

Utjecaj kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike

Šerić, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:119:455150>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Josip Šerić

**UTJECAJ KONTAMINACIJE POVRŠINE ZRAKOPLOVA NA
AERODINAMIČKE KARAKTERISTIKE**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2017.

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Teorija leta I**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4152

Pristupnik: **Josip Šerić (0135236747)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: Utjecaj kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike

Opis zadatka:

Objasniti značaj kvalitetnog aerodinamičkog oblikovanja i obrade površine izloženih elemenata konstrukcije aviona. Nabrojiti i objasniti vrste i izvore kontaminacije površine aviona, te uvjete pogodne za pojavu kontaminacije.

Analizirati učinak kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike uslijed promjene oblika, hrapavosti površine, povećane mase, blokiranja pokretnih površina itd. Analizirati degradaciju performansi aviona kao posljedicu kontaminacije površine, u raznim režimima leta.

Opisati i objasniti sustave za detekciju i uklanjanje kontaminacije površine aviona.

Izvesti zaključke.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:



mr. sc. Davor Franjković, v. pred.

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**UTJECAJ KONTAMINACIJE POVRŠINE ZRAKOPLOVA NA
AERODINAMIČKE KARAKTERISTIKE**

**THE INFLUENCE OF AIRCRAFT SURFACE
CONTAMINATION ON AERODYNAMIC
CHARACTERISTICS**

Mentor: mr. Sc. Davor Franjković

Student: Josip Šerić, 0135236747

Zagreb, rujan 2017.

SAŽETAK

Kontaminacija površine zrakoplova ledom jedna je od najopasnijih pojava u zrakoplovstvu zbog svog štetnog utjecaja na sposobnosti provođenja sigurnog leta zrakoplova. U sklopu ovog rada, objašnjeno je nastajanje leda u uvjetima zaleđivanja zajedno sa svim utjecajima različitih tipova i oblika kontaminacije na aerodinamičke karakteristike zrakoplova preko rezultata ispitivanja i simulacija. Svaka promjena aerodinamičkih karakteristika uslijed kontaminacije ima kao posljedicu degradaciju performansi zrakoplova.

KLJUČNE RIJEČI: kontaminacija, led, aerodinamičke karakteristike, degradacija performansi zrakoplova

SUMMARY

Aircraft surface icing contamination is one of the most dangerous occurrences in aviation because of its adverse effects on the ability of the aircraft to conduct safe flight. Within this study, the formation of ice in icing conditions is explained alongside with all the effects of different types and shapes of contamination on the aerodynamic characteristics of aircraft through the results of tests and simulations. Every change of aerodynamic characteristics due to contamination causes a degradation of aircraft performance.

KEY WORDS: contamination, ice, aerodynamic characteristics, aircraft performance degradation

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KONTAMINACIJA POVRŠINE ZRAKOPLOVA	3
2.1. Vrste leda	3
2.1.1. Prozirni led.....	3
2.1.2. Neprozirni led (inje)	3
2.1.3. Mješoviti led	4
2.2. Akumulacija leda na zrakoplovu	4
2.2.1. Akumulacija leda na zrakoplovu u zraku	4
2.2.2. Akumulacija leda na zrakoplovu na tlu.....	6
2.3. Prevencija i uklanjanje kontaminacije zrakoplova.....	7
2.3.1. Fluidi za odleđivanje i protiv zaleđivanja.....	8
2.3.2. Provjere zrakoplova prije otpreme i odgovornosti	9
2.3.3. Stajanke za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja	9
3. UTJECAJ KONTAMINACIJE NA AERODINAMIČKE KARAKTERISTIKE	11
3.1. Simulacije kontaminacija aeroprofila.....	11
3.2. Utjecaji različitih nakupina leda na različitim mjestima aeroprofila na aerodinamičke karakteristike.....	12
3.2.1. Hrapavost leda	14
3.2.2. Rogljasti led.....	18
3.2.3. Nizstrujni led.....	23
3.2.4. Grebenasti led duž raspona uzgonskih površina	28
3.2.5. Analiza i usporedba utjecaja svih tipova kontaminacije ledom.....	35
4. DEGRADACIJA PERFORMANSI ZRAKOPLOVA USLIJED KONTAMINACIJE	37
4.1. Degradacija performansi zrakoplova na polijetanju	37
4.2. Degradacija performansi zrakoplova u penjanju i spuštanju	43
4.3. Degradacija performansi zrakoplova u krstarenju.....	46
4.4. Degradacija performansi zrakoplova na slijetanju.....	46
5. SUSTAV ICEPro.....	49
6. ZAKLJUČAK	51
LITERATURA	52
POPIS SLIKA.....	53
POPIS GRAFIKONA.....	54
POPIS TABLICA.....	56

1. UVOD

Istraživanje zaleđivanja počelo je u 1930-ima, ali je tek nakon Drugog svjetskog rata doživjelo velik razvoj kada su se počeli koristiti zračni tuneli s mogućnosti simulacije uvjeta zaleđivanja. Nedugo nakon su se osmislile i kompjutorske simulacije strujanja zraka preko aeroprofila koje su imale mogućnost virtualnog testiranja aerodinamičkih karakteristika kontaminiranog aeroprofila. 1994. god. se dogodila zrakoplovna nesreća u kojoj je ATR-72, ušavši u jake uvjete zaleđivanja, izgubio kontrolu i srušio se na zemlju. Taj događaj potaknuo je detaljnije istraživanje zaleđivanja i njegovog utjecaja na zrakoplov.

Kontaminacija površine zrakoplova podrazumijeva svaku deformaciju ili promjenu oblika aeroprofila koja narušava strujanje zraka. Postoji više tipova kontaminacije kao led, blato i kukci, ali i oštećenja oplata zrakoplova, dok će se ovaj rad usredotočiti na led kao glavni i najopasniji kontaminant s kojim se može susresti u zrakoplovstvu. Zaleđivanje zrakoplova ima jako štetne i opasne posljedice na let zrakoplova. Potrebno je prepoznati uvjete zaleđivanja i bilo kakav tip zaleđivanja na površini zrakoplova za odvijanje sigurnog leta. Ukoliko se zaleđivanje ne prepozna i ne poduzmu se potrebne mjere odleđivanja ili zaštite od zaleđivanja, može doći do gubitka kontrole nad zrakoplovom. Svrha završnog rada je objasniti akumulaciju različitih tipova leda na zrakoplovu u različitim uvjetima, te prikazati i analizirati rezultate ispitivanja utjecaja kontaminacije površine zrakoplova na njegove aerodinamičke karakteristike zajedno s degradacijom performansi zrakoplova uslijed promjene istih karakteristika. Naslov završnog rada je: Utjecaj kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike, a podijeljen je u 6 cjelina:

1. Uvod
2. Kontaminacija površine zrakoplova
3. Utjecaj kontaminacije na aerodinamičke karakteristike
4. Degradacija performansi zrakoplova uslijed kontaminacije
5. Sustav ICEPro
6. Zaključak

U drugom poglavlju navedene se vrste leda koje se mogu akumulirati na površini zrakoplova i pojašnjen je proces njihovog nastajanja. Objašnjeni su i uvjeti i situacije u kojima nastaju zajedno s načinom prevencije i uklanjanja kontaminacije.

Treće poglavlje je najopširnije poglavlje ovog rada, a objašnjava utjecaj kontaminacije površine zrakoplova ledom na različite aerodinamičke karakteristike aeroprofila odnosno zrakoplova kao što su: koeficijenti uzgona, otpora, tlaka i momenta propinjanja. Objašnjen je i način provođenja ispitivanja utjecaja na različite aeroprofile.

U četvrtom poglavlju su, temeljem spoznaja iz prijašnjeg poglavlja, objašnjena ograničenja i degradacije performansi kontaminiranog zrakoplova u svim režimima i fazama leta.

Peto poglavlje ukratko objašnjava sustav ICEPro za procjenu degradacije performansi zrakoplova uslijed kontaminacije i za obavješćavanje pilota o istim.

2. KONTAMINACIJA POVRŠINE ZRAKOPLOVA

Površina zrakoplova smatra se kontaminiranom u slučaju postajanja bilo kakve vanjske nakupine materijala ili deformacije same oplata zrakoplova koja narušava laminarno strujanje zraka. Najčešći kontaminanti kod zrakoplova su led, snijeg, blato, kukci i pijesak. Nakupljanje blata, kukaca i pijeska na površini zrakoplova se obično događa pri slijetanju i polijetanju i većinom se ne akumuliraju dovoljno da bi imali značajan utjecaj na aerodinamičke karakteristike. S druge strane, led se može u većoj mjeri nagomilati i potpuno poremititi struju zraka preko površina zrakoplova te posljedično spriječiti nesmetano stvaranje uzgona i povećati ukupni otpor.

2.1. Vrste leda

2.1.1. Prozirni led

Prozirni led (eng. Clear ice) se najčešće stvara u ledenoj kiši koja se sastoji od kapljica kiše koje se zamrznu pri kontaktu s hladnom površinom zrakoplova. Te kapljice se zovu pothlađene kapljice (eng. supercooled water droplets). One su nestabilne i imaju temperaturu ispod normalnog ledišta vode ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) iako su u tekućem agregatnom stanju. Čim dotaknu površinu kojoj je temperatura manja od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, kao na primjer krilo, rep ili krakovi elise, prelaze u čvrsto agregatno stanje, odnosno led. Taj proces kristalizacije se odvija postepeno zbog latentne topline koja se oslobađa što kao posljedicu ima kretanje pothlađenih kapljica koje su još u tekućem stanju u smjeru strujanja zraka i na taj način se više površine zrakoplova kontaminira slojem prozirnog leda. Što je sporiji proces kristalizacije, više će površine biti zahvaćeno kontaminantom. [1]

Površina prozirnog leda je glatka, s ulegnućima i kvrgama. Takav tip leda mijenja aerodinamički oblik cijelog aeroprofila. Umanjuje stvaranje uzgona, a drastično povećava otpor i masu zrakoplova. U slučaju otkidanja većeg komada leda usred leta, moguće je ozbiljno oštećenje dijela zrakoplova koji se sudari s njim. Ledene kiše postoje većinom na velikim visinama, ispod nimbostratusa i očituju se u postojanju tuče. [1]

2.1.2. Neprozirni led (inje)

Inje (eng. Rime ice) se stvori kada jako male pothlađene kapljice dođu u doticaj s površinom kojoj je temperatura ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i zalede se. Razlika od razvoja prozirnog leda je u

tome što su kapljice koje tvore neprozirni led iznimno male, pa se odmah zalede pri inicijalnom dodiru, što znači da nema dovoljno kapljica u tekućem stanju da se sjedine s nadolazećim pothlađenim kapljicama i ne formira se homogeni sloj leda, već heterogena mješavina leda i sitnih mjehurića zarobljenog zraka. Rezultat je grub i neproziran sloj leda koji je krt i lomljiv.

Inje se obično nakuplja na napadnim bridovima zrakoplova, iako sporo, remeti strujanje zraka oko površine zrakoplova. Javlja se kod visokih oblaka altostratus ili altocumulus. Kao i prozirni led, smanjuje stvaranje uzgona, a povećava otpor dok ima manji utjecaj na masu jer ima manju gustoću zbog zarobljenog zraka unutar sloja leda. Opseg temperatura pri kojima se inje može formirati je između 0 °C i 40 °C, dok se najčešće javlja između 10 °C i 20 °C. [1]

2.1.3. Mješoviti led

U slučaju pojave kapljica različitih veličina u ledenoj kiši ili oblaku, dolazi do formiranja mješovitog leda (eng. Mixed ice ili Cloudy ice). To je kombinacija prozirnog (velike kapljice) i neprozirnog (male kapljice) i većina zaleđivanja tijekom letenja u uvjetima zaleđivanja bit će ovog tipa, a rijetko čisti prozirni ili čisti neprozirni led. [1]

2.2. Akumulacija leda na zrakoplovu

Površina zrakoplova se može zalediti i tijekom leta i dok je zrakoplov na stajanci, sve dok se nalazi u uvjetima zaleđivanja. Uvjeti zaleđivanja su atmosferski uvjeti u kojima je moguće stvaranje leda odnosno prisutnost vodenih kapljica i temperature niže od 0 °C. Zrakoplovstvo se oslanja na neučestalost pojavljivanja zaleđivanja, ograničeni opseg obuhvaćanja uvjeta zaleđivanja, meteorološke prognoze, izvješća i pravovremeno prepoznavanje uvjeta zaleđivanja i same kontaminacije površine zrakoplova. [1]

2.2.1. Akumulacija leda na zrakoplovu u zraku

Vodene kapljice se u atmosferi mogu naći u oblacima koji nastaju tako da se zrak uzdiže i u isto vrijeme hladi i širi zbog manjeg tlaka zraka na većoj visini. Ukoliko ta zračna masa dođe do svoje točke zasićenja, vodena para unutar zraka će kondenzirati i te novonastale kapljice će formirati oblak. Što je vlažniji zrak koji se uzdiže i što se većim vertikalnom brzinom uzdiže, to će nastali oblaci imati veći maseni udio vode u sebi i veće

kapljice što znači akumuliranje veće količine leda na površini zrakoplova koji prolazi kroz isti oblak. [2]

Različiti tipovi oblaka podrazumijevaju i različite uvjete zaleđivanja odnosno veći ili manji rizik od zaleđivanja. Razine rizika od zaleđivanja površine zrakoplova pri različitim temperaturama i u različitim uvjetima prikazane su na tablici 1.

Tablica 1. Razine rizika od zaleđivanja površine zrakoplova pri različitim temperaturama i u različitim oblacima.

	Cumulus	Stratus	Ledena kiša
Visoki rizik	Od 0 °C do -20 °C	Od 0 °C do -15 °C	0 °C i manje
Umjereni rizik	Od -20 °C do -40 °C	Od -15 °C do -30 °C	
Niski rizik	Manje od -40 °C	Manje od -30 °C	

Izvor: [1]

- **Stratus**

Stratus oblaci, koji se mogu opisati i kao slojeviti oblaci, obično prekrivaju široko područje atmosfere. Uzdizanje mase zraka koja formira ove oblake je sporo i rijetko imaju velik maseni udio vode u sebi. Stvaranje stratusa se povezuje s aktivnim frontama ili s orografskim uzdizanjem vlažne zračne mase s mora. Temperatura vodenih kapljica u stratusima se kreću sve do -15 °C.

Prostor uvjeta zaleđivanja u stratusima se vertikalno ne pruža više od 3000 stopa (915 m), tako da je izlazak iz istog moguć promjenom visine za par tisuća stopa. Ako postoji mogućnost značajnog zaleđivanja, preporuča se letjeti na nižim visinama gdje su temperature veće od 0 °C. [1], [2]

- **Cumulus**

Cumulusi su gomilasti oblaci nastali jakom konvekcijom s velikim masenim udjelom vode. Za razliku od stratusa, više se pružaju vertikalno (par tisuća stopa), dok manje horizontalno. Uglavnom sadrže kapljice vode temperature sve do -20 °C, a ispod te temperature nastaju i kristali leda. Tek nastali cumulusi će imati više kapljica vode nego stariji.

Rizik od zaleđivanja površine zrakoplova je jako velik pri temperaturama između 0 i 20 °C. U ovu grupu oblaka spadaju i „towering cumulus“ i cumulonimbus, što su zapravo razvijeniji i veći cumulusi koji osim zaleđivanja donose i grmljavinska nevremena. Uglavnom sadrže kristale leda koji ne prijanjaju na površinu s kojom dođu u kontakt iako se mogu otopiti na toploj površini i naknadno se opet zalediti. Ovakve oblake treba izbjeći, a u slučaju ulaska u iste, spustiti se na visinu s većom temperaturom. [1], [2]

2.2.2. Akumulacija leda na zrakoplovu na tlu

Postoji mnogo atmosferskih pojava pri kojima je povećana mogućnost stvaranja leda na zrakoplovu koji se nalazi na stajanci. Najčešće su snijeg, mraz, magla, kiša i rosa. Neke od njih ni ne zahtijevaju temperaturu ispod ledišta vode da bi se stvorile. Primjer kontaminiranog zrakoplova na stajanci vidljiv je na slici 1. Bitno je razumjeti da se atmosferski uvjeti konstantno mijenjaju i sukladno promjenama tijekom zrakoplovnih operacija djelovati i spriječiti zaleđivanje zrakoplova. Letačko osoblje i osoblje na stajanci moraju konstantno paziti jer je zaleđivanje i nepotpuno odleđivanje u nekim slučajevima teško za prepoznati. Dodatnom povećanju mogućnosti zaleđivanja površine zrakoplova pridodaje i postojanje vode, snijega ili bljuzge na manevarskim površinama iz razloga što čestice mogu lako dospjeti na površinu zrakoplova pod utjecajem vjetra ili sila pogonske grupe zrakoplova. U slučaju da je oplata zrakoplova topla, postoji opasnost da se ledene padaline otope i oblože veću površinu zrakoplova što još više pogoršava aerodinamičke karakteristike zrakoplova.

Potrebno je spomenuti i efekt „Cold-soak“ koji se pojavljuje kod dugih letova zrakoplova na velikim visinama ili kod tankanja jako hladnog goriva u zrakoplov. Tada je gorivu u krilima toliko niska temperatura da se na stajanci počinje kondenzirati vodena para iz zraka na površini zrakoplova. To je moguće kod temperature okolnog zraka od -2 °C pa sve do +15 °C, sve dok je temperatura površine zrakoplova 0 °C ili manje, a velika vlažnost okolnog zraka. Produkt efekta „Cold-soak“ je prozirni led kojeg je teško uočiti na zrakoplovu. [3]



Slika 1. Potpuna kontaminacija površine zrakoplova ledom

(Izvor: <http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/weather/how-to-get-perfectly-clear-ice-on-your-airplane>)

2.3. Prevencija i uklanjanje kontaminacije zrakoplova

Prije polijetanja zrakoplova, u slučaju da je kontaminiran ledom ili postoji rizik od zaleđivanja, njegova površina mora biti odleđena i obložena fluidom protiv zaleđivanja. Princip rada fluida za odleđivanje i protiv zaleđivanja je da smanje temperaturu ledišta padalina s kojima dolaze u doticaj, te na taj način odgađaju stvaranje leda i sprječavaju njegovu akumulaciju na površini zrakoplova. Postoje i drugi načini prevencije i uklanjanja leda sa zrakoplova, kao što su elektrotermalni, elektromehanički i pneumatski sustavi. Na velikim aerodromima, gdje je to potrebno postoje i stajanke za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja. [3]

Prije svakog polijetanja treba osigurati da je stanje zrakoplova u skladu s „*clean-airplane*“ konceptom koji nalaže da „Niti jedna osoba ne smije poletjeti zrakoplovom kada su mraz, led ili snijeg akumulirani na krila, upravljačke površine, propelere, uvodnike motora ili ostale kritične površine zrakoplova.“¹ Taj koncept podrazumijeva zrakoplov koji je aerodinamički čist, odnosno nije kontaminiran što je bitno jer su performanse poljetanja

¹ Izvor: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2010_q4/2 (pristupljeno 21.7.2017.)

zrakoplova u priručnicima bazirane na čistom aeroprofilu i bez poremećaja strujanja zraka. Te performanse se mogu drastično promijeniti zbog smanjenja uzgona te povećanja otpora i mase koji se pojavljuju kao posljedica kontaminacije površine zrakoplova. [4]

2.3.1. Fluidi za odleđivanje i protiv zaleđivanja

Fluidi za odleđivanje i protiv zaleđivanja se dijele na tipove: I, II, III i IV.

