

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

ICING - METEOROLOŠKI UVJETI
ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA
DIPLOMSKI RAD

autor: Vesna Sarajčić

mentor: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2010.

Zahvaljujem mentoru
prof. dr. sc. Branku Grisogonu
na savjetima i podršci, i Dunji Drvar, dipl. ing.
na pomoći pri izradi ovog rada.

SADRŽAJ

1. OPĆENITO O ZALEĐIVANJU ZRAKOPLOVA
2. VRSTE I INTENZITET ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA
 - 2.1. VRSTE ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA
 - 2.2. INTENZITET ZALEĐIVANJA
 - 2.2.1. ZRAKOPLOVNE DEFINICIJE INTENZITETA
 - 2.2.2. METEOROLOŠKE DEFINICIJE INTENZITETA
3. FIZIKALNI PROCESI ODGOVORNI ZA ZALEĐIVANJE ZRAKOPLOVA
 - 3.1. FAZNI PRIJELAZI VODE
 - 3.2. SADRŽAJ TEKUĆE VODE
 - 3.3. VELIČINA OBLAČNIH KAPI
 - 3.4. FIZIKALNI MEHANIZMI NASTANKA PREHLADNIH VELIKIH KAPI
 - 3.4.1. PROCES TOPLOG SLOJA
 - 3.4.2. KOLIZIJA-KOALESCENCIJA

4. SINOPTIČKO–SKALNI UVJETI U KOJIMA SE JAVLJA ZALEĐIVANJE,
SEKTORI CIKLONE I ZALEĐIVANJE

4.1. TOPLI SEKTOR CIKLONE

4.2. SEKTOR NADILAŽENJA (OVERRUNNING)

4.3. SEKTOR HLADNE ADVEKCIJE

4.4. ZALEĐIVANJE IZA PRIZEMNOG CENTRA NISKOG TLAKA

4.5. ZALEĐIVANJE U FRONTAMA OKLUZIJE

5. MEZOSKALNI UVJETI ZALEĐIVANJA

5.1. OROGENETIČKI UJECAJ NA ZALEĐIVANJE

5.2. ZAFRONTALNO OROGENETSKO DIZANJE I SMICANJE

6. DIJAGNOZA METEOROLOŠKIH UVJETA ZALEĐIVANJA

6.1. VISINSKE KARTE POLJA VLAŽNOSTI I TEMPERATURE

6.2. PRIZEMNA MOTRENJA

6.3. UPOTREBA PODATAKA DOBIVENIH SONDAŽOM I VJETRENIM
PRESJEČNICIMA

6.3.1. PROCJENA OBLAČNIH SLOJEVA

6.3.2. ODREĐIVANJE FAZE OBLAKA

6.3.3. ZASIJAVANJE LEDOM (ICE SEEDING), INJENJE (RIMING)

6.3.4. PREHLADNA VODA U NESTABILNOJ ATMOSFERI

6.4. SATELITSKE SLIKE

6.5. KORIŠTENJE RADARSKIH SLIKA ZA OTKRIVANJE PROCESA
TOPLOG SLOJA

7. PROGNOZA METEOROLOŠKIH UVJETA ZALEĐIVANJA

7.1. CIP - CURRENT ICING POTENTIAL

7.2. FIP - FORECAST ICING POTENTIAL

8. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA NAD HRVATSKOM

8.1. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA 19.01.05.

8.2. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA 11.04.05.

9. ZAKLJUČNA DISKUSIJA I REZULTATI

10. LITERATURA

POPIS KRATICA

AMOS	Automatska meteorološka postaja, eng. <i>Automated Meteorological Observing System</i>
ASOS	Automatska prizemna meteorološka postaja, eng. <i>Automated Surface Observing System</i>
AWOS	Automatska meteorološka postaja, eng. <i>Automated Weather Observing System</i>
CIP	Potencijal za zaleđivanje, eng. <i>Current Icing Potential</i>
FAA	Federalna zrakoplovna uprava, eng. <i>Federal Aviation Administration</i>
FIP	Prognozirani potencijal za zaleđivanje, eng. <i>Forecast Icing Potential</i>
HRID	Izentropski model visoke rezolucije, eng. <i>High Resolution Isentropic Diagnosis</i>
LCL	kondenzacijska razina dizanja, eng. <i>Lifting Condensation Level</i>
LWC	sadržaj tekuće vode, eng. <i>Liquid Water Content</i>
METAR	Meteorološko aerodromsko izvješće, eng. <i>METeorological Aerodrome Report</i>
NCAR	Nacionalni centar za atmosferska istraživanja, eng. <i>National Center for Atmospheric Research</i>

NEXRAD	radar nove generacije (1988.), eng. <i>NEXt generation weather RADar</i>
PIREP	pilotsko meteorološko izvješće, eng. <i>PIlot REPort</i>
QPF	kvantitativna prognoza oborine, eng. <i>Quantitative Precipitation Forecast</i>
RUC	mezoskalni model, eng. <i>Rapid Update Cycle</i>
SLD	prehladne velike kapi, eng. <i>Supercooled Liquid Droplets</i>
SN	slab snijeg, eng. <i>light SNow</i>
WISP	projekt koji proučava zaleđivanje u hladnom dijelu godine, eng. <i>Winter Icing and Storms Project</i>

1. OPĆENITO O ZALEĐIVANJU ZRAKOPLOVA

DEFINICIJA

Zaleđivanje je nakupljanje leda na nekom predmetu uzrokovano sudaranjem i zaleđivanjem tekućih (najčešće prehladnih) hidrometeora ili procesom depozicije u kojem se vodena para taloži u ledene kristaliće bez prolaska kroz tekuću fazu. Razlikujemo zaleđivanje prozirnim ledom, neprozirnim ledom i miješanim ledom. U zrakoplovnoj meteorologiji zaleđivanjem se smatra pojava nakupljanja leda na površinama zrakoplova, te na upravljačkim, kontrolnim i pogonskim sklopovima.

OPASNOSTI ZA ZRAKOPLOVSTVO

Zaleđivanje je jedna od najopasnijih pojava tijekom leta zrakoplova. Narušava letačka svojstva, aerodinamiku i mehaniku leta zrakoplova, javljaju se preopterećenja i razne druge popratne pojave. Zaleđivanje se javlja na krilima, repu, elisi (mijenja oblik profila elise), trupu, usisnim kanalima motora, remeti rad instrumenata (otvori za dinamički i statički tlak zraka: za brzinomjer – Pitot-ova cijev, za visinomjer i variometar), na antenama i drugdje. Prilikom zaleđivanja raste otpor aviona, pada uzgon, raste težina, snaga motora slabi (mogući su prekidi rada), smanjuje se brzina, narušena je stabilnost, vidljivost kroz vjetrobransko staklo se smanjuje, javljaju se mehanička oštećenja, otežava se radio veza i druge smetnje.

2. VRSTE I INTENZITET ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA

2.1. VRSTE ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA

PROZIRNI LED

Prozirni led nastaje kada prehladne kapi (u oblaku ili u oborinama) dolaze u kontakt s površinom zrakoplova, ostaju razmjerno dugo u tekućem stanju (zbog oslobađanja latentne topline) te se razlijevaju po površini prije zaleđivanja u prozirni i čvrsti sloj leda. Spori proces zaleđivanja vode isključuje hvatanje mjehurića zraka, te je gustoća leda jednolika i velika te iznosi $0.8 - 1.0 \text{ g/cm}^3$. Ova vrsta leda je najopasnija za zrakoplove, između ostalog zato što se teško skida. Prozirni led može nastati na površini zrakoplova nakon što se zrakoplov spustio s velikom količinom goriva u spremnicima u krilu. Gorivo održava stjenke spremnika na temperaturi ispod $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ako je temperatura oborina blizu $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, te se površine mogu prekriti prozirnim ledom. Prozirni led tipično nastaje iznad $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a većina pilotskih izvješća javljena je na temperaturama od $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do tik ispod $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Uvjeti za zaleđivanje prozirnim ledom se češće javljaju u područjima s velikim sadržajem tekuće vode i velikim kapima (Schultz i Politovich, 1992), što oboje otežava odvođenje latentne topline zaleđivanja od kapljice koja se zaleđuje. Sadržaj tekuće vode (eng. *Liquid Water Content*, LWC) je količina vode u tekućem stanju u jediničnom obujmu zraka. Izražava se u gramima po kubičnom metru (g/m^3) ili po kilogramu (g/kg) zraka.

Zaleđivanje prozirnim ledom je opasnija vrsta zaleđivanja iz nekoliko razloga. Prozirni led je sklon formiranju rogova na prednjem dijelu krila. Ovakva nakupina jako remeti tok zraka oko krila i uzrokuje znatno veće područje turbulentnog toka od onog koje nastaje kao posljedica nakupljanja neprozirnog leda. Kako je ovaj led proziran i teško ga je zamijetiti, pilot ga često neće vidjeti dok se ne nakupi veća količina istoga. Teško ga je odstraniti, jer se proteže preko površine krila koja je van dosega uređaja za odleđivanje. Tvrd je i čvrsto prianja uz površinu zrakoplova.

Posebno veliku opasnost za zrakoplovstvo predstavlja prozirni led koji nastaje zaleđivanjem velikih prehladnih kapi (velike kapi su po definiciji one dijametra većeg od 40 μm). Do ove vrste zaleđivanja dolazi u prehladnoj oborini (ledenoj kiši, ledenoj rosulji) gdje se velike prehladne kapi brzo nakupljaju i teku preko krila. Velike kapi se zaleđuju u grubu grudastu strukturu koja jako ometa tok zraka i kvari aerodinamičnost zrakoplova. One teku duž aerodinamičkog profila prije nego što se potpuno zalede i time zaleđuju veću površinu nego manje kapljice. Tako se led nakuplja na površinama koje se nalaze daleko izvan dosega uređaja za odleđivanje. Čak i mala količina leda na donjoj i gornjoj površini krila može ozbiljno promijeniti aerodinamička svojstva krila.

MIJEŠANI LED

Miješani led je kombinacija prozirnog i neprozirnog leda. To je grubi, neravni konglomerat koji nastaje kada se zbog varijacija u sadržaju tekuće vode, temperaturi i veličini kapljica na maloj meteorološkoj prostornoj skali (desetci kilometara ili manje) na zrakoplovu akumuliraju prozirni i neprozirni led u slojevima. Također može nastati kada su prehladne kapljice pomiješane sa snijegom, zrnima leda ili sitnom tučom. Miješani je led sličan prozirnome po tome što se može protezati preko velike površine krila zrakoplova i što se teže odstranjuje nego neprozirni led. Temperature koje pogoduju zaleđivanju miješanim ledom su nešto više od očekivanih za neprozirni led ($> -15\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Zaleđivanje miješanim ledom za zrakoplov predstavlja sličnu opasnost kao i prozirni led. Miješani led se, kao i prozirni, može protezati preko dijelova krila na koje ne utječe uređaj za odleđivanje. Led koji se nakuplja na stražnjem dijelu krila uzrokuje odvajanje tokova zraka i turbulenciju na velikoj površini krila, što smanjuje efikasnost krila za održavanje zrakoplova u letu.

NEPROZIRNI LED

Neprozirni led nastaje kada se veliki broj malenih prehladnih kapljica trenutno zamrzava pri kontaktu s prednjim rubovima zrakoplova. Naglim zamrzavanjem mjehurići zraka ostaju zarobljeni te tako nastaje zrnasto-šupljikavi, krhki, neprozirni sloj mliječno bijelog leda male gustoće ($0.5 - 0.8 \text{ g/cm}^3$). Lako se lomi i otklanja s površine. Nakuplja se u smjeru zračnog toka na prednjim površinama krila i drugim izloženim dijelovima zrakoplova. Nakupljanju neprozirnog leda pogoduju niže temperature, niža vodnost i manje kapljice koje omogućavaju da latentna toplina koja nastaje pri zamrzavanju bude brzo odvedena od kapljice. Na temperaturama nižim od $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ neprozirni led ima veću učestalost pojavljivanja nego druge vrste leda.

Iako je neprozirni led najčešća vrsta zaleđivanja, smatra se najmanje opasnim, jer njegov oblik i tekstura ne ometaju bitno tok zraka oko krila, a zbog krhkosti ga je lako odstraniti. Zbog tendencije da se nakuplja na prednjem dijelu krila, lako ga je odstraniti uređajima za odleđivanje, međutim za zrakoplove koji nemaju uređaje za odleđivanje neprozirni led predstavlja opasnost.

2.2. INTENZITET ZALEĐIVANJA

Potencijal za zaleđivanje određenog zrakoplova ovisan je, osim o meteorološkim uvjetima, i o vrsti i dizajnu zrakoplova, visini leta i brzini. Komercijalni zrakoplovi na mlazni pogon su najmanje osjetljivi na zaleđivanje zbog svoje brzine, boljih uređaja za odleđivanje i činjenice da lete na većim visinama gdje su temperature niže od tipičnog raspona pogodnog za zaleđivanje (npr. lete gdje su $t < -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Zrakoplovi koji se koriste za obuku osjetljiviji su, jer lete manjim brzinama i na manjim visinama gdje su zaleđivanja češća.

2.2.1. ZRAKOPLOVNE DEFINICIJE INTENZITETA

Zrakoplovne definicije intenziteta zaleđivanja određene su kako bi izrada pilotskih izvješća u letu bila što jednostavnija. Intenzitet je kategoriziran u odnosu na brzinu nakupljanja, djelotvornost raspoložive opreme za odleđivanje i postupke koje pilot mora poduzimati kako bi izbjegao, ili se borio protiv daljnjeg nakupljanja leda. Jačina zaleđivanja odgovara brzini taloženja leda, odnosno debljini sloja leda nastalog u jedinici vremena. Obično se iskazuje u mm/min, a uvjetovana je meteorološkim i aerodinamičkim čimbenicima. U oblacima je brzina taloženja između 0.1 i 6 mm/min, a doseže i do 25 mm/min. Podjele intenziteta zaleđivanja su okvirne jer učinak zaleđivanja ovisi i o tipu, i o brzini leta zrakoplova. U zrakoplovstvu se zaleđivanje dijeli prema intenzitetu na kategorije: tragovi, slabo, umjereno i jako zaleđivanje. U tablici 2.1. prikazane su kategorije u ovisnosti o brzinama nakupljanja.

TRAGOVI

Brzina nakupljanja je malo veća od brzine gubljenja leda sublimacijom. Ova kategorija zaleđivanja nije opasna. Nema potrebe za aktiviranjem uređaja za odleđivanje ili za mijenjanjem visine leta ako ovakvi uvjeti traju manje od sat vremena.

SLABO

Brzina nakupljanja leda je takva da predstavlja problem ako zrakoplov ostaje u ovim uvjetima duže od jednog sata. Nužna je povremena upotreba uređaja za odleđivanje kako bi se odstranio nakupljeni led ili da bi se spriječilo njegovo nakupljanje. Ako je izgledno da će let u ovakvim uvjetima trajati duže od jednog sata, treba promijeniti smjer ili visinu leta.

UMJERENO

Brzina nakupljanja leda je tako velika da čak i kratak boravak u ovakvim uvjetima može biti opasan. Neophodna je upotreba uređaja za odleđivanje, a često je potrebna i promjena smjera ili visine.

JAKO

Zaleđivanje je jako kad god je brzina nakupljanja takva da upotrebom uređaja za odleđivanje nije moguće kontrolirati ili smanjiti opasnost. Obično je potrebna hitna promjena smjera i/ili visine.

Tablica 2.1. Zrakoplovne definicije intenziteta zaleđivanja

INTENZITET	TALOŽENJE mm/min	OPIS
slabo	0.01 - 0.5	nije potrebna promjena kursa ili visine leta
umjereno	0.5 - 1.0	poželjna je promjena kursa ili visine leta
jako	> 1.0	neophodna je promjena kursa i/ili visine leta

2.2.2. METEOROLOŠKE DEFINICIJE INTENZITETA

Definiranje stupnjeva intenziteta zaleđivanja u terminima meteoroloških veličina je aktivno područje istraživanja. Većina istraživača se slaže da su sadržaj tekuće vode u oblaku, temperatura i veličina kapljica primarni parametri o kojima ovisi zaleđivanje. Skicirane su relacije između tih parametara i vrste i intenziteta zaleđivanja. Mnogi meteorološki parametri se baziraju na sadržaju tekuće vode ili na "prilagođenom" sadržaju tekuće vode koji uzima u obzir temperaturu i veličinu kapljica (Politovich, 1998a). Relacije intenzitet zaleđivanja – sadržaj tekuće vode dane su u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Intenzitet zaleđivanja u ovisnosti o sadržaju tekuće vode oblaka

INTENZITET ZALEĐIVANJA	SADRŽAJ TEKUĆE VODE (g/m ³)
tragovi	< 0.1
slabo	0.11 - 0.6
umjereno	0.61 - 1.2
jako	> 1.2

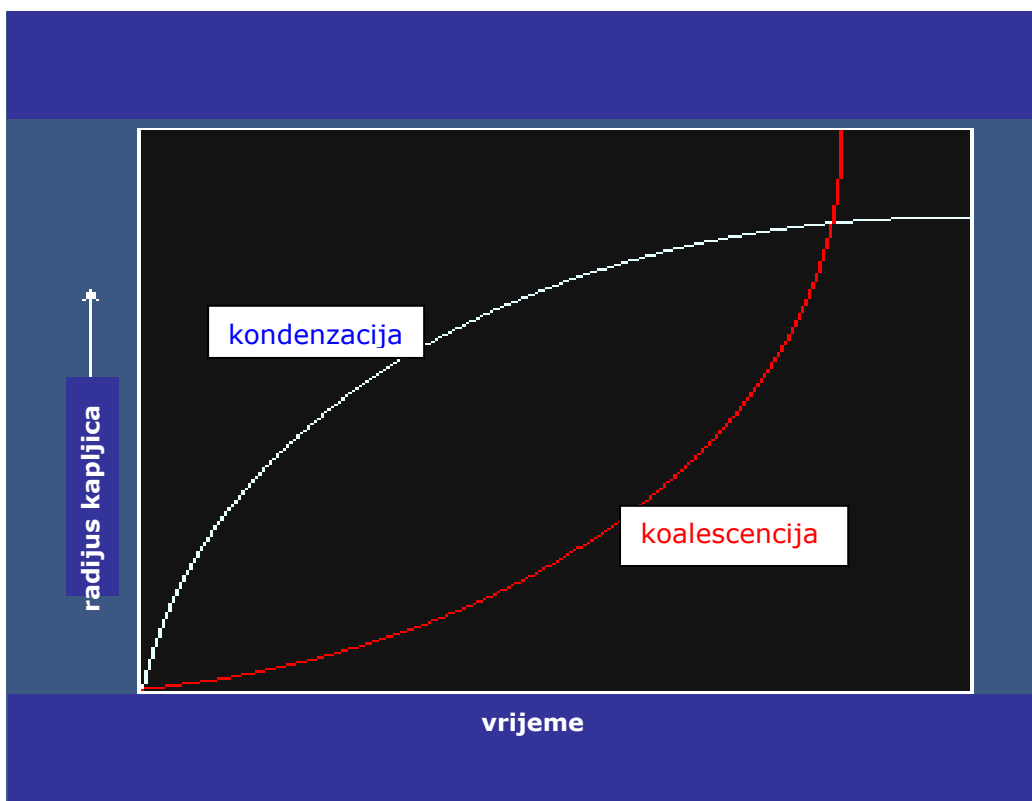
3. FIZIKALNI PROCESI ODGOVORNI ZA ZALEĐIVANJE ZRAKOPLOVA

3.1. FAZNI PRIJELAZI VODE

Voda se u atmosferi nalazi u tri agregatna stanja: kao tekućina, led i para. Prijelazi između faza u velikoj mjeri određuju sadržaj tekuće vode raspoložive za zaleđivanje. Prijelazi između faza su: kondenzacija (ukapljivanje), evaporacija (isparavanje), zaleđivanje, taljenje, depozicija i sublimacija.

KONDENZACIJA

Kondenzacijom nazivamo prijelaz vodene pare u tekuću vodu. Oblaci tekuće vode nastaju kada se zrak diže i hladi do točke rosišta. Čest se diže, širi i adijabatički hladi, a vodena para se kondenzira na jezgrama kondenzacije. Ako se čest nastavi dizati i hladiti, kapljice nastavljaju rast procesom kondenzacije. Kondenzacija je važna za prognoziranje zaleđivanja, jer povećava sadržaj tekuće vode u oblaku. Uvjeti koji pogoduju kondenzaciji mogu pogodovati i zaleđivanju ako je temperatura ispod 0 °C. Za rast kapi kondenzacijom potrebno je mnogo vremena, tako da kondenzacija dolazi do izražaja u slučaju dugotrajne prostrane stratiformne naoblake. Slika 3.1. (slike 3.1. do 3.3. preuzete su iz Politovich 1998a) prikazuje relativne omjere brzina rasta kapljica procesima kondenzacije i kolizije-koalescencije. Manje kapljice (do 20 μm) puno brže rastu kondenzacijom nego veće tako da za rast kapljica kiše ili rosulje u prehladnom okruženju kondenzacija nije efikasan način. Veće kapljice, s druge strane, brže rastu procesom koalescencije (Wallace i Hobbs, 1977).



Slika 3.1. Rast oblačnih kapljica kondenzacijom (plava krivulja) i koalescencijom (crvena krivulja); manje kapljice brže rastu kondenzacijom, nego veće

EVAPORACIJA (ISPARAVANJE)

Do isparavanja dolazi u slojevima zraka koji imaju veliku razliku između temperature i temperature rosišta (nezasićeni su). Kada se oblaci miješaju s okolnom suhom atmosferom kapljice isparavaju zbog kontakta s nezasićenim zrakom. Ako je umiješano dovoljno okolnog suhog zraka kapljice ispare u potpunosti. Proces uvlačenja (eng. *entrainment*) i miješanja je uobičajen i u konvektivnim i u stratiformnim oblacima; sporadičan je i nedovoljno proučen. Uvlačenjem suhog zraka stratus može prijeći u stratokumulus, a ako se proces nastavi može i potpuno nestati. Kapljice koje padaju iz oblaka u nezasićeni sloj će najvjerojatnije ispariti

prije nego što dođu do tla, i time će povećati zasićenost suhog sloja ispod oblaka. Ukoliko oborina potraje, nakon nekog vremena će temperatura rosišta doseći temperaturu okoline, pa će atmosfera imati 100%-tnu relativnu vlažnost. Uvlačenje suhog zraka u oblak dovodi do isparavanja koje smanjuje sadržaj tekuće vode oblaka i posljedično smanjuje mogućnost zaleđivanja.

ZALEĐIVANJE

Zaleđivanje je moguće na svakoj zasićenoj razini (kada je temperatura zraka manja ili jednaka temperaturi rosišta), gdje postoje prehladne kapljice na temperaturama od 0 °C do -40 °C. Tekuće kapljice se uglavnom ne zaleđuju na, ili odmah ispod 0 °C. One mogu postati prehladne i ostati u tekućem stanju na dosta nižim temperaturama. Da bi se prehladna kapljica zamrzнула mora doći u dodir s jezgrom zaleđivanja. Sposobnost jezgre zaleđivanja da potakne zaleđivanje kapljice ovisna je o temperaturi. Na temperaturama višim od -15 °C postoji malo aktivnih jezgri zaleđivanja i oblaci će se uglavnom sastojati od prehladnih kapljica, a ne od kristalića leda. Ako oblak ima malu koncentraciju jezgara zaleđivanja, mogu postojati prostrana područja prehladne vode (velika opasnost od zaleđivanja). Na razinama gdje temperatura pada ispod -20 °C prehladne kapljice više nisu tako brojne i prevladavaju kristalići leda. Oko i ispod -40 °C prehladne kapljice zaleđuju se spontano (bez jezgara zaleđivanja), pa prehladna voda najčešće više nije prisutna. Zaleđivanje oblačnih kapljica smanjuje mogućnost zaleđivanja zrakoplova. Smanjenje sadržaja tekuće vode i povećanje broja ledenih kristalića smanjuje opasnost od zaleđivanja, jer se ledeni kristalići ne hvataju na površinu zrakoplova.

DEPOZICIJA

Depozicijom nazivamo prelazak vodene pare u led. Ukoliko se kapljice vode i kristalići leda zajedno nalaze na nekoj temperaturi, tlak pare

iznad vodene kapljice je veći od tlaka pare iznad leda. Tada će se molekule vodene pare iz zraka deponirati na kristaliće leda, a ne na vodene kapljice (Bergeronov proces). Tako kristalići leda rastu na račun kapljica koje se smanjuju. Depozicija smanjuje zasićenost atmosfere tako da ona postaje nezasićena u odnosu na vodenu paru. Vodene kapljice isparavaju kako bi održale zasićenost i tako dalje podržavaju rast ledenih kristala. U miješanim oblacima glacijacija (prelazak oblačnog sadržaja od prehladne vode u led) odvija se vrlo brzo. Glacijacija obično počinje u gornjim dijelovima oblaka i spušta se kako kristali postaju veći, teži i padaju. U stratiformnim oblacima koji imaju temperature vrhova hladnije od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ uvjeti za zaleđivanje nisu dobri jer su na ovim nižim temperaturama aktivne jezgre zaleđivanja koje formiraju led i dovode do glacijacije (Marwitz i sur., 1997). Iznimka su kumuliformni oblaci (uključujući stratokumulus) s dovoljno jakim uzlaznim strujama koje opskrbljuju gornje dijelove oblaka dovoljnim količinama kondenzata da bi vodene kapljice i ledeni kristalići mogli koegzistirati. Proces depozicije uglavnom smanjuje rizik zaleđivanja jer smanjuje koncentraciju tekućih kapi kroz rast ledenih kristalića. Postoje situacije gdje upravo proces depozicije može dovesti do povećanja rizika za zaleđivanje (zaleđivanje karburatora).

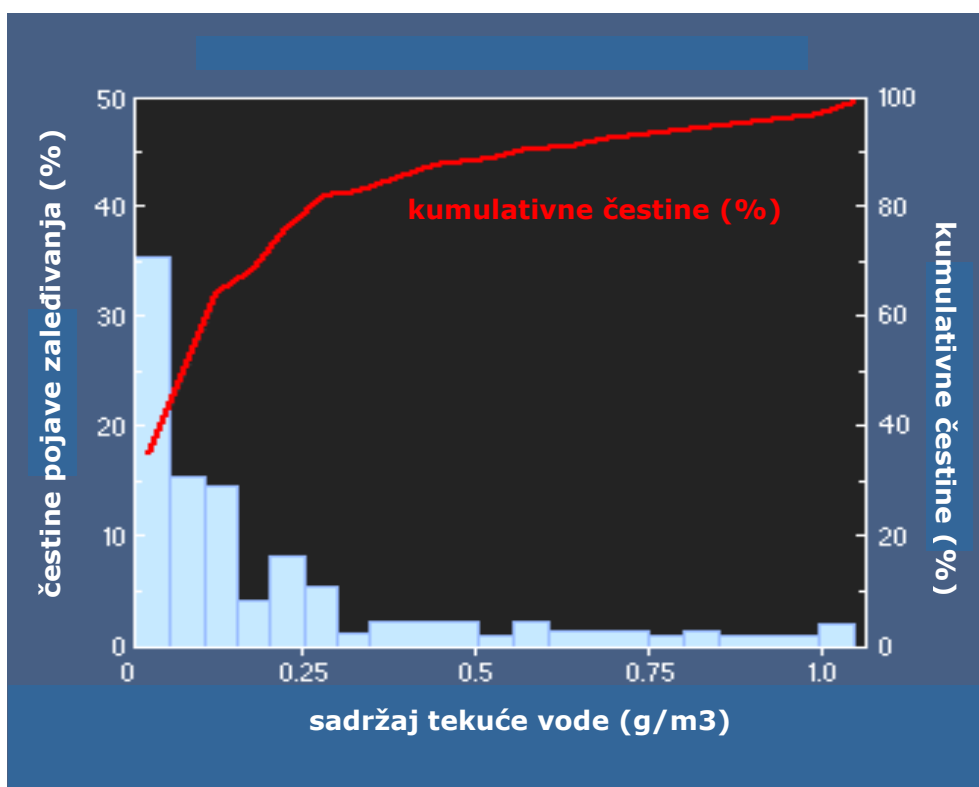
SUBLIMACIJA

Sublimacija je direktan prijelaz leda u vodenu paru bez taljenja koji se odvija u nezasićenoj atmosferi gdje je $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zrakoplov se može osloboditi leda u područjima sublimacije. Kada zrakoplov izađe iz oblaka ali ostane u području gdje je $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, led će sublimirati s površine zrakoplova.

3.2. SADRŽAJ TEKUĆE VODE

Količina prehladnih kapljica u oblaku je ključni faktor u određivanju rizika za zaleđivanje. Ako je $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, onda je sadržaj tekuće vode mjera količine prehladne vode koja je raspoloživa za akumulaciju na zrakoplovu.

Slika 3.2. prikazuje kompilaciju preko 1000 sati podataka koje je prikupio istraživački zrakoplov Sveučilišta u Wyomingu, SAD (Sand i sur., 1984). Prikazana je raspodjela čestina sadržaja tekuće vode izmjerenih u situacijama gdje je zabilježeno zaleđivanje. Velika većina slučajeva zaleđivanja ima vrlo niski sadržaj tekuće vode (manje od 0.1 g/m^3) i samo ih 17% ima sadržaj tekuće vode veći od 0.3 g/m^3 . Ovo istraživanje navodi na zaključak da se većina slučajeva zaleđivanja javlja pri niskom sadržaju tekuće vode.



Slika 3.2. Čestine pojave zaleđivanja u ovisnosti o sadržaju tekuće vode (plava), kumulativne čestine (crvena krivulja)

3.3. VELIČINA OBLAČNIH KAPI

Oblačnim kapima se smatraju one koje su dijametra manjeg od $40 \mu\text{m}$. Iako veličina kapi utječe na zaleđivanje, ustanovljeno je da ona nije

bitna kao npr. sadržaj tekuće vode ili temperatura kada se radi o kapima oblačne veličine. Kada su kapi veće od onih koje su klasificirane kao oblačne, veličina počinje igrati ulogu. Veće kapi na negativnim temperaturama nazivamo prehladnim velikim kapima. Tako ledena rosulja (kapi dijametra 40 do 200 μm) i ledena kiša ($> 200 \mu\text{m}$) spadaju u prehladne velike kapi. Pri istom sadržaju tekuće vode, veće kapljice daju jače zaleđivanje nego manje. Veće kapljice se zbog veće inercije više sudaraju s udarnim površinama zrakoplova, dok su manje otklonjene strujom zraka.

3.4. FIZIKALNI MEHANIZMI NASTANKA PREHLADNIH VELIKIH KAPI

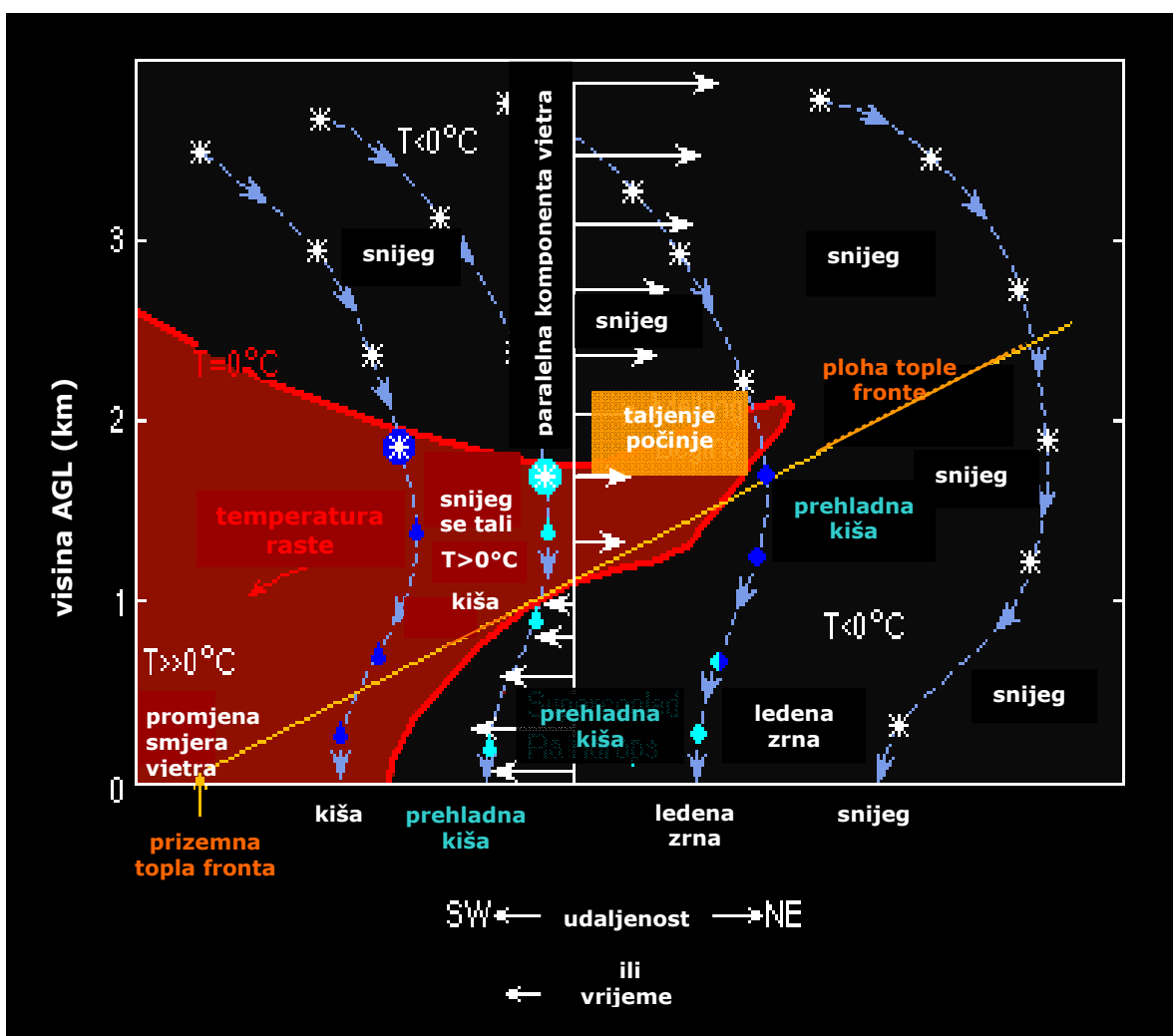
Prehladne velike kapi nastaju ili taljenjem, pa prehlađivanjem ledenih hidrometeora (u procesu toplog sloja), ili rastom kapljica kroz proces kolizije-koalescencije u prehladnom okruženju. U prvom slučaju neophodna je prisutnost ledenih hidrometeora, dok u drugom nije. U oba je slučaja ledena kiša pri tlu dobar inicijalni indikator postojanja prehladnih velikih kapi u atmosferi.

3.4.1. PROCES TOPLOG SLOJA

Proces toplog sloja je pojava koja nastaje kada je prisutna topla intruzija za vrijeme oborina. Ovakva temperaturna struktura je često vezana uz prodor tople fronte, pri čemu se topliji zrak diže preko hladnog. Na slici 3.3. prikazan je primjer procesa toplog sloja (Martner i sur., 1993). Duž tople fronte nalazimo niz oborinskih tipova. Bliže fronti je topla intruzija i pahuljice se tale u ovom toplom sloju (temperatura toplog sloja mora biti barem 2 °C do 3 °C). Ispod toplog sloja hidrometeori postaju prehladni u prizemnom hladnom sloju ($t < 0 \text{ °C}$). Rezultat je ledena oborina (ledena kiša, ledena rosulja) pri tlu. Padanjem kroz donji hladni sloj prehladne se

kapi mogu zamrznuti u ledena zrna (ovisno o temperaturi i dubini sloja). Daleko ispred tople fronte može padati snijeg. Iza prizemne tople fronte je temperatura pri tlu pozitivna, pa nalazimo rosulju ili kišu.

Dakle, ledena kiša i ledena rosulja u ovom procesu nastaju taljenjem snijega dok on pada kroz topli sloj, i zatim padanjem dalje kroz sloj zraka negativne temperature. Proces toplog sloja pruža povoljne uvjete za nastajanje prehladnih velikih kapi te je povećana vjerojatnost za zaleđivanje prozirnim ledom kada je on prisutan.



Slika 3.3. Prikaz procesa toplog sloja, crveno označava područje temperature iznad 0°C

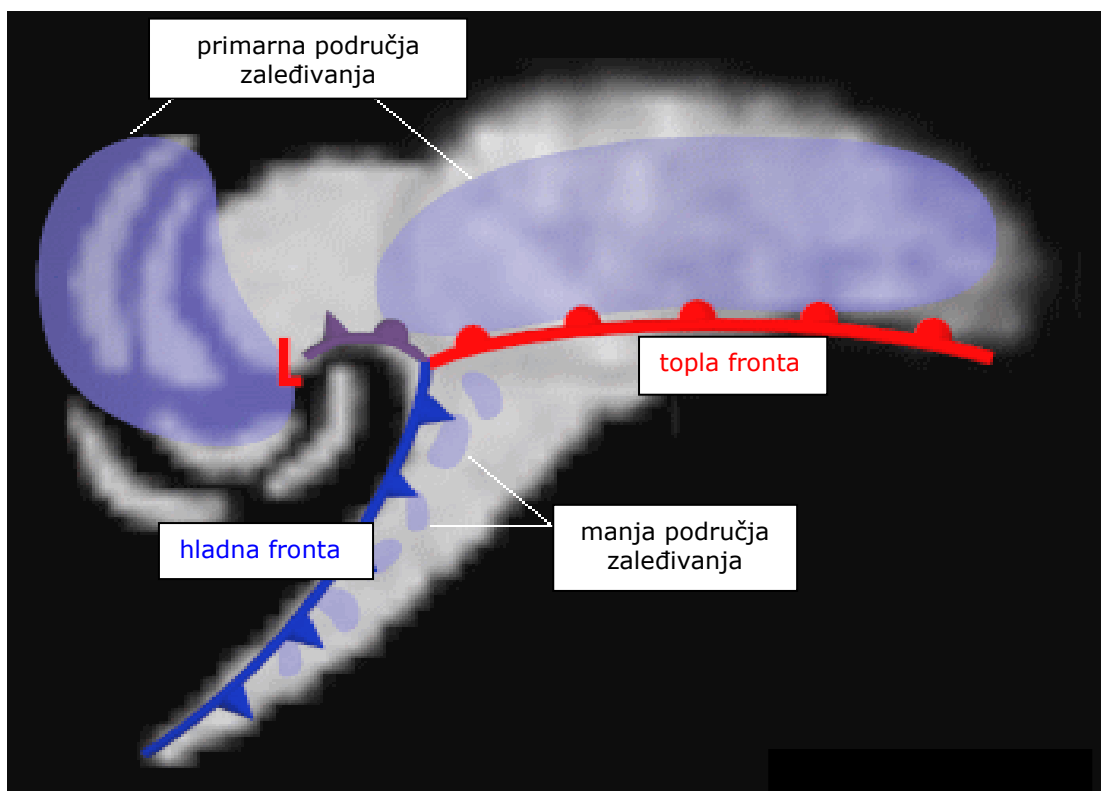
Hoće li ledena oborina padati kao ledena kiša ili kao ledena rosulja ovisi o veličini pahulja koje se tale, količini isparene vlage za vrijeme padanja kroz nezasićenu atmosferu ispod oblaka, te dodatnom rastu procesom kolizije-koalescencije koji kapljice prolaze. Evaporacija smanjuje veličinu svih kapljica, manje kapljice evaporacijom gube masu brže nego veće. I evaporacija i kolizija-koalescencija pomiču distribuciju veličina prema većim kapima, dok manje kapljice potpuno isparavaju ili bivaju pokupljene od većih kapljica.

3.4.2. KOLIZIJA - KOALESCENCIJA

Ledena kiša i ledena rosulja također mogu nastati procesom kolizije-koalescencije. Taj proces ne mora uključivati ledenu fazu kao u procesu toplog sloja (Bocchieri, 1980). U oblaku obično postoje kapljice različitih veličina. Veće kapljice padaju brže od manjih. Neke će se kapljice sudarati s drugima i spojiti u veće kapi. Ovaj proces započinje kada najveće kapljice u raspodjeli dosegnu promjer od 20 μm i može naglo preobraziti kapljice oblačne veličine u veće kapljice rosulje (200 do 500 μm) ili u kapi kiše ($> 500 \mu\text{m}$). Kao što je vidljivo na grafu kondenzacije i koalescencije (Slika 3.1.), rast kapljica koalescencijom započinje polako i ubrzava se s vremenom postajući efikasnijim kada su kapljice veće. Tako, kada kapljice jednom dosegnu promjer od 20 μm , proces kolizije-koalescencije započinje, a kada započne to je puno brži način za rast kapljica do veličine kišnih ili rosuljnih kapi. Nađena je jaka statistička veza između prisutnosti prehladnih velikih kapi i smicanja vjetra u blizini vrhova stabilnih stratiformnih oblaka (Pobanz i sur. 1994). Smicanje u blizini vrhova oblaka ubrzava rast kapljica do točke u kojoj može započeti rast procesom kolizije-koalescencije (kada dosegnu promjer 20 μm).

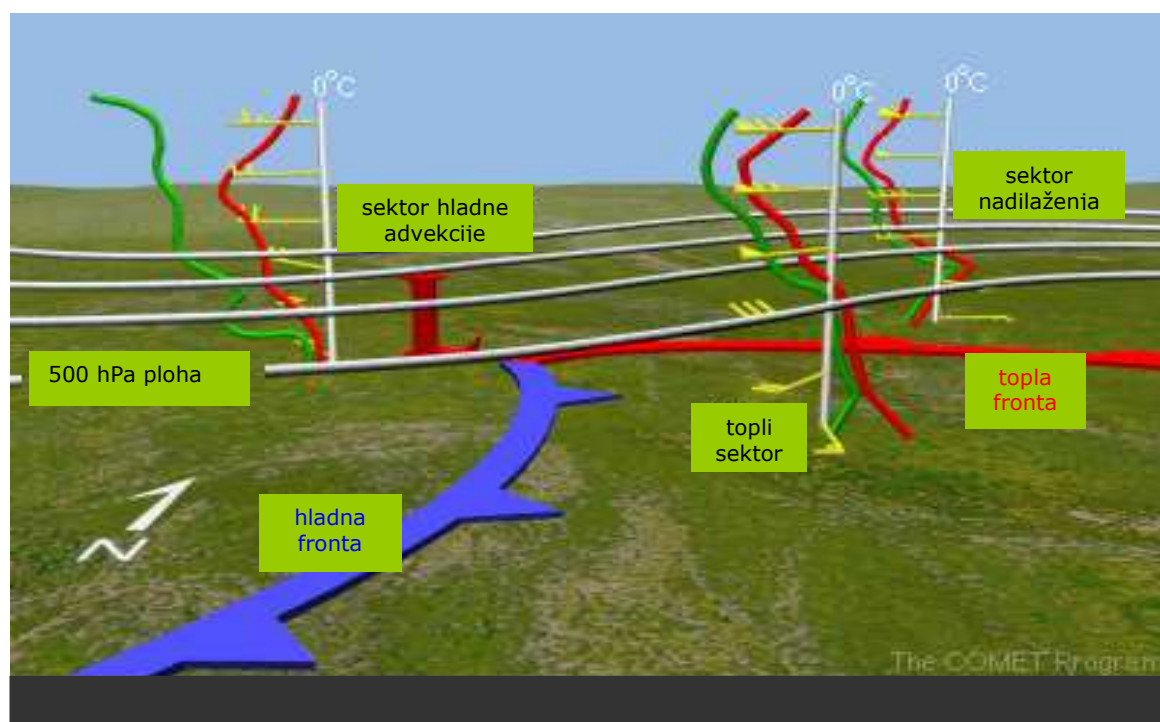
4. SINOPTIČKO-SKALNI UVJETI U KOJIMA SE JAVLJA ZALEĐIVANJE, SEKTORI CIKLONE I ZALEĐIVANJE

Ciklonalne cirkulacije generiraju konvergenciju u blizini centara sustava niskog tlaka u donjoj troposferi, i stoga jaka uzlazna gibanja i stvaranje oblaka. Zaleđivanje najčešće nalazimo u područjima ispred aktivnih i stacionarnih toplih fronti i iza prizemnih centara niskog tlaka. To su područja koja pogoduju stvaranju prehladnih tekućih oblaka i prehladne oborine (Bernstein i sur., 1997).



Slika 4.1. Područja zaleđivanja sinoptičko-skalne ciklone

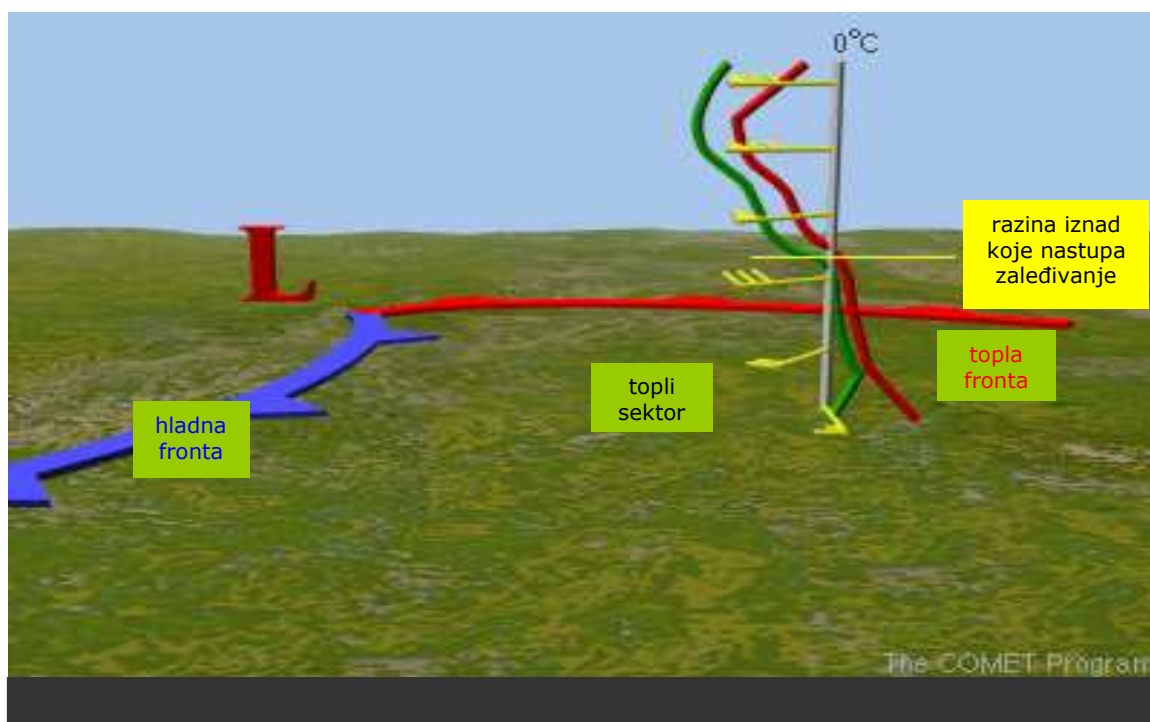
Pri procjeni rizika za zaleđivanje korisno je odrediti položaje sektora ciklone. Na taj način dobivamo uvid u opće stanje atmosfere što se tiče temperature, vlažnosti i smicanja neke zračne mase i u fizikalne procese vezane uz zaleđivanje koji se pritom eventualno odvijaju. Tipična ciklona umjerenih širina uključuje interakciju više zračnih masa. Ove zračne mase dijelimo na nekoliko primarnih sektora specifičnih karakteristika: topli sektor, sektor nadilaženja (overrunning sector) i sektor hladne advekcije. Slike 4.1. i 4.2. (slike 4.1. do 4.8. preuzete su iz Politovich 1998b) prikazuju karakteristične profile temperature, vlažnosti i vjetra uobičajene za pojedini sektor.



Slika 4.2. Sektori ciklone sa karakterističnim sondažama (temperatura – crveno; rosište – zeleno; vjetar – žuto)

4.1. TOPLI SEKTOR CIKLONE

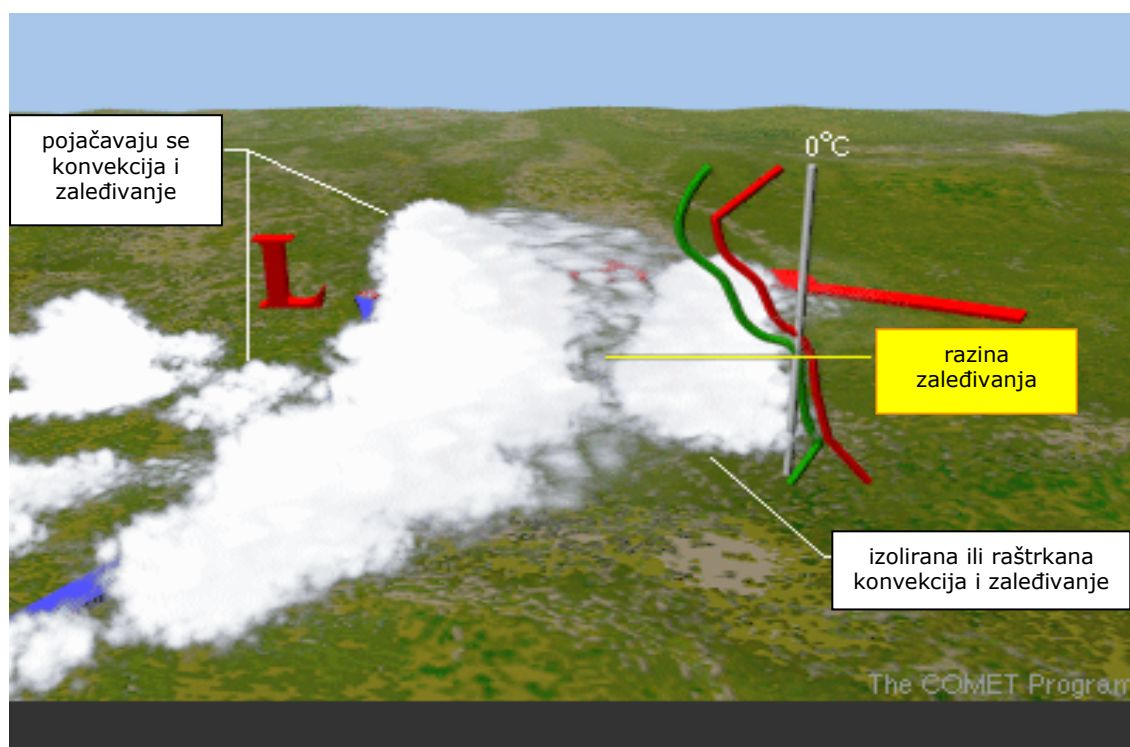
Topli sektor se nalazi ispred hladne, a iza tople fronte (Slika 4.3.). Karakteristična sondaža unutar toplog sektora odaje značajke dubokog, vlažnog i ponekad nestabilnog sloja. Površinski vjetar je obično južnog smjera i s visinom zakreće u jugozapadni i zapadni (srednja i gornja troposfera).



Slika 4.3. Topli sektor sa karakterističnom sondažom
(temperatura – crveno; rosište – zeleno; vjetar – žuto)

Zaleđivanje se u toplom sektoru obično javlja na većim visinama nego u drugim sektorima (zbog tople advekcije pri površini i na visini), i to pretežno unutar konvektivnih oblačnih nakupina i grmljavinskih oluja (Slika 4.4.). Vrsta i intenzitet zaleđivanja unutar tople zračne mase mogu zbog konvekcije horizontalno i vertikalno jako varirati. Najrizičnije uvjete zaleđivanja u toplom sektoru nalazimo unutar grmljavinskih oluja gdje

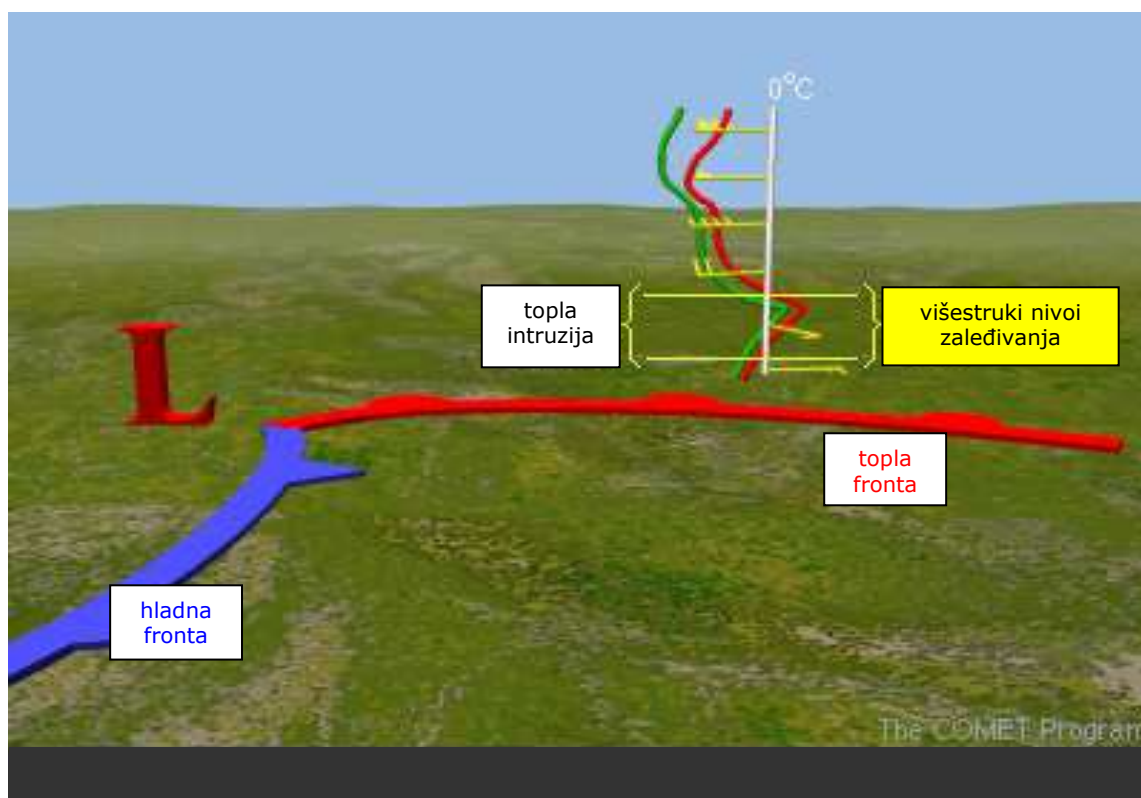
može doći do srednjeg/jakog zaleđivanja prozirnim ledom. Veličina područja u kojem je prisutno zaleđivanje i intenzitet zaleđivanja rastu s približavanjem hladne fronte (sukladno proširenju i jačanju konvekcije). Jačanje konvekcije ispred i u blizini hladne fronte rezultat je djelovanja više čimbenika uključujući i povećanu konvergenciju vjetra i vlažnosti u donjem sloju, uzlazna vertikalna gibanja i dinamiku gornjeg sloja (Politovich, 1998b).



Slika 4.4. Zaleđivanje u toplom sektoru
(temperatura – crveno; rosište – zeleno; vjetar – žuto)

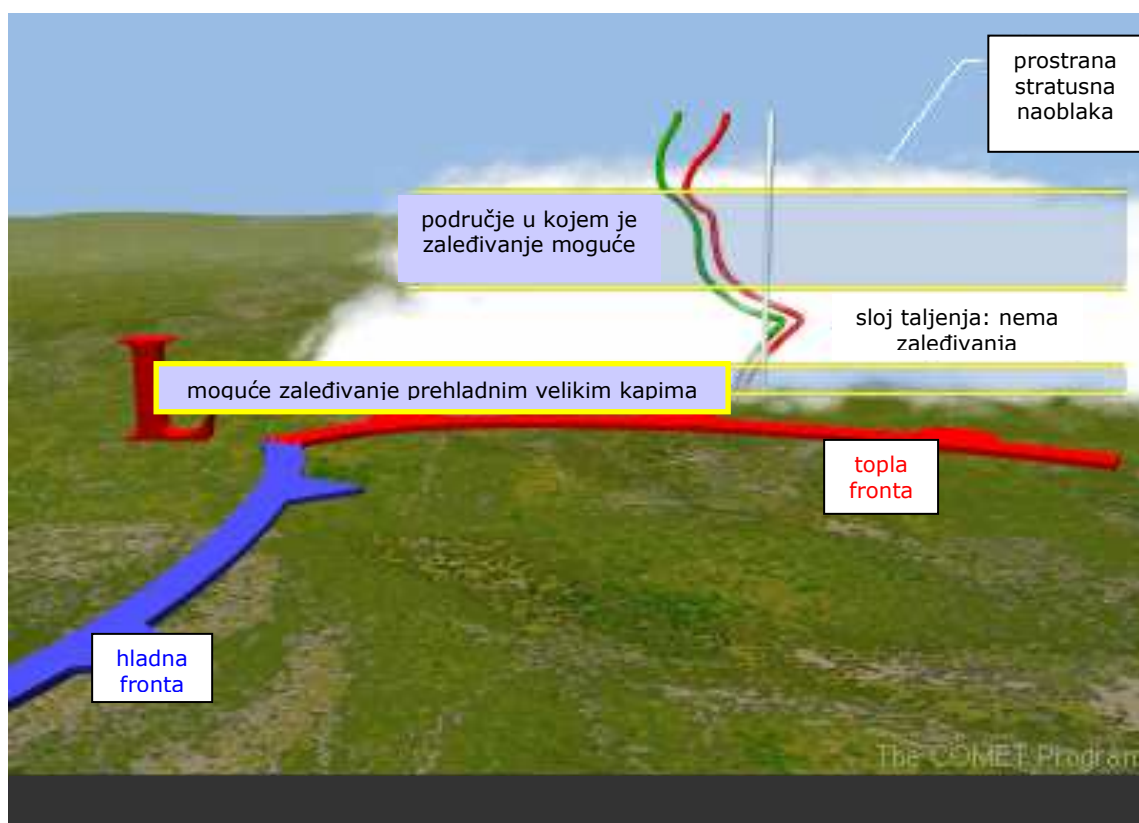
4.2. SEKTOR NADILAŽENJA

Sektor nadilaženja se nalazi ispred prizemne tople fronte istočno i/ili sjeveroistočno od prizemnog centra ciklone (Slika 4.5.). Profil temperature ukazuje na dubok, hladan, vlažan i stabilan sloj zraka u ovom dijelu ciklonalnog vrtloga. Često nalazimo visinsku inverziju koja ukazuje na visinski prodor toplog zraka iznad prizemne hladne zračne mase. Visinska topla fronta obično se nalazi u blizini vrha tople intruzije. U ovakvoj situaciji obično nalazimo višestruke nivoe zaleđivanja što omogućuje taljenje zaleđene oborine i pojavu ledene kiše i/ili ledene rosulje pri tlu (ako je u donjem sloju $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Prizemni vjetar je istočnoga smjera i s visinom mijenja smjer u jugozapadni. Unutar oblačnih slojeva je moguća pojava jakog smicanja (naročito u blizini frontalne plohe).



Slika 4.5. Sektor nadilaženja sa karakterističnom sondažom
(temperatura – crveno; rosište – zeleno; vjetar – žuto)

Sektor nadilaženja ima prostorno najveće područje u kojem postoji rizik za zaleđivanje. Razlog tome su prostrana naoblaka i oborina (Slika 4.6.). Intenzitet zaleđivanja obično je lagan do umjeren, a iznimno i jak. Kako je zračna masa uglavnom stabilna, većina slučajeva zaleđivanja javlja se unutar stratiformnih oblaka i vezana je uz stratiformne oborinske procese. Zaleđivanje unutar oborina može biti jakog intenziteta kada se radi o ledenoj rosulji ili kiši, odnosno zaleđivanju velikim prehladnim kapima. Zaleđivanje velikim prehladnim kapima prevladava ispod sloja taljenja gdje velike kapi nastale taljenjem ledenih kristalića postaju prehladne.

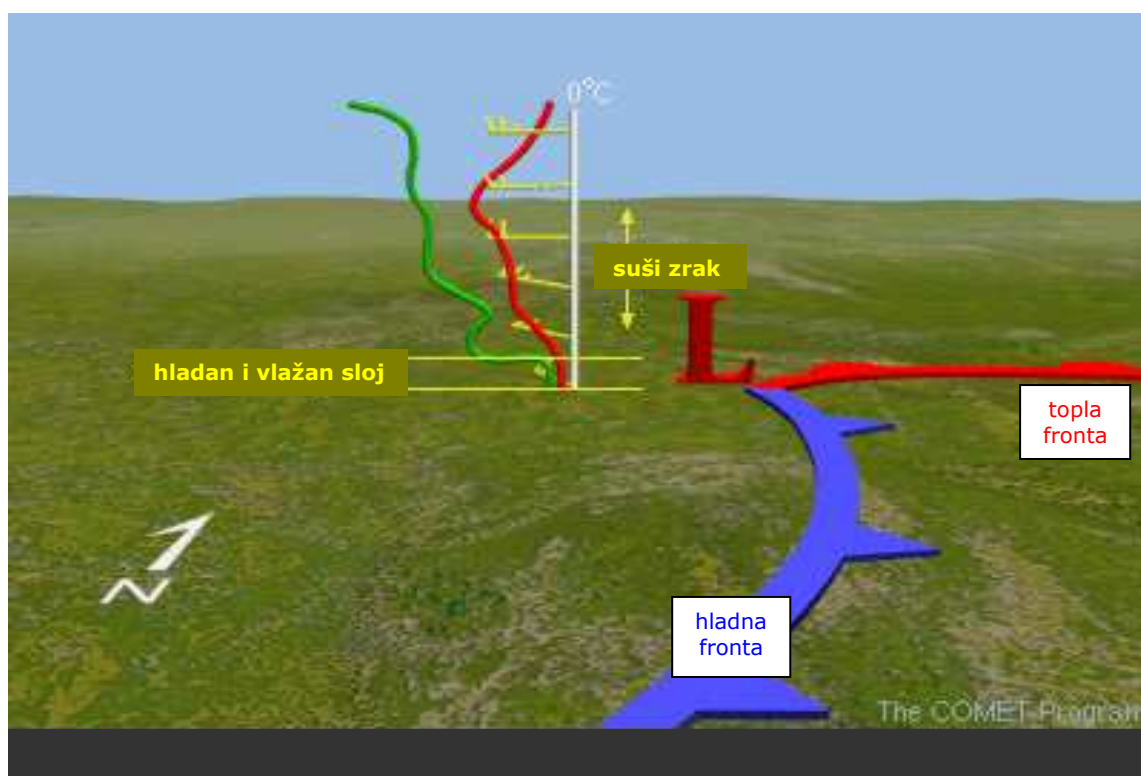


Slika 4.6. Zaleđivanje u sektoru nadilaženja

Prema statističkoj obradi 37 slučajeva zimskog vremena (Bernstein i sur., 1997), jako zaleđivanje je imalo 6 - 8 puta veću vjerojatnost pojavljivanja u području 250 - 600 km ispred aktivnih i stacionarnih toplih fronti nego za nasumično odabrano područje prizemne sinoptičke karte. Takvi rezultati imaju smisla s obzirom na to da su područja sjeverno od ovih prizemnih fronti često imala relativno visoke temperature vrhova oblaka, niske prizemne temperature (zimi često ispod 0° C), veliku relativnu vlažnost i prostranu slabu oborinu koja se ponekad smrzavala. Ovakve karakteristike ukazuju na dubok prehladan zasićen sloj gdje se može očekivati zaleđivanje. Ukoliko je bila prisutna jača topla advekcija i uzlazno orogenetičko gibanje (tipično ispred aktivnih toplih fronti) vrhovi nastalih oblaka su bili hladniji i oborina je bila obilnija, ali je svejedno sadržaj tekuće vode bio velik zbog priljeva toplog vlažnog zraka. Na taj način mogu nastati mješoviti oblaci (snijeg i prehladna voda), naročito ako nastajanje tekuće vode premašuje osiromašenje kristalićima leda. Topli vrhovi oblaka i slaba oborina ukazuju na izostanak formiranja ledenih kristalića koji bi procesom inženja (eng. *riming*) pokupili prehladnu vodu. Injenje je proces u kojem se prehladne kapljice sudaraju s kristalićima leda i zamrzavaju na njima. Manje prijetnje za aktivne nego za stacionarne tople fronte mogle bi se pripisati manjoj vjerojatnosti za osiromašenje sadržaja prehladne vode snijegom kod stacionarnih fronti.

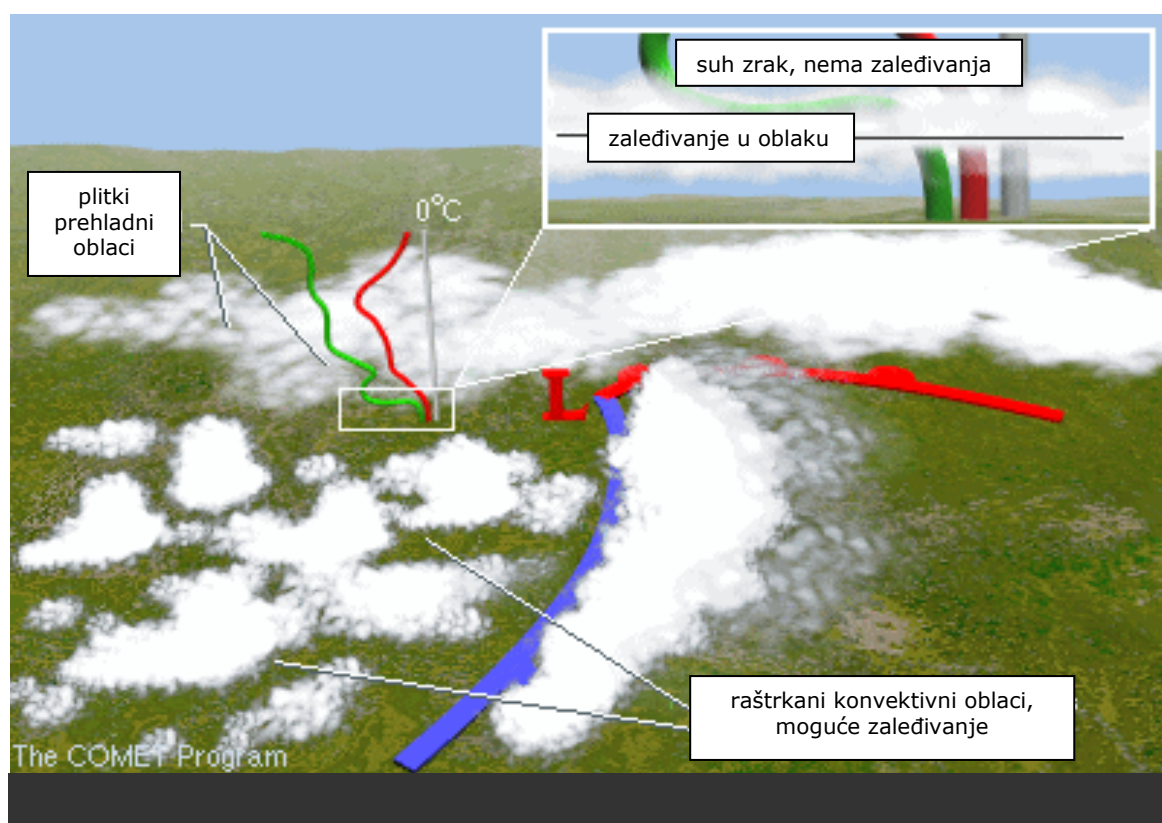
4.3. SEKTOR HLADNE ADVEKCIJE

Sektor hladne advekcije nalazi se iza hladne fronte i zapadno ili sjeverozapadno od centra ciklone (Slika 4.7.). Na profilu temperature okarakteriziran je prizemnom vlažnom hladnom zračnom masom iznad koje je suši zrak. Do ovakve situacije dolazi kada je visinska vlažna zračna masa pomaknuta istočno od centra ciklone jačanjem zapadnog vjetera na visini, dok preostala vlažnost niske razine zaostaje zapadnije (oko površinske cirkulacije). Vjetar zakreće protusatno od sjeveroistočnog/sjevernog pri tlu do zapadnog na visini. Podaci koje daje vjetreni presječnik (eng. *wind profiler*; vrsta Dopplerovog radara, daje vertikalni profil vjetra; Gelo, 2005) uglavnom pokazuju prisutnost prizemnog sloja koji se produbljuje kako se površinski centar niskog tlaka udaljava i kako hladna zračna masa napreduje. Iznad ovog sloja je sloj jugozapadnog/sjeverozapadnog vjetra, ovisno o visinskim strujanjima.



Slika 4.7. Sektor hladne advekcije sa karakterističnom sondažom
(temperatura – crveno; rosište – zeleno; vjetar – žuto)

U ovom području se zaleđivanja najvećeg intenziteta javljaju na nižim razinama, unutar oblačnih slojeva (Slika 4.8.). Kako je prizemna zračna masa izrazito vlažna u blizini prizemnog centra niskog tlaka, rizik od zaleđivanja postoji u ovom plitkom, prostranom sloju. Međutim, ako se radi o jakim arktičkim prodorima, prizemni je sloj dovoljno hladan za stvaranje kristalića leda na temperaturama $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa se time smanjuje vjerojatnost za pojavu zaleđivanja na prostranom području. Kada temperature nisu tako niske, oblačni slojevi sadrže prehladnu tekuću vodu. Ako se pri vrhu oblaka nalazi sloj u kojem je prisutno smicanje, onda postoje pogodni uvjeti za rast kapljica kroz proces kolizije-koalescencije, što pojačava zaleđivanje (Politovich, 1998).



Slika 4.8. Zaleđivanje u sektoru hladne advekcije

4.4. ZALEĐIVANJE IZA PRIZEMNOG CENTRA NISKOG TLAKA

Prehladne velike kapi se često mogu naći zapadno od prizemnog centra niskog tlaka. To je područje znatnog sadržaja vlage u nižoj troposferi, u dijelu sustava u kojem postoji slabo vertikalno gibanje. Iako ciklonalni sustav općenito ima duboke oblake hladnih vrhova ispred prizemnog centra niskog tlaka (N), iza N se obično nalaze topliji vrhovi oblaka te srednji i gornji nivo tu sadrže bitno manje vlage. Supsidencija iza sustava N guši duboku konvekciju održavajući vrhove oblaka relativno nisko i relativno toplima. Tako se vertikalna razvijenost oblaka može naglo smanjiti iza N eliminirajući snijeg koji osiromašuje sadržaj tekuće vode, pa prehladne velike kapi mogu neometano narasti i zadržavati se u ovom području. Ovim područjem općenito dominiraju stratokumulusi i stratusi. Vertikalni nagib između prizemnog N i N na 700 hPa plohi dovodi do jakog smicanja unutar nižih oblačnih slojeva. Ovakva kombinacija jake naoblake, relativno toplih oblačnih vrhova i smicanja je izrazito povoljna za razvoj prehladnih velikih kapi. U procjeni postojanja ovakvih uvjeta korisne su satelitske snimke i podaci dobiveni sondažom.

4.5. ZALEĐIVANJE U FRONTAMA OKLUZIJE

U procesu okluzije hladna fronta sustiže toplu, što dovodi do okludirane fronte. Okludirana fronta objedinjuje karakteristike naoblake tople i hladne fronte ovisno o vrsti okluzije. U toploj okluziji se hladna fronta uzdiže po plohi tople fronte. Hladna fronta postaje visinska hladna fronta i povezana je s pljuskovima, grmljavinom i prostranom naoblakom. Najčešće se nalazi dosta ispred prizemne okludirane fronte. Rizik za zaleđivanje je velik za putanje zrakoplova paralelno i okomito na okludiranu frontu. U hladnoj okluziji zrak ispred tople fronte je topliji od zraka iza hladne fronte. U ovom slučaju hladna fronta (koja postaje okludirana

fronta) ostaje prizemna. Okluzija hladne fronte također uzrokuje prostranu naoblaku, pljuskove i grmljavinske oluje. Opasnost od zaleđivanja jednaka je onoj za okluziju tople fronte.

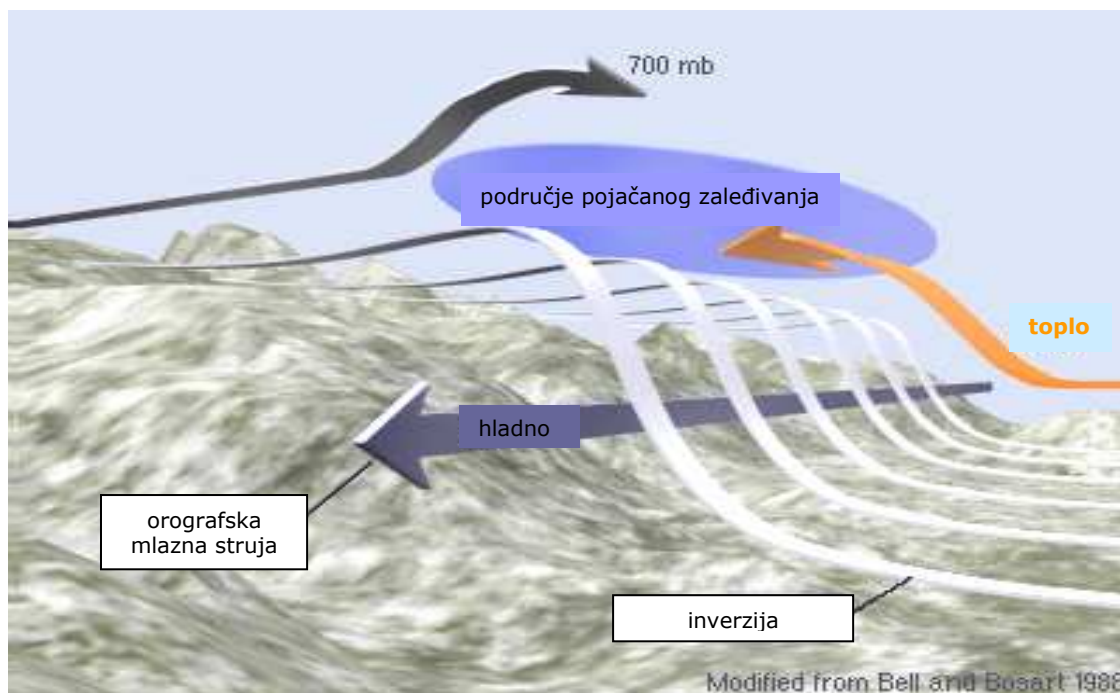
5. MEZOSKALNI UVJETI ZALEĐIVANJA

5.1. OROGENETIČKI UJECAJ NA ZALEĐIVANJE

Kada se zrak prisilno podiže zbog konfiguracije terena može doći do razvoja prostrane naoblake u kojoj postoje povoljni uvjeti za zaleđivanje. Ovakva situacija može se zadržati i do nekoliko dana, a obično se javlja nakon prolaska arktičke ili polarne fronte. Uvjeti koji pogoduju zaleđivanju javljaju se i u orografskim oblacima koji nastaju uzduž vrhova planina. Najbolje uvjete za razvoj orografskih oblaka pruža vjetar što puše okomito na planinski lanac. U valovitim oblacima koji nastaju pri orogenetičkom dizanju vlažnog zraka iznad i u zavjetrini planina, prisilna uzlazna strujanja su često dovoljna za razvoj velikih kapi. Ako su prehladne, jako zaleđivanje može se dogoditi zrakoplovima koji lete kroz njih. Naročito je opasno letjeti kroz takve valne oblake u smjeru okomitom na pravac širenja vala, u području dizanja zraka.

Mezoskalni odgovor donjih slojeva atmosfere često je kompleksniji od običnog dizanja ili spuštanja česti zraka preko padina planina. Značajni su efekti blokiranja planinskim preprekama, naročito tijekom zime. Stabilna stratifikacija i inverzije uz planinske vrhove mogu spriječiti strujanja pri uzlaznom gibanju uz padine što dovodi do usporavanja i skretanja toka. Pri takvom strujanju je Froudeov broj manji od jedinice (npr. Holton, 1992). Ovakvi procesi mogu uzrokovati zone prizemne konvergencije, te oblake i oborine ispred planinske prepreke. Takva područja konvergencije su pogodna za pojavu zaleđivanja.

U određenim situacijama blokiranja hladnog zraka (ako je visinski tok iznad barijere umjeren do jak) može se razviti orografska mlazna struja (eng. *barrier jet*) koji teče uzduž planinske blokade (Slika 5.1.). Prisutnost orografske mlazne struje dalje pojačava vertikalno gibanje i naoblaku u blizini orografske barijere (npr. Rasmussen i sur., 1992).



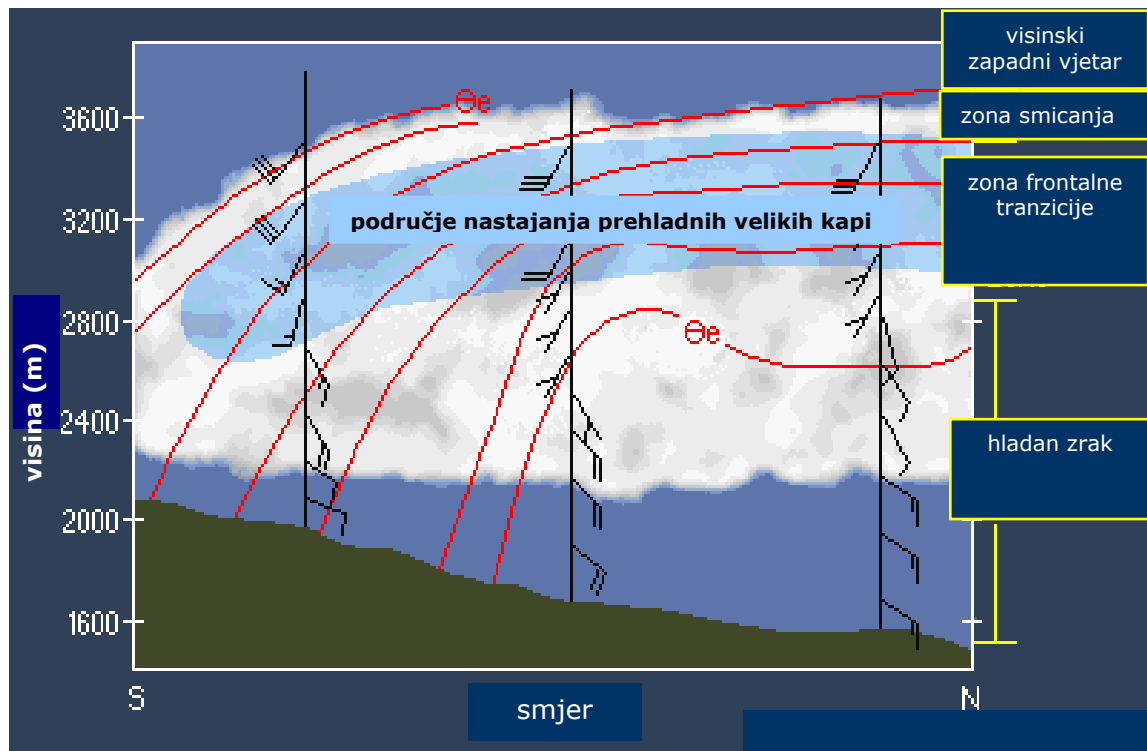
Slika 5.1. Orografska mlazna struja

5.2. ZAFRONTALNO OROGENETIČKO DIZANJE I SMICANJE

Velike prehladne kapi, naročito ledena rosulja, pojavljuju se u područjima u kojima koincidiraju: postupno dizanje, plitka i zasićena zračna masa, te relativno topli ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) vrhovi oblaka. Obično su to područja zafrontalnog orogenetičkog dizanja (iza hladne fronte), područja ispred toplih fronti i iza centara niskog tlaka. Ova područja sadrže zajednički element promjene horizontalne brzine vjetera i/ili smjera s visinom na nekom nivou unutar oblaka (smicanje). Ovakva situacija je najčešće prisutna ispred tople fronte unutar sinoptičke ciklone. Zafrontalno orogenetičko dizanje se često povezuje s posebno uskom zonom smicanja blizu vrha oblaka, koja također može ubrzati rast velikih prehladnih kapi. Pretpostavka postojanja velikih prehladnih kapi u ovim područjima odgovara rezultatima WISP-a (projekt koji proučava zaleđivanje u hladnom dijelu godine, eng. *Winter Icing and Storms Project*) (Rasmussen i sur.,

1992). Dodatno, smicanje vjetra na vrhu stratiformnog oblaka je u jakoj korelaciji sa pojavom prehladnih velikih kapi unutar ovih oblaka (Pobanz i sur., 1994).

Zafrontalno orogenetičko dizanje duž planinskih lanaca pruža povoljne uvjete za rast prehladnih velikih kapi (Rasmussen i sur., 1995). Ključni sastojak ovakvih situacija je plitki oblačni sustav relativno toplih vrhova ($> -15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Konvekcija pojačana orogenetičkim forsiranjem produbljuje vertikalno dizanje i opskrbljuje oblake velikim količinama kondenzata. Na slici 5.2. (slike 5.1. do 5.3. preuzete su iz Politovich 1998a) prikazana je vertikalna struktura kakvu često nalazimo u slučaju zafrontalnog orogenetičkog dizanja. Glavne karakteristike su: hladan prizemni sloj, zona frontalne tranzicije, uska zona smicanja i vjetar zapadnog smjera u gornjem sloju. U donjem sloju često nalazimo gotovo neutralnu stabilnost i vjetar istočnog smjera. Prehladna tekuća voda u donjem sloju nastaje djelovanjem relativno male vertikalne brzine vezane uz uzdižuću teren. Iznad donjeg sloja nalazi se zona frontalne tranzicije između hladnog zraka ispod i toplog iznad. Ova se zona obično produbljuje sa udaljenošću od hladne fronte i često je termodinamički dobro pomiješana. Zona smicanja je stabilan ili gotovo stabilan plitak sloj u blizini vrhova oblaka sa vertikalnim smicanjem smjera i/ili brzine vjetra na plohi koja dijeli zonu frontalne tranzicije i gornji zapadni vjetar. Velike kapi (promjera većeg od $40\text{ }\mu\text{m}$) nastaju u zoni smicanja i u zoni frontalne tranzicije ispod zone smicanja.



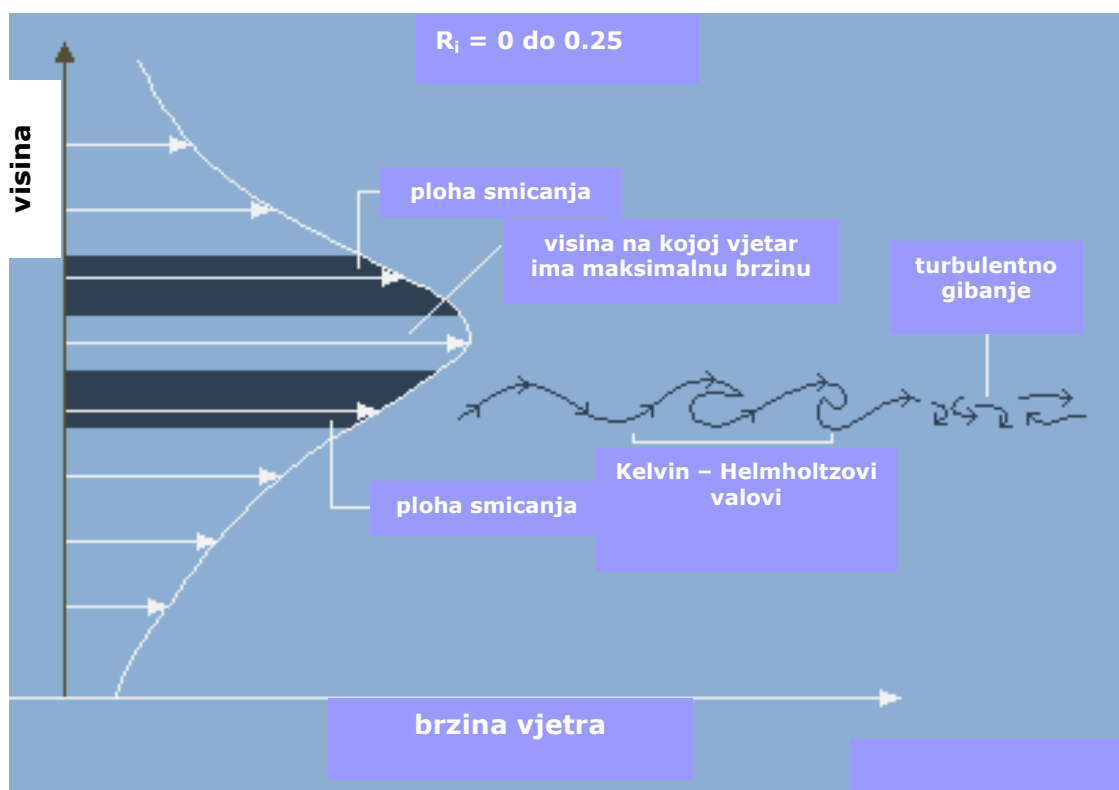
Slika 5.2. Zafrontalno orogenetičko dizanje i smicanje

Richardsonov broj koristi se kao mjera stabilnosti sloja fluida. Od statičke stabilnosti definirane preko stope opadanja temperature razlikuje se po tome što uzima u obzir učinke atmosfere u gibanju. Richardsonov broj, Ri , se može izračunati prema formuli:

$$Ri = \frac{g}{\theta} \Delta\theta \Delta V^{-2} \Delta z ,$$

gdje je g ubrzanje sile teže, θ je potencijalna temperatura, a $\Delta\theta$ i ΔV su promjene potencijalne temperature i vektora vjetra kroz sloj smicanja Δz (npr. Holton, 1992; Pobanz i sur., 1994). Negativne vrijednosti znače nestabilnost toka, pozitivne stabilnost dok je nula neutralna stabilnost. Richardsonov broj između 0 i 0.25 povezuje se sa prijelazom od laminarnog prema turbulentnom gibanju i ukazuje na gotovo neutralnu stabilnost, odnosno dinamičku nestabilnost, i uvjete smicanja koji često prate nastajanje velikih kapi.

Na slici 5.3. prikazano je gibanje zraka kakvo može nastati pri vrijednostima Richardsonovog broja od 0 do 0.25. U ovakvim uvjetima statička je stabilnost dovoljna da se zrak koji je zbog nekog poremećaja vertikalno pomaknut vrati na svoju početnu poziciju. Međutim, smicanje je dovoljno jako da izazove turbulenciju. U atmosferi se ovo stanje očituje nastankom Kelvin-Helmholtzovih valova duž plohe smicanja koji se nagnju, savijaju i potom lome u turbulentno gibanje. Dakle, ovaj proces se odvija u četiri faze: 1. postoji smicanje zbog razlike u smjerovima i/ili brzinama u blizini vrhova oblaka; 2. smicanje uzrokuje valno gibanje na plohi smicanja (Kelvin-Helmholtzovi valovi); 3. valovi amplificiraju i lome se, što u oblak uvlači suši zrak; 4. turbulentno gibanje i miješanje ubrzavaju rast kapljica kondenzacijom i kolizijom-koalescencijom.



Slika 5.3. Smicanje, Kelvin-Helmholtzovi valovi i turbulencija

Senzorski podaci i većina produkata operativnih numeričkih modela ne mogu definirati intenzivne plitke slojeve smicanja koji su pogodni za nastanak prehladnih velikih kapi procesom kolizije-koalescencije. Kombiniranje podataka o vjetru dobivenih vjetrenim presječnicima, profila temperature i vlažnosti dobivenih sondažom i temperatura vrhova oblaka sa satelitskih snimaka može pomoći odrediti postoje li i gdje su locirani plitki slojevi smicanja i njihov položaj u odnosu na oblačne slojeve.

6. DIJAGNOZA METEOROLOŠKIH UVJETA ZALEĐIVANJA

6.1. VISINSKE KARTE POLJA VLAŽNOSTI I TEMPERATURE

Interpretacija visinskih podataka je logičan prvi korak u postupku izrade prognoze te daje pregled meteorološke situacije na sinoptičkoj skali. Na visinskim kartama mogu se uočiti strukture i pojave koje utječu na formiranje područja zaleđivanja. Njihovo prepoznavanje utječe na točnost prognoze zaleđivanja. Mjerenja uključuju geopotencijalnu visinu, temperaturu, rosište, rosišnu razliku, te smjer i brzinu vjetra. Kao sredstvo procjene rizika za zaleđivanje, visinske karte se koriste na samom početku analize trenutnog dinamičkog i termodinamičkog stanja atmosfere na sinoptičkoj skali, uključujući pojave kao što su: centri visokog i niskog tlaka, strukture grebena i dolina, mlazne struje i visinske fronte.

Analiza visinskih karata polja vlažnosti i temperature omogućuje eliminaciju područja i slojeva gdje je vjerojatnost za zaleđivanje mala, te daje grubu sliku naoblake i faze razvoja oblaka na različitim razinama i lokacijama. Npr. područja suhe atmosfere ili temperature iznad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nemaju uvjete povoljne za zaleđivanje, dok će zasićena atmosfera s $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dati oblake koji sadržavaju ledene kristaliće, prehladnu tekuću vodu ili oboje istovremeno.

Visinski podaci dostupni su u standardna i pouzdana vremena, te pružaju dobar pregled važnih vremenskih situacija. Međutim, mreža motrenja je horizontalno rijetka tako da nije moguća detaljnija analiza. Ovi podaci su i vremenski rijetki (obično samo u 00 i 12 UTC). Vertikalna rezolucija između nivoa je također gruba. Uvjeti između nivoa nisu nužno kontinuirani pa je potrebno obratiti se na radio-sondažne podatke kako bi se dobila detaljnija slika vertikalnih varijacija meteoroloških parametara.

6.2. PRIZEMNA MOTRENJA

Nakon analize podataka slijedi interpretacija prizemnih karata. Prizemna motrenja uključuju mjerenja temperature, rosišta, određivanje naoblake i visine baze oblačnog pokrivača, vidljivosti, smjera i brzine vjetra, tlaka, tendencije tlaka, trenutne oborine i oborine u posljednjih sat vremena. Mnoge strukture i pojave prisutne pri analizi visinskih podataka vidljive su i u prizemnim podacima. Prizemne karte koriste se za dijagnozu trenutno aktivnih vremenskih sustava, eliminaciju područja gdje zaleđivanje nije vjerojatno i pronalaženje područja koja zahtijevaju daljnju analizu. Kada su odabrana područja za detaljnu analizu, prizemne karte i tekstualna izvješća se uspoređuju s visinskim kartama, izvješćima pilota i drugim izvorima. Izvješća o oborinama pri tlu su posebno korisna za određivanje faze oblaka i vjerojatnosti za postojanje prehladne tekuće vode iznad promatranog područja. Usporedbom podataka na različitim nivoima gradi se trodimenzionalna slika atmosfere.

Na prizemnim kartama se utvrđuje raspored fronti, oborina i oblačnih slojeva. Detaljnije se analiziraju hladne, tople i stacionarne fronte, centri niskog tlaka, područja zahvaćena oborinama, promjena vrste oborine, te polje vjetra. Hladne fronte se proučavaju detaljnije, jer su uvjeti koji pogoduju zaleđivanju podržani na hladnoj strani hladne fronte i u blizini hladne strane fronte; tople fronte jer uzlazno gibanje na sinoptičkoj skali i nadilaženje mogu proizvesti prehladnu tekuću vodu u situacijama gdje topliji zrak nadilazi hladniji zrak; stacionarne fronte, jer prehladna tekuća voda može nastati u zračnoj masi koja se polako diže i prekriva stacionarnu frontu; centri niskog tlaka jer uzlazno gibanje može proizvesti prehladnu tekuću vodu u blizini prizemnog centra niskog tlaka; supsidencija iza centra niskog tlaka može podržati preživljavanje prehladne tekuće vode eliminacijom dubljeg i hladnijeg oblaka ledene faze; polje vjetra, jer se položaj i utjecaj fronti, advekcija i orogenetički efekti mogu odrediti iz polja vjetra na prizemnoj karti; područja zahvaćena oborinama, jer vrste oborina u prizemnom sloju ukazuju na procese i faze oblaka iznad zahvaćenog područja. Zaleđivanje je često prisutno u područjima zahvaćenim

oborinama i na njihovim rubovima. Promjena vrste oborine ukazuje na promjene u procesima zaleđivanja u oblačnim slojevima (Politovich, 1999).

Nakon odabira područja za detaljnu analizu treba obratiti pažnju na razvoj prizemnih prilika u posljednjih nekoliko sati, na trendove i promjene u polju vjetra, tlaku, oborinama i naoblaci. Promjene u polju vjetra mogu ukazivati na promjene dubine prizemnog hladnog ($t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sloja, npr. sjeverni vjetar u jačanju najčešće ukazuje na produbljivanje prizemnog hladnog sloja. Promjene u polju tlaka otkrivaju gibanja zračnih masa i njihovih pridruženih uvjeta zaleđivanja. Početak i prestanak oborina, promjena visine baze oblaka i promjena vidljivosti ukazuju na promijenjene uvjete zaleđivanja. Promjena intenziteta i vrste oborine daje naznake o faznim promjenama u oblačnim slojevima iznad. Promjena naoblake i visine baze oblaka također daje informaciju o promijenjenim uvjetima zaleđivanja. Npr. intenzitet zaleđivanja se može povećati kada snijeg prestaje padati, ali nebo ostaje oblačno; opada intenzitet snijega; snijeg prelazi u ledenu kišu, ledenu rosulju ili ledena zrna; baza oblaka se spušta; mjestimična naoblaka prelazi u pretežno oblačno ili oblačno stanje neba. Intenzitet zaleđivanja može opasti kada: snijeg počinje; intenzitet snijega raste; ledena kiša, ledena rosulja ili ledena zrna prelaze u snijeg; baza oblaka se diže; pretežno oblačno ili oblačno stanje neba prelazi u mjestimično oblačno.

Prizemna motrenja imaju relativno dobru prostornu i vremensku rezoluciju i u njima je lako uočiti gibanje fronti i zračnih masa, te trendove oborina. Mogu se koristiti za određivanje strukture oblaka iznad motrenog područja. Međutim, motrenja nisu konzistentna od stanice do stanice, a ponekad i od države do države. Neke automatske meteorološke postaje (ASOS, eng. *Automated Surface Observing System*) nisu opremljene senzorima za ledenu kišu, dok neke stanice uopće ne javljaju ledenu kišu, ledenu rosulju, ledena zrna, zrnati snijeg, soliku i rosulju. Druge (AWOS - Automatska meteorološka postaja, eng. *Automated Weather Observing System*; AMOS - Automatska meteorološka postaja, eng. *Automated Meteorological Observing System*) uopće ne javljaju oborinu. Automatske stanice javljaju naoblaku samo ako je podnica niža od ~ 3.5 km iznad tla.

Javlja se pogreške kod određivanja vrste oborine, npr. ledena zrna, ledena kiša i ledena rosulja su ponekad krivo javljene. Na kartama je za neku točku podatak o oborini obično samo jedan što može navesti na krivi zaključak ako je oborina miješanog tipa. Lokalni efekti mogu zamaskirati sinoptičke i mezoskalne procese. Izvješće o intenzitetu oborine nije precizno, npr. SN (slab snijeg, eng. *light SNow*) može značiti od nekoliko pahulja do brzine akumulacije 12-19 mm/h.

6.3. UPOTREBA PODATAKA DOBIVENIH SONDAŽOM I VJETRENIM PRESJEČNICIMA

Vertikalni profili temperature, rosišta, injišta i vjetra su izrazito korisni kod utvrđivanja karakteristika zračnih masa i zona u kojima postoji mogućnost za zaleđivanje. Sondaža daje sliku vertikalnog profila vlažnosti i temperature, te se na osnovi sondažnih podataka donose zaključci o tome gdje se nalaze oblačni slojevi. Vertikalni profili otkrivaju moguću glacijaciju (ukoliko se iznad oblaka prehladne vode nalazi oblak temperature niže od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Usporedbom niza vertikalnih profila utvrđuje se vrijeme zadržavanja oblačnih slojeva u temperaturnom rasponu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Usporedbom profila sa satelitskim slikama može se potvrditi prisutnost, temperatura i visina gornje granice oblačnog sloja. Usporedba profila s vrstama oborina zabilježenim kod prizemnih motrenja govori o pretežnom sastavu oblaka. Nedostatak je što su prostorna i vremenska rezolucija sondaža male, pa mezoskalni elementi koji mogu bitno utjecati na zaleđivanje mogu proći neopaženo. Također, mjerenja relativne vlažnosti na vrlo niskim temperaturama mogu biti nepouzdana zbog ograničenja instrumenta.

6.3.1. PROCJENA OBLAČNIH SLOJEVA

Vertikalni profili temperature i rosišta daju naznake raspodjele oblačnih slojeva i područja potencijalnog stvaranja oblaka. Tablica 6.1. sadrži upute za procjenu naoblake usporedbom rosišne razlike i relativne vlažnosti.

Tablica 6.1. Naoblaka u ovisnosti o relativnoj vlažnosti i rosišnoj razlici

rosišna razlika	relativna vlažnost	naoblaka
0 °C do 2 °C	90% do 100%	oblačno
2 °C do 4 °C	80% do 90%	oblačno do pretežno oblačno
4 °C do 5 °C	70% do 80%	pretežno do umjereno oblačno
5 °C do 6 °C	65% do 70%	umjereno oblačno do vedro

Uobičajena rosišna razlika za oblake $t \geq 0$ °C je 1 °C do 2 °C, dok je za oblake -10 °C $\geq t \geq -20$ °C rosišna razlika oko 4 °C (za temperature oblaka ispod -12 °C točnije je obratiti se na injište).

Procjena strukture oblaka temeljena na sondaži započinje određivanjem visine baze nekonvektivnog oblaka. Kao što se vidi iz tablice 6.1. za nekonvektivne stratiformne oblake relativna vlažnost od 85% odgovara opisu naoblake: "oblačno do pretežno oblačno". Ovakva vrijednost relativne vlažnosti odgovara rosišnoj razlici manjoj od 4 °C (za oblake tekuće faze). Tako se visina baze sloja "pretežno oblačno" može procijeniti na profilu nalaženjem visine na kojoj rosišna razlika pada na 4 °C.

Za određivanje visine baze konvektivnog oblaka ili oblaka koji je nastao podizanjem česti potrebno je izračunati kondenzacijsku razinu dizanja (eng. *lifting condensation level* - LCL). Kondenzacijska razina se

nalazi na visini na kojoj se sijeku krivulja koja prati liniju omjera miješanja počevši od prizemne temperature rosišta i krivulja koja prati suhu adijabatu počevši od prizemne temperature. LCL određen ovom metodom dobar je samo u vrijeme sondaže i samo za konvektivne procese.

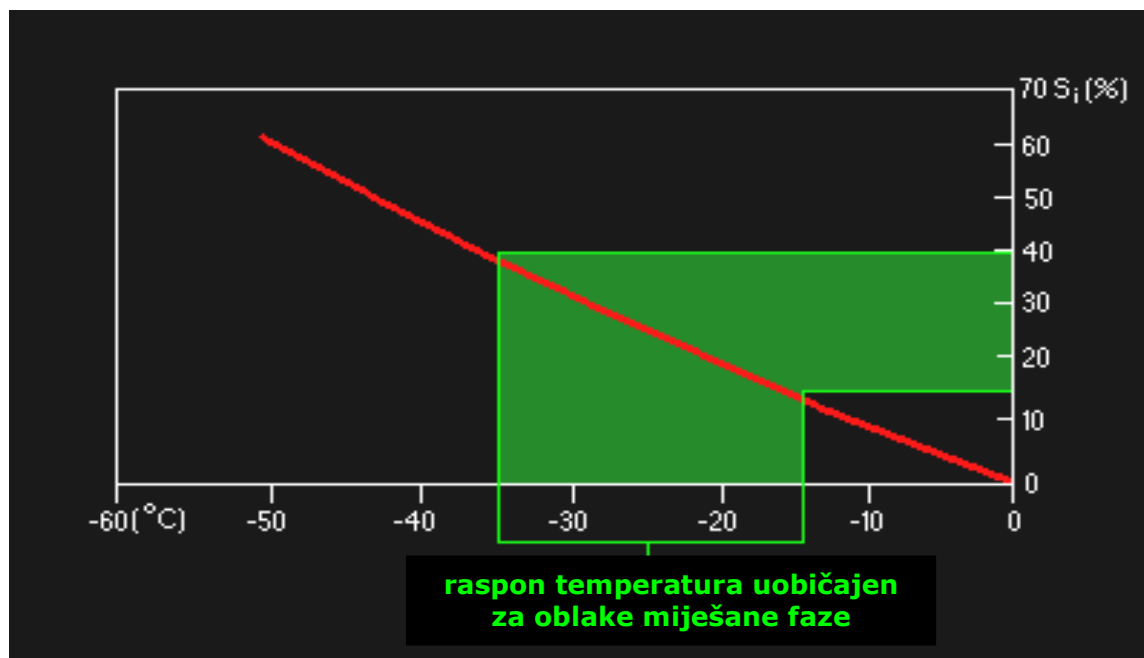
U odnosu na podatke dobivene sondažom vjetreni presječnici pružaju veću vertikalnu i vremensku rezoluciju strukture vjetra, pa omogućavaju precizniju dijagnozu i prognozu promjena mezoskalnih svojstava koja utječu na potencijal za zaleđivanje. Iako vjetreni presječnici nisu široko rasprostranjeni, u područjima u kojima se koriste pružaju detaljan zapis razvoja vjetra na nekoj lokaciji. Najbolje ih je koristiti u kombinaciji sa sondažnim podacima, jer ne daju podatke o temperaturi i vlažnosti. Interpretacijom vremenskih nizova profila vjetra moguće je odrediti konfiguraciju i gibanje zračnih masa.

6.3.2. ODREĐIVANJE FAZE OBLAKA

Oblaci koji se sastoje od prehladne vode predstavljaju veliki rizik od zaleđivanja, dok oblaci sačinjeni od ledenih kristalića ne predstavljaju nikakvu opasnost od zaleđivanja. Stoga je neophodno razlikovati oblake prehladne vode od ledenih oblaka. Jedna od metoda za razlikovanje faza oblaka koristi podatke profila injišta. Injište je temperatura na kojoj je zrak zasićen u odnosu na led. Razlika između rosišta (T_d) i injišta (T_f) je oko 1/9 temperature rosišta (u °C) ili $T_d \approx 1.1 T_f$ (T_f je uvijek veća od T_d) (Politovich, 1998b).

Na istoj temperaturi je tlak pare nad ledom niži od onoga nad vodom, te na temperaturama ispod 0 °C prije dolazi do depozicije nego do kondenzacije. Čest zasićena u odnosu na vodu ($RH_w = 100\%$) prezasićena je u odnosu na led. Prezasićenost u odnosu na led definirana je kao $S_i = RH_i - 100\%$, gdje je RH_i relativna vlažnost u odnosu na led. Do glacijacije dolazi u oblaku miješane faze koji je zasićen ili blizu zasićenja u odnosu na vodu i prezasićen u odnosu na led. U takvim uvjetima ledeni

kristalići rastu na užtrb vodenih kapljica. Vodena para nastala podizanjem i hlađenjem deponira se na led, ne kondenzira se na kapljicama. Nadalje, ukoliko je atmosfera blago nezasićena, vodene kapljice isparavaju i opskrbljuju ledene kristaliće vlagom za depoziciju. Ovaj proces se nastavlja dok atmosfera ne postane zasićena nad ledom ($RH_i = 100\%$). Do glacijacije može doći naglo ako je temperatura dovoljno niska. Oblačni sloj miješane faze može prijeći u ledeni oblak za manje od 30 minuta. Ovakva transformacija potpuno eliminira prijetnju zaleđivanja za taj sloj. Slika 6.1. (slika 6.1. preuzeta je iz Politovich 1998b) prikazuje prezasićenost s obzirom na led (S_i) pri potpunoj zasićenosti nad vodom ($RH_w = 100\%$) u ovisnosti o temperaturi. Crvena krivulja pokazuje da pri zasićenosti nad vodom S_i raste s padom temperature. Nije neobično da S_i premaši 10% u oblaku miješane faze. Oblak miješane faze obično nastaje unutar zeleno osjenčanog temperaturnog raspona ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$), iako se može pojaviti i na višim temperaturama. Unutar ovog raspona S_i može poprimiti vrijednosti do 40% u hladnijem dijelu raspona.



Slika 6.1. Prezasićenost nad ledom u ovisnosti o temperaturi pri $RH_w = 100\%$ (crveno)

Kombinirajući podatke relativne vlažnosti s temperaturnim relacijama za procese tekuće i krute faze može se odrediti faza pojedinog sloja oblaka. Tekuća faza dominira na temperaturama iznad -15°C . Na nižim temperaturama počinju dominirati procesi zaleđivanja. Kada temperatura padne na -40°C voda više ne može postojati u tekućem obliku i aktivni su samo procesi koji stvaraju led. Najteže je odrediti fazu između -15°C i -40°C . Čak i na višim temperaturama teško je odrediti fazu ako je počeo proces glacijacije. Naročito je to teško ako oblak postoji duže vrijeme i/ili ako hladniji dio oblaka sadrži veliku količinu ledenih kristalića.

6.3.3. ZASIJAVANJE LEDOM (ICE SEEDING), INJENJE (RIMING)

Na proces glacijacije osim razlika u tlakovima para nad vodom i ledom utječe i injenje. Injenje je proces u kojem se prehladne kapljice sudaraju s kristalićima leda i zamrzavaju na njima. Čestica leda je u oblaku obično veća od kapljice (zbog prvog procesa) i pada brže nego manje kapljice. Dok čestica leda pada, na nju se zaleđuju kapljice, gustoća joj raste i ona sve brže pada. Tako se ovaj proces ubrzava. Ukoliko se iznad oblaka prehladne vode nalazi ledeni oblak, glacijacijom se oblak prehladne vode može zalediti za dvadesetak minuta. Ovakav slučaj je zabilježen u sjeveroistočnom Coloradu, SAD (Politovich i Bernstein, 1995) gdje je tekuća faza brzo potrošena u donjem sloju oblaka procesom injenja kristalića leda koji su padali odozgo.

6.3.4. PREHLADNA VODA U NESTABILNOJ ATMOSFERI

Atmosferska stabilnost i vrsta oblaka su također važni čimbenici koje treba uzeti u obzir kod određivanja faze oblaka. Jača vertikalna gibanja povezana s kumuliformnim oblacima omogućavaju prisutnost prehladne tekuće vode na nižim temperaturama, nego što bi to bilo moguće u stabilnim uvjetima sa stratiformnim oblacima. Jaka vertikalna gibanja unutar kumulusa opskrbljuju gornje dijelove oblaka prehladnom tekućom

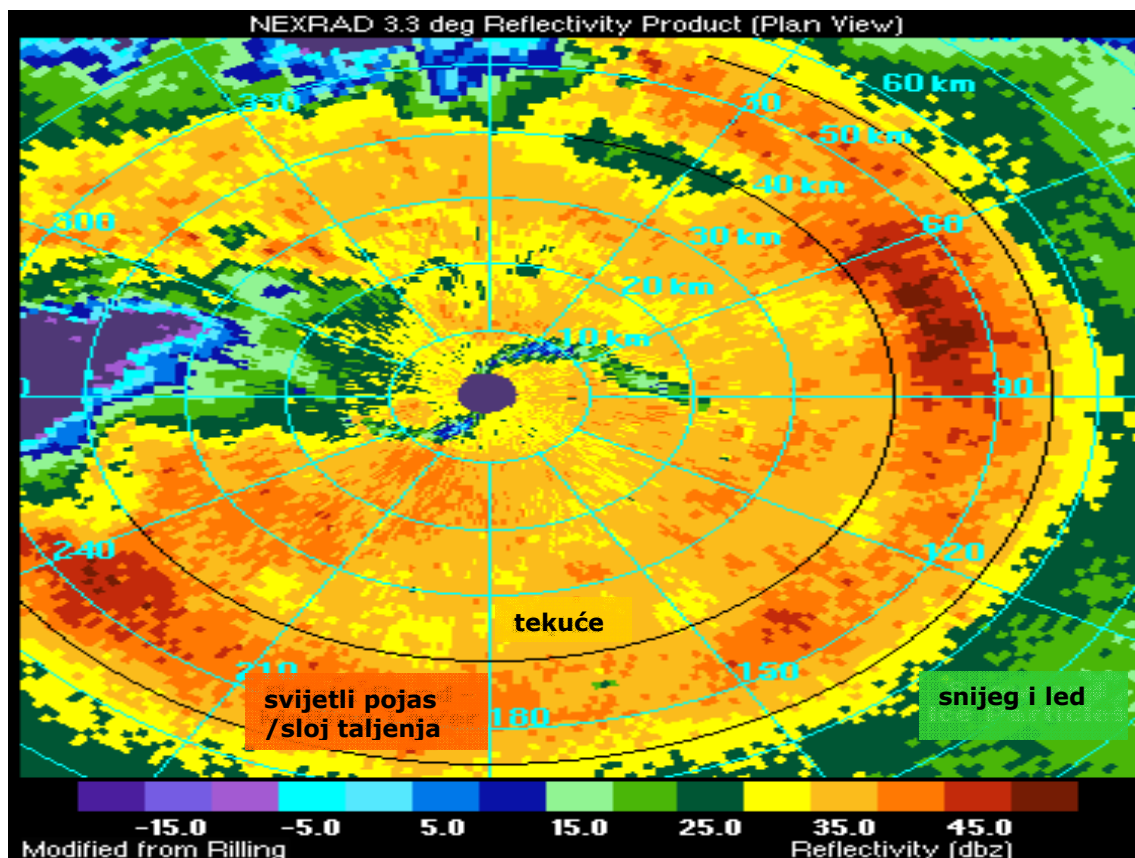
vodom. Ona također zadržavaju ledene kristaliće tamo gdje nastaju - pri vrhu oblaka, sprječavaju ih da padnu kroz oblak kao što bi se dogodilo u dubokoj cikloni sa slabijim vertikalnim gibanjima. Tako pri procjeni vlažne, nestabilne sondaže koja podržava razvoj kumulusne naoblake treba očekivati tekuću vodu na nižim temperaturama, nego što bi to bilo uobičajeno za stabilnu atmosferu.

6.4. SATELITSKE SLIKE

Oblake koji se sastoje od čestica leda moguće je razlikovati od oblaka prehladnih kapljica analizom satelitskih snimaka u infracrvenom dijelu spektra (IR 3.9 μm) (Thompson i sur., 1997). Na ovoj valnoj duljini refleksija na kapljicama vode je bitno jača od refleksije na česticama leda. Tako su niži oblaci (stratusi i stratokumulusi) koji sadrže kapljice bijeli dok su viši oblaci (cirusi) koji se sastoje od čestica leda tamni (obrnuto od uobičajenog izgleda visokih i niskih oblaka na snimci na kanalu IR 4 μm). Kada se koriste dnevne slike IR 3.9 μm potrebno je odstraniti refleksiju Sunčevih zraka.

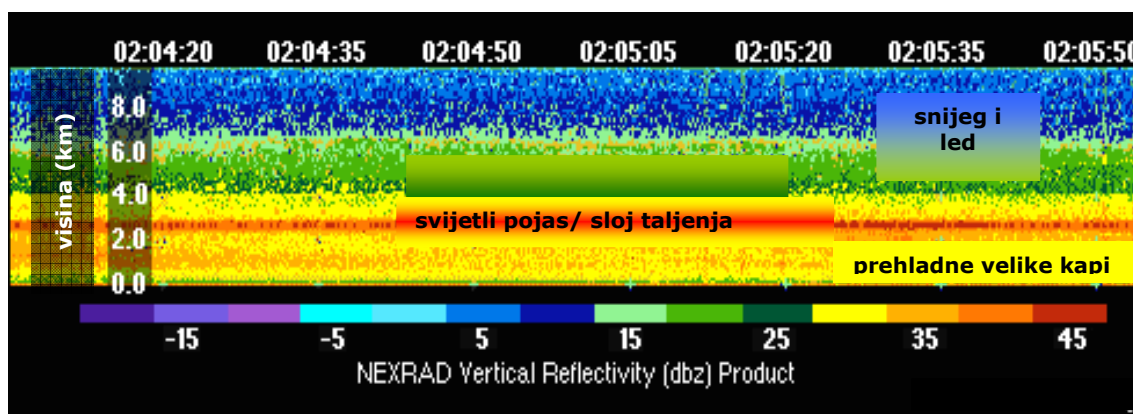
6.5. KORIŠTENJE RADARSKIH SLIKA ZA OTKRIVANJE PROCESA TOPLOG SLOJA

Ukoliko je na osnovi prizemnih motrenja ustanovljeno da u prizemnom sloju pada ledena kiša ili ledena rosulja, potrebno je odrediti postoji li iznad sloj u kojem se oborina tali, te koliko je dubok pripadni hladni ($t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sloj. Za to je korisno na radarskim slikama potražiti tzv. svijetli pojas (npr. Martner i sur., 1993). Svijetli pojas je lokalni maksimum radarske refleksivnosti koji nastaje na temperaturama oko $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snijeg se počinje taliti dok pada kroz sloj iznad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i na pripadnim kristalima se formira tanki tekući sloj. Kako tekuće kapljice reflektiraju više energije natrag prema radaru, nego snježni kristalići slične veličine, vodom presvučeni snijeg ima veću refleksivnost. Tako se na radarskoj slici ovaj temperaturni sloj vidi kao svijetla traka (Slika 6.2.); (slike 6.2. i 6.3. preuzete su iz Politovich 1998a). Mokre pahuljice imaju oko pet puta veću refleksivnost nego kapljice kiše ili suhe pahulje. Kada se snijeg dalje topi smanjuje mu se volumen, a time i refleksivnost. Kada se ledeni kristali potpuno rastale, kapljice koje nastanu padaju brže, pa se koncentracija kišnih kapi ili kapi rosulje naglo smanjuje što dalje slabi refleksivnost.



Slika 6.2. Radarska reflektivnost (konusni planarni presjek, eng. *Plan Position Indicator - PPI*), vidljiv je svijetli pojas (narančasto i crveno)

Visinu svijetlog pojasa je jednostavno odrediti. Na vertikalnom presjeku reflektivnosti visinu očitamo (Slika 6.3.). Na konusnom prikazu reflektivnosti (Slika 6.2.) visinu svijetlog pojasa određujemo prema relaciji $D = R \sin \theta$ (D je visina baze svijetlog pojasa, R udaljenost baze od radara, θ kut elevacije radara). Kada znamo na kojoj se visini nalazi svijetli pojas možemo odrediti dubinu sloja ispod u kojem je moguće postojanje prehladne tekuće vode (uz uvjet da je donji sloj ispod 0 °C). Treba imati na umu da se visina sloja zaleđivanja može naglo mijenjati.



Slika 6.3. Radarska refleksivnost, vertikalni presjek

U svojem istraživanju Prater i Borho (1992) razvili su algoritam za detekciju ledene kiše baziran na rezultatima istraživanja slučaja ledene kiše prouzročene nadilaženjem i zaključili su da ovi slučajevi imaju prepoznatljiva obilježja na radarskim slikama NEXRAD-a, koja su k tome i jednostavna za parametrizaciju. Algoritam prvo provjerava prizemnu temperaturu kako bi utvrdio postoji li mogućnost za ledenu kišu, zatim prisutnost svijetlog pojasa na radarskoj slici i konačno se utvrđuje postoji li sloj smicanja ispod svijetlog pojasa. Pretpostavlja se da sloj smicanja aproksimira nižu granicu zaleđivanja i da su hidrometeori potpuno rastaljeni prije nego što prođu kroz donju granicu zaleđivanja. Tako bi opasnost od ledene kiše postojala od tla do nivoa gdje prestaje smicanje kada je temperatura pri tlu $< 0^{\circ}\text{C}$.

Sondaža se obavlja dva puta dnevno i podaci se koriste da bi se odredili slojevi zaleđivanja i smicanja, ali ti su podaci pouzdani samo u blizini lansirne postaje dok se radarom može kontinuirano pratiti slojeve smicanja i svijetle pojaseve unutar radarskog raspona i opskrbiti algoritam za detekciju ledene kiše reprezentativnijim podacima za veće područje. Tako su algoritmi za detekciju ledene kiše koji koriste radarske podatke vrlo korisni u kratkoročnoj prognozi uvjeta koji pogoduju zaleđivanju.

7. PROGNOZA METEOROLOŠKIH UVJETA ZALEĐIVANJA

Posljednjih godina razvijen je niz dijagnostičkih i prognostičkih algoritama za procjenu zaleđivanja. Oni se na različite načine koriste podacima numeričkih modela, radarskih mozaika, satelitskim i prizemnim motrenjima. Svaka od metoda ima određene prednosti i ograničenja.

Algoritmi koji se isključivo koriste rezultatima prognostičkih modela ovise o poljima relativne vlažnosti i temperature. Izlazna polja temperature ovih modela (npr. RUC, mezoskalni model, eng. *Rapid Update Cycle*) mogu se s velikom točnošću koristiti za određivanje područja koja su pretopla ili prehladna da bi u njima zaleđivanje bilo moguće, te za određivanje temperaturnih raspona u kojima je zaleđivanje uobičajeno. Međutim, pri korištenju modelom generiranih polja relativne vlažnosti za određivanje naoblake nastaju problemi. Zbog rezolucije modela, usrednjavanja i netočnosti, kao prag za postojanje naoblake nije moguće koristiti relativnu vlažnost od 100%. Potrebno je balansirati između spuštanja praga kako bi se obuhvatilo što više oblačnih područja i podizanja praga kako bi se prostor dijagnosticiranog/prognoziranih zaleđivanja održao što manjim. Rješenje ovog problema je najčešće odabir praga relativne vlažnosti od 60 - 80%. U nekim slučajevima koriste se dodatne informacije poput termodinamičke strukture i računaju polja vertikalnih brzina u kombinaciji s poljima relativne vlažnosti kako bi se dobila preciznija informacija o položaju oblaka, ili se dalje spuštaju vrijednosti praga kada su prisutne određene termodinamičke strukture i/ili strukture vertikalnih brzina. Nijedan od ovih načina nije uspješan u točnom određivanju položaja oblaka i svi dijagnosticiraju/prognoziraju zaleđivanje na lokacijama gdje naoblake nema. Tako algoritmi bazirani prvenstveno na rezultatima modela obuhvaćaju najviše PIREP-a (pilotsko meteorološko izvješće, eng. *PIlot REPort*), ali pretjeruju u prognozi: oni ponekad prognoziraju zaleđivanje tamo gdje naoblake i nema.

Algoritmi koji se za određivanje područja zaleđivanja koriste instrumentalnim podacima su obično precizniji. Kada identificiraju da u nekom području postoji zaleđivanje, ono najčešće tamo i jest, i PIREP-i će to potvrditi. Tako određeno područje će biti manje od onog dobivenog algoritmom baziranim na rezultatima modela. Međutim, ovi algoritmi ne detektiraju veliki postotak slučajeva zaleđivanja zbog ograničenja uređaja ili primijenjenih metoda. Npr. algoritmi koji koriste satelitske podatke, koriste kombinaciju podataka nekoliko kanala (vidljive i infracrvene) da bi izdvojili oblake za koje postoji velika vjerojatnost da imaju prehladne vrhove. Taj način je dobar kada postoji jedan oblačni sloj, međutim, ne uspijeva identificirati oblake kada postoji više oblačnih slojeva (hladan visoki oblak zasjenjuje nižeg prehladnog), te u slučaju klasičnog dubokog oblaka koji daje ledenu kišu (dubok, hladan oblak zasjenjuje niski sloj prehladne oborine). Algoritam baziran na radarskim podacima koristi podatke radarskog mozaika i numeričkog modela da bi odredio područja negativnih temperatura unutar oborina. Problem je što se veliki dio zaleđivanja događa na područjima stotinama kilometara daleko od eha raspoznatljivog na radarskom mozaiku. Razlog je veličina kapljica koje uzrokuju zaleđivanje. Premale su da bi bile vidljive na radaru, osim iz velike blizine. Izuzetak je ledena kiša koju je moguće otkriti i na relativno velikim udaljenostima. Tako algoritmi bazirani uglavnom na instrumentalnim podacima (sateliti, radari, prizemna motrenja) uspješno prognoziraju zaleđivanje tamo gdje upućuju na njegovo prisustvo, ali podbacuju jer nijedan od raspoloživih instrumenata nije u mogućnosti identificirati sve lokacije na kojima se zaleđivanje odvija.

7.1. CIP - CURRENT ICING POTENTIAL

CIP (eng. *Current Icing Potential*) je automatski generirani indeks trenutnog potencijala za zaleđivanje. Razvio ga je NCAR (Nacionalni centar za atmosferska istraživanja, eng. *National Center for Atmospheric*

Research), a koriste FAA (Federalna zrakoplovna uprava, eng. *Federal Aviation Administration*) i druge vladine agencije u SAD-u. CIP daje 3-D umrežena polja potencijala za zaleđivanje i prisustvo velikih prehladnih kapi u razmacima od jednog sata. Ideja koja stoji iza dijagnostičkog algoritma CIP-a je iskoristiti prednosti i umanjiti mane oba pristupa kako bi se obuhvatio maksimalan broj PIREP-a uz najmanju površinu/volumen područja zaleđivanja. Algoritam prvo integrira podatke GOES-8 satelita, površinska motrenja i izlaz RUC modela da bi odredio naoblaku (3-D), zatim koristi podatke navedenih izvora i radarski mozaik kako bi odredio područja i pripadajuće vjerojatnosti za zaleđivanje i zaleđivanje prehladnim velikim kapima. Procedura ovisi i o aktivnim fizikalnim procesima za pojedinu situaciju. Algoritam CIP upotrebljava podatke od četiri izvora (satelitske, prizemnih motrenja, radarski mozaik, RUC model). Koristeći podatke iz više izvora na način prilagođen pojedinoj situaciji (prilagođen aktivnom fizikalnom procesu) moguće je umanjiti utjecaj nekvalitetnih podataka.

CIP ALGORITAM ZA ODREĐIVANJE INTENZITETA ZALEĐIVANJA

NCAR je nedavno uklopio intenzitet zaleđivanja u svoj Current Icing Potential (CIP) algoritam. Intenzitet je kombinacija atmosferskih uvjeta i odgovora zrakoplova koji se nalazi u takvoj situaciji. Kada pilot javi zaleđivanje putem PIREP-a, taj podatak je donekle subjektivan. CIP intenzitet algoritam pokušava pomiriti ove često oprečne izvore informacija. CIP služi kao polazište za algoritam CIP intenzitet. Intenzitet "slabo" pridružen je svakoj točki s potencijalom > 0.05 (na skali 0 - 1), "umjereno" zaleđivanje imaju područja gdje su prisutne prehladne velike kapi, uključujući duboku konvekciju. Dalje je intenzitet prilagođen uz pomoć prognoze sadržaja tekuće vode i vertikalne brzine iz RUC modela, kao i intenziteta javljenog u nedavnim bliskim PIREP-ima. Izlaz je dan na istoj mreži kao i potencijal (Politovich i sur., 2004).

7.2. FIP - FORECAