i provjere kontaminacije prije polijetanja ako je vrijeme zadržavanja (HOT) isteklo. Ove provjere potvrđuju da tretirane površine zrakoplova ostaju bez kontaminacije, održavajući spremnost zrakoplova za sigurno polijetanje [4].

Unutar programa osiguranja kvalitete, periodični auditi igraju ključnu ulogu u održavanju standarda sigurnosti i učinkovitosti. Auditi uključuju unutarnje i vanjske revizije koje provjeravaju sukladnost procedura sa standardima te omogućuju prepoznavanje područja za poboljšanje. Vanjski auditi, koje provode neovisne organizacije ili partneri, osiguravaju dodatnu razinu provjere i usklađenosti s industrijskim smjernicama. Svaka nepravilnost otkrivena tijekom audita podliježe korektivnim mjerama, a svi rezultati dokumentiraju se i analiziraju tijekom redovitih pregleda uprave. Na taj način, proces audita doprinosi stalnom poboljšanju operacija i prilagodbi na promjenjive uvjete rada [17].

ICAO Priručnik za operacije odleđivanja/zaštite zrakoplova od zaleđivanja se također bavi ekološkim mjerama, naglašavajući važnost zadržavanja otjecanja glikola i recikliranja tekućina kako bi se minimalizirao utjecaj na okoliš. Program zaštite okoliša naglašava koliko je važno spriječiti ulazak štetnih tvari, poput glikole i drugih kemijskih sredstava, u sustave oborinske odvodnje na aerodromima, a to se postiže izoliranjem i prikupljanjem otpadnih tekućina za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja sustavima za prikupljanje otpadnih tekućina za odleđivanje kroz kanale i spremnike, čime se sprječava onečišćenje tla i vode, a istovremeno se zadovoljavaju zahtjevi za zaštitu okoliša.

Također, ističe se važnost recikliranja, odnosno ponovnog korištenja tekućina u svrhu smanjenje potreba za proizvodnjom novih kemikalija, direktno smanjujući troškove i utjecaj na okoliš. Reciklirani fluidi mogu se koristiti u naknadnim postupcima kada ispunjavaju zahtjeve za kvalitetu. Primjenom preciznih mlaznica i tehnologija za ravnomjernu raspodjelu tekućina, aerodromi optimiziraju upotrebu fluida, smanjujući količinu otpad te na ovaj način, postupci odleđivanja i zaštite zrakoplova postaju ekološki prihvatljiviji i održiviji [4].

Priručnik propisuje jasne komunikacijske protokole za postupke odleđivanja i zaštite od zaleđivanja koji su ključni za provođenje koordiniranih operacija na zemlji i tijekom leta. Pravilna komunikacija između letачke i zemaljske posade osigurava se kroz strukturirane fraze, posebno tijekom dvosmjernih veza na VHF frekvencijama ili koristeći interfon. Naglašena je potreba za operativnom razinom engleskog jezika za osoblje koje komunicira s letачkom posadom, a cjelokupna komunikacija mora biti jasna i strukturirana uz preporuku korištenja standardne ICAO frazeologije i izbjegavanje lokalnih izraza kako bi se smanjila mogućnost nesporazuma [4].

Prije početka odleđivanja ili zaštite od zaleđivanja, zemaljsko osoblje i letачka posada pružaju i potvrđuju jasne informacije kao što je konfiguracija zrakoplova s ciljem usklađenosti procesa sa standardima proizvođača i operatora. Upravo je ova obostrana komunikacija (prijenos informacije i potvrda iste informacije od strane drugog sudionika) ključna u sprječavanju pogrešne komunikacije koja bi potencijalno mogla ugroziti sigurnost zrakoplova.

Po završetku procesa, zemaljsko osoblje je dužno obavijestiti letачko osoblje o usklađenosti s Kodeksom čistog zrakoplova putem koda o zaštiti od zaleđivanja (eng. *Anti-icing code*) s pomoću kojeg letачko osoblje prima jasne informacije o tipu tekućine koja je korištena u procesu, proizvođaču, imenu, koncentraciji mješavine te datumu i vremenu provođenja svih procesa u svrhu vođenja evidencije.

Prije kretanja zrakoplova, zemaljsko osoblje dužno je obavijestiti (dati znak) letачkom osoblju da je sva oprema uklonjena i da je time kompletni proces odleđivanja/zaštite od zaleđivanja završen [4].

4.2. Postupci provođenja odleđivanja i zaštite zrakoplova

Postupci odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja provode se u nekoliko koraka koji osiguravaju učinkovitost procesa [11].

1. korak: Određivanje potrebe za postupkom odleđivanja / zaštite zrakoplova od zaleđivanja

U vremenskim uvjetima koji potenciraju mogućnost zaleđivanja zrakoplova, poput niskih temperatura ili padalina koje mogu stvoriti led ili mraz, pregled zrakoplova je od iznimne važnosti kako bi se ustanovilo ima li potrebe za provođenjem procesa odleđivanja / zaštite od zaleđivanja. Također, prisutnost kontaminanata kao što su snježne ili ledene naslage formirane tijekom leta ili taksiranja te prisutnost pothlađenog goriva u krilima koje može dovesti do stvaranja leda na vanjskim površinama zbog temperaturne razlike, potiče na provjeru stanja zrakoplova u svrhu utvrđivanja potrebe provođenja ovih procesa.

Zrakoplov se pregledava vizualnom provjerom sa specifičnih lokacija koje omogućuju dobru vidljivost kritičnih površina kao što su krila, repne površine, usisnici

motora te druga aerodinamička područja. Za precizniji pregled koriste se ljestve, specijalizirani uređaji za provjeru ili unutrašnjost zrakoplova kada je to moguće.

Ako se tijekom pregleda otkrije kontaminacija, letačko i zemaljsko osoblje zajednički donose odluke o daljnjem postupanju i svim potrebnim koracima. Odluka o nastavku procesa ostaje na zapovjedniku zrakoplova koji procjenjuje ima li potrebe za nastavkom procesa ili ne.

U određenim uvjetima kao što su visoka vlažnost zraka ili temperatura blizu nule zbog pojave rizika od formiranja prozirnog leda ili primjerice ili ako je zrakoplov već bio odleđen, ali se tijekom vremena ponovno izložio niskim temperaturama prije dolaska posade, potrebno je provesti dodatnu vizualnu provjeru zrakoplova te ustanoviti je li potrebno provesti proces odleđivanja / zaštite.

2. korak: Lokacija provođenja procesa

Nakon provjere, u slučaju utvrđivanja potrebe provođenja procesa, potrebno je odlučiti na kojoj lokaciji će se provesti proces, a to prvenstveno ovisi vrsti prometa i veličini zrakoplova, operativnim uvjetima, zahtjevima kontrole prometa, sigurnosti, dostupnoj infrastrukturi te koordinaciji među pružateljima usluga.

Zračna luka može imati centralizirane ili izdvojene pozicije na kojima je potrebno dodatnu pažnju pridonijeti manevriranju zrakoplova i drugih vozila, a svi sudionici moraju imati jasno definirane uloge i putanje za kretanje pogotovo u uvjetima visoke prometne frekvencije. Također, izdvojene pozicije zahtijevaju posebnu logistiku i planiranje kako bi se osigurao nesmetan pristup opremi i tekućinama za odleđivanje, bez ometanja drugih operacija.

Širina i dužina zrakoplova također utječu na odabir lokacije jer veći zrakoplovi zahtijevaju više prostora dok manji mogu koristiti fleksibilnije površine. Također je potrebno uskladiti procese kada postoji nekoliko različitih pružatelja koji koriste istu izdvojenu poziciju te postaviti koordinatora kako bi cjelokupni proces bio učinkovit, a sama usluga sinkronizirana. Cjelokupni proces mora osigurati učinkovitost, sigurnost i fluidnost postupka i na temelju svih specifičnih zahtjeva zračne luke prilagoditi odabir lokacije.

Tri glavne lokacije na kojima se provode postupci odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja su [11]:

- *Parkirna pozicija kod terminala* na kojoj se cijeli proces od pregleda do provođenja samog procesa odvija neposredno nakon parkiranja ili prije polijetanja. Ova lokacija omogućava lakši pristup potrebnoj opremi i osigurava sigurno izvođenje pregleda, a prednosti uključuju izbjegavanje dodatnog kretanja zrakoplova, što smanjuje rizik od onečišćenja ili dodatnog zaleđivanja.
- *Izdvojena pozicija za odleđivanje* koje se koriste kada je potrebna posebna zona za odleđivanje zrakoplova. Na tim se lokacijama osigurava dvosmjerna komunikacija između letačke posade i zemaljske posade te veći prostor za izvođenje postupaka bez ometanja ostalog prometa (slika 11).



Slika 11. Izdvojena stajanka za odleđivanje zrakoplova
Izvor: [2]

- *Pozicije opremljene avio-mostovima* koriste se ako je zrakoplov na poziciji s avio-mostom (slika 12), ali je potrebno provesti posebne mjere kako bi se osigurala sigurnost i spriječilo ometanje postupka odleđivanja. Ključno je ukloniti sva druga opslužna vozila, povući avio-most u siguran položaj te isključiti motore zrakoplova. Prednost je da se na ovoj lokaciji omogućava siguran i neprekinut postupak odleđivanja, čime se minimizira rizik od dodatnog nakupljanja leda tijekom taksiranja.



Slika 12. Proces odleđivanja zrakoplova na poziciji opremljenoj avio-mostom
Izvor: [18]

3. korak: Proces odleđivanja / zaštite od zaleđivanja

Sama provedba procesa odvija se jednostupanjskim ili dvostupanjskim postupkom uz korištenje odgovarajuće opreme što je već ranije objašnjeno u ovom radu, a broj vozila i redoslijed obrade prilagođeni su specifičnim zahtjevima svakog zrakoplova i vremenskim uvjetima [5][11].

Broj vozila ovisi o veličini zrakoplova, vremenskim uvjetima te potrebnoj brzini izvođenja postupka, posebno u uvjetima visokog prometa. Manji zrakoplovi, primjerice regionalni zrakoplovi, obično zahtijevaju dva vozila, što omogućava ekonomičnu i brzu obradu bez nepotrebnog zastoja. Veliki zrakoplovi, kao što su širokotrupni komercijalni avioni, zahtijevaju četiri vozila kako bi se sve površine mogle simultano obrađivati. Korištenje više vozila na većim zrakoplovima omogućava bržu pokrivenost cijele površine, čime se minimizira vrijeme izlaganja kritičnih površina niskim temperaturama.

Redoslijed obrade prilagođen je dizajnu zrakoplova kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost. Uobičajeno je da se postupak započinje prskanjem trupa, krećući od prednje strane prema stražnjem dijelu, kako bi se prvo uklonio led s najvećih površina, a zatim se prelazi na krila, počevši od najviših točaka prema rubovima. Time se osigurava da se kontaminacija uklanja s unutarnjih dijelova prema vanjskim, čime se smanjuje rizik od naknadnog zaleđivanja očišćenih površina. Po završetku ovih površina, obrađuju repne površine, uključujući vertikalne i horizontalne stabilizatore, gdje se prskanje provodi od vrha prema dolje, osiguravajući da se preostali led ukloni sa svih aerodinamički osjetljivih dijelova [11].

4. korak: Provjera nakon postupka

Nakon provođenja procesa potrebno je izvršiti provjere kako bi se osiguralo da su svi osjetljivi dijelovi zaštićeni i spremni za let. Ove provjere jamče sigurnost i čistoću zrakoplova prije polijetanja. Provjera se provodi vizualno kako bi se utvrdilo jesu li površine očišćene od leda ili snijega i potpuno prekrivene slojem fluida za zaštitu od zaleđivanja, a ako se otkrije bilo kakvo onečišćenje, osoblje odmah izvještava letačku posadu.

Na određenim tipovima zrakoplova, posebno onima s motorima smještenim na stražnjem dijelu trupa, vizualna provjera može biti nadopunjena dodirrom ruke (eng. Tactile check), a ova provjera uključuje dodirivanje specifičnih površina kako bi se osjetilo eventualno prisustvo leda, što je posebno korisno za otkrivanje prozirnog leda.

Sve provjere se provode s točaka koje omogućuju dobar pregled obrađenih površina, iz vozila za odleđivanje ili uz pomoć ljestvi, a ako se otkrije onečišćenje, ono se uklanja dodatnim postupkom odleđivanja, a cijeli postupak provjere se ponavlja kako bi se potvrdila čistoća [11].

5. korak: Komunikacija i koordinacija

Tijekom cijelog postupka, od pripreme do završne provjere, ključna je koordinacija između zemaljskog osoblja i letačke posade, a komunikacijski protokoli, koji su već detaljno objašnjeni u ovom radu, osiguravaju da su sve strane obaviještene o trenutnom statusu postupka, korištenim tekućinama i mogućim ograničenjima [11].

4.3. Metode provođenja odleđivanja i zaštite zrakoplova

Led, snijeg, bljuzga ili mraz mogu se ukloniti korištenjem ugrianih tekućina, mehaničkim tehnikama, korištenjem vrućeg zraka, alternativnim tehnologijama ili kombinacijom ovih metoda. Metode provođenja odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja moguće je ugrubo podijeliti na standardne koje uključuju primjenu fluida, mehaničke metode i korištenje vrućeg zraka i na alternativne koje uključuju inovativne pristupe, poput infracrvene tehnologije i drugih razvijajućih tehnologija.

Naravno, korištenje određenih metoda odleđivanja i zaštite od zaleđivanja ovisi o mnogim čimbenicima, ali i o uputama samog proizvođača određenog zrakoplova. Airbus i Boeing, kao dva najveća svjetska proizvođača komercijalnih zrakoplova i dva najveća rivala, imaju specifične smjernice za ove procese, koje odražavaju razlike u konstrukcijskim rješenjima i tehničkim zahtjevima njihovih modela. Razlike u dizajnu, poput položaja motora, kontrole zakrilaca i toplinskih ograničenja, zahtijevaju prilagođene pristupe u primjeni različitih metoda u zimskim uvjetima [11].

Sukladno tome, Airbus se oslanja na visoku razinu automatizacije s brojnim automatskim senzorima koji prate uvjete zaleđivanja i po potrebi aktiviraju anti-ice sustave, što smanjuje potrebu za ručnim postupcima posade. Primjerice, Airbus koristi ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring) sustav, koji posadi pruža stalne informacije o stanju kritičnih površina i sustava za zaštitu od zaleđivanja. Ovaj automatizirani sustav omogućava brži i sigurniji odgovor na promjene u uvjetima zaleđivanja, pružajući konzistentnu zaštitu tijekom cijelog leta [6].

Postupci na Airbus modelima također se mogu izvoditi sa spuštenim zakrilcima i pretkrilcima, ali samo po nalogu pilota, čime se smanjuje vrijeme zaštite od zaleđivanja za 25%. Specifične površine, poput kabinskih prozora, motora i drugih osjetljivih dijelova, moraju biti zaštićene od direktnog prskanja tekućina kako bi se izbjegla moguća oštećenja ili smanjena vidljivost [6].

Proizvođač zrakoplova Boeing, s druge strane, preferira veći stupanj ručne kontrole. Boeing preporučuje preciznu primjenu fluida kako bi se izbjeglo prskanje u otvore motora, čime se štite motor i osjetljive komponente, a primjena fluida također se provodi simetrično, kako bi se osigurala konzistentnost u tretiranju svih površina. Boeingovi modeli, poput B787 i B737, imaju dodatna ograničenja u vezi s toplinskim limitima vrućeg zraka, pri čemu postupci zahtijevaju kontrolu temperature kako bi se izbjeglo termalno opterećenje i osigurala sigurnost kritičnih komponenti. Za razliku od Airbusovog automatiziranog sustava, Boeingov pristup uključuje redovne provjere i

zagrijavanje motora, čime se posadi omogućuje fleksibilnost i kontrola nad procesom odleđivanja u realnim vremenskim uvjetima [7].

4.3.1. Primjena fluida

Odabir odgovarajuće metode prskanja ovisi o zimskim uvjetima i zahtjeva prilagodbu specifične situacije i lokalnim smjernicama. Za najbolji učinak, tekućine se primjenjuju što bliže površini zrakoplova kako bi se smanjio gubitak topline. Toplina tekućine učinkovito topi mraz i lagane naslage snijega, bljuzge i leda, dok kod težih naslaga toplina razbija vezu između zaleđenih slojeva i površine zrakoplova, nakon čega hidraulički mlaz uklanja zaostale naslage.

Fluidi se primjenjuju tako da pokrivaju cijelu površinu zrakoplova u kontinuiranom sloju. Kod jakih oborina ili niskih temperatura, viskoznost fluida i debljina sloja postaju kritični faktori. U slučajevima ekstremnih vremenskih uvjeta, primjerice snježnih oluja ili ledene kiše, preporučuje se korištenje kombinacije zagrijane tekućine tipa I za prvo uklanjanje leda i nastavak s tekućinama tipa II, III ili IV kako bi se postigla dugotrajnija zaštita.

Brzina i način nanošenja fluida ovise o vrsti zrakoplova i konstrukcijskim specifičnostima. Kod zrakoplova s motornim usisnicima smještenim na prednjem dijelu, primjena fluida mora biti pažljivo usmjerena kako bi se izbjeglo njegovo unošenje u usisne otvore, što može ugroziti rad motora i stvoriti dodatne sigurnosne rizike. Za zrakoplove osjetljive na vlagu na pojedinim površinama, poput instrumenata, preporučuje se pažljivo doziranje i praćenje količine nanesenog fluida kako bi se smanjila akumulacija vlage na kritičnim dijelovima [5].

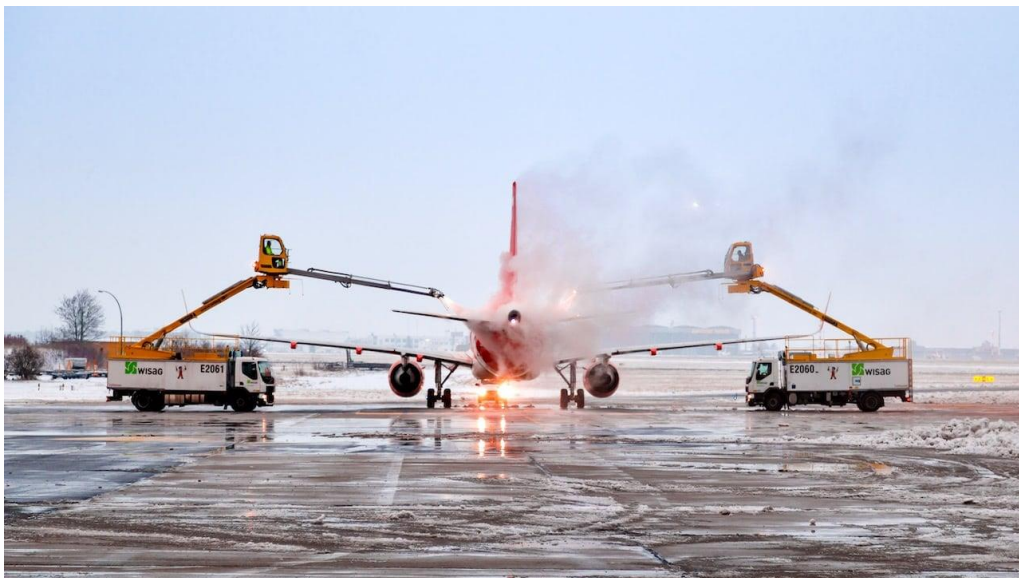
Odabir opreme u primjeni ove metode ovisi o specifičnim potrebama zrakoplova i intenzitetu vremenskih uvjeta. Kod ekstremnih vremenskih uvjeta kao što je snježna oluja ili ledena kiša, oprema se koristi s dodatnim grijačima i sustavima za kontrolu protoka, kako bi se osigurao stalni tok zagrijanih fluida, što omogućava topljenje leda čak i pri vrlo niskim temperaturama i u tim uvjetima kombinacija tekućina tipa I i II ili IV pruža dugotrajniju zaštitu nakon početnog uklanjanja naslaga [5].

Veći komercijalni zrakoplovi, poput Airbus i Boeing modela, često koriste napredne sustave za prijenos fluida koji omogućuju brzu i ravnomjernu primjenu tijekom dvostupanjskog postupka. U tim sustavima, grijači su integrirani kako bi se fluidi održali na optimalnoj temperaturi, što je posebno važno za održavanje njihove učinkovitosti u ekstremnim uvjetima. Mlaznice su precizno postavljene i prilagođene kako bi mogle pokriti veće površine u jednom prolazu, čime se smanjuje vrijeme potrebno za primjenu fluida i dodatno poboljšava učinkovitost samog procesa, a hidraulične rampe omogućuju operaterima siguran i jednostavan pristup visokim dijelovima zrakoplova [5].

Za potpuno odleđivanje i zaštitu ovih velikih zrakoplova obično je potrebno četiri vozila kako bi se mogla provesti simultana obrada svih kritičnih površina zrakoplova,

čime se minimizira vrijeme izlaganja niskim temperaturama i osigurava cjelovito uklanjanje leda u što kraćem vremenu. Rezultat prilagodbe opreme i broja vozila je optimalan proces i povećavana operativna učinkovitost, posebno u uvjetima visokog prometa u zimskim mjesecima [5].

S druge strane, manji zrakoplovi, poput regionalnih aviona i turbopropelerskih modela, obično zahtijevaju dva vozila za primjenu fluida (slika 13) te se tako omogućava ekonomična i brza obrada te se time smanjuju kašnjenja i osigurava učinkovito uklanjanje naslaga leda. Za ove zrakoplove koriste se prijenosni grijači i manji spremnici za fluid, oprema je fleksibilnija i lakša za premještanje, prilagođena primjeni na manjim površinama, ali primjena zahtijeva preciznije rukovanje, budući da su manji zrakoplovi često osjetljiviji na višak tekućine [5].



Slika 13. Odleđivanje zrakoplova s dva vozila za primjenu fluida
Izvor [19]

Vrlo je važno da se, tijekom samog procesa, osoblje koje je kvalificirano i provodi sam proces ophodi stručno i da se pridržavaju sigurnosnih smjernica koje jasno određuju dijelove zrakoplova koje je dozvoljeno prskati i da izbjegavaju kontakt s fluidima onih dijelova koje nije dozvoljeno prskati zbog njihove osjetljivosti. Kako bi se osigurala dosljednost i sigurnost u provođenju postupaka odleđivanja i zaštite zrakoplova, ključna je certificirana obuka svih članova osoblja uključenih u ove procese. Osoblje mora proći teorijski i praktični trening koji pokriva rad s opremom, pravilno rukovanje fluidima te specifične sigurnosne procedure za rad u zimskim uvjetima te je svake godine predviđena obnova certifikata, kao i dodatna obuka kada se uvedu nove tehnologije ili sigurnosne smjernice. Pravilno obučeno osoblje omogućuje učinkovito uklanjanje leda i smanjuje rizik od incidenata, posebice na kritičnim dijelovima zrakoplova poput usisnika motora, instrumenata i senzora [2].

Aerodinamičke površine kao što su krila, repne površine (vertikalni i horizontalni stabilizatori) i trup zrakoplova smiju se prskati kako bi se osiguralo uklanjanje leda i zaštita od ponovnog nakupljanja i njihova potpuna čistoća ima prioritet.

Stakla na pilotskoj kabini smiju se prskati fluidom, ali s oprezom i najčešće tek zagrijanim tekućinama tipa I koje brzo ispare, jer viskozitet i ostaci drugih fluida mogu smanjiti vidljivost, a prskanje tekućinama tipa II, III ili IV nije preporučljivo zbog viskoznosti koja može zamagliti stakla i smanjiti vidljivost pilota.

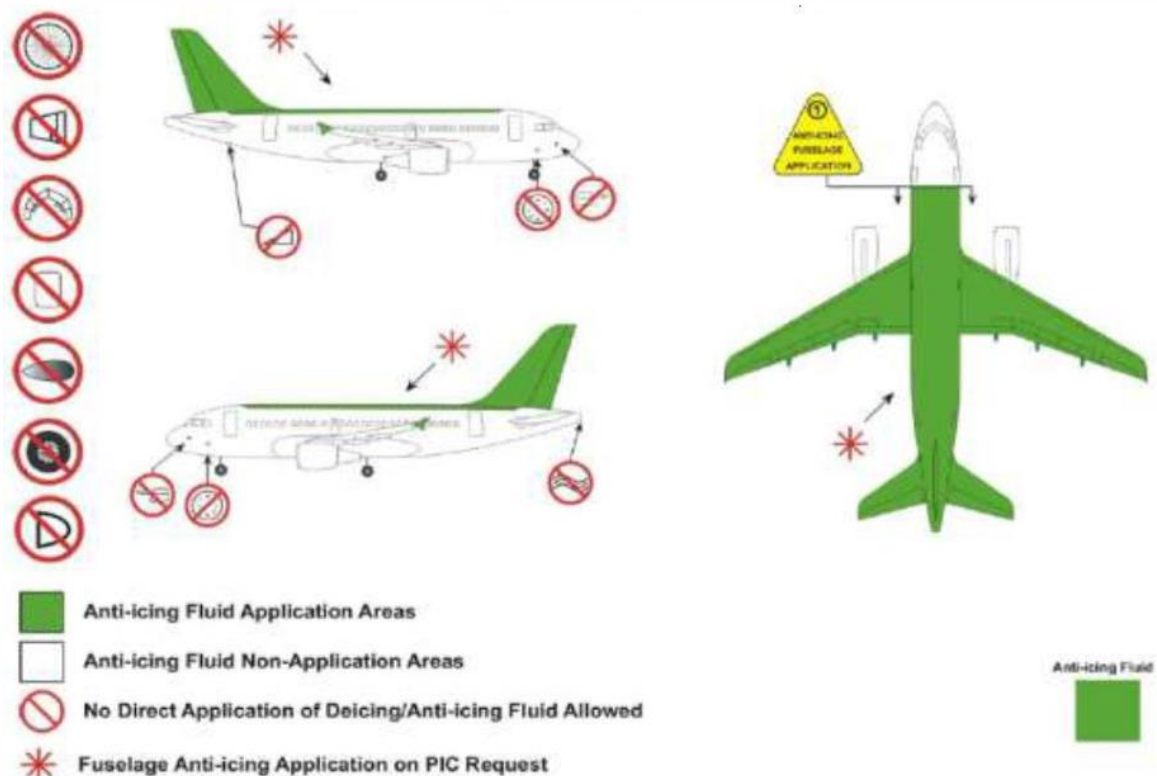
Posebnu pažnju zahtijevaju usisnici motora, senzori, instrumenti, otvori i ventili. Prskanje fluida u ili blizu usisnika motora može uzrokovati unošenje tekućine u motor, što može dovesti do ozbiljnih problema poput pregrijavanja, smanjenja snage motora, pa čak i potencijalnog kvara motora. Kada je to moguće, ovi dijelovi se odleđuju zagrijanim zrakom ili metodama koje smanjuju rizik unošenja vlage u motore. Dijelovi zrakoplova koji se smiju prskati fluidima u procesu odleđivanja zrakoplova prikazani su na slici 14.



Slika 14. Dijagram dopuštene primjene fluida za odleđivanje - A318/319
Izvor: [10]

Također, instrumenti kao što su Pitotove cijevi i statički otvori koji su ključni za mjerenje brzine i visine zrakoplova, ne bi trebali biti izloženi direktnom prskanju fluidima, jer nakupljanje ostataka može dovesti do blokade senzora, a samim time i netočnih očitavanja. Kao zamjenu preporučuje se čišćenje ovih dijelova mehaničkim metodama ili primjenom vrućeg zraka [2].

Otvori za ventilaciju, hidraulične komponente i spojne točke sustava za gorivo zahtijevaju izbjegavanje kontakta s fluidima, a prskanje fluida po ovim dijelovima može izazvati kondenzaciju i potencijalne probleme s električnim komponentama ili koroziju, zbog čega je alternativa korištenje vrućeg zraka [5]. Dijelovi zrakoplova koji se smiju prskati fluidima za zaštitu od zaleđivanja, te dijelovi za koje je to strogo zabranjeno, prikazani su na slici 15.



Slika 15. Dijagram dopuštene primjene fluida za zaštitu od zaleđivanja
Izvor: [10]

4.3.2. Mehaničke metode

U situacijama kada naslage leda postaju tvrdokornije i teže za ukloniti isključivo korištenjem fluida, primjenjuju se mehaničke metode, poput struganja ili korištenja specijaliziranih alata za ručno uklanjanje. Ovisno o situaciji, ova metoda koristi se kao primarna metoda kako bi se izbjeglo oštećenje osjetljivih dijelova zrakoplova ili kao dodatak u kombinaciji s fluidima kako bi se razbila struktura debljih naslaga leda. Mehaničke metode prikladne su za ekstremne uvjete u kojima je potrebno brzo uklanjanje leda, posebno kod naslaga koje bi mogle ometati aerodinamičke funkcije zrakoplova [5].

Jedna od osnovnih mehaničkih tehnika je ručno uklanjanje leda pomoću strugalica, metli (slika 16), četki ili specijaliziranih alata. Primjenjuje se na relativno manjim površinama koje su lako dostupne i ne zahtijevaju primjenu teških strojeva, a od velike je važnosti da se struganje obavlja uz veliku pažnju kako bi se izbjegla oštećenja

osjetljivih aerodinamičkih površina i instrumenata te se treba pridržavati pravilnog smjera kako bi se spriječilo da snijeg ili drugi kontaminanti dospiju u međuprostore između fiksnih i pokretnih dijelova krila i repa. Metle su korisne za uklanjanje suhog i laganog snijega, osobito na manjim zrakoplovima, dok se čvršći snijeg uklanja drugim metodama, a prilikom čišćenja potrebno je provjeriti ima li ispod snijega još sloj leda [5].

Prednost ove metode očituje se kroz njenu preciznost uklanjanja tvrdokornih naslaga leda na teško dostupnim dijelovima zrakoplova, ali mana je dugotrajnost procesa i fizički napor koji je potrebno uložiti, potreba za kvalificiranim i osposobljenim osobljem i povećan rizik od nastanka oštećenja. Mehaničkim metodama postiže se detaljno odleđivanje i posebno su korisne u uvjetima kada fluidi nisu prikladni ili nedostaje odgovarajuća oprema za tekućine [5].



Slika 16. Uklanjanje kontaminanata mehaničkom metodom – upotrebom metle
Izvor: [20]

Također u upotrebi su i pneumatski uređaji, koji koriste komprimirani zrak pod visokim tlakom i omogućuje brzo uklanjanje naslaga s površina zrakoplova bez upotrebe tekućina, što je korisno za dijelove na kojima je potrebno izbjeći vlagu, poput motora ili osjetljivih instrumenata. Ipak, nedostatak im je da ti uređaji zahtijevaju pažljivo upravljanje tlakom kako bi se izbjegla oštećenja, posebno na površinama koje su tanke ili osjetljive na udarce. Ovi sustavi su dugo u upotrebi i široko su prihvaćeni u komercijalnoj i vojnoj avijaciji. Koriste se na mnogim malim i regionalnim zrakoplovima, kao i na većim komercijalnim modelima, posebno zbog njihove pouzdanosti i relativno niskih energetske zahtjeva [5].

Primjer korištenja pneumatskih "de-ice boots" sustava za uklanjanje leda na krilima (zračnih jastuka) je proizvođač De Havilland Canada (Dash 8) koji koristi ovaj sustav na svojim regionalnim zrakoplovima Dash 8. Ovi sustavi, postavljeni na prednje rubove krila (slika 17), napuhuju se i stvaraju vibracijske udare koji razbijaju led, omogućujući njegovu lakšu eliminaciju tijekom leta [21].



Slika 17. Pneumatski „de-ice boots“ sustav (crne boje) za uklanjanje leda na krilima
Izvor: [21]

4.3.3. Primjena vrućeg zraka

Za zrakoplove koji su osjetljivi na vlagu ili u uvjetima kada postoji zabrinutost za moguću kontaminaciju fluida, koristi se metoda primjene vrućeg zraka. Zrak zagrijan na visoku temperaturu usmjeren je pomoću uređaja za zagrijavanje zraka prema površinama zrakoplova, čime se učinkovito uklanjaju tanki slojevi mraza ili leda, bez potrebe za dodatnim kemijskim sredstvima. Ova metoda smanjuje rizik od prekomjernog nakupljanja vlage na kritičnim dijelovima zrakoplova i idealna je u situacijama gdje je potrebno brže izvođenje postupka. Također, često se koristi u kombinaciji s drugim metodama, npr. nakon primjene tekućina tipa I, kako bi se osigurala potpuna čistoća aerodinamičkih površina [5].

U uvjetima vrlo niskih temperatura i jakog vjetrova, potrebno je osigurati da zagrijani zrak dopre do površina bez značajnog gubitka topline i to se često postiže usmjeravanjem zraka iz posebnih grijaćih jedinica koje omogućuju stalnu temperaturu zraka, čak i u ekstremnim zimskim uvjetima. Prednosti ove metode očituju se u njejoj brzini, jer omogućuje uklanjanje tankih slojeva leda i mraza u kratkom vremenu, što je posebno važno tijekom brzih operacija u zračnim lukama.

Primjena vrućeg zraka prilagođava se tipu, odnosno veličini zrakoplova. Kod većih komercijalnih zrakoplova, sustavi za odleđivanje vrućim zrakom često su integrirani unutar strukture, dok manji zrakoplovi ponekad koriste mobilne uređaje za zagrijavanje zraka koji se usmjeravaju prema specifičnim dijelovima aviona prije polijetanja (slika 18).



Slika 18. Odleđivanje zrakoplova primjenom vrućeg zraka
Izvor: [20]

Vrlo je važno istaknuti dodatne prednosti ove metode kao što su ekološka prihvatljivost, manja potrošnja goriva i smanjenje troškova održavanja zrakoplova. S obzirom na to da ova metoda koristi samo zagrijani zrak, nema otpada poput kemijskih tekućina koje mogu završiti u tlu ili kanalizaciji, a samim time je metoda ekološki održivija, jer ne doprinosi zagađenju i smanjuje potrebu za naknadnim postupcima čišćenja na aerodromima. Također, smanjuje se potreba za dodavanjem mase uzrokovane akumulacijom kemijskih sredstava, a zadržavanje optimalne mase doprinosi učinkovitijem trošenju goriva i može produžiti vrijeme između potrebnih održavanja [5].

4.4. Specifične prakse u industriji

Tvrtka DHL Air (Austria) GmbH osmislila je koncept naziva „Snowman“ koji koriste u procesu odleđivanja i zaštite od zaleđivanja svojih zrakoplova. Tijekom zimskog razdoblja, DHL-ove lokacije imenuju člana zemaljskog osoblja odgovornog za odleđivanje, koji se naziva *Snowman*. Prvo mora steći kvalifikaciju, a zatim svake

godine ponovno proći tečaj za rad na postupcima odleđivanja, a nakon uspješne obuke, odgovorni Regionalni odjel za zemaljske operacije imenuje kandidata za ulogu *Snowman-a*. Ovlaštenje za rad kao *Snowman* vrijedi jednu zimsku sezonu, nakon čega se mora ponovo kvalificirati. Izdaje se pismo ovlaštenja i kontrolna lista [22].

Odgovornosti *Snowmana* uključuju [22]:

- Provjeru vremenskih uvjeta na početku operacija i, ako se očekuju uvjeti za zaleđivanje, osiguranje da je osoblje informirano, a oprema provjerena, napunjena i spremna za rad.
- Sat vremena prije prvog zakazanog polijetanja, procjenu postojećih uvjeta.
- Ako je zrakoplov duže vrijeme na zemlji u uvjetima zaleđivanja, npr. nakon vikend pauze, *Snowman* treba razmotriti primjenu zaštite od zaleđivanja ili odleđivanja prije početka ukrcaja.
- *Snowman* bi trebao primiti zahtjeve za odleđivanje od posada najmanje 30 minuta prije polijetanja. U slučaju da posada kasni, primjerice zbog kasnog dolaska zrakoplova, *Snowman* treba procijeniti stanje zrakoplova i, ako je potrebno, organizirati odleđivanje.
- Po završetku odleđivanja, *Snowman* prenosi *anti-icing code* posadi koja preuzima let.

Također, postoje specifične mjere koje DHL primjenjuje u vezi s prilagodbom ekološkim aspektima navedene su u njihovom priručniku za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja [22]:

1. *Ekološka odgovornost*: DHL je svjestan utjecaja tekućina za odleđivanje na okoliš i stoga zahtijeva pažljivu, preciznu i restriktivnu uporabu tih tekućina bez kompromitiranja sigurnosti, čime nastoje smanjiti ekološki otisak operacija
2. *Lokalne procedure*: Priručnik sadrži specifične postupke prilagođene zračnim lukama s posebnim zahtjevima. U zračnim lukama gdje postoje specifične procedure za zbrinjavanje otpadnih voda koje sadrže tekućine za odleđivanje, DHL provodi postupke odleđivanja na posebno određenim pozicijama opremljenim sustavima za prikupljanje otpadnih tekućina. Ove pozicije omogućuju sigurno prikupljanje i odvajanje tekućina, čime se sprječava njihov nekontrolirani odlazak u okoliš, a prikupljena tekućina zatim može biti reciklirana ili zbrinuta prema lokalnim ekološkim standardima, čime DHL osigurava da su njihove operacije usklađene s propisima svake pojedine zračne luke.
3. *Smanjenje količine korištene tekućine*: Preporučuje se uporaba pred-koraka uklanjanja kontaminacije prije odleđivanja, poput četkanja ili upotrebe komprimiranog zraka, što smanjuje potrebu za kemijskim tekućinama te pomaže u smanjenju kemijskog otpada i olakšava kasnije postupke odleđivanja.

5. ALTERNATIVNE TEHNOLOGIJE U PROCESU ODLEĐIVANJA I ZAŠTITE OD ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA

Alternativne metode predstavljaju inovativna rješenja u procesu odleđivanja i zaštite od zaleđivanja zrakoplova, usmjerene na smanjenje vremena potrebnog za proces odleđivanja, troškova te štetnog utjecaja na okoliš. Standardne metode poput korištenja tekućina značajno utječu na okoliš i tvrtke specijaliziranje za ove procese u suradnji sa zračnim lukama i avioprijevoznicima istražuju prihvatljivija rješenja. Dok se neka od ovih rješenja još u fazi istraživanja i testiranja, pojedine tehnologije već su uvedene na frekventne zračne luke gdje doprinose operativnoj učinkovitosti i smanjenju kašnjenja. U budućnosti, alternativne metode preuzeti će globalno tržište u procesu odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja zahvaljujući svojoj ekološkoj održivosti i operativnim prednostima.

5.1. Infracrvena metoda

Infracrveno zračenje zagrijava površine zrakoplova, a provodi se sve dok kontaminanti ne počnu otapati ili isparavati, ovisno o intenzitetu i trajanju primjene infracrvene energije. Nakon provođenja ovog procesa, vlažne površine mogu zahtijevati dodatnu primjenu zagrijane tekućine za zaštitu od zaleđivanja kako bi se spriječilo ponovno zaleđivanje, primjerice, ako je vanjska temperatura 0°C ili ispod 0°C. Nakon primjene infracrvene metode, zrakoplov mora biti pregledan od strane stručnog osoblja, a letачka posada mora dobiti potvrdu da su površine čiste od zaleđenih kontaminanta prije polijetanja [11].

Iako infracrveno zračenje kao metoda odleđivanja zrakoplova ima niz prednosti kao što su brzina, točnost i manja štetnost na okoliš, nedostatak je da se provodi u infracrvenim hangarima specijaliziranim za ovaj postupak, a to iziskuje veliku površinu i povećane troškove za izgradnju pa je samim time dostupan samo većim zračnim lukama, a jedan od takvih hangara, prikazan na slici 19, nalazi se u zračnoj luci Newark Liberty *International Airport* u New Yorku, Sjedinjene Američke države.



Slika 19. Infracrveni hangar u zračnoj luci Newark, New York, Sjedinjene Američke Države
Izvor: [21]

Također, inovativno rješenje u procesu odleđivanja i zaštite od zaleđivanja je mobilni infracrveni sustav, poznat kao ICE CAT sustav, koji je razvila tvrtka Infra-Red Technologies Inc. kao alternativu glikolnim sustavima zbog nižih troškova i manjeg utjecaja na okoliš. ICE CAT koristi katalitičke infracrvene grijače pogonjene propanom, bez plamena, što smanjuje rizik od ekološkog zagađenja [23].

Infracrveni panel, koji se može postaviti na različite visine iznad krila, montiran je na kamionski kran s hidrauličkim cilindrima (slika 20) za lako podešavanje položaja nad krilima zrakoplova, a opremljen je i sigurnosnim mehanizmima poput senzora tlaka za sprječavanje curenja goriva i automatskog isključivanja u slučaju kvara, no istraživanja pod različitim uvjetima zaleđivanja pokazala su da je vrijeme za potpuno odleđivanje u slučaju mokrog snijega ili potpuno zaleđenog krila zrakoplova predugo za praktičnu operativnu primjenu, ali definitivno postoji potencijal za uklanjanje laganih naslaga inja u kraćem vremenu.



Slika 20. Mobilni infracrveni sustav - ICE CAT
Izvor: [23]

Ovaj sustav je održiva alternativa u uvjetima gdje nema aktivnih padalina, a i važno je istaknuti prednosti kao što je prilagodljivost različitim lokacijama s mogućnošću prilagodne visine panela, te smanjenje troškova i rizika za okoliš, a daljnje razvijanje će zasigurno smanjiti vrijeme odleđivanja i učiniti ovaj sustav više konkurentnim i iskoristivim. Korištenje ICE CAT sustava za odleđivanje / zaštitu od zaleđivanja zrakoplova prikazano je na slici 21 [23].



Slika 21. Infracrveni panel postavljen iznad krila
Izvor: [23]

Također, jedna od inovacija u korištenju infracrvenog zračenja je laser koji razvija tvrtka Sun Lase Inc. za brzo i učinkovito odleđivanje zrakoplova. Ovaj sustav koristi visokoenergetski infracrveni laser koji generira zrake pomoću ugljičnog dioksida i usmjerava prema površini zrakoplova uz pomoć računala i kontroliranih ogledala. Računalo upravlja poravnanjem lasera i simultano prati temperaturu površine zrakoplova, a pokriva površinu od otprilike 1 kvadratnog metra. Radi sigurnosti, laser je kombiniran s crvenom svjetlošću kako bi operateri mogli pratiti njegovu poziciju. Sustav se može montirati na kamion ili teleskopske stubove i osmišljen je za rad od strane jedne osobe čime se znatno smanjuju troškovi provođenja procesa [24].

5.2. Primjena robota u svrhu odleđivanja zrakoplova

Norveška kompanija MSG Aviation, koja je specijalizirana za odleđivanje zrakoplova, posljednjih nekoliko godina surađuje sa zračnom lukom Avinor Oslo u Norveškoj na projektu izgradnje robota prilagođenog zračnom prometu i toku prometa, posebno tijekom vršnih sati kada je potrebno odlediti velik broj zrakoplova [25].



Slika 22. Prikaz robota za provođenje procesa odleđivanja i zaštite od zaleđivanja
Izvor: [25]

Predloženi robot primijenit će vlastiti softver umjetne inteligencije MSG Aviationa te će biti sposoban uklanjati snijeg i led sa zrakoplova (slika 22) s jednim i dvostrukim prolazom, čistiti trup i motore (slika 23), kao i provoditi tehničke inspekcije kako s velikih komercijalnih zrakoplova, tako i s manjih privatnih, kao i vojnih zrakoplova. Nova tehnologija bit će korisna za zrakoplovne tvrtke u smislu poboljšanja njihove učinkovitosti, točnosti polijetanja te smanjenja troškova i emisije ugljika. Kompanija je u pregovorima s avioprijevoznicima Wideroe i Norwegian te s pružateljem zemaljskih usluga Menzies u vezi s korištenjem predloženog robota za odleđivanje, pranje i inspekciju zrakoplova ali se svakako planiraju proširiti globalno u budućnosti.

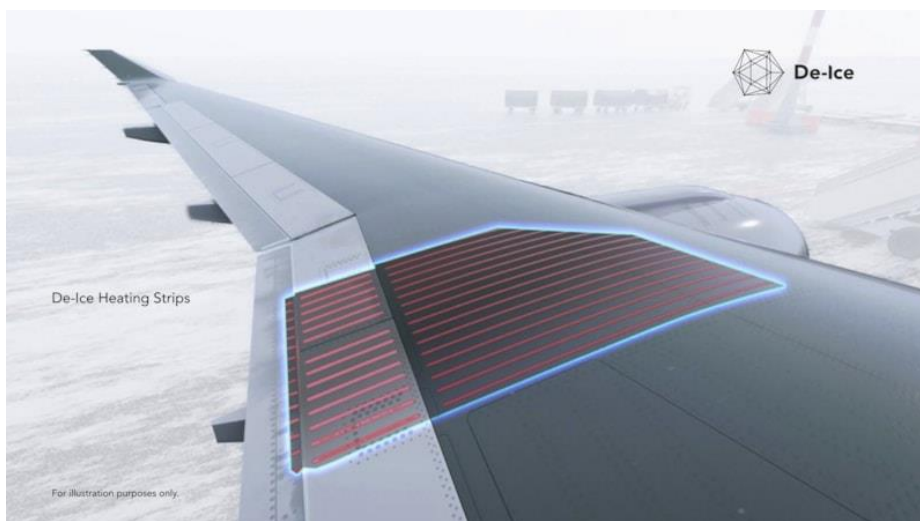


Slika 23. Robot spreman za pranje, održavanje i provođenje tehničkih inspekcija
Izvor: [26]

5.3. Elektromagnetska tehnologija

Tvrtka De-Ice sa sjedištem u Bostonu u suradnji s Air Canadom koristi svoju elektromagnetsku tehnologiju za održivo odleđivanje zrakoplova na zrakoplovu serije Airbus A320. Tehnologija De-Ice osmišljena je s ciljem smanjivanja kašnjenja pri polijetanju i ugljičnog otiska povezanog s kemijskim odleđivanjem a koristi visokofrekventnu električnu struju za odleđivanje zrakoplova, bez upotrebe tekućina za odleđivanje na bazi kemikalija.

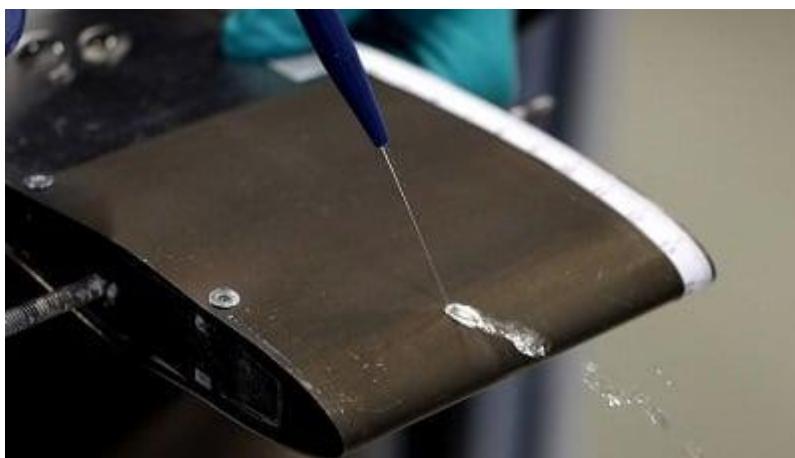
Sastoji se od traka nalik vrpci koje se pričvršćuju na vanjsku stranu zrakoplova (slika 24). Pilot aktivira tehnologiju, a sustav De-Ice generira visokofrekventnu struju koja uzrokuje pomicanje elektrona na površini zrakoplova i stvara toplinu. Taj proces topi snijeg i led tijekom ukrcavanja, čime zrakoplov ostaje bez leda i spreman je za polijetanje odmah nakon napuštanja parkirne pozicije. De-Ice je također razvio niz drugih inovacija u području energetske elektronike i distribucije kako bi omogućio rad ove nove tehnologije. Korištenje ove tehnologije ne samo da smanjuje gorivo nego osigurava velike uštede goriva, a samim time i smanjene troškove [27].



Slika 24. De-Ice trake
Izvor: [27]

5.4. Lasersko odleđivanje

U Njemačkoj 2020.godine, Airbus i Tehničko sveučilište u Dresdenu razvijali su lasersku tehnologiju odleđivanja koja koristi direktno lasersko interferentno strukturiranje (eng. direct laser interference patterning – DLIP) za izradu mikrostrukture na površinama krila. Ove 3D strukture smanjuju nakupljanje leda koristeći ultrakratke laserske pulseve za stvaranje površina s fragmentiranim strukturama koje smanjuju prianjanje leda. Testovi u zračnom tunelu (slika 25) pokazali su da led na tretiranoj površini otpada bez dodatnog zagrijavanja, dok se pri zagrijavanju led uklanja puno brže nego na netretiranoj površini. Testiranja u stvarnim uvjetima leta provodili su se na zrakoplovu A350, čije su površine tretirane DLIP tehnologijom [28].



Slika 25. Aeroprofil s vodo odbojnom strukturiranom površinom
Izvor: [28]

5.5. Hibridni sustav odleđivanja

Istraživači iz Kanade razvili su pametan hibridni sustav odleđivanja koji automatski otkriva i otapa led na zrakoplovu, bez potrebe za ljudskom intervencijom, kombiniranjem pasivne i aktivne metode.

Aktivno odleđivanje koristi vanjsku energiju za uklanjanje leda, obično toplinskim, kemijskim ili mehaničkim metodama, dok pasivno odleđivanje smanjuje brzinu nakupljanja leda, odnosno smanjuje čvrstoću prianjanja između leda i površine ili oboje. Senzor ispod premaza na zrakoplovu djeluje kao detektor leda i pokreće ugrađene grijače kako bi automatski otopili led i tako poboljšali energetska učinkovitost [29]. Primjer ovakvog hibridnog sustava prikazan je na slici 26, gdje kombinacija mikrovalnih senzora i grijača omogućuje automatsku detekciju leda i njegovo uklanjanje [30].



Slika 26. Hibridni sustav na zrakoplovu koji koristi kombinaciju grijača i mikrovalnih senzora integriranih ispod zaštitnih slojeva
Izvor: [30]

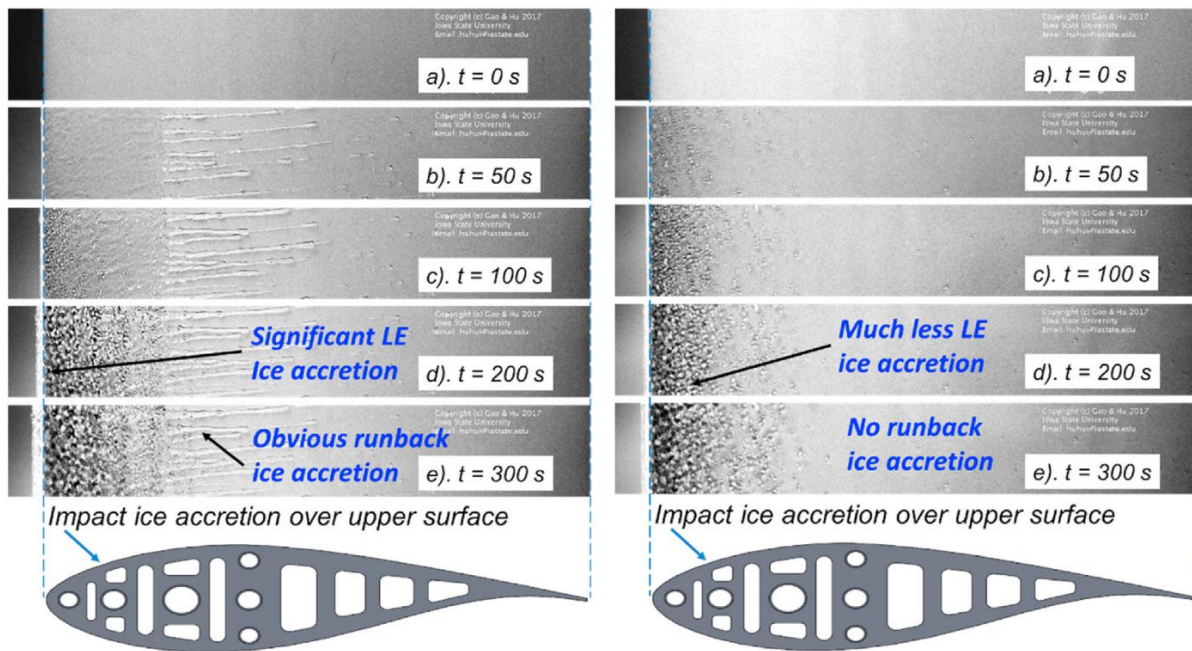
5.6. Hidrofobne površine i premazi

Hidrofobne površine i premazi primjenjuju se u zrakoplovstvu za smanjenje akumulacije leda na aerodinamičkim površinama poput krila. Superhidrofobne površine, koje sadrže mikro ili nano-strukture, značajno smanjuju površinsku energiju, što sprječava prianjanje kapljica vode, a zrak zarobljen između hladne površine i kapljica djeluje kao izolator, usporavajući stvaranje leda. Učinak hidrofobnosti može se smanjiti pod visokim vlagama i temperaturama blizu točke smrzavanja, a mikro-strukture često trpe oštećenja tijekom uklanjanja leda.

Alternativne tehnologije poput SLIPS (eng. *Slippery Liquid-Infused Porous Surface*) površina, koje koriste ulja ili slične tekućine unutar mikro-strukturiranih

materijala, omogućuju veću mehaničku otpornost i sprečavaju habanje, ali te se površine mogu s vremenom iscrpiti, što smanjuje hidrofobni učinak. Dodatna rješenja uključuju ledofobne premaze s niskom adhezijom leda, koji omogućuju pasivno uklanjanje leda [8].

U svrhu ispitivanja učinkovitosti SLIPS premaza u suzbijanju akumulacije leda, provedeno je testiranje na modelu lopatice vjetroturbine. Testiranje je provedeno pod uvjetima temperature zraka od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i brzine zraka od 40 m/s , čime su simulirani uvjeti stvaranja prozirnog leda. SLIPS premaz pokazao je prednost u smanjenju nakupljanja leda, posebice u zoni direktnog udara kapljica vode na prednjem rubu profila. Kao što prikazuju rezultati na slici 27, primjena SLIPS premaza omogućila je brže otjecanje vode i smanjenu akumulaciju leda, čime se smanjuje potreba za dodatnim metodama uklanjanja leda. Kako bi se potpuno eliminirala pojava zaleđivanja u zonama slabijeg utjecaja aerodinamičkih slika i osigurala veća energetska učinkovitost, SLIPS površine zahtijevaju integraciju s minimalnim zagrijavanjem prednjeg ruba profila [31].



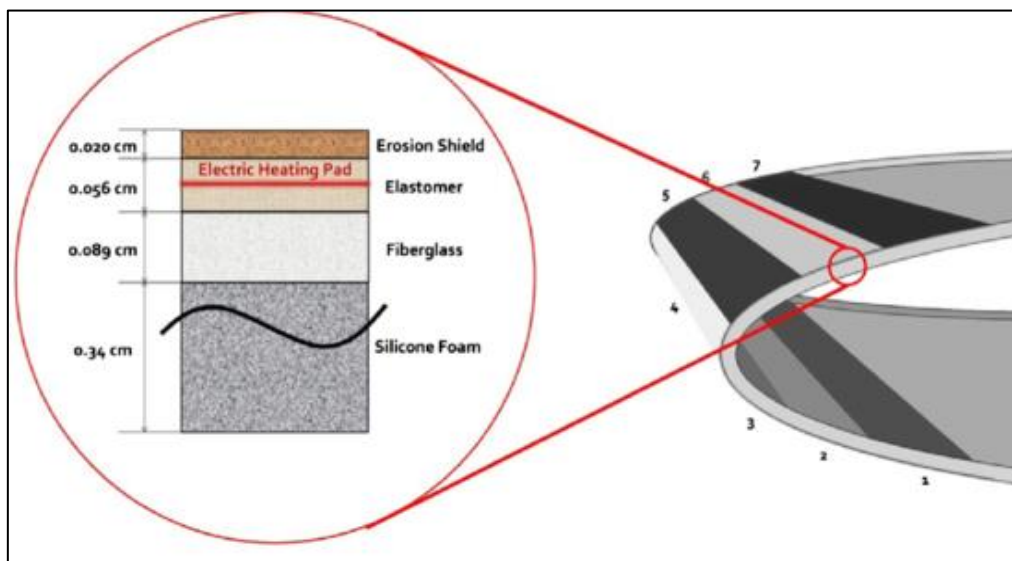
Slika 27. Dinamički proces nakupljanja leda na površini modela lopatice vjetroturbine prije i nakon nanošenja SLIPS premaza
Izvor: [31]

5.7. Kompozitni materijali s ugrađenim grijanim slojevima

Nova metoda integrirane funkcije protiv zaleđivanja u zrakoplovstvu koristi kompozitne materijale s ugrađenim grijanim slojevima, pružajući značajna poboljšanja u energetske učinkovitosti i aerodinamičkim performansama zrakoplova. Ovaj pristup omogućuje da se grijani elementi, poput tankih filmova visoke vodljivosti, ugrađuju izravno u kompozitne slojeve krila i repa, čime se osigurava ravnomjerno grijanje svih kritičnih dijelova, a time se uklanjaju potrebe za vanjskim grijanim komponentama koje bi mogle ometati aerodinamički profil zrakoplova [32].

Struktura se sastoji od više slojeva s različitim funkcijama: silikonska pjena pruža izolaciju i smanjuje prijenos topline, stakloplastika doprinosi mehaničkoj čvrstoći, dok elastomer i zaštitni sloj protiv erozije štite sustav od oštećenja uzrokovanih vanjskim uvjetima. Integrirani grijači slojevi omogućuju ravnomjerno grijanje kritičnih površina, smanjujući nakupljanje leda i održavajući aerodinamičku učinkovitost.

Slika 28 prikazuje primjer ove slojevite strukture, gdje svaki sloj ima specifičnu ulogu u osiguravanju dugotrajnosti i učinkovitosti sustava protiv zaleđivanja. Ovaj napredni sustav pomaže smanjiti potrošnju goriva, povećati sigurnost leta i smanjiti ekološki otisak zrakoplovstva [33].



Slika 28. Elektro-termalni sustav zaštite od zaleđivanja
Izvor: [33]

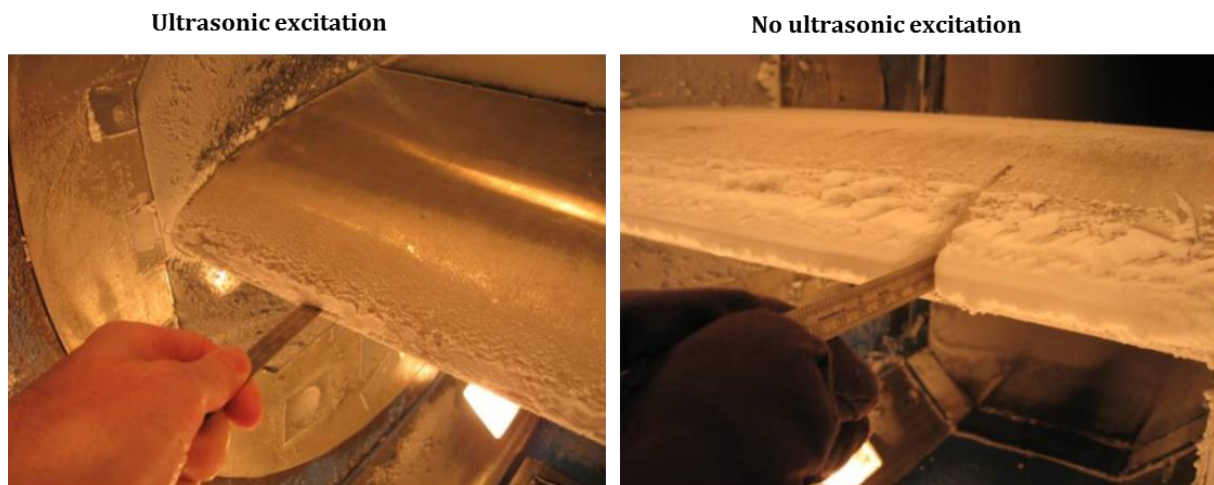
5.8. Ultrazvučna tehnologija

Ultrazvučna tehnologija za detekciju i uklanjanje leda predstavlja inovativan pristup u industriji zrakoplovstva, osobito u kontekstu ranog prepoznavanja formiranja leda na kritičnim površinama zrakoplova. Ova metoda koristi visokofrekventne ultrazvučne valove, poput S1 modusa, za otkrivanje tankih slojeva leda u ranoj fazi, što omogućuje pravovremenu reakciju kako bi se smanjio rizik od ozbiljnijih posljedica tijekom leta.

Prema najnovijim istraživanjima, detekcija se postiže praćenjem promjena u brzini grupe valova koja se smanjuje s povećanjem debljine leda. Eksperimenti provedeni na obloženim i neobloženim uzorcima pokazali su da premazi s hidrofobnim svojstvima mogu usporiti prijanjanje i akumulaciju leda, čineći ultrazvučne valove izuzetno korisnim za procjenu učinkovitosti premaza u smanjenju rizika od zaleđivanja [34].

Ova tehnologija, razvijena i testirana u suradnji s tvrtkom Guidedwave, koristi piezoelektrične aktuatora za prijenos vibracija kroz strukture zrakoplova, čime se fizički odvajaju naslage leda i tako osiguravaju nisku potrošnju energije. Kako ultrazvučno odleđivanje nije toplinsko, sigurno je za kompozitne materijale koji su osjetljivi na visoke temperature. Ultrazvučni valovi omogućuju pokrivanje većih površina, osiguravajući bolju zaštitu i smanjenje utjecaja na aerodinamiku zrakoplova [35] [36].

Iako je ova tehnologija još u fazi istraživanja, rezultati dosadašnjih testiranja u zračnim tunelima pokazuju odlične rezultate (slika 29), a ovaj pristup može biti dobar kompromis između težine sistema i potrošnje energije, iako su potrebni daljnji koraci kako bi se povećala njegova izdržljivost i učinkovitost u stvarnim uvjetima leta [35].



Slika 29. Rezultati provođenja testiranja ultrazvučne tehnologije u zračnim tunelima
Izvor: [35]

6. ZAKLJUČAK

Odleđivanje i zaštita zrakoplova od zaleđivanja ključni su postupci u zrakoplovnoj industriji, gdje sigurnost letenja ovisi o pravovremenom uklanjanju leda i sprječavanju njegovog ponovnog formiranja. U radu je prikazana sveobuhvatna analiza tehničko-tehnoloških karakteristika sustava za odleđivanje, uključujući razne tekućine na bazi glikola, metode primjene, te inovativne tehnologije poput infracrvenog zračenja. Standardne metode koriste kemijske otopine koje učinkovito uklanjaju zaleđene slojeve, ali su ekološki manje prihvatljive zbog prisutnosti glikola u otpadnim vodama koje mogu završiti u okolišu. Kroz istraživanja i napredak tehnologije, sve se više pozornosti pridaje razvoju održivih rješenja koja smanjuju štetan utjecaj na okoliš.

Tehnologije bez glikola, poput površinskih premaza i infracrvenih sustava, pokazale su se kao potencijalno učinkovite alternative s ekološkim prednostima. Njihova implementacija donosi mogućnosti smanjenja troškova, vremena izvršenja procesa odleđivanja i zaštite od zaleđivanja i kemijskog opterećenja. Istraživanja i razvoj novih metoda nastavit će se u smjeru poboljšanja učinkovitosti ovih alternativa, a moguća rješenja obuhvaćaju i optimizaciju postojećih sustava za upravljanje otpadnim vodama kroz reciklažu i ponovnu upotrebu tekućina.

Održavanje visokih sigurnosnih standarda u različitim klimatskim uvjetima zahtijeva kontinuirano prilagođavanje tehnologija i postupaka, pri čemu međunarodne smjernice i propisi igraju važnu ulogu u postizanju ujednačenosti i pouzdanosti ovih operacija. Ovaj rad pridonosi boljem razumijevanju specifičnih izazova vezanih uz zaleđivanje zrakoplova, te daje uvid u mogućnosti poboljšanja postojećih sustava kroz inovacije i prilagodbu industrijskim standardima. U budućnosti, odleđivanja zrakoplova vjerojatno će sve više uključivati održive tehnologije koje uravnotežuju sigurnosne zahtjeve i ekološku odgovornost.

LITERATURA

- [1] Hrvatska kontrola zračne plovidbe. *Najznačajnije meteorološke pojave opasne za zrakoplovstvo*. Preuzeto sa: [Najznačajnije meteorološke pojave opasne za zrakoplovstvo - Crocontrol](#) [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [2] Bračić M. *Tehnologija prihvata i otpreme zrakoplova*, radni materijal. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu; 2021
- [3] Steiner S., Vidović A., Bajor I., Pita O., Štimac I. *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilište u Zagrebu; 2008
- [4] International Civil Aviation Organization. *Doc 9640, Manual of Aircraft Ground De-icing/Anti-icing Operations*. Montreal; Third Edition 2018. Preuzeto sa: <https://store.icao.int/en/manual-of-aircraft-ground-de-icing-anti-icing-operations-doc-9640> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [5] Tomas D., Čarić G. *Odleđivanje i zaštita od zaleđivanja na MZLZ*. Zagreb; 2023
- [6] Airbus Industrie. *Getting to grips with cold weather operations*. Blagnac; 2000
- [7] The Airline Pilots. *B777 cold weather operations*. Preuzeto sa: [Airline Pilots Forum an Resource](#) [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [8] Kovačić M. *Tehnološke zabilješke*. Zagreb; 2019 Preuzeto sa: <https://hrcak.srce.hr/218558> [Pristupljeno: rujan 2024.]
- [9] Medium. *The crash of American Eagle flight 4184 and the ATR icing story*. Preuzeto sa: <https://admiralcloudberg.medium.com/into-the-valley-of-death-the-crash-of-american-eagle-flight-4184-and-the-atr-icing-story-29e64faee67c> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [10] Štimac I. *Procedure prihvata i otpreme zrakoplova u zimskim uvjetima*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu; 2023
- [11] Air France, KLM. *De-icing/Anti-icing Manual Winter 2023-2024*.
- [12] Aviation Pros. *Deicing / Anti-icing Equipment & Services*. Preuzeto sa: <https://www.aviationpros.com/gse/deicing-anti-icing-equipment-services/product/10027574/kilfrost-limited-dfsustain> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [13] Večernji list. *Pogledajte kako se avioni štite od zaleđivanja*. Preuzeto sa: <https://www.vecernji.hr/vijesti/avion-prskanje-led-zamrzavanje-zastita-1226790?page=1> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [14] SAE International. *Aircraft Ground Deicing/Anti-Icing Training and Qualification Program*. Aerospace Standard AS6286, Rev. D, 2024

- [15] Federal Aviation Administration. *Holdover time guidelines Winter 2024-2025*
- [16] CCAA. Preuzeto sa: <https://www.ccaa.hr/> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [17] SAE International. *Aircraft Ground Deicing/Anti-Icing Quality Management*. Aerospace Standard AS6332, Rev. A, 2021
- [18] Simple flying. *How Aircraft Ground De-Icing And Anti-Icing Works*. Preuzeto sa: <https://simpleflying.com/how-de-icing-and-anti-icing-works/> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [19] One Air. *Aircraft de-icing*. Preuzeto sa: <https://www.grupooneair.com/aircraft-de-icing/> [Pristupljeno: 10. listopada 2024.]
- [20] NASA. *De-icing Operations*. Preuzeto sa: https://aircrafticing.grc.nasa.gov/2_4_3_1.html [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [21] SKYbrary. *Aircraft ice protection systems*. Preuzeto sa: <https://skybrary.aero/articles/aircraft-ice-protection-systems> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [22] DHL Air (Austria) GmbH. *De-/Anti-Icing Procedures Manual*, Ed 01 Rev 05. Vienna: 2024
- [23] Civil Aviation Transport Canada. *Deicing with a Mobile Infrared System*. Montreal; 1998. Preuzeto sa: https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/tc/T52-4-162-1998-eng.pdf [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [24] Environmental Protection Agency. *Airport Deicing Operations*. Washington DC, 2000. Preuzeto sa: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/airport-deicing-pds-2000.pdf> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [25] Aviation Weel Network. *New Robotic System*. Preuzeto sa: New Robotic System Targets Automated Aircraft De-icing, Cleaning | Aviation Week Network [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [26] Airport Industry News. *Deicing Robot at Oslo Airport*. Preuzeto sa: <https://airportindustry-news.com/msg-aviation-to-build-worlds-largest-deicing-robot-at-oslo-airport/> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [27] Global Air. *Electromagnetic technology*. Preuzeto sa: <https://www.globalair.com/articles/boston-company-using-electromagnetic-technology-to-de-ice-aircraft-announces-first-customer?id=6703> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [28] Gobal Spec. *A laser-based ice-repellent technology for aircraft deicing*. Preuzeto sa: <https://insights.globalspec.com/article/13719/a-laser-based-ice-repellent-technology-for-aircraft-deicing> [Pristupljeno: listopad 2024.]

- [29] Aerospace. *Automatic aircraft de-icing system*. Preuzeto sa: <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/technology/automatic-aircraft-de-icing-system-to-save-energy.html> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [30] SAE International. *Planar Microwave Sensor for Localized Ice and Snow Sensing*. Preuzeto sa: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-01-1432/> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [31] Liqun M., Zichen Z., Linyue G., Yang L., Hui H. *An exploratory study on using Slippery-Liquid-Infused-Porous-Surface (SLIPS) for wind turbine icing mitigation*. Preuzeto sa: <https://www.aere.iastate.edu/~huhui/paper/journal/Journal-Papers/2020-Ma-LQ-RE-SLIPS-Erosion.pdf> [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [32] MDPI. *Ultrasonic Deicing*. Preuzeto sa: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6640> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [33] Pourbagian M., Habashi W.G. *Aero-thermal optimization o fin-flight electro-thermal ice protection systems in transient de-icing mode*. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2015: 167-182. Preuzeto sa: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-the-temperature-history-underneath-heater-3_fig4_278050057 [Pristupljeno: studeni 2024.]
- [34] MDPI. *Ultrasonic Guided Waves*. Preuzeto sa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2850> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [35] Guided wave. *Ultrasonic De-icing*. Preuzeto sa: <https://www.gwultrasonics.com/other-technologies/ultrasonic-de-icing/> [Pristupljeno: listopad 2024.]
- [36] Guided wave. *De-icing and ice sensing*. Preuzeto sa: <https://www.gwultrasonics.com/knowledge/icing/> [Pristupljeno: listopad 2024.]

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Sustavi i dijelovi sustava na zrakoplovu osjetljiv na zaleđivanje..... | 2 |
| Slika 2. Prikaz površina i međuprostora na upravljačkim površinama osjetljivim na zaleđivanje ... | 3 |
| Slika 3. Ostaci repa i ostali dijelovi zrakoplova ATR-72 nakon pada..... | 5 |
| Slika 4. Zaleđeni motor zrakoplova | 6 |
| Slika 5. Zaleđivanje propelera zrakoplova..... | 7 |
| Slika 6. Vozilo za provođenja procesa odleđivanja zrakoplova tekućinom tip I..... | 8 |
| Slika 7. Spremnici za čuvanje fluida tip I..... | 9 |
| Slika 8. Sustav za prijenos fluida do površine zrakoplova..... | 9 |
| Slika 9. Mlaznice za prskanje tekućine za odleđivanje / zaštitu od zaleđivanja..... | 10 |
| Slika 10. Boje tekućina za odleđivanje / zaštitu zrakoplova od zaleđivanja | 13 |
| Slika 11. Izdvojena stajanka za odleđivanje zrakoplova | 23 |
| Slika 12. Proces odleđivanja zrakoplova na poziciji opremljenoj avio-mostom | 23 |
| Slika 13. Odleđivanje zrakoplova s dva vozila za primjenu fluida | 27 |
| Slika 14. Dijagram dopuštene primjene fluida za odleđivanje - A318/319..... | 28 |
| Slika 15. Dijagram dopuštene primjene fluida za zaštitu od zaleđivanja | 29 |
| Slika 16. Uklanjanje kontaminanata mehaničkom metodom – upotrebom metle | 30 |
| Slika 17. Pneumatski „de-ice boots“ sustav (crne boje) za uklanjanje leda na krilima | 31 |
| Slika 18. Odleđivanje zrakoplova primjenom vrućeg zraka | 32 |
| Slika 19. Infracrveni hangar u zračnoj luci Newark, New York, Sjedinjene Američke Države | 35 |
| Slika 20. Mobilni infracrveni sustav - ICE CAT | 35 |
| Slika 21. Infracrveni panel postavljen iznad krila..... | 36 |
| Slika 22. Prikaz robota za provođenje procesa odleđivanja i zaštite od zaleđivanja | 37 |
| Slika 23. Robot spreman za pranje, održavanje i provođenje tehničkih inspekcija | 38 |
| Slika 24. De-Ice trake..... | 39 |
| Slika 25. Aeroprofil s vodoodbojnom strukturiranom površinom | 39 |
| Slika 26. Hibridni sustav na zrakoplovu koji koristi kombinaciju grijača i mikrovalnih senzora integriranih ispod zaštitnih slojeva | 40 |
| Slika 27. Dinamički proces nakupljanja leda na površini modela lopatica vjetroturbine prije i nakon nanošenja SLIPS premaza | 41 |
| Slika 28. Elektro-termalni sustav zaštite od zaleđivanja..... | 42 |
| Slika 29. Rezultati provođenja testiranja ultrazvučne tehnologije u zračnim tunelima..... | 43 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Vrijeme zadržavanja tekućine tip I s obzirom na meteorološke uvjete | 17 |
| Tablica 2. Procijenjeno vrijeme trajanja zaštite tekućine tip IV s obzirom na meteorološke uvjete | 17 |
| Tablica 3. Smjernice za primjenu tip II i IV fluida | 18 |

POPIS GRAFIKONA

| | |
|--|----|
| Graf 1. Vrijeme zadržavanja po tipu fluida i temperaturi..... | 16 |
|--|----|

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

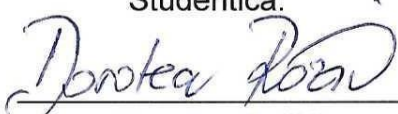
IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je ZAVRŠNI RAD
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega 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 rada pod naslovom „TEHNIČKO TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE SUSTAVA ZA ODLEĐIVANJE I ZAŠTITU ZRAKOPLOVA PROTIV ZALEĐIVANJA“, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 12. studenog 2024.

Studentica:

(Dorotea Rožić)