Fluidi prvog tipa imaju malu viskoznost koja se mijenja ovisno o temperaturi. Sastoje se od glikola (etilen glikol, dietilen glikol, propilen glikol ili mješavina navedenih), vode, inhibitora korozije, ovlaživača², tvari protiv pjenjenja i ponekad bojila. Da bi ti fluidi učinkovito odledili zrakoplov, moraju biti zagrijani i obično se razrjeđuju u vodi da bi se postiglo ledište razrjeđenog fluida koji odgovara prikladnim operacijama. [3]

S druge strane, fluidi tipa II, III i IV imaju veću viskoznost koja se mijenja ovisno o sili na fluid, omjeru fluida i vode, te temperaturi fluida. Takvi fluidi imaju bolja svojstva protiv zaleđivanja nego fluidi prvog tipa. Dostupni su u koncentratima ili već razrijeđeni, a sadrže kao i fluidi prvog tipa etilen glikol, dietilen glikol, propilen glikol, dok ostatak smjese čine voda, zgušnjivač, inhibitori korozije, ovlaživači i ponekad bojila. Zbog visoke viskoznosti fluida, kombiniranom s ovlaživačima, premazivanjem površine zrakoplova dobija se gusta i debela prevlaka fluida protiv zaleđivanja. Također se moraju zagrijati da bi se učinkovito koristili u svrhu odleđivanja površine zrakoplova. [3]

Struja zraka preko prevlake fluida tijekom polijetanja uzrokuje smanjenje viskoznosti fluida što kao posljedicu može imati odljepljivanje istog s površine zrakoplova. Padaline postepeno razrjeđuju sve tipove fluida, sve dok se ledište ne podigne dovoljno da se omogući akumulacija leda. Povećanjem viskoznosti fluida moguće je formirati gušću i deblju prevlaku na površini zrakoplova što znači i veći volumen fluida. Veći volumen fluida podrazumjeva da će fluid moći upiti veću količinu padalina prije nego se počne formirati led. Pravilo je da preko prevlake fluida protiv zaleđivanja na površini zrakoplova se nikad ne smije premazivati novu prevlaku prije potpunog uklanjanja prethodne. [3]

² Ovlaživač je tvar koja smanjuje površinsku napetost tekućine tako da bi se ista mogla lakše širiti i obložiti površinu. Izvor: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Wetting_Agents (pristupljeno 21.7.2017.)

2.3.2. Provjere zrakoplova prije otpreme i odgovornosti

U svim slučajevima zapovjednik zrakoplova ima odgovornost osigurati da je zrakoplov u skladu s konceptom „*clean aircraft*“. Prije otpreme zrakoplova, potrebno je napraviti provjere zrakoplova koje se mogu podijeliti u 3 dijela: [3]

- Provjera zrakoplova prije nanošenja fluida za odleđivanje i protiv zaleđivanja
- Provjera zrakoplova nakon nanošenja fluida za odleđivanje i protiv zaleđivanja
- Posebne provjere

Prva provjera podrazumjeva pretpoletni pregled koji odrađuje posada zrakoplova ili posada na tlu. Pregledava se cijeli trup, upravljačke površine i stajni trap u skladu s planom operatora. Ukoliko se pronađe kontaminacija, mora se provesti odleđivanje na zrakoplovu. Provjeru nakon nanošenja fluida za odleđivanje i protiv zaleđivanja provodi ovlaštena i obučena osoba u skladu s planom i odobrenim procedurama operatora. Provodi se i provjera netom prije polijetanja zrakoplova koja je odgovornost zapovjednika zrakoplova, a služi da bi se zadnji put prije polijetanja potvrdilo da ne postoji kontaminacija na kritičnim površinama zrakoplova. Ta provjera se radi što bliže vremenu polijetanja tako da se iz zrakoplova vizualno pregledaju krila i ostale površine kritične važnosti. Posebne provjere su one kojima se utvrđuje tip zaleđivanja zrakoplova. [3]

Osoba koja otprema zrakoplov je odgovorna za potvrdu učinkovitog odleđivanja i zaštićenja zrakoplova od zaleđivanja. Zapovjednik zrakoplova tada ima izbor prihvatiti odrađeni tretman ili vratiti zrakoplov na ponovno odleđivanje ili zaštitu pošto on ima krajnju odgovornost. Prijenos odgovornosti se događa u trenutku kada se zrakoplov počne kretati vlastitom snagom. Osoblje na tlu odlučuje je li potrebno odleđivati zrakoplov na osnovi vlastite procjene te je odgovorno za točno i cjelovito odleđivanje zrakoplova. Odluka je još uvijek u pilotovim rukama zbog čega je neprekidna radiokomunikacija između posade zrakoplova i osoblja na tlu od velike važnosti. [1]

2.3.3. Stajanke za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja

Na aerodromima na kojima se očekuju uvjeti zaleđivanja i pojava leda ili snijega su izgrađene posebne stajanke za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja. To podrazumijeva i aerodrome koje koriste zrakoplovi koji su pod utjecajem efekta „*cold soak*“, bez obzira što na samom aerodromu nisu često prisutni uvjeti zaleđivanja. Stajanke su

dizajnirane uzimajući u obzir metode i procedure koje se koriste, zrakoplove koji će se odleđivati i štititi od zaleđivanja, tipu padalina i zaleđivanja na tom aerodromu te na način da je što manji vremenski period između odleđivanja i poljetanja zrakoplova. Način nanošenja presvlake fluida za zaštitu od zaleđivanja na površinu zrakoplova vidljiv je na slici 2. [3]



Slika 2. Nanošenje presvlake fluida za zaštitu od zaleđivanja na površinu zrakoplova

Izvor: <http://www.globalspec.com/learnmore/specializedindustrialproducts/transportationproducts/deicingantiicingequipment> (pristupljeno 21.7.2017.)

3. UTJECAJ KONTAMINACIJE NA AERODINAMIČKE KARAKTERISTIKE

Iako se led može formirati na svim površinama zrakoplova, najveći utjecaj na aerodinamiku zrakoplova ima kontaminacija krila zrakoplova, a ukupne promjene aerodinamičkih sila promatrat će se na aeroprofilu. Neki aeroprofili su manje osjetljivi na poremećaje strujanja zraka oko krila uslijed kontaminacije od drugih, učinkovitijih aeroprofila. Kontaminacija površine zrakoplova ima kao posljedicu široki raspon utjecaja na aerodinamičke karakteristike zrakoplova. Neki od tih utjecaja su relativno neprimjetni i zanemarivi obzirom na upravljanje samog zrakoplova i sigurnost leta, dok ostali mogu drastično ugroziti sigurno provođenje leta prevlačenjem cijelog ili dijelova aeroprofila. [1]

Postoji beskonačno mnogo varijanti oblika, debljine i teksture leda koji se može akumulirati na različitim mjestima na aeroprofilu. Svaki oblik kontaminacije zapravo tvori novi aeroprofil s jedinstvenim koeficijentom uzgona i otpora, kritičnim napadnim kutom, momentom propinjanja i položajem centra potiska i aerodinamičkog centra koji se razlikuje od čistog aeroprofila. Često se utjecaj zaleđivanja određuje prema debljini sloja leda na površini što je razumljivo u nekim slučajevima. Na primjer, ako usporedimo aeroprofile kontaminirane slojevima leda sličnog oblika različitih debljina, onaj sloj s većom debljinom više će degradirati aerodinamičke sposobnosti zrakoplova. S druge strane ako usporedimo aeroprofil s nakupinom leda blizu prednjeg brida i drugi sa slojem bliže zadnjem bridu, ali s 5 puta manjom debljinom, sloj na drugom aeroprofilu bit će štetniji. [1]

3.1. Simulacije kontaminacija aeroprofila

Zbog beskonačno mnogo oblika i veličina u kojima se led može nakupiti na površini zrakoplova u stvarnim operacijama, jako je teško učinkovito simulirati sve procese formiranja leda i fizičkih karakteristika tih nakupina za svaku površinu zrakoplova, u svim meteorološkim uvjetima. Nekada se i obavljaju testovi i istraživanja u stvarnim uvjetima, ali obično u svrhu isprobavanja ispravnog rada sustava za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja. Takva vrsta testiranja nije praktična za ovako velik broj oblika i veličina zaleđivanja i utjecaja na aerodinamiku zrakoplova koji se moraju ispitati. Takav pristup je neekonomičan i jako ograničen nepredvidivošću atmosferskih uvjeta. [5]

Stoga, da bi se realistično, ali i praktično, ispitali utjecaji kontaminacije površine zrakoplova koriste se analitičke i empirijske simulacije i ispitivanja u zračnim tunelima s

umjetno stvorenim uvjetima zaleđivanja na modelima različitih površina zrakoplova. Takva ispitivanja su nekada neprecizna i uglavnom dugotrajna pa se iz njih razvila računalna dinamika fluida (eng. *computational fluid dynamics*, CFD). To je napredna kompjutorska simulacija koja samostalno proračunava parametre strujanja zraka oko kontaminiranog aeroprofila i omogućava brzo i precizno izračunavanje. Njen cilj je da precizno prikaže proces nakupljanja leda u ovisnosti o vremenu kada zrakoplov leti kroz oblak u kojem postoje pothlađene kapljice ili ledena kiša. [5]

Da bi takva virtualna simulacija bila vjerodostojna postoje tri temeljna uvjeta koja se mora uzeti u obzir da bi se provela realistična simulacija stvarnih uvjeta: [6]

- aerodinamička struja zraka oko aeroprofila i različitih formacija leda na aeroprofilu
- putanje vodenih kapljica i njihovi sudari s drugim tijelima
- termodinamika zaleđivanja i nakupljanja leda na aeroprofilu

Bitno je još spomenuti i hrapavost sloja leda kao bitan parametar koji utječe na granični sloj oko aeroprofila. Što je sloj hrapaviji to će se, između ostalog, ranije laminarni granični sloj pretvoriti u turbulentni koji donosi veliko povećanje štetne sile otpora tlaka zbog čega je bitno da se realno simulira. [6]

Potrebno je razumjeti da iako vjerodostojne, sve simulacije u najboljem slučaju mogu pružiti samo približne procjene kontaminacija ledom iz razloga što je jednostavno nemoguće prikazati nejednolike i nepravilne uvjete koji se susreću u prirodnoj atmosferi kod stvarnih letova. [5]

3.2. Utjecaji različitih nakupina leda na različitim mjestima aeroprofila na aerodinamičke karakteristike

Štetni aerodinamički učinci uzrokovani kontaminacijom površine zrakoplova ledom koji su od najvećeg značaja za sigurno provođenje letova uključuju: [5]

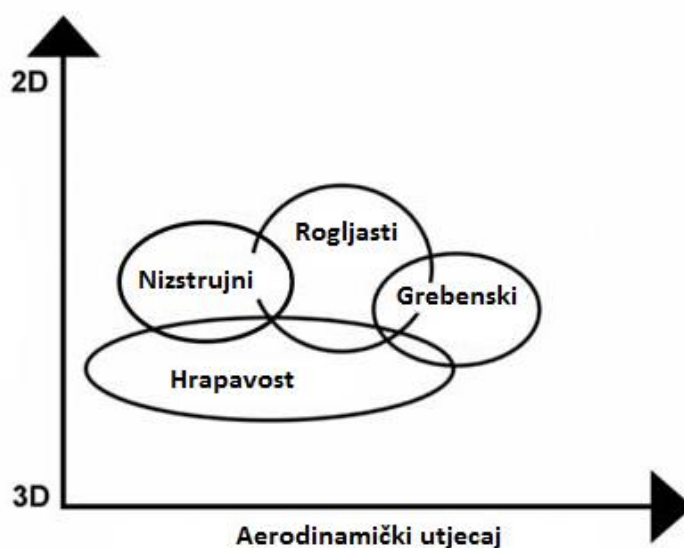
- smanjenje sposobnosti krila i repnih površina da proizvode silu uzgona, te gubitak upravljivosti zbog smanjenja maksimalne sile uzgona odnosno povećanih margina za prevlačenje
- gubitak kontrole i nagle promjene učinkovitosti upravljačkih površina na krilima i repu
- veliki porast otpora zrakoplova

- poremećaji struje zraka prema motorima

Ispitivanje utjecaja kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike bazira se na četiri tipa leda s obzirom na njihov geometrijski oblik: [6]

- hrapavost leda (eng. *ice roughness*)
- rogljasti led (eng. *horn ice*)
- nizstrujni led (eng. *stream-wise ice*)
- grebenasti led duž raspona (eng. *span-wise ridge ice*)

Većina nakupina leda u stvarnosti nisu potpuno jednog tipa ili drugog, već imaju kombinirana svojstva dva ili više tipova. Na slici 3. je vidljiv graf koji prikazuje odnos između utjecaja na aerodinamičke karakteristike zrakoplova (x-os) i geometrijskog oblika nakupine leda (y-os) za sva četiri tipa leda. Što se više povećavaju poremećaji u struji zraka oko kontaminirane površine to se sve više degradiraju aerodinamičke sposobnosti zrakoplova. Hrapavi led se nalazi u donjem lijevom kutu kao oblik trodimenzionalno najizraženiji s niskim i srednjim utjecajem na aerodinamiku. Rogljasti, nizstrujni i grebenasti led su svi većinski dvodimenzionalni. Nizstrujni uzrokuje najmanje poremećaje u struji zraka preko kontaminirane površine dok grebenasti led najviše. Kružnice koje predstavljaju različite tipove leda prelaze jedne preko drugih upravo zbog činjenice što postoje oblici sa svojstvima više geometrijskih tipova leda. [6]

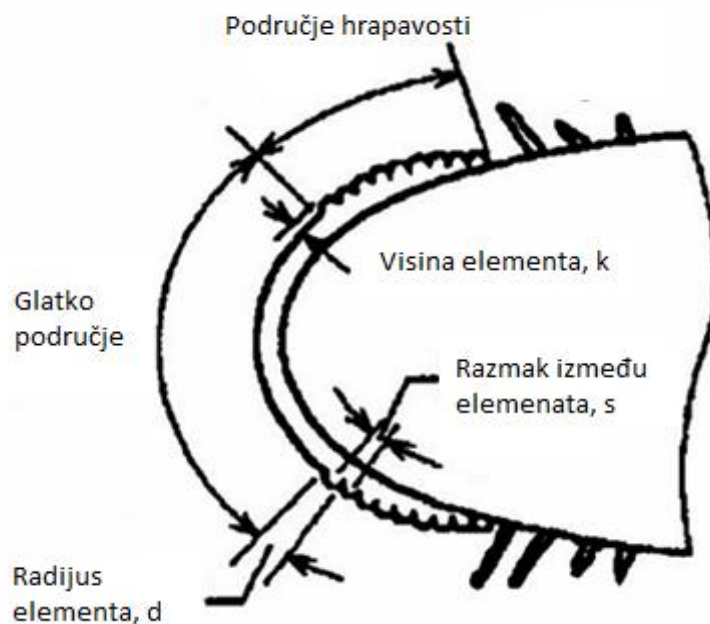


Slika 3. Odnos između geometrijskog oblika četiri tipa leda i utjecaja na aerodinamičke karakteristike aeroprofila [6]

3.2.1. Hrapavost leda

Hrapavost leda se pojavljuje kod faze početnog nakupljanja leda na površini odnosno prije nastajanja ikakvog primjetljivog geometrijskog tipa, kao na primjer rogljasti led. Ostali tipovi su također hrapavi, ali ta početna faza hrapavosti leda značajno mijenja konturu aeroprofila, a posljedično i struju zraka oko aeroprofila. Postoje tri zone hrapavog leda koje nastaju na prednjem bridu u uvjetima pogodnim za nastajanje neprozirnog leda koje se nazivaju glatka, hrapava i perjasta zona, vidljive na slici 4. Element hrapavosti je svaka polukugla nastala na sloju leda, a njihova visina (k), promjer (d) i razmak između središta susjednih elemenata (s) ovise o termodinamici zaleđivanja i akumulacije leda. Hrapavost leda može se pojaviti i kao posljedica rada sustava za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja zrakoplova. Za zrakoplove koji lete pri uobičajenim Reynoldsovim brojevima, visina hrapavosti leda veća je od debljine lokalnog graničnog sloja što utječe na razvoj graničnog sloja i aerodinamičke karakteristike zrakoplova. Za svaku hrapavost leda višu od debljine graničnog sloja, svaki element hrapavosti predstavlja izolirano tijelo odnosno prepreku strujanju zraka.

[6]



Slika 4. Značajke hrapavosti leda [6]

Glavne karakteristike hrapavosti su njena visina, gustoća i mjesto kontaminacije na površini. Aerodinamičke performanse aeroprofila se mijenjaju ovisno o ovim parametrima. Oblik hrapavosti može imati utjecaj na struju zraka iako se smatra manje bitnim od ostale tri karakteristike. Visina hrapavosti (k) je udaljenost između vrha elementa i površine zrakoplova (slika 4.). Gustoća hrapavosti je direktno povezana s razmakom središta susjednih elemenata (s) koji je vidljiv na slici 4. Što je manji razmak s , to je veća gustoća hrapavosti. [6]

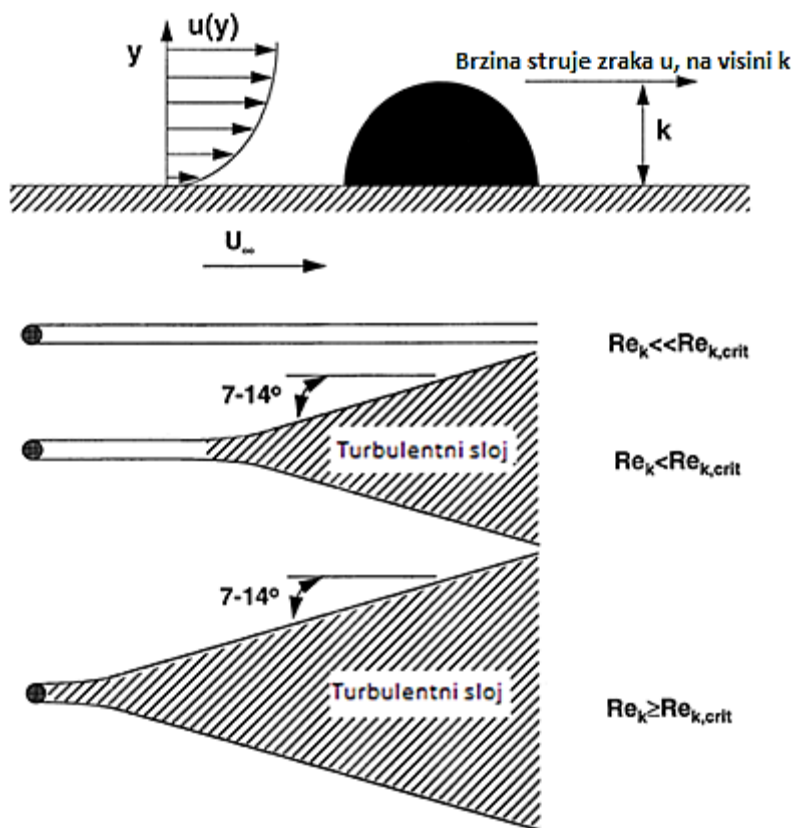
Hrapavost utječe na aerodinamičke karakteristike aeroprofila i krila prvotno tako da povećava otpor trenja aeroprofila i otpor tlaka. Što je veća visina hrapavosti, to će otpor kretanja kroz fluid biti veći. Hrapavost još uzrokuje i uranjenu transformaciju graničnog sloja iz laminarnog u turbulentno i njegovo zadebljanje. [6]

Uslijed konveksnosti aeroprofila, odnosno nakon točke gdje pravac slobodne struje zraka tangira zakrivljenje aeroprofila, dolazi do pozitivnog gradijenta tlaka prema zadnjem bridu koji se smatra nepovoljnim jer potiče separaciju struje zraka od aeroprofila na zadnjem bridu. U području nepovoljnog gradijenta tlaka povećava se debljina graničnog sloja, a kao posljedica nastaje razlika tlakova na uzstrujnom i nizstrujnom dijelu aeroprofila i javljaju se sile otpora tlaka. Dok je god granični sloj spojen s površinom aeroprofila, otpor tlaka je relativno male vrijednosti. S druge strane kad dođe do separacije graničnog sloja otpor tlaka raste, iako uvelike ovisi o obliku aeroprofila i položaju točke odvajanja. [7]

Na slici 5. prikazan je samostalan element hrapavosti u obliku polukugle i njegova uloga u transformaciji graničnog sloja u odnosu na Reynoldsov broj (Re). Iscrtkano područje iza elementa predstavlja turbulentno strujanje. Kada je Re puno manji od kritičnog Reynoldsovog broja (Re_{crit}) uopće se ne pojavljuje turbulentno strujanje. Kako se Re povećava, tako se pojavljuje transformacija u turbulentno strujanje, a mjesto transformacije se sve više približava elementu iako ga nikada ne dostiže. [6]

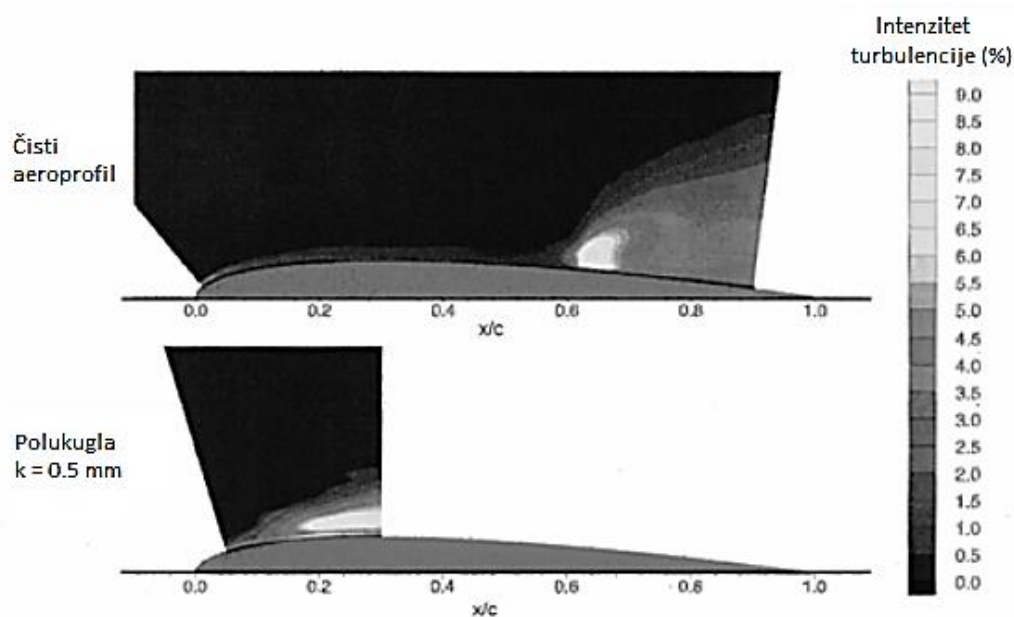
Na slici 6. vidljiva je gornjaka čistog i kontaminiranog aeroprofila s indikacijom intenziteta turbulencije. Kod čistog aeroprofila turbulentno strujanje počinje tek na zadnjoj trećini duljine tetive, dok je kod kontaminiranog aeroprofila (postavljena je jedna polukugla visine 0.5 mm, 11 mm udaljena od prednjeg brida) povećanje intenziteta turbulencije vidljivo već na mjestu gdje struja zraka prelazi preko elementa hrapavosti. Uzimajući u obzir da se led uglavnom nakuplja na površini prve četvrtine tetive aeroprofila, očigledno je da se kod

kontaminiranog aeroprofila ranije, odnosno bliže prednjem bridu, odvaja granični sloj. To podrazumijeva manji maksimalni uzgon, manji kritični napadni kut, veće brzine prevlačenja i veći otpor tlaka. [6]

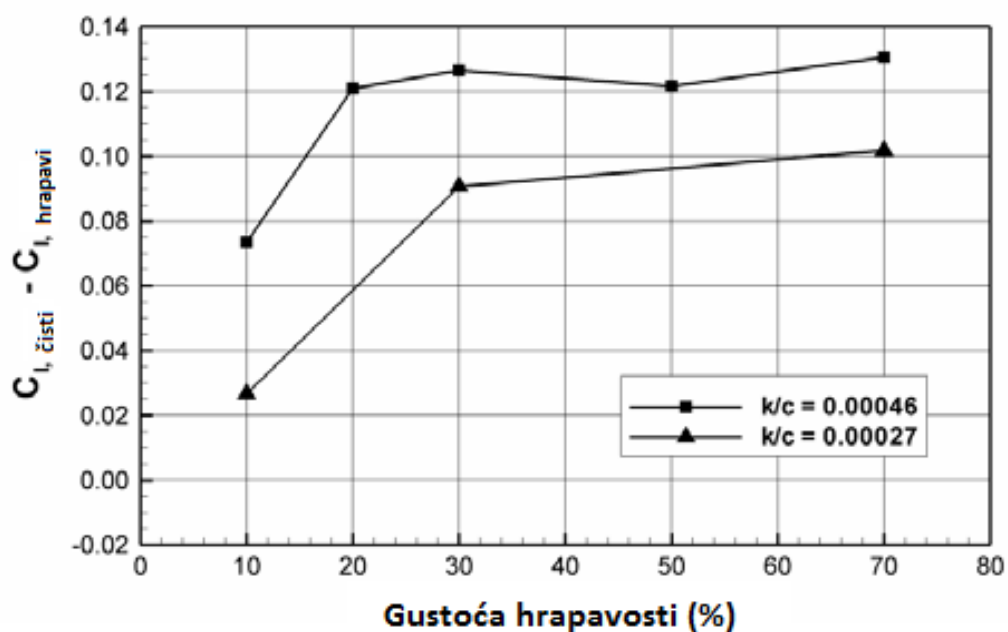


Slika 5. Strujanje u graničnom sloju oko samostalnog elementa hrapavosti pri različitim Reynoldsovim brojevima [6]

Grafikon 3.1. prikazuje promjenu koeficijenta uzgona kontaminiranog ($C_{l,hrapavi}$) aeroprofila u odnosu na gustoću hrapavosti leda izraženu u postotcima i visinom hrapavosti. Krivulja opisana kvadratnim točkama na grafu podrazumijeva veći omjer visine hrapavosti i duljine tetive aeroprofila (k/c) u odnosu na drugu krivulju. Može se zaključiti da se $C_{l,max}$ smanjuje kako se visina hrapavosti povećava. Vidljivo je da se $C_{l,max}$ smanjuje i kod povećanja gustoće hrapavosti do 30% gustoće. Daljnje povećanje gustoće nema značajan utjecaj na $C_{l,max}$. [6]



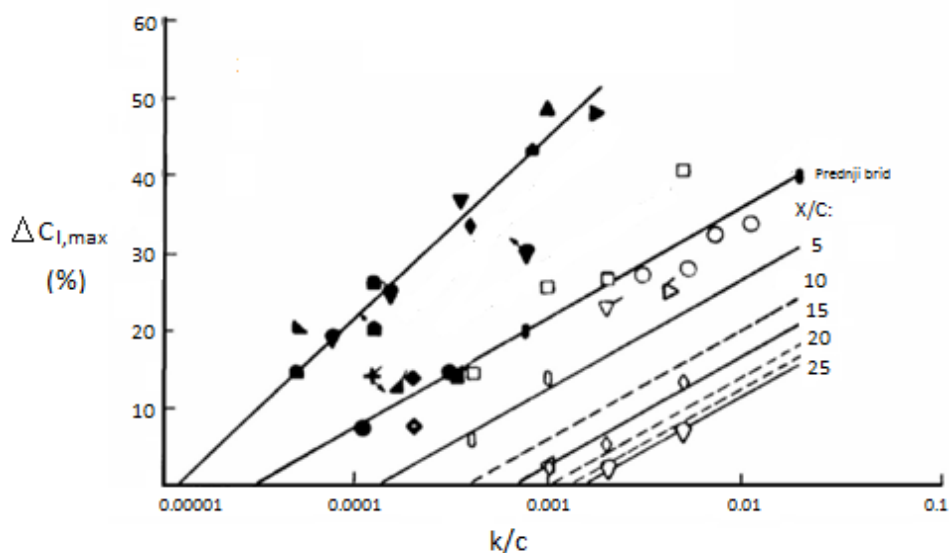
Slika 6. Prikaz intenziteta turbulencije kod prestrujavanja zraka preko gornjake čistog i kontaminiranog aeroprofila [6]



Grafikon 3.1. Promjena maksimalnog koeficijenta uzgona kontaminiranog u odnosu na visinu i gustoću hrapavosti [6]

Na grafikonu 3.2. prikazan je utjecaj visine hrapavosti, udjela zahvaćenosti površine hrapavošću u odnosu na tetivu aeroprofila i pozicije hrapavosti leda na $C_{l, \max}$. Vidljivo je da hrapavost uzrokuje veće smanjenje $C_{l, \max}$ kako se njegova pozicija u odnosu na tetivu pomiče od zadnjeg brida do prednjeg brida. Hrapavost leda ima jako štetan utjecaj na aerodinamiku

aeroprofila kada se nalazi na točki najveće brzine strujanja zraka (najmanjeg tlaka), odnosno na prednjem bridu. Ta pojava objašnjava i različite utjecaje hrapavosti na istoj poziciji u odnosu na tetivu, a različitim aeroprofilima. Najstrmija krivulja prikazuje smanjenje $C_{l,max}$ u odnosu na visinu hrapavosti pri kompletno kontaminiranom gornjakom. Taj slučaj očigledno ima najštetniji utjecaj za uzgon aeroprofila. [6]



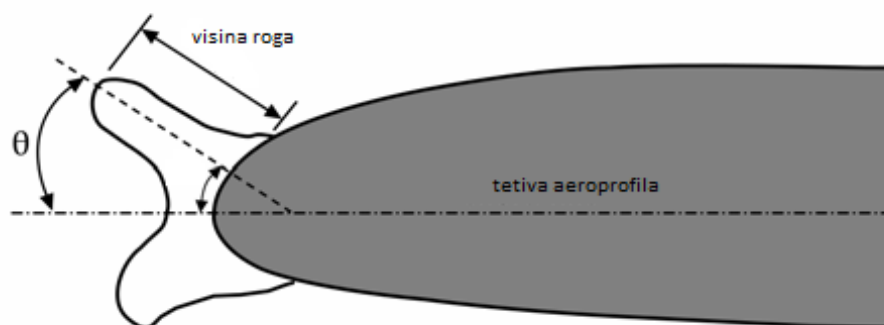
Grafikon 3.2. Ovisnost $C_{l,max}$ o visine hrapavosti, udjela za zahvaćenosti površine hrapavošću u odnosu na tetivu aeroprofila i pozicije hrapavosti leda na $C_{l,max}$

3.2.2. Rogljasti led

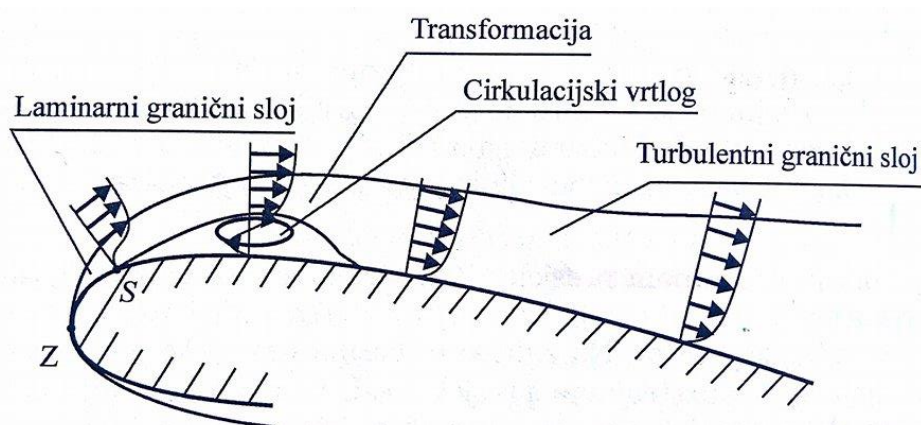
Rogljasti led se može okarakterizirati njegovom visinom roga i kutom omeđenim tetivom aeroprofila i dužinom visine roga (ϑ). Na slici 7. nakupina leda je formirala gornji i donji rog što remeti strujanje i preko gornjake i donjake. Rogljasti led nastaje na prednjem bridu, u uvjetima nastajanja prozirnog leda, a obično je popraćen akumulacijom leda na ostatku uzgonske površine prema zadnjem bridu. Ima veći utjecaj na aerodinamičke karakteristike od nizstrujnog leda, ali manje od rasponskog. [6]

Najznačajniji uzrok degradacije performansi aeroprofila kontaminiranim rogljastim ledom je stvaranje cirkulacijskog mjehura (vrtloga). Taj mjehur ima utjecaj na cijeli aeroprofil zbog promjene raspodjele tlaka. Na slici 8. vidljivo je nastajanje laminarnog cirkulacijskog mjehura. Kod čistih aeroprofila, mjehur nastaje kada se u laminarnom graničnom sloju pojavi pozitivni gradijent tlaka dovoljno velik da dođe do separacije u točki S zbog čega nastaje cirkulacijski mjehur. Statički tlak u mjehuru je relativno konstantan do transformacije

graničnog sloja u turbulentni kada nastaje povratno strujanje i vrtlog što ima negativan utjecaj na aeroprofil. Kod aeroprofila kontaminiranih rogljastim ledom, granični sloj se odvaja na vrhu roga zbog velikog gradijenta tlaka uzrokovanim naglom promjenom oblika površine. [6], [7]



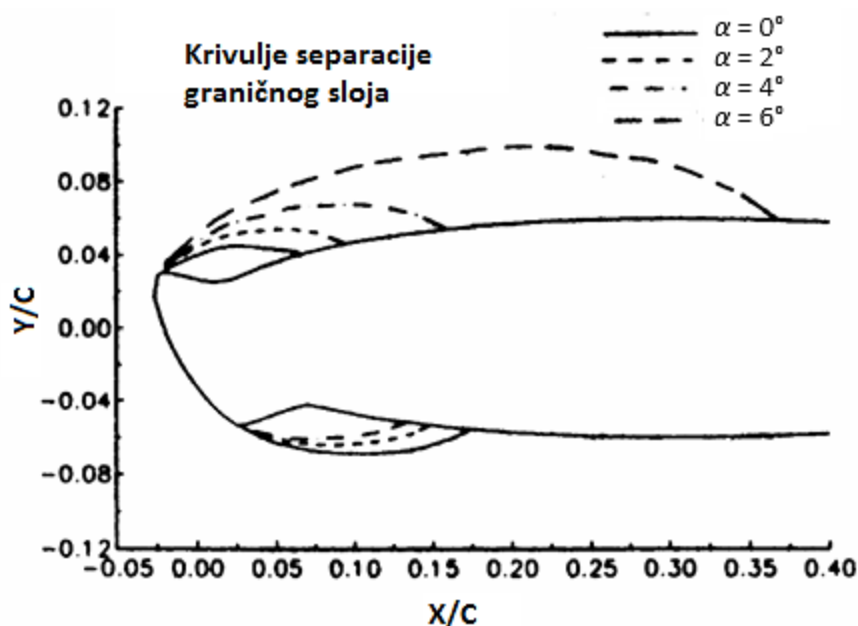
Slika 7. Rogljasti led [6]



Slika 8. Separacija graničnog sloja i nastajanje cirkulacijskog vrtloga [7]

Grafikon 3.3. prikazuje veličine područja cirkulacijskih vrtloga nastala na gornjaci i donjaci zbog kontaminacije rogljastim ledom pri različitim napadnim kutovima (α). Krivulje predstavljaju granice područja cirkulacijskog vrtloga i graničnog sloja. Na gornjaci se to područje povećava s povećanjem napadnog kuta sve dokad se granični sloj više ne može spojiti s površinom aeroprofila ($\alpha > 6^\circ$), u kojem slučaju nema strujanja zraka preko gornjake. U slučaju donjake, odnos je obrnut, pa se područje cirkulacijskog vrtloga smanjuje povećanjem napadnog kuta. Što je veći cirkulacijski mjehur to je veći ukupni otpor, a kad granični sloj ne spoji s gornjakom dolazi do prevlačenja aeroprofila. Iz ovoga je očigledno da

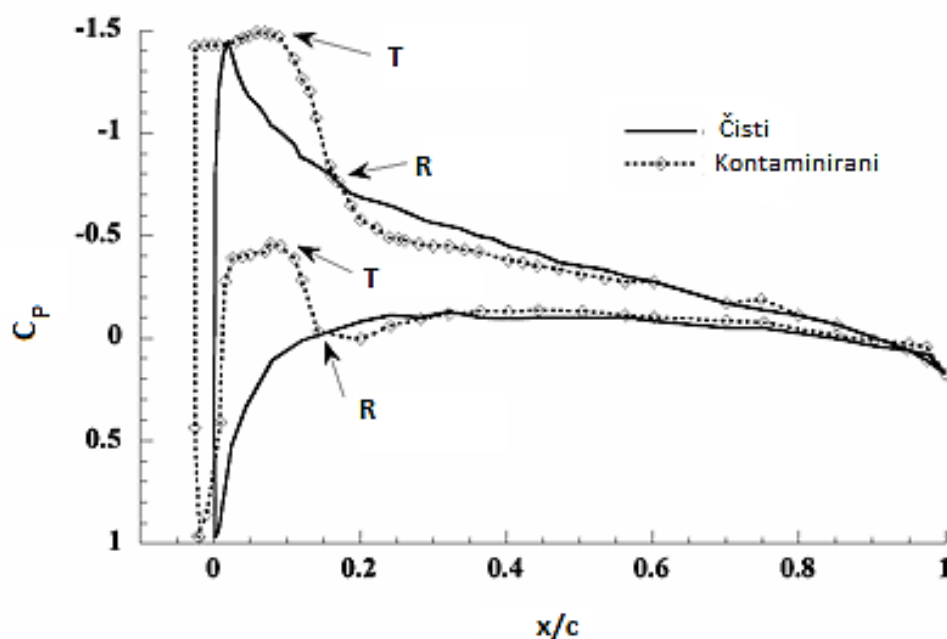
što je veća visina rogljastog leda, to će se smanjiti kritični napadni kut (α_{krit}) pri kojem se prevlači aeroprofil. [6]



Grafikon 3.3. Promjena veličine cirkulacijskog mjehura pri različitim napadnim kutovima za aeroprofil kontaminiran rogljastim ledom [6]

Raspodjela tlaka pri $\alpha = 4^\circ$ oko čistog i kontaminiranog aeroprofila (gornjaka i donjaka) prikazana je na grafikonu 3.4. Oznaka „T“ obilježava transformaciju graničnog sloja, a oznaka „R“ spajanje graničnog sloja s površinom aeroprofila. Kao što je prije spomenuto, tlak u području cirkulacijskog mjehura (između prednjeg brida i $x/c = 0.10$) je približno konstantan. Iza $x/c = 0.10$ tlak raste kako se granični sloj ponovno spaja s površinom aeroprofila. Mjesto gdje se spoji na mjestu gdje je tlak otprilike jednak za čisti i kontaminirani aeroprofil. Tlak dalje raste prema zadnjem bridu. [6]

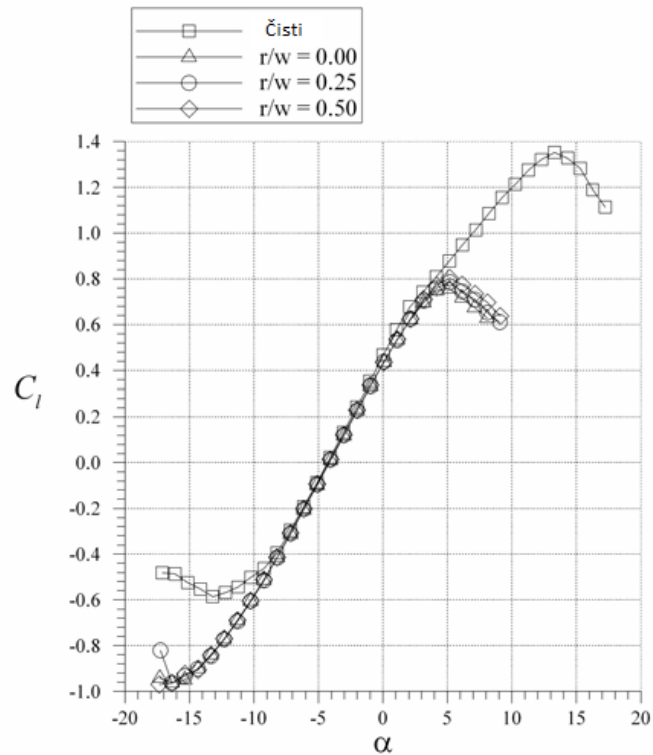
Cirkulacijski mjehur nastao kao posljedica rogljastog leda je puno kompleksniji u usporedbi s onim kod čistog aeroprofila, upravo zbog vrtloga koji su nastali kao posljedica povratnog strujanja u mjehuru. Vrtlozi se spajaju i formiraju veće vrtloge koji se kreću nizstrujno prema zadnjem bridu. Njihovo formiranje je nestabilno, a kako se otkidaju nizstrujno tako se mijenja oblik (visina i duljina) cirkulacijskog mjehura što vodi promjenjivim tlakovima oko aeroprofila. To znači da se sile na aeroprofil konstantno mijenjaju što može dovesti do turbulencije zrakoplova. [6]



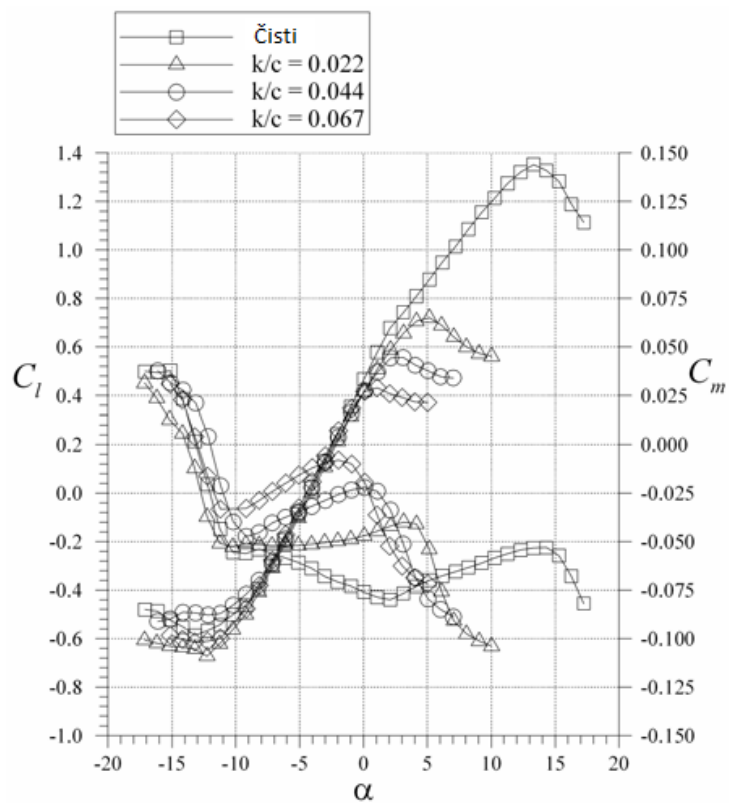
Grafikon 3.4. Raspodjela tlaka pri $\alpha = 4^\circ$ čistog i kontaminiranog aeroprofila [6]

Na grafikonu 3.5. prikazani su rezultati mjerenja koeficijenta uzgona C_l aeroprofila kontaminiranog rogljastim ledom s različitim radijusima vrha roga. Odmah je vidljiva razlika u $C_{l,max}$ i α_{krit} između čistog aeroprofila i onih kontaminiranih. $C_{l,max}$ i α_{krit} kontaminiranih aeroprofila je značajno manji. S druge strane, očigledno je da promjena radijusa vrha roga nema utjecaja na $C_{l,max}$ i α_{krit} . Rog nakupine leda moguće je zamijeniti sa spoilerom koji ima radijus puno manji od stvarnog roga. Na taj način su olakšane simulacije i ispitivanja utjecaja kontaminacije. Može se zaključiti da aerodinamički utjecaj roga ne ovisi o detaljnom obliku roga, već da je većina utjecaja na aeroprofil kontaminiran rogljastim ledom posljedica nastajanja cirkulacijskog mjehura. Bitni su samo visina roga, kut u odnosu na struju zraka i položaj roga na aeroprofilu. [6]

Na grafikonu 3.6. vidljiv je utjecaj promjene visine roga (k/c) na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima. Kako se visina roga povećava tako se $C_{l,max}$ i α_{krit} smanjuju. Vidljivo je i povećanje momenta prominjanja pri malim napadnim kutovima kako se visina roga povećava. Grafikon 3.7. opisuje utjecaj položaja roga na aeroprofilu (s/c). Očigledno je da se $C_{l,max}$ i α_{krit} smanjuju pri povećanju s/c . [6]

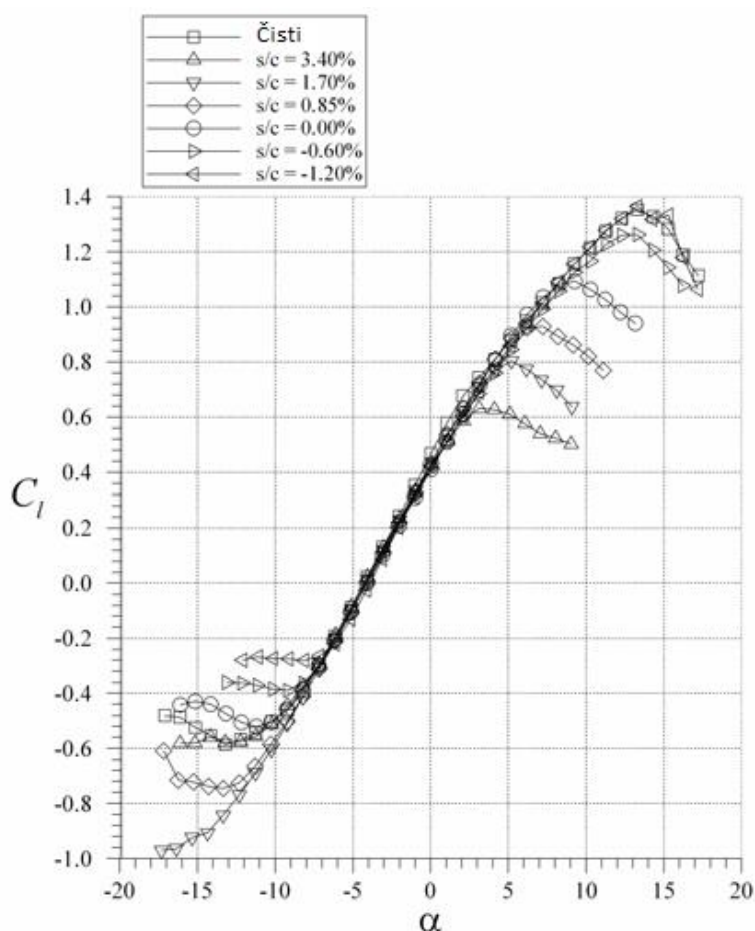


Grafikon 3.5. Utjecaj radijusa vrha roga (r/w) na koeficijent uzgona aeroprofila pri različitim napadnim kutovima [6]



Grafikon 3.6. Utjecaj promjene visine roga (k/c) na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima

Postoje tri varijante rogljastog leda, kada postoji gornji, donji ili oba roga i svaki slučaj ima drugačiji utjecaj na aerodinamiku aeroprofila. Gornji rog remeti prestrujavanje zraka preko gornjake što znači da najviše utječe na $C_{l,max}$ i α_{krit} dok donji rog ima zanemariv utjecaj. Gornji rog povećava koeficijent otpora (C_d) pri većim napadnim kutovima dok donji pri manjim i negativnim napadnim kutovima. Za razliku od uzgona, ukupni koeficijent otpora aeroprofila s gornjim i donjim rogom je otprilike zbroj C_d čistog aeroprofila s C_d aeroprofilom s gornjim rogom i C_d aeroprofila s donjim rogom. Ukoliko se kod rogljastog leda pojavi još i hrapavost, neće postojati značajan utjecaj na aerodinamiku pošto je oblik rogova svakako nepravilan. [6]

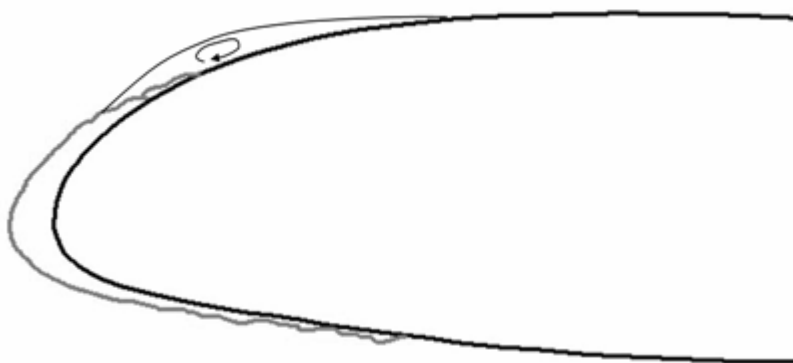


Grafikon 3.7. Utjecaj položaja roga na aeroprofilu (s/c) na koeficijent uzgona (C_l) pri različitim napadnim kutovima [6]

3.2.3. Nizstrujni led

Nizstrujni led ima najmanji utjecaj na aerodinamičke karakteristike kontaminiranog aeroprofila od 4 navedena tipa leda. Aeroprofil kontaminiran nizstrujnim ledom vidljiv je na slici 8. Najčešće se stvara kao posljedica letenja kroz uvjete stvaranja neprozirnog leda (inja).

Akumulira se na prednjem bridu uzgonskih površina padanjem vodenih kapljica pri niskoj temperaturi. U slučaju duljeg letenja u takvim uvjetima kapljice se više vremena nakupljaju i postoji mogućnost stvaranja rogljastog leda. Oblik mu je takav da, za razliku od rogljastog leda, ima malu visinu i ne remeti struju zraka u tolikoj mjeri. Također stvara cirkulacijski mjehur, ali kao što je vidljivo na slici 9., jako je male vrijednosti stoga ima manji utjecaj na aerodinamičke sposobnosti aeroprofila. [6]



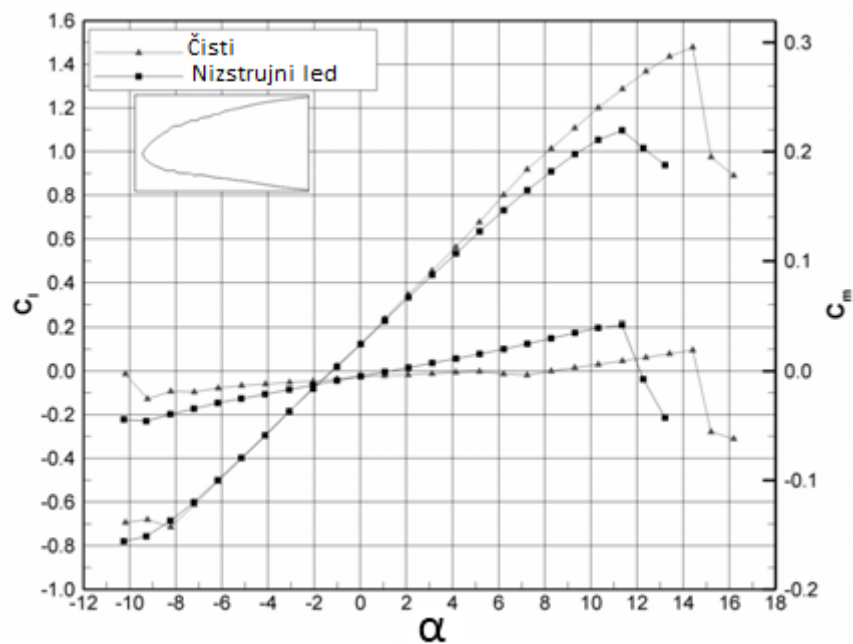
Slika 9. Aeroprofil kontaminiran nizstrujnim ledom [6]

Nizstrujni led na neki način produljuje aeroprofil odnosno prednji brid aeroprofila. Mjesto nastanka cirkulacijskog mjehura nije uvijek, kao kod rogljastog leda (vrh roga), na istom mjestu već ovisi o obliku spojnice nizstrujnog leda i površine aeroprofila, napadnom kutu, hrapavosti (stanje graničnog sloja) i Reynoldsovom broju. Pošto je spojnica obično nepravilnog oblika, tu se javlja nepovoljni gradijent tlaka i nastaje separacija graničnog sloja i posljedično cirkulacijski mjehur (slika 8.). [6]

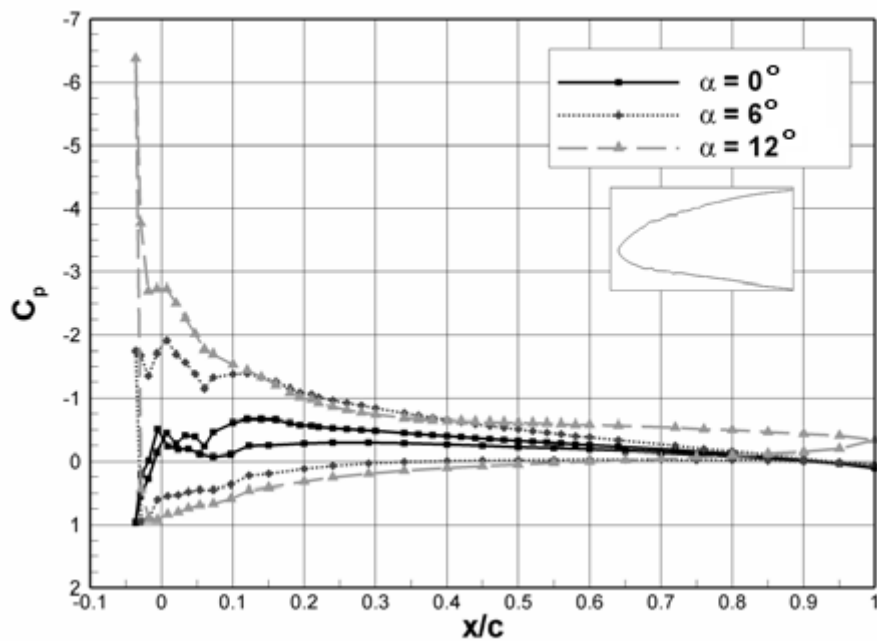
Na grafikonu 3.8. prikazan je utjecaj nizstrujnog leda na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima u odnosu na čisti aeroprofil. Vidljivo je smanjenje $C_{l,max}$ i α_{krit} i manji nagib krivulje. Moment propinjanja i uzgon se slome pri $\alpha = 11^\circ$. [6]

Grafikon 3.9. prikazuje raspodjelu tlaka aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom. Vidljivo je, iz tendencije promjene koeficijenta tlaka, da se blizu prednjeg brida formira cirkulacijski mjehur. Pri $\alpha = 12^\circ$ nagla promjena tlaka blizu prednjeg brida ukazuje na separaciju nizstrujno i stvaranje mjehura koji se pruža otprilike 5% duljine tetive. Vidljivo je i

da je tlak konstantan od $x/c = 0.5$ do zadnjeg brida što može značiti odvojeni granični sloj na tom području i prevlačenje stražnjeg brida. [6]

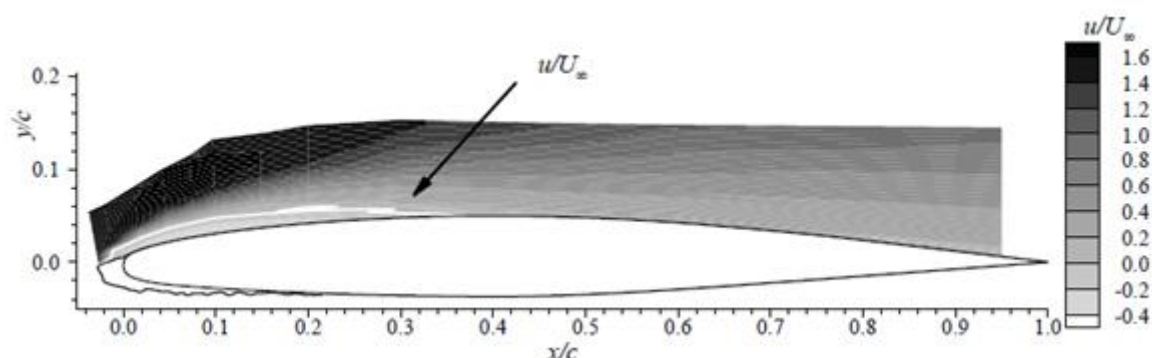


Grafikon 3.8. Utjecaj nizstrujnog leda na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima [6]



Grafikon 3.9. Raspodjela tlaka aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom pri različitim napadnim kutovima [6]

Grafikon 3.10. prikazuje srednje nizstrujne brzine (u/U_∞) na gornjaci aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom. Vidljiva je separacija graničnog sloja i stvaranja cirkulacijskog mjehura nizstrujno vrhu nakupine leda. U usporedbi s mjehurom nastalim kao posljedica rogljastog leda, znatno je manji u visini i duljini. Bitno je imati na umu da je napadni kut aeroprofila na grafikonu $\alpha = 10^\circ$. Što je oblik leda manje konforman prednjem bridu i površini aeroprofila, to je cirkulacijski mjehur veći i ima veći utjecaj na aerodinamičke karakteristike.

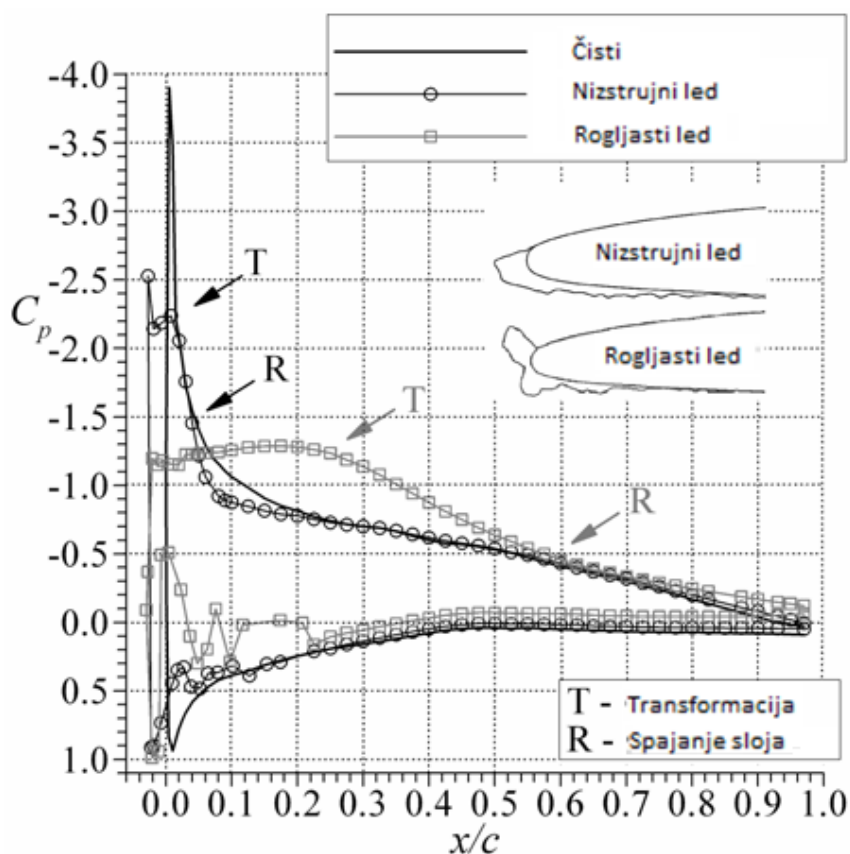


Grafikon 3.10. srednje nizstrujne brzine (u/U_∞) na gornjaci aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom [6]

Usporedba cirkulacijskih mjehura uzrokovanih nizstrujnim i rogljastim ledom pri istom napadnim kutom prikazana je na grafikonu 3.11. Što se tiče rogljastog leda, vidljivo je da je tlak na gornjaci približno konstantan od $x/c = 0.00$ do $x/c = 0.20$ što ukazuje na postojanje mjehura u tom području. Nakon toga je vidljiv je veliki porast tlaka što znači da se granični sloj transformira iz laminarnog u turbulentni (točka T). Gledajući nizstrujno, taj porast tlaka dovodi do spajanja graničnog sloja s površinom aeroprofila na $x/c = 0.60$ (točka R). Velika je razlika između veličine mjehura kod ova dva primjera kontaminacije. Na $x/c = -0.03$ vidljiv je kratkotrajni minimum koeficijenta tlaka što indicira da postoji strujanje zraka preko vrha nakupine leda uzrokovan nizstrujnim ledom. Nakon malog područja konstantnog tlaka u području cirkulacijskog mjehura, tlak se naglo poveća, a granični sloj se spoji s aeroprofilom na $x/c = 0.04$. Raspodjela tlaka je zapravo slična kao kod čistog aeroprofila, osim područja gdje se formira mjehur. Iz navedenog se može zaključiti da je utjecaj nizstrujnog leda značajno manji od utjecaja rogljastog leda na aeroprofil. [6]

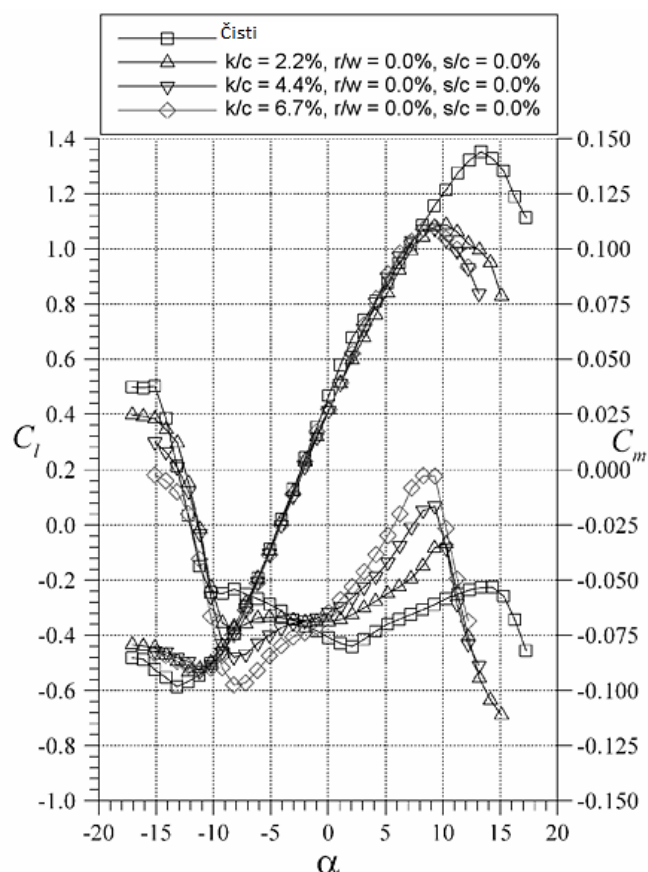
Ukoliko je rog postavljen pod kutom 0° , promjena njegove visine nema nikakav utjecaj na $C_{l,max}$ kao što je vidljivo na grafikonu 3.12. Rogljasti led, postavljen na taj način se može

smatrati simulacijom nekih oblika nizstrujnog leda pošto je prestrujavanje drugačije od onog uzrokovanog rogom koji je postavljen pod nekim kutom. Kada je separacija od vrha roga okomita na struju zraka, utjecaj na aerodinamiku aeroprofila je proporcionalan visini roga. S druge strane, za nizstrujni led kod kojeg se separacija ne događa na vrhu roga, prestrujavanje i utjecaj na aerodinamiku nije ovisan o visini nakupine leda. [6]



Grafikon 3.11. Raspodjela tlaka čistog aeroprofila i aeroprofila kontaminiranih nizstrujnim i roglastim ledom pri $\alpha = 6^\circ$ [6]

Postoje i simulacije kontaminacija aeroprofila nizstrujnim ledom u kojima je vidljiv porast $C_{l,max}$. NACA 63A415 aeroprofil, kontaminiran nizstrujnim ledom pri $\alpha = 6.6^\circ$. Mjerenja su pokazala povećanje $C_{l,max}$ za 10%, iako popraćeno sa značajnim povećanjem otpora. Razlog povećanja $C_{l,max}$ je to što se nakupina leda akumulirala na prednjem bridu na način da je formirala pretkrilce. [6]

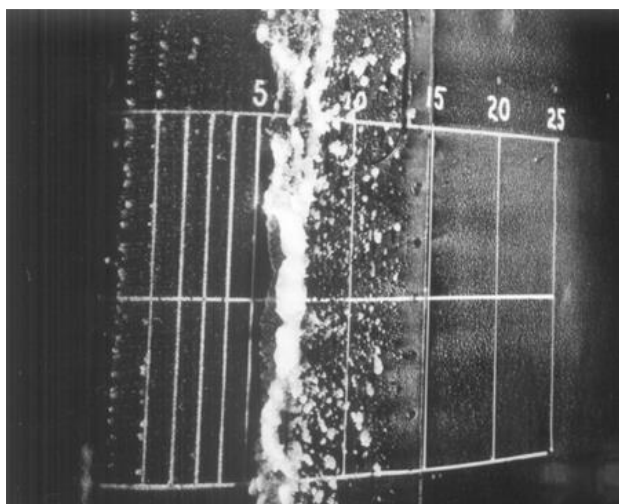


Grafikon 3.12. Utjecaj promjene visine roga (k/c) na C_l i C_m aeroprofila pri različitim napadnim kutovima dok je položaj roga $x/c = 0$ [6]

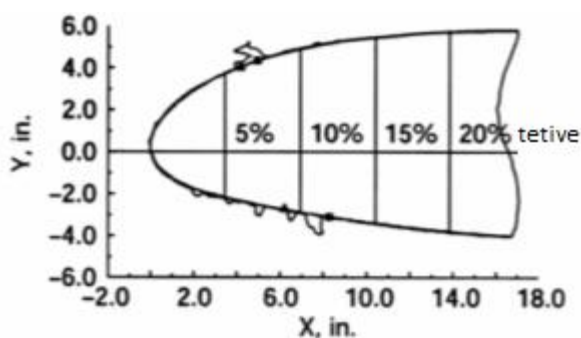
3.2.4. Grebenasti led duž raspona uzgonskih površina

Grebenasti led je najčešće asociran s ledom akumuliranim na zrakoplovu kao posljedica sudara površine s pothlađenim kapljicama. Ovaj tip leda pruža se duž raspona krila, od korijena do vrha, a nazvan je „grebenasti“ zbog svog oblika koji podsjeća na reljefni oblik grebena. Ovakav tip leda nakuplja se nizstrujno od prednjeg brida uzgonskih površina zrakoplova koji su opremljeni sustavima za odleđivanje i zaštitu od odleđivanja. Grebenaste nakupine leda mogu se stvoriti i iz nizstrujnog leda kada se prednji brid grije termičkim sustavom za odleđivanje i led ne pređe u paru, već u vodu. Strujanje zraka te kapljice nosi nizstrujno, te se one zaleđuju dodirnom hladnijeg dijela površine. Zbog načina formiranja, grebeni leda su često jako različite geometrije duž raspona krila. Obično su položeni bliže zadnjem bridu od hrapavih, rogljastih i nizstrujnih oblika leda. Ta udaljenost dozvoljava da se granični sloj razvije ili čak transformira u turbulentni sloj zbog male hrapavosti uzstrujno od rasponskog grebena koji zapravo predstavlja prepreku strujanju zraka. [6]

Na slici 10. vidljivo je testiranje pneumatičkog sustava za određivanje krila zaleđenog pothlađenim kapljicama. Sukladno slici, grafikon 3.13. prikazuje dvodimenzionalno pružanje grebenastog leda na aeroprofilu tog krila. Greben se nalazi na otprilike $x/c = 0.06$, odnosno blizu kraja pneumatičke gume, s visinom $k/c = 0.015$. Obično, kod krila kontaminiranog grebenastim ledom, na području od grebena do prednjeg brida nema kontaminacije, a sam greben je nepravilnog oblika. [6]



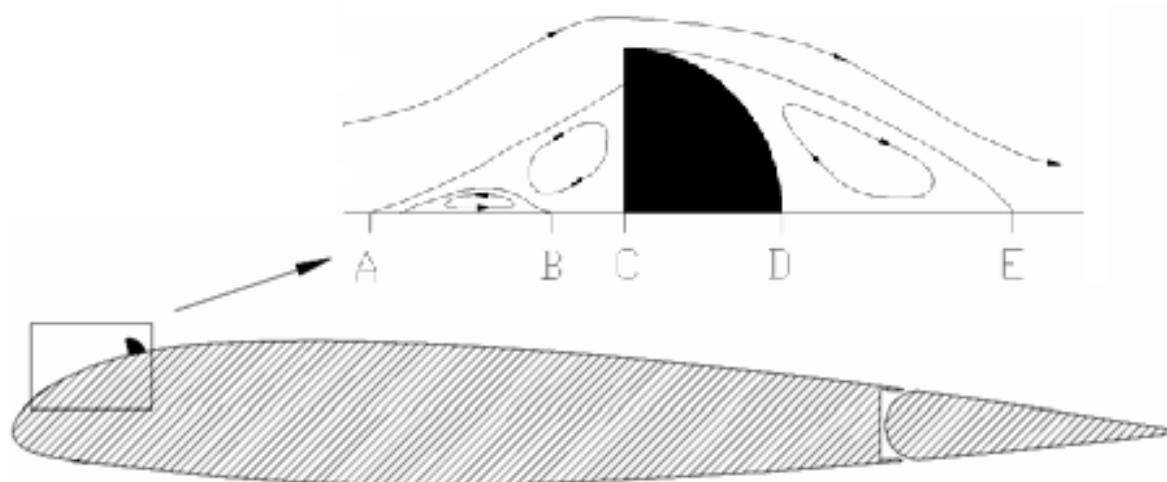
Slika 10. Rasponski grebenasti led nastao kao posljedica pothlađenih kapljica [6]



Grafikon 3.13. Dvodimenzionalni oblik grebenasti leda na aeroprofilu [6]

Način simulacije prestrujavanja zraka oko aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom prikazan je na slici 11. Na određenoj udaljenosti od prednjeg brida na gornjaci, postavljen je kontaminant u obliku četvrtine kugle. Vidljivo je i strujanje zraka preko grebena. Točke "C" i "D" označavaju uzstrujni i nizstrujni rub grebena. Separacija graničnog sloja događa se na točki "A". Glavna struja zraka se recirkulira i kod točke "B" događa se još jedna

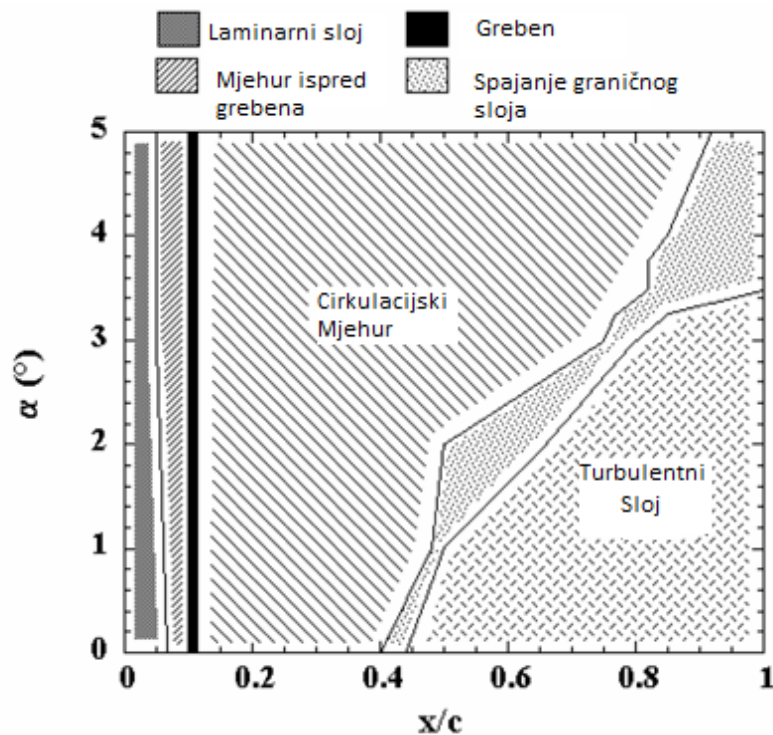
separacija povratnog strujanja. Točka "E" predstavlja mjesto spajanja glavnog cirkulacijskog mjehura nizstrujno od grebena dok sekundarni mjehur nije prikazan. [6]



Slika 11. Strujanje zraka oko aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom [6]

Ovakvo strujanje je, kao i kod rogljastog leda, nestabilno što znači da se područje spajanja graničnog sloja s aeroprofilom pruža preko velike dužine tetive kada je cirkulacijski mjehur velik. To je prikazano na grafikonu 3.14. na kojem je još vidljivo stanje graničnog sloja pri različitim napadnim kutovima. Crna linija predstavlja grebenasti led uzduž raspona, a ispred njega vidljiv je laminarni granični sloj na prednjem bridu aeroprofila nakon kojeg dolazi do separacije. Kako se napadni kut povećava, tako se područje spajanja graničnog sloja pomiče nizstrujno i približava se zadnjem bridu. Za $\alpha > 3^\circ$, područje spajanja prekriva zadnjih 15 do 20% tetive aeroprofila. [6]

Grebenasti led se može usporediti s preprekom nadolazećem strujanju. Točka separacije graničnog sloja nalazi se ispred grebena što kod rogljastog leda nije slučaj. Točka separacije je obično na rogu. Iako oba tipa leda uzrokuju nastajanje velikih cirkulacijskog mjehura, onaj nastao kao posljedica grebena ima veći utjecaj na aerodinamiku. Visina, položaj, raznolikost duž raspona i oblik grebena su najznačajniji parametri koji imaju utjecaj na aerodinamičke karakteristike aeroprofila. [6]

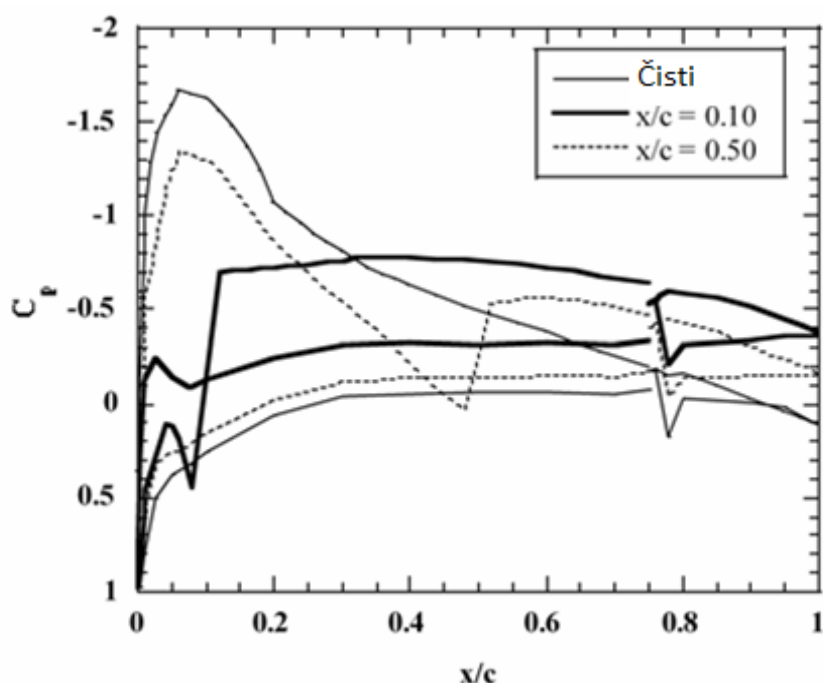


Grafikon 3.14. Stanje graničnog sloja na gornjaci aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom [6]

Utjecaj visine grebena na aeroprofil je takav da, kao i kod već spomenutih tipova kontaminacije, što je veća visina to je veća degradacija aerodinamičkih karakteristika. To se događa kao posljedica formiranja većih cirkulacijskih mjehura ispred i iza grebena. Jednako bitan je položaj grebena na aeroprofilu jer degradacija koju greben uzrokuje ovisi o raspodjeli tlaka oko čistog aeroprofila. Ukoliko se formira greben na prvoj trećini tetive kod aeroprofila koji dobivaju većinu svog uzgona blizu prednjeg brida zbog podtlaka na gornjaci, on sprječava nastajanje usisavanja zraka i smanjuje se ukupan uzgon. [6]

Raspodjela tlaka aeroprofila NACA 23012m prikazan je na grafikonu 3.15. Vidljiv je iznos tlaka preko cijele tetive čistog aeroprofila i aeroprofila kontaminiranih grebenastim ledom visine $k/c = 0.014$, postavljen na $x/c = 0.10$ i $x/c = 0.50$. Kod čistog aeroprofila, ispred $x/c = 0.10$ vidljiv je nagli pad tlaka koji je popraćen nepovoljnim gradijentom tlaka što povećava mogućnost separacije graničnog sloja. Ukoliko se greben nalazi u tom području, on sprječava stvaranje podtlaka, a cirkulacijski mjehur nizstrujno od grebena se pruža preko područja s približno konstantnim tlakom nakon čega dolazi do spajanja graničnog sloja s aeroprofilom. Kako se napadni kut povećava, tako se točka spajanja graničnog sloja pomiče nizstrujno prema

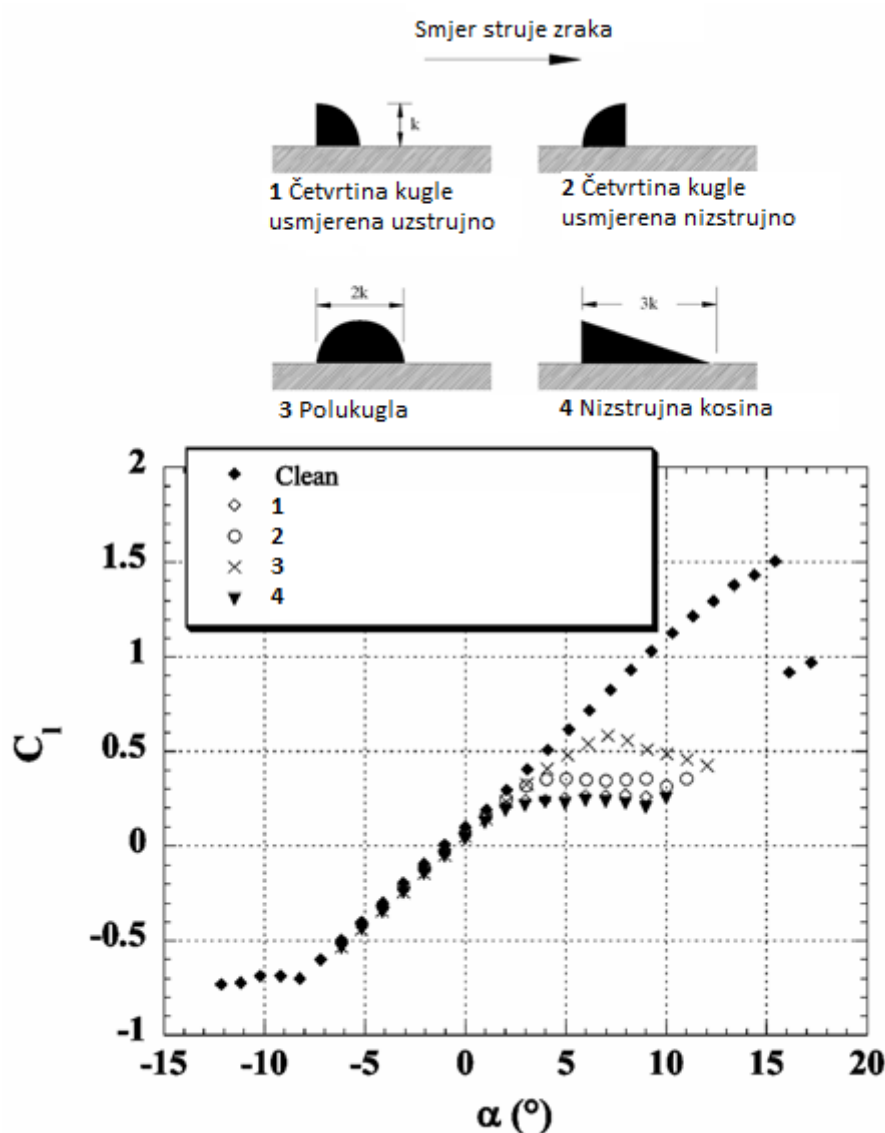
zadnjem bridu. Kada je greben pozicioniran na polovici tetive dolazi do velikog podtlaka blizu prednjeg brida ali ne doseže jednako veliku vrijednost kao kod čistog aeroprofila, iako imaju sličan nepovoljni gradijent tlaka. Na polovici tetive vidljiv je naglo smanjenje tlaka, odnosno separaciju graničnog sloja i cirkulacijski mjehur. Iz navedenog može se zaključiti da je utjecaj grebena postavljenog bliže prednjem bridu štetniji. Ovaj zaključak se odnosi samo na aeroprofil na kojem je provedeno ovo ispitivanje. Pošto je raspodjela tlaka drugačija za svaki aeroprofil, bit će drugačiji i utjecaj grebena. Što je veća visina grebena, to je kritični položaj grebena bliže zadnjem bridu. Kada se visina grebena smanjuje i dođe blizu visine elementa hrapavosti, tada je degradacija karakteristika uzrokovana smanjenjem količine gibanja u graničnom sloju, dodatnim otporom i prevlačenjem zadnjeg brida. [6]



Grafikon 3.15. Raspodjela tlaka aeroprofila kontaminiranih grebenastim ledom i čistog aeroprofila NACA 23012m [6]

Još jedna razlika između grebenastog i rogljastog leda je da utjecaj grebenastog leda uvelike ovisi o trodimenzionalnom obliku grebena. Na grafikonu 3.16. vidljiv je utjecaj različitih oblika grebena na koeficijent uzgona aeroprofila pri različitim napadnim kutovima. Vidljivo je da je $C_{l,max}$ aeroprofila kontaminiranog polukuglom (oblik 3) jednak otprilike 0.60, dok je $C_{l,max}$ kod četvrtine kugle usmjerene uzstrujno i nizstrujne kosine (oblika 1 i 4) jednak 0.25. Kod grebena oblika polukugle se formira manje područje separiranog graničnog sloja nego kod spomenuta druga oblika koji imaju ravnu stranu usmjerenu uzstrujno i imaju

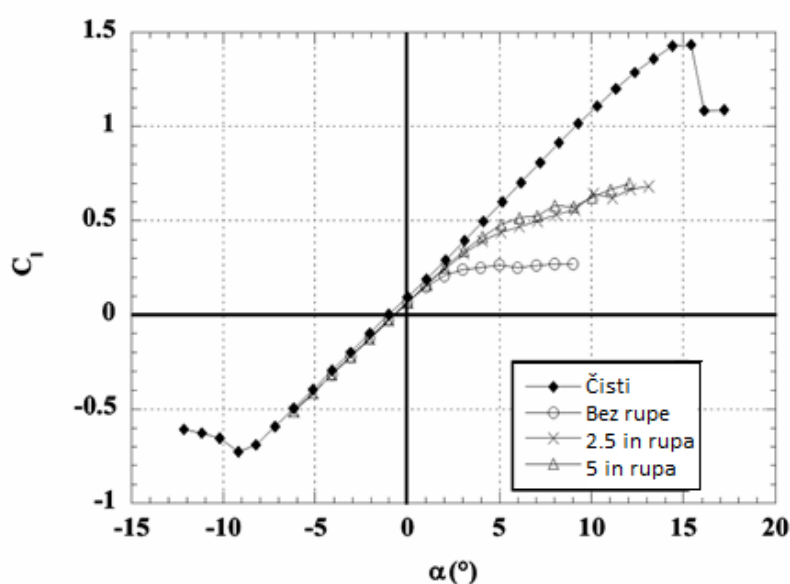
najštetniji utjecaj na koeficijent uzgona. Geometrija dijela grebena usmjerenog i uzstrujno i nizstrujno imaju svoju ulogu u separaciji graničnog sloja ispred i iza grebena i mjestu spajanja graničnog sloja, za razliku od rogljastog leda kod kojeg geometrija samog roga nema velik utjecaj na aerodinamički utjecaj. Ukoliko postoji hrapavost ispred ili iza grebena strujanje zraka će se promijeniti, a s njim i utjecaj na aerodinamičke karakteristike. Dokazano je da hrapavost ispred grebena može povećati $C_{l,max}$. [6]



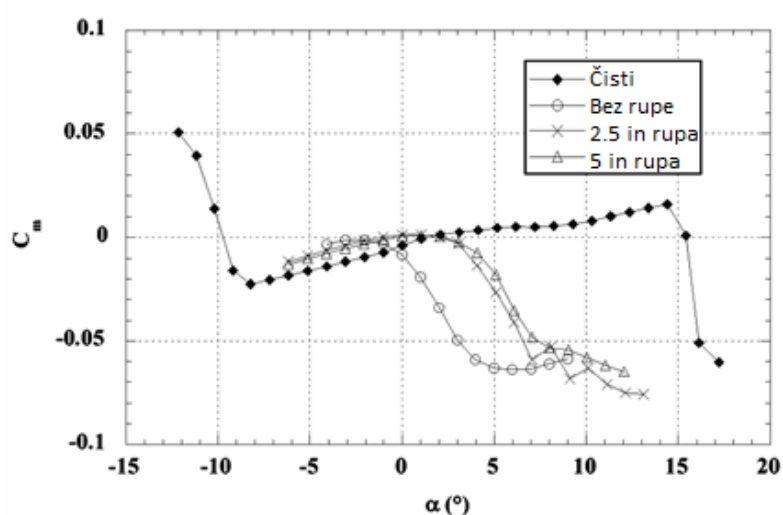
Grafikon 3.16. Utjecaj različitih oblika grebena na koeficijent uzgona aeroprofila pri različitim napadnim kutovima [6]

Raznolikost grebenastog leda duž raspona krila uvelike ovisi o uvjetima zaleđivanja. Grebeni mogu imati puknuća i rupe na različitim mjestima duž raspona. Utjecaj različitih veličina rupa u grebenima duž raspona na C_l i C_m prikazan je na grafikonima 3.17 (a) i (b).

Vidljivo je da $C_{l,max}$ može biti dvostruko veći kod grebena s malim rupama. Iz grafikona (a) je teško zaključiti koji napadni kut je kritičan jer nije vidljiv konkretan slom uzgona, iako je kod grafikona (b) vidljivo iz smanjenja C_m da je prevlačenje za grebene s rupama odgođeno za gotovo četiri stupnja napadnog kuta. Strujanje zraka kroz i oko rupa u grebenima je komplicirano u trodimenzionalnom smislu jer je jako kaotično i promjenjivo. Ukoliko promatramo strujanje preko kontaminiranog aeroprofila u dvodimenzionalnom smislu možemo zaključiti da se ispred i iza grebena s puknućem formiraju manji lokalizirani cirkulacijski mjehuri koji nemaju toliko štetan utjecaj kao jedan veliki konstantni mjehur. [6]



(a)

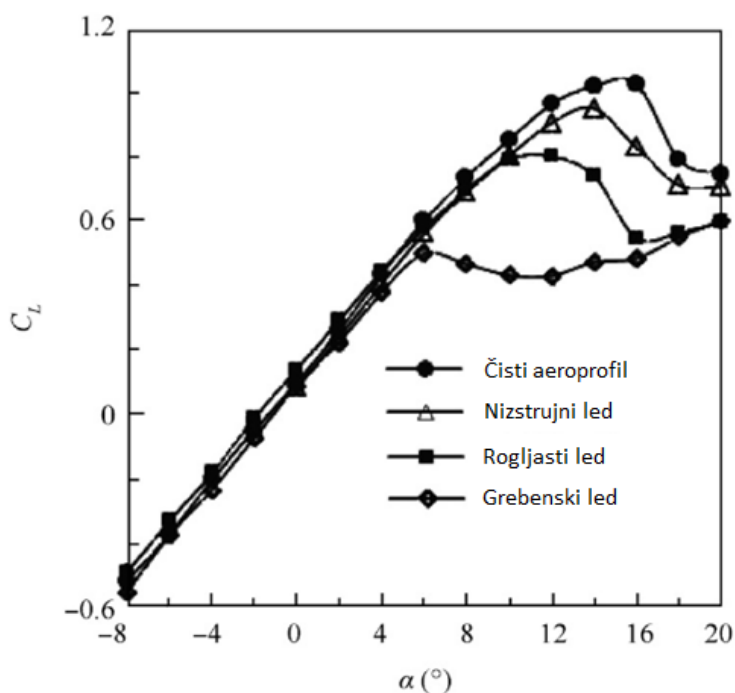


(b)

Grafikon 3.17. Utjecaj različitih veličina rupa u grebenima duž raspona na C_l i C_m [6]

3.2.5. Analiza i usporedba utjecaja svih tipova kontaminacije ledom

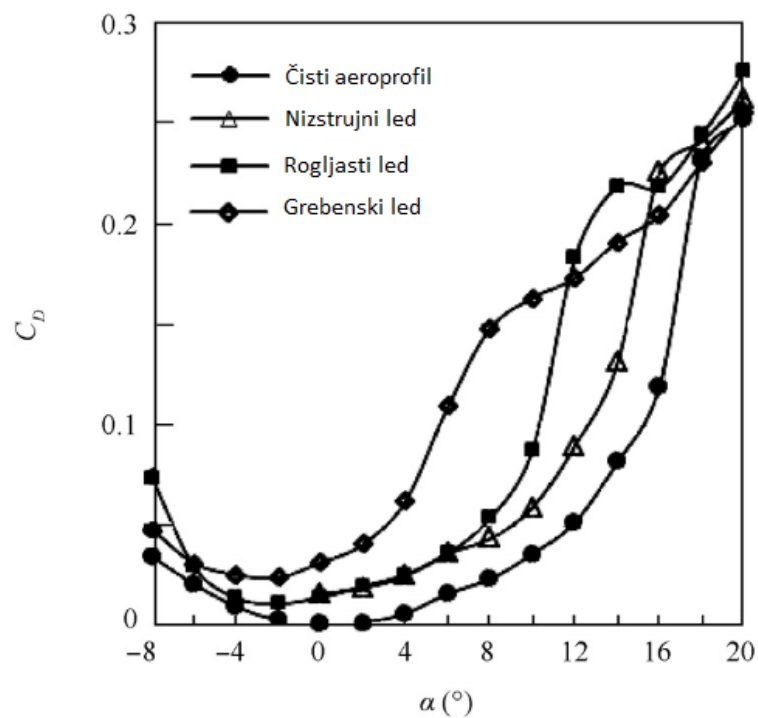
Da bi se precizno odredila degradacija performansi uzrokovana utjecajem kontaminacije površine zrakoplova ledom potrebno je kvantitativno analizirati rezultate ispitivanja prije navedenih tipova leda. Na grafikonu 3.18. vidljiva je usporedba promjena koeficijenta uzgona aeroprofila kontaminiranog s tri tipa kontaminacije ledom. Očigledno je da najbolji koeficijent uzgona daje čisti aeroprofil, dok kod aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom vidljivo je malo smanjenje u $C_{l,max}$ i α_{krit} iako relativno neznajno. Kod aeroprofila kontaminiranog rogljastim ledom se nastavlja smanjenje $C_{l,max}$ i α_{krit} iako se kod većih napadnih kutova koeficijent uzgona počne povećavati slično kao i kod aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom kod kojeg su vidljivi najniži $C_{l,max}$ i α_{krit} , tako da se može zaključiti da grebenasti led ima najštetniji utjecaj na uzgon zrakoplova.



Grafikon 3.18. Usporedba promjena koeficijenta uzgona kontaminiranog aeroprofila NACA 23012 pri različitim kontaminacijama ledom [8]

Grafikon 3.19. prikazuje promjene koeficijenta otpora aeroprofila pri različitim oblicima kontaminacije ledom. Opet je za usporedbu prikazana krivulja čistog aeroprofila i vidljivo je da on stvara najmanje otpora. Već je kod aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom očigledan porast koeficijenta otpora pri, a kod rogljastog leda je koeficijent sličan pri nultom napadnom kutu, dok se povećanjem preko $\alpha = 7^{\circ}$ vidi nagli porast koeficijenta otpora

aeroprofila. Bitno je primijetiti da je najveći otpor pri negativnim napadnim kutovima kod aeroprofila kontaminiranog rogljastim ledom. Opet je vidljivo da grebenasti led ima najštetniji utjecaj, ali ovdje na otpor zrakoplova. Pri $\alpha = 8^\circ$ koeficijent otpora čistog aeroprofila je gotovo osmerostruko manji od otpora uzrokovanog grebenastim ledom zbog separacije graničnog sloja iza grebena. Grebenasti led uzrokuje najveći porast otpora pri malim napadnim kutovima, ali nakon $\alpha = 8^\circ$ raste manjom brzinom.



Grafikon 3.19. Usporedba promjena koeficijenta otpora kontaminiranog aeroprofila NACA 23012 pri različitim kontaminacijama ledom [8]

4. DEGRADACIJA PERFORMANSI ZRAKOPLOVA USLIJED KONTAMINACIJE

Kao posljedica svih utjecaja kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke karakteristike, dolazi do degradacije performansi zrakoplova u svim fazama leta. Povećanje mase i otpora, te smanjenje uzgona i kritičnog napadnog kuta imaju svoju ulogu u polijetanju, penjanju, krstarenju i slijetanju zrakoplova. Izračun performansi kontaminiranog zrakoplova je jako bitan jer su sposobnosti zrakoplova značajno ograničene tijekom operacija.

4.1. Degradacija performansi zrakoplova na polijetanju

Najbitniji aspekt kod polijetanja zrakoplova je da potrebna duljina polijetanja (TODR) nije veća od raspoložive duljine polijetanja (TODA). Duljina polijetanja se dijeli na dva dijela, duljina zatrčavanja i udaljenost koju zrakoplov prijeđe od odljepljivanja od tla do točke gdje se uzdigao do visine od 50 stopa. Sile koje djeluju na zrakoplov u polijetanju vidljive su na slici 12. Poželjno je da zrakoplov ima što veću akceleraciju da bi sila uzgona što prije postala veća od težine zrakoplova i na taj će način imati i manju potrebnu duljinu polijetanja. Akceleracija ovisi o sili potiska, na koju kontaminacija nema utjecaja, i silama trenja i otpora. Kontaminacija zrakoplova ledom povećava ukupni otpor zrakoplova što kao posljedicu ima smanjenje akceleracije. Sila trenja direktno ovisi o težini zrakoplova (1) koja se povećava što se više leda akumuliralo na njegovoj površini, tako da se može zaključiti da se povećanjem mase povećava i potrebna duljina polijetanja. [9]

$$F_{trenja} = \mu(W - L) \quad (1)$$

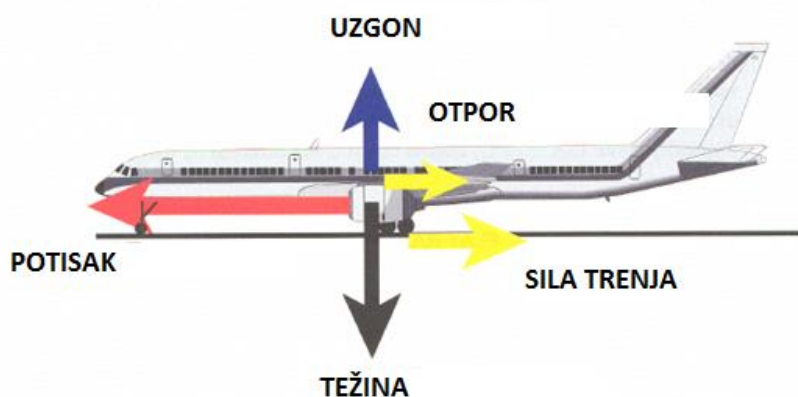
- μ – koeficijent trenja
- W – težina zrakoplova
- L – sila uzgona

Masa sama po sebi smanjuje akceleraciju jer je, pri većoj masi, potrebna i veća sila za istu akceleraciju (2), a sila potiska motora je ograničena svojim maksimumom na polijetanju.

$$F = m * a \quad (2)$$

- F – sila
- m – masa
- a – akceleracija

Još se mora uzeti u obzir i da pošto masa zrakoplova povećava brzine prevlačenja, moraju biti veće i sigurnosne brzine pri polijetanju što znači da zrakoplov mora ubrzati do veće brzine da bi poletio. Potrebna duljina polijetanja će biti veća jer je potreban veći put da bi ubrzao do veće brzine.



Slika 12. Sile koje djeluju na zrakoplov na polijetanju [9]

Da bi precizno usporedili degradaciju performansi zrakoplova u polijetanju potrebno je usporediti duljinu polijetanja zrakoplova Cessna 172N, s betonirane uzletno sletne staze koeficijenta trenja s maksimalnom masom polijetanja, u standardnim atmosferskim uvjetima na razini mora, s čistim aeroprofilom NACA 23012 i s kontaminiranom površinom najštetnijim oblikom leda, grebenastim ledom. Karakteristike čistog zrakoplova Cessna 172N, aeroprofila NACA 23012 i drugi podaci koji su nam potrebni za izračun su:

- Masa (m) = 1 043 kg
- Maksimalni koeficijent uzgona ($C_{L,max}$) = 1.04
- Površina krila (A) - 16.2 m²
- Raspoloživa snaga (P_a) = 119 kW
- Učinkovitost propelera (η) = 0.8
- Gustoća zraka (ρ) = 1.225 kg/m³
- Visina krila (h) = 2 m
- Raspon krila (b) = 11 m
- Koeficijent otpora krila pri nultom uzgonu ($C_{D,0}$) = 0.035 [12]
- Oswaldov koeficijent (e) = 0.75
- Koeficijent trenja za asfaltnu podlogu (μ) = 0.02

Potrebnu duljinu zatrčavanja moguće je izračunati iz formule (3):

$$s_{LO} = \frac{1.44 * W^2}{g\rho AC_{L,max}\{T - [D + \mu(W - L)]_{sr}\}} \quad (3)$$

- s_{LO} – duljina zaleta
- W – težina zrakoplova
- g – ubrzanje zemljine sile teže (9.81 m/s^2)
- ρ – gustoća zraka (na razini mora iznosi 1.225 kg/m^3)
- A – površina krila
- $C_{l,max}$ – maksimalni koeficijent uzgona
- T – sila potiska
- D – sila otpora
- $T - [D + \mu(W - L)]_{sr}$ – prosječna vrijednost razlike sile potiska i ukupne sile otpora

Potisak zrakoplova nije isti pri svim brzinama, tako da za je za njegov izračun potrebno dobiti srednju brzinu polijetanja koja iznosi 70% brzine polijetanja. Brzina polijetanja je 20% veća od brzine prevlačenja zrakoplova i računamo ju preko formule (4):

$$V_{LO} = 1.2V_S = 1.2 \sqrt{\frac{2W}{\rho AC_{L,max}}} \quad (4)$$

- V_{LO} – brzina polijetanja
- V_S – brzina prevlačenja

Sila potiska ovisi, osim o srednjoj brzini polijetanja, još o raspoloživoj snazi motora i učinkovitosti propelera prema formuli (5):

$$T = \frac{\eta P_A}{V_{SR}} \quad (5)$$

- η – učinkovitost propelera
- P_A – raspoloživa snaga motora
- V_{SR} – srednja brzina polijetanja

Sila otpora računa se preko formule (6):

$$D = \left(C_{D,0} + \phi \frac{C_{Lmax}^2}{\pi e A R} \right) \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A \quad (6)$$

- $C_{D,0}$ – sila otpora pri nultom uzgonu
- ϕ – utjecaj blizine tla

Zbog izračuna sile otpora potrebna nam je i informacija o utjecaju blizine tla preko formule (7):

$$\phi = \frac{(16 \frac{h}{b})^2}{1 + (16 \frac{h}{b})^2} \quad (7)$$

- h – visina krila iznad tla
- b – raspon krila

Na kraju još ostaje i sila uzgona koja se računa preko formule (8):

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A \quad (8)$$

Prvi korak izračuna potrebne duljine polijetanja za čisti (nekontaminirani) zrakoplov je izračunati brzinu polijetanja preko formule (4).

$$V_{LO} = 1.2V_S = 1.2 \sqrt{\frac{2W}{C_{L,max}\rho A}} = 1.2 \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 1043}{1.04 \times 1.225 \times 16.2}} = 37.78 \text{ m/s}$$

Pošto sila potiska zrakoplova ovisi o srednjoj brzini, potrebno ju je izračunati, a to radimo tako da umanjimo brzinu polijetanja za 30%.

$$V_{SR} = 0.7V_{LO} = 0.7 \times 37.78 = 26.45 \text{ m/s}$$

Dobiveni iznos srednje brzine ubacujemo u formulu (5) zajedno s raspoloživom snagom motora i učinkovitosti propelera Cessne 172N.

$$T = \frac{\eta P_A}{V_{SR}} = \frac{0.8 \times 119000}{26.45} = 3599.24 \text{ N}$$

Potrebno je još izračunati sile otpora i uzgona prema formulama (6) i (8), ali prije toga se treba izračunati utjecaj blizine tla preko formule (7) da bi imali sve informacije potrebne da bi jednadžba sile otpora (6) bila potpuna.

$$\phi = \frac{(16 \frac{h}{b})^2}{1 + (16 \frac{h}{b})^2} = \frac{(16 \frac{2}{11})^2}{1 + (16 \frac{2}{11})^2} = 0.89$$

$$D = \left(C_{D,0} + \phi \frac{C_{L,max}^2}{\pi e A R} \right) \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A =$$

$$= \left(0.035 + 0.89 \times \frac{1.04^2}{3.14 \times 0.75 \times 7.32} \right) \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 26.45^2 \times 16.2 = 630.6 \text{ N}$$

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A = 1.04 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 26.45^2 \times 16.2 = 7219.48 \text{ N}$$

$$s_{LO} = \frac{1.44 * W^2}{g \rho A C_{L,max} \{ T - [D + \mu(W - L)]_{sr} \}}$$

$$= \frac{1.44 \times (9.81 \times 1043)^2}{9.81 \times 1.225 \times 16.2 \times 1.04 \times \{ 3599.24 - [630.6 + 0.02(9.81 \times 1043 - 7219.48)] \}} \\ = 256.01 \text{ m}$$

Potrebna duljina za zatrčavanja Cessne 172N s aeroprofilom NACA 23012 u već navedenim uvjetima iznosi 256.01 m. Sada je još potrebno provesti proračun za potrebnu duljinu zatrčavanja kontaminiranih zrakoplova u istim uvjetima. Pretpostavljeno je da se masa zrakoplova uslijed velike kontaminacije grebenastim ledom povećala za 5%, odnosno sada je ukupna masa zrakoplova na polijetanju iznosi 1095.15 kg. Iz grafikona 3.18. i 3.19. vidljivo je da je $C_{L,max}$ aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom pao na 0.58. Što se tiče koeficijenta otpora aeroprofila on se povećava na vrijednost od 0.03 za razliku od prijašnje vrijednosti 0.01. Povećat će se onda i koeficijent otpora zrakoplova pri nultom uzgonu za 0.02 nakon kontaminacije iznosi 0.055.

Zbog promjene mase i maksimalnog uzgona promijenit će se i brzina polijetanja zrakoplova, a time i srednja brzina polijetanja.

$$V_{LO} = 1.2V_S = 1.2 \sqrt{\frac{2W}{C_{L,max}\rho A}} = 1.2 \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 1095.15}{0.58 \times 1.225 \times 16.2}} = 51.33 \text{ m/s}$$

U usporedbi s brzinom 37.78 m/s kod čistog zrakoplova vidljiv je značajan porast brzine polijetanja zbog porasta težine zrakoplova i smanjenja njegovog uzgona koji povećava brzinu pri kojoj dolazi do sloma uzgona zrakoplova. Potrebno je izračunati i srednju brzinu radi sile potiska.

$$V_{SR} = 0.7V_{LO} = 0.7 \times 51.33 = 35.93 \text{ m/s}$$

Dobivena brzina uvrštava se u formulu za potisak. Zbog veće srednje brzine u zatrčavanju zrakoplova, sila potiska će biti značajno manja.

$$T = \frac{\eta P_A}{V_{SR}} = \frac{0.8 \times 119000}{35.93} = 2649.6 \text{ N}$$

Što se tiče otpora, uvrštavamo drugačiji koeficijent otpora pri nultom uzgonu, maksimalni koeficijent uzgona i srednju brzinu. Ostali parametri ostaju isti jer se ne mijenjaju pri zaleđivanju. Sila otpora poraste za gotovo 300 N.

$$D = \left(C_{D,0} + \phi \frac{C_{L,max}^2}{\pi e AR} \right) \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A =$$

$$= \left(0.055 + 0.89 \times \frac{0.58^2}{3.14 \times 0.75 \times 7.32} \right) \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 35.93^2 \times 16.2 = 927 \text{ N}$$

Na uzgon utječe samo veća srednja brzina zatrčavanja čije ga povećanje zapravo poveća, ali za relativno mal iznos.

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A = 0.58 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 35.93^2 \times 16.2 = 7429.57 \text{ N}$$

Sve dobivene parametre za kontaminirani zrakoplov uvrštavamo u formulu za duljinu zatrčavanja.

$$s_{LO} = \frac{1.44 * W^2}{g \rho A C_{L,max} \{T - [D + \mu(W - L)]_{SR}\}}$$

$$= \frac{1.44 \times (9.81 \times 1095.15)^2}{9.81 \times 1.225 \times 16.2 \times 0.58 \times \{2649.6 - [927 + 0.02(9.81 \times 1095.15 - 7429.57)]\}}$$

$$= 888.7 \text{ m}$$

Vidljivo je da se duljina zatrčavanja zrakoplova kontaminiranog grebenastim ledom u polijetanju povećala 3,5 puta u odnosu na čisti zrakoplov. U stvarnosti je to jako velika promjena i u slučaju kratkih uzletno sletnih staza, postoji mogućnost da je spriječeno polijetanje zbog nedovoljne raspoložive duljine za uzlijetanje. Očigledno je da kontaminacija zrakoplova ledom ozbiljno šteti performansama zrakoplova u polijetanju.

4.2. Degradacija performansi zrakoplova u penjanju i spuštanju

U penjanju zrakoplova komponenta težine zrakoplova djeluje u istom smjeru i dodaje se otporu, što znači da suprotne sile na pravcu leta moraju biti jednake da bi brzina zrakoplova bila konstantna vidljivo na slici 13. To možemo prikazati jednadžbom (9):

$$T = D + W \sin \theta \quad (9)$$

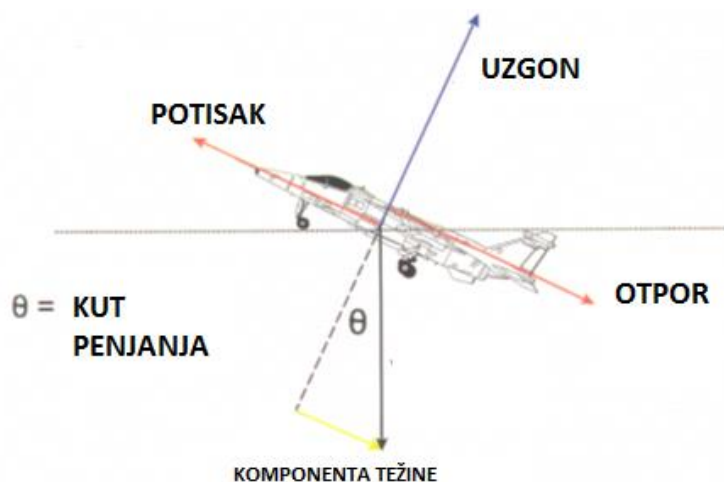
- θ – kut penjanja

Očigledno je da su akceleracija i brzina kontaminiranog zrakoplova manje pošto kontaminacija povećava i otpor i težinu zrakoplova. Masa i otpor još utječu i na gradijent penjanja (γ) što je vidljivo u formuli (10):

$$\sin \theta = \gamma = \frac{T - D}{W} \quad (10)$$

- γ – gradijent penjanja
- $T - D$ – višak potiska

Gradijent penjanja se povećava zajedno s viškom potiska, koji je manji pri većem otporu koji dolazi uz kontaminaciju. Povećanje mase zrakoplova povećava težinu i otpor što za dani potisak smanjuje gradijent penjanja. Povećana masa daje i veću brzinu najbolji kut penjanja (V_x). Masa zrakoplova povećava inducirani otpor iz razloga što je za veću težinu potrebna veća sila uzgona, a što je veći uzgon veći je i inducirani otpor. Povećava i otpor trenja zbog većih brzina potrebnih za isti napadni kut. [9]



Slika 13. Sile koje djeluju na zrakoplov u penjanju [9]

Brzina uzdizanja ovisi o višku snage i masi zrakoplova što je vidljivo iz formule (11):

$$R/C = \frac{VT - VD}{W} \quad (11)$$

- R/C – brzina uzdizanja
- VT – raspoloživa snaga
- VD – potrebna snaga

Pošto kontaminacija povećava otpor, veća je potrebna snaga, a pošto se raspoloživa snaga ne mijenja višak snage je manji što kao posljedicu ima i manju brzinu uzdizanja. Veća masa, kao i kod gradijenta penjanja, smanjuje brzinu uzdizanja, a povećava brzinu najbolje brzine uzdizanja (V_y). [9]

Plafon leta je visina na kojoj gradijent penjanja i brzina uzdizanja iznose nula, a pošto kontaminacija uzrokuje njihovo brže smanjenje može se zaključiti da će plafon leta biti niži za kontaminirani zrakoplov. Obrnuto je proporcionalan masi zrakoplova. [8]

U spuštanju komponenta težine je suprotno usmjerena od sile otpora, tako da se zbraja sa silom potiska ukoliko motori zrakoplova rade tijekom spuštanja što je prikazano na slici 14. Da bi se održavala konstantna brzina mora vrijediti (12):

$$D = T + W \sin \theta \quad (12)$$

Ili (13):

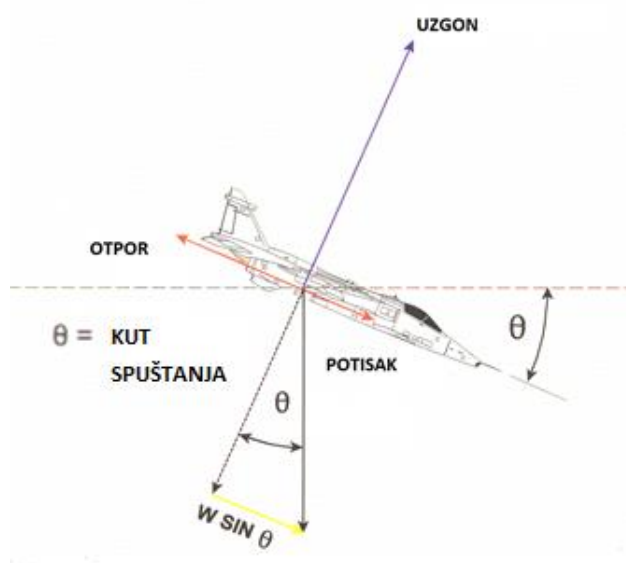
$$\sin \theta = \frac{D - T}{W} \quad (13)$$

U ovom slučaju, kut spuštavanja ovisi o višku otpora ($D - T$). Kut spuštavanja bit će veći ukoliko je otpor zrakoplova povećan uslijed kontaminacije pod uvjetom da je brzina konstantna.

Brzina spuštavanja ovisi o višku snage i masi zrakoplova što je vidljivo u jednadžbi (14):

$$R/Descent = \frac{VD - VT}{W} \quad (14)$$

- $R/Descent$ – brzina spuštavanja
- VD – potrebna snaga
- VT – raspoloživa snaga



Slika 14. Sile koje djeluju na zrakoplov u spuštanju [9]

U slučaju spuštavanja zrakoplova bez rada motora, odnosno bez sile potiska (jedrenje), na njega djeluju samo uzgon, otpor i težina, a jednadžba jedrenja zrakoplova postaje (15):

$$\tan \theta = \frac{D}{L} = \frac{C_D}{C_L} \quad (15)$$

Kut spuštavanja u jedrenju bit će najmanji, a dolet zrakoplova najveći, kada je omjer C_L/C_D maksimalan. Pošto kontaminacije smanjuje uzgon, a povećava otpor, kut spuštavanja bit će veći,

a dolet manji u usporedbi s „čistim“ zrakoplovom. Na najbolji kut spuštanja ne utječe masa. [9]

4.3. Degradacija performansi zrakoplova u krstarenju

Sile na zrakoplov u krstarenju su uzgon, otpor, težina i potisak. Izjednačene su tako da je potisak jednak otporu, a uzgon je jednak težini. Na taj način zrakoplov leti na konstantnoj visini i konstantnoj brzini. Pošto kontaminacija smanjuje uzgon, a povećava masu, potrebno je da se zrakoplov kreće većom brzinom da bi, kao prvo, nadoknadio gubitak uzgona uzrokovan kontaminacijom, a kao drugo, povećao silu uzgona da se izjednači s težinom zrakoplova. Zbog povećanja otpora dolazi i do smanjenja maksimalne brzine krstarenja zrakoplova³. [9]

Specifična potrošnja goriva zrakoplova (*sfc*) ovisi i o masi i otporu zrakoplova, koje kontaminacija povećavaju. Njihovim povećanjem se povećava i *sfc*, a time se dolet i istrajnost zrakoplova značajno smanjuju. Masa, osim što sama po sebi povećava otpor, povećava i potrebnu snagu što znači da je potrebna veća sila potiska za održavanje zrakoplova na istoj visini, čije povećanje zahtjeva veću potrošnju goriva. [9]

4.4. Degradacija performansi zrakoplova na slijetanju

Slično polijetanju, jedan od najbitnijih parametara slijetanja je potrebna duljina zaustavljanja (LDR). Razlika između usmjerenja sila koje djeluju na zrakoplova u polijetanju i slijetanju je da u slučaju polijetanja sile potiska nema osim ako motori imaju sposobnost obrnutog potiska. Tada je sila potiska usmjerena u istom smjeru kao sila trenja i otpora. U slijetanju zrakoplov pokušava usporiti do potpunog stajanja, odnosno sile trenja, otpora i eventualno sila potiska, nadjačavaju silu inercije zrakoplova. Sila inercije je veća što je veća i masa zrakoplova, što znači da je teže zaustaviti zrakoplov pri slijetanju te da će kontaminirani zrakoplov imati veću potrebnu duljinu zaustavljanja od čistog. Masa povećava i brzinu prevlačenja zrakoplova što znači da zrakoplov mora sletjeti s većom brzinom koja povećava i potrebnu duljinu slijetanja. S druge strane sila trenja se povećava zajedno s masom što je već objašnjeno formulom (1), tako da masa ima i koristan utjecaj na potrebnu duljinu slijetanja, iako je u usporedbi s ostalima zanemariv. Povećanje otpora uzrokovano kontaminacijom ima pozitivan utjecaj na potrebnu duljinu slijetanja, odnosno smanjuje ju. [9]

³ Brzina zrakoplova postignuta kada se izjednače maksimalni raspoloživi potisak i otpor.

Detaljniji opis degradacije performansi kontaminiranog zrakoplova u slijetanju može biti dobiven preko brojčanog proračuna duljine zaustavljanja zrakoplova.

$$s_L = \frac{1.69 W^2}{g \rho A C_{L,max} [D + \mu (W - L)]_{0.7V_T}} \quad (16)$$

- s_L – potrebna duljina slijetanja,
- $[D + \mu (W - L)]_{0.7V_T}$ – prosječna vrijednost sile usporavanja

Za izračun duljine zaustavljanja potrebna je i brzina slijetanja koja se računa preko formule (17):

$$V_T = 1.3V_S = 1.3 \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,max}}} \quad (17)$$

Srednja brzina slijetanja se računa kao 0.7 puta manja brzina od brzine slijetanja, a sile potiska i uzgona iznose 0 pošto je riječ o slijetanju, a $C_{L,max}$ će biti povećan zbog izvučenih zakrilaca do 1.54. Koeficijent trenja se uzima 0.4 zbog kočenja zrakoplova. Slijedi proračun duljine zaustavljanja na slijetanju nekontaminiranog zrakoplova.

$$V_T = 1.3V_S = 1.3 \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,max}}} = 1.3 \times \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 1043}{1.225 \times 16.2 \times 1.54}} = 33.64 \text{ m/s}$$

Dalje se računa srednja brzina slijetanja da bi bilo moguće dobiti informaciju o sili otpora zrakoplova.

$$V_{SR} = 0.7V_T = 0.7 \times 33.64 = 23.55 \text{ m/s}$$

$$D = C_{D,0} \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A = 0.035 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 23.55^2 \times 16.2 = 192.61 \text{ N}$$

Naposljetku treba sve dobivene vrijednosti u formulu (16).

$$s_L = \frac{1.69 W^2}{g \rho A C_{L,max} [D + \mu (W - L)]_{0.7V_T}} =$$

$$= \frac{1.69 \times (9.81 \times 1043)^2}{9.81 \times 1.225 \times 16.2 \times 1.54 \times [192.61 + 0.4(9.81 \times 1043 - 0)]} = 137.85 \text{ m}$$

Tu duljinu treba usporediti s duljinom slijetanja kontaminiranog zrakoplova koja se dobije na isti način ali s drugačijim W , $C_{L,max}$ i $C_{D,0}$. Uzete su iste vrijednosti kao i kod izračuna na polijetanju kontaminiranog zrakoplova. Pretpostavljeno je da se granični sloj iza grebena spaja s gornjakom aeroprofila i postoji strujanje zraka preko zakrilaca i još uvijek je $C_{L,max}$ povećan za 0.5 i iznosi 1.08.

$$V_T = 1.3V_S = 1.3 \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,max}}} = 1.3 \times \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 1095.15}{1.225 \times 16.2 \times 1.08}} = 41.16 \text{ m/s}$$

Radi povećanja mase i smanjenja koeficijenta uzgona uslijed kontaminacije površine zrakoplova, brzina sloma uzgona bit će veća što zahtjeva i veću brzinu slijetanja. Dalje se računaju još srednja brzina slijetanja i sila otpora da bi se mogla proračunati duljine slijetanja zrakoplova.

$$V_{SR} = 0.7V_T = 0.7 \times 41.16 = 28.81 \text{ m/s}$$

$$D = C_{D,0} \frac{1}{2} \rho V_{SR}^2 A = 0.055 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 28.81^2 \times 16.2 = 507.33 \text{ N}$$

$$s_L = \frac{1.69 W^2}{g \rho A C_{L,max} [D + \mu (W - L)]_{0.7V_T}} =$$

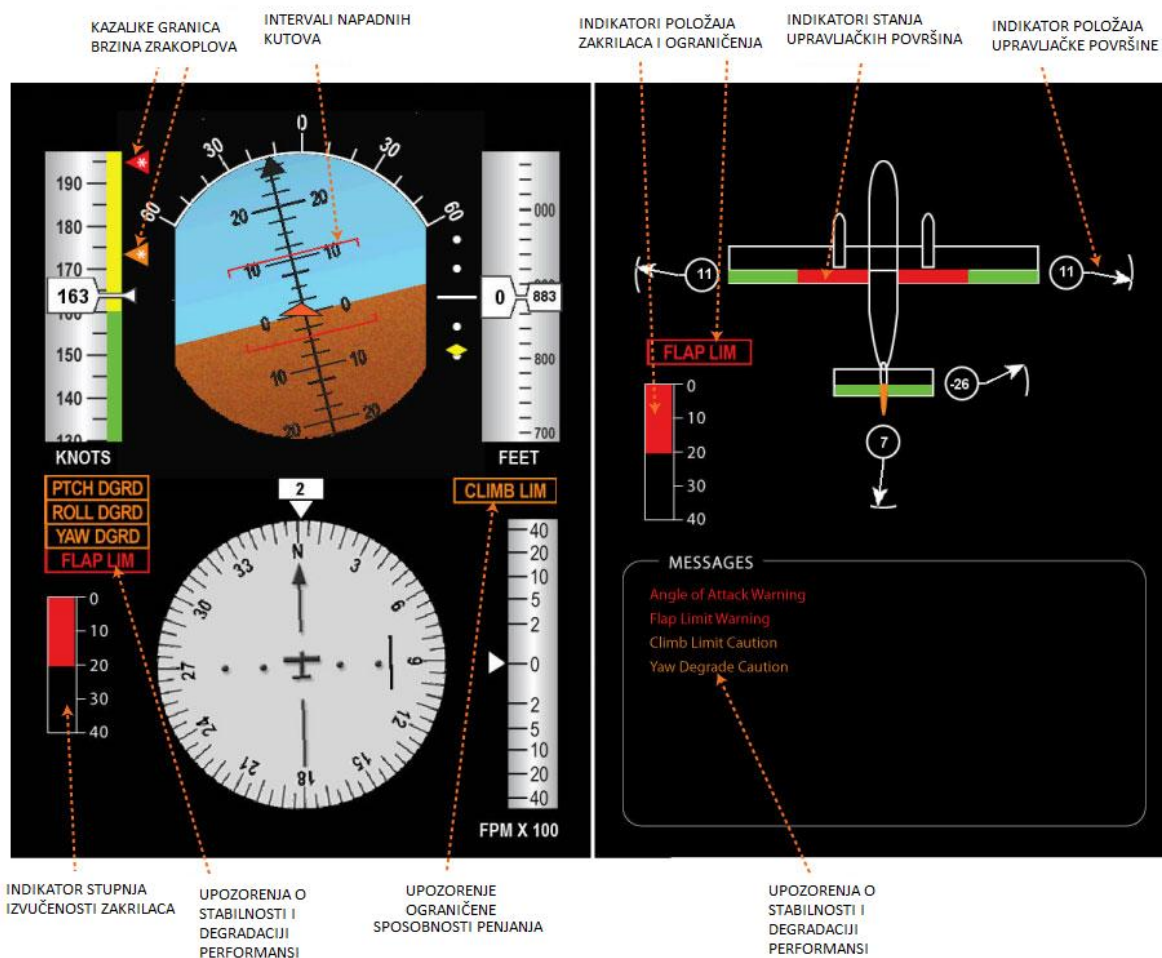
$$= \frac{1.69 \times (9.81 \times 1095.15)^2}{9.81 \times 1.225 \times 16.2 \times 1.08 \times [507.33 + 0.4(9.81 \times 1095.15 - 0)]} = 193.09 \text{ m}$$

Duljina potrebna da se kontaminirani zrakoplov zaustavi na slijetanju je veća od one kod čistog zrakoplova iako ne drastično veća. Očigledno je da povećanje otpora zrakoplova uslijed kontaminacije smanjuje duljinu slijetanja, ali je utjecaj mase prevelik na usporavanje zrakoplova.

5. SUSTAV ICEPro

Kontaminacija zrakoplova ledom tijekom leta je oduvijek bila velika prijetnja sigurnog provođenja zračnog prometa zbog svih štetnih utjecaja koje ima na njegove performanse, stabilnost i upravljivost. Bitno je imati na umu da se 9% svih smrtonosnih nesreća dogodi ulaskom zrakoplova u uvjete zaleđivanja. „Icing Contamination Envelope Protection“, ili kraće ICEPro, je sustav koji u stvarnom vremenu obrađuje mjerenja stanja površine zrakoplova i informacije o kontrolama zrakoplova, procjenjuje stabilnost i upravljivost uz pomoć baze podataka o različitim parametrima zrakoplova i pruža pilotima vizualne i auditivne indikacije kako bi izbjegli gubitak kontrole nad zrakoplovom i štetne utjecaje nastale uslijed kontaminacije površine zrakoplova u letu. Dizajniran je i implementiran da bi se otkrile degradacije performansi zrakoplova uzrokovane kontaminacijom njegove površine. [11]

Primjer implementacije ICEPro sustava u „*Primary Flight Display*“ (PFD) zrakoplova vidljiv je na slici 15. On daje savjete, upozorenja i signale za indikaciju učinkovitosti kontrola zrakoplova, te prikazuje granice brzina, napadnih kutova (kutovi propinjanja i poniranja) i pozicija zakrilaca. Kazaljke na prikazniku brzine predviđaju najviše i najniže granice brzina zrakoplova za trenutnu konfiguraciju i izmjerenim uvjetima zaleđivanja. Intervali napadnih kutova predstavljaju maksimalne kutove propinjanja i poniranja koji su definirani s kritičnim napadnim kutom za trenutnu konfiguraciju i kontaminaciju zrakoplova, a služe za izbjegavanje prevlačenja uzgonskih površina. Indikacija o poziciji zakrilaca koja savjetuje pilota o stanju zrakoplova pri trenutnom stupnju zakrilaca što je bitno jer je letenje malim brzinama s izvučenim zakrilcima na prilazu za slijetanje najopasnija faza letenja zbog gubitka stabilnosti i učinkovitosti kontrola. Ukoliko sustav prepozna degradaciju stabilnosti, indikator mijenja svoju boju u žutu i upozorava na opasnost daljnjeg izvlačenja zakrilaca. U slučaju da se stanje pogorša indikator postaje crven što upozorava pilota da uvuče zakrilca do kraja. Indikatori stabilnosti i učinkovitosti kontrola informiraju pilota o štetnom utjecaju kontaminacije na propinjanje, valjanje i skretanje zrakoplova. Postoji i upozorenje o ograničenim performansama zrakoplova u penjanju koje znači da se brzina uzdizanja, za trenutnu konfiguraciju s jednim motorom, smanjila ispod 100 stopa po minuti. [11]



Slika 15. Implementacija ICEPro sustava u PFD DeHavilland DHC-6 Twin Ottera [11]

Da bi se dobila dosljedna i pouzdana aproksimacija degradacije performansi i narušavanja stabilnosti uslijed kontaminacije zrakoplova potrebne su od prije poznatih informacija i podataka o zrakoplovu dok je u čistom stanju, bez kontaminacije i u najgorem kontaminiranom stanju. Ti podaci se poslije uspoređuju s izmjerenim podacima u stvarnom vremenu o aerodinamičkim karakteristikama i naposljetku se izračunavaju predviđanja o već navedenim parametrima operiranja zrakoplova.

6. ZAKLJUČAK

Do kontaminacije površine zrakoplova ledom može doći i u zraku i na tlu, sve dok su prisutni uvjeti zaleđivanja, odnosno vlaga i niske temperature. Postoji više oblika leda po strukturi i obliku nakupine na površini zrakoplova. Da bi izbjegli zaleđivanje zrakoplova potrebno je izbjegavati uvjete zaleđivanja te koristiti pristupne sustave za odleđivanje i zaštitu protiv zaleđivanja zrakoplova. Postoje 4 glavna geometrijska tipa leda koji se mogu akumulirati na uzgonskim površinama zrakoplova: hrapavi, rogljasti, nizstruji i grebenasti led, iako se u stvarnosti rijetko dogodi da će nakupina leda na površini zrakoplova biti striktno jednog tipa. Hrapavost nastaje u početnim fazama nakupljanja leda blizu prednjeg brida, a povećava otpor i smanjuje maksimalni uzgon kontaminiranog aeroprofila. To je posljedica transformacije graničnog sloja u turbulentni i njegove separacije od površine aeroprofila. Rogljasti led također nastaje u području blizine prednjeg brida, ali kod duže akumulacije leda. Njegov utjecaj se bazira na nestabilnom cirkulacijskom mjehuru koji nastaje kao posljedica separacije graničnog sloja na vrhu roga i povratnog strujanja zraka. Nizstrujni led ima najmanji utjecaj na aerodinamičke karakteristike zrakoplova zbog svog konformnog oblika u odnosu na strujanje zraka preko uzgonskih površina. Način utjecanja na aerodinamiku je isti kao i kod rogljastog leda iako, pošto je puno tanji i niži oblik leda, ne stvara cirkulacijske mjehure ni približne veličine. Grebenasti led najviše utječe na aerodinamičke karakteristike, a nastaje duž raspona nizstrujno od ostalih tipova leda, najčešće kao posljedica rada sustava za odleđivanje i zaštitu od zaleđivanja. Također stvara cirkulacijski mjehur separacijom graničnog sloja od površine aeroprofila, ali je poseban u tome što i ispred grebena dolazi do separacije. Svojim položajem na aeroprofilu narušava cijelu raspodjelu tlaka, a time oštećuje stvaranje uzgona.

Svaka štetna promjena aerodinamičkih karakteristika uzrokovana kontaminacijom ima kao posljedicu degradaciju performansi zrakoplova u svim fazama leta: polijetanje, penjanje, krstarenje, spuštanje i slijetanje. Kontaminacije površine zrakoplova povećava njegovu masu, ograničava stvaranje uzgona, smanjuje brzine i kutove pri kojima dolazi do sloma uzgona i još povećava otpor. Degradacije performansi uslijed kontaminacije mogu biti i značajno opasne ukoliko se o njima ne vodi računa i unaprijed ne provede proračun kao što je napravljeno u četvrtom poglavlju. Kao pomoć pri upravljanju zrakoplova uslijed kontaminacije može se koristiti ICEPro sustav koji daje vizualne indikacije pilotu o degradaciji performansi i narušenoj stabilnosti zrakoplova.

LITERATURA

- [1] Aircraft Icing Handbook, Civil Aviation Authority, https://www.caa.govt.nz/safety_info/GAPs/Aircraft_Icing_Handbook.pdf (preuzeto 30.5.2017.)
- [2] FAA, Pilot Guide: Flight in Icing Conditions, https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_91-74B.pdf (preuzeto 21.7.2017.)
- [3] International Civil Aviation Organization, Manual of Aircraft Ground De - icing/Anti - icing Operations, Doc 9640 - AN/940, Second edition , Montreal, 2000.
- [4] Boeing, Safe Winter Operations, http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2010_q4/2 (pristupljeno 21.7.2017.)
- [5] Frank T. Lynch, Abdollah Khodadoust, Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics, Aerospace Engineering, College of Engineering, University of Illinois, 2003.
- [6] M.B. Bragg, A.P. Broeren, Iced-Airfoil Aerodynamics, , and L.A. Blumenthal Aerospace Engineering, College of Engineering, University of Illinois, 2005.
- [7] Petar Kesić, Osnove aerodinamike, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [8] Sohrab Gholamhosein Pouryoussefi, Masoud Mirzaei, Mohammad-Mahdi Nazemi, Mojtaba Fouladi, Alireza Doostmahmoudi, Experimental study of ice accretion effects on aerodynamic performance of an NACA 23012 airfoil, Department of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technolog, Iran, 2015.
- [9] Jaa Atpl Book 6 - Oxford Aviation Jeppesen - Mass & Balance And Perfomance, Jeppesen GmbH, Frankfurt, Germany, 2001.
- [10] Cessna Aircraft Company, Cessna 172N Skyhawk Pilot's Operating Handbook, Wichita, Kansas, SAD, 1977.
- [11] David R. Gingras, Billy Barnhart, Envelope Protection for In-Flight Ice Contamination, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, 2009.
- [12] <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0184.shtml> (pristupljeno 15.8.2017.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Potpuna kontaminacija površine zrakoplova ledom.....	7
Slika 2. Nanošenje presvlake fluida za zaštitu od zaleđivanja na površinu zrakoplova.....	10
Slika 3. Odnos između geometrijskog oblika četiri tipa leda i utjecaja na aerodinamičke karakteristike aeroprofila.....	13
Slika 4. Značajke hrapavosti leda.	14
Slika 5. Strujanje u graničnom sloju oko samostalnog elementa hrapavosti pri različitim Reynoldsovim brojevima.....	16
Slika 6. Prikaz intenziteta turbulencije kod prestrujavanja zraka preko gornjake čistog i kontaminiranog aeroprofila.....	17
Slika 7. Rogljasti led.....	18
Slika 8. Separacija graničnog sloja i nastajanje cirkulacijskog vrtloga.....	19
Slika 9. Aeroprofil kontaminiran nizstrujnim ledom.....	23
Slika 10. Rasponski grebenasti led nastao kao posljedica pothlađenih kapljica.....	28
Slika 11. Strujanje zraka oko aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom.....	30
Slika 12. Sile koje djeluju na zrakoplov na polijetanju.....	38
Slika 13. Sile koje djeluju na zrakoplov u penjanju.....	44
Slika 14. Sile koje djeluju na zrakoplov u spuštanju.....	45
Slika 15. Implementacija ICEPro sustava u PFD DeHavilland DHC-6 Twin Ottera.....	50

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 3.1. Promjena maksimalnog koeficijenta uzgona kontaminiranog u odnosu na visinu i gustoću hrapavosti.....	17
Grafikon 3.2. Ovisnost $C_{l,max}$ o visine hrapavosti, udjela za zahvaćenosti površine hrapavošću u odnosu na tetivu aeroprofila i pozicije hrapavosti leda na $C_{l,max}$	18
Grafikon 3.3. Promjena veličine cirkulacijskog mjehura pri različitim napadnim kutovima za aeroprofil kontaminiran rogljastim ledom.....	20
Grafikon 3.4. Raspodjela tlaka pri $\alpha = 4^\circ$ čistog i kontaminiranog aeroprofila.....	21
Grafikon 3.5. Utjecaj radijusa vrha roga na koeficijent uzgona aeroprofila pri različitim napadnim kutovima.....	22
Grafikon 3.6. Utjecaj promjene visine roga (k/c) na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima.....	22
Grafikon 3.7. Utjecaj položaja roga na aeroprofilu (s/c) na koeficijent uzgona (C_l) pri različitim napadnim kutovima.....	23
Grafikon 3.8. Utjecaj nizstrujnog leda na koeficijent uzgona (C_l) i koeficijent momenta (C_m) aeroprofila pri različitim napadnim kutovima.....	25
Grafikon 3.9. Raspodjela tlaka aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom pri različitim napadnim kutovima.....	25
Grafikon 3.10. srednje nizstrujne brzine (u/U_∞) na gornjaci aeroprofila kontaminiranog nizstrujnim ledom.....	26
Grafikon 3.11. Raspodjela tlaka čistog aeroprofila i aeroprofila kontaminiranih nizstrujnim i rogljastim ledom pri $\alpha = 6^\circ$	27
Grafikon 3.12. Utjecaj promjene visine roga (k/c) na C_l i C_m aeroprofila pri različitim napadnim kutovima dok je položaj roga $x/c = 0$	28
Grafikon 3.13. Dvodimenzionalni oblik grebenastog leda na aeroprofilu.....	29
Grafikon 3.14. Stanje graničnog sloja na gornjaci aeroprofila kontaminiranog grebenastim ledom.....	31

Grafikon 3.15. Raspodjela tlaka aeroprofila kontaminiranih grebenastim ledom i čistog aeroprofila NACA 23012m.....	32
Grafikon 3.16. Utjecaj različitih oblika grebena na koeficijent uzgona aeroprofila pri različitim napadnim kutovima.....	33
Grafikon 3.17. Utjecaj različitih veličina rupa u grebenima duž raspona na C_l i C_m	34
Grafikon 3.18. Usporedba promjena koeficijenta uzgona kontaminiranog aeroprofila NACA 23012 pri različitim kontaminacijama ledom.....	35
Grafikon 3.19. Usporedba promjena koeficijenta otpora kontaminiranog aeroprofila NACA 23012 pri različitim kontaminacijama ledom.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine rizika od zaleđivanja površine zrakoplova pri različitim temperaturama i u različitim oblacima.....	4
---	---



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako 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 **Utjecaj kontaminacije površine zrakoplova na aerodinamičke**
karakteristike

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 5.9.2017 _____

Student/ica: _____

(potpis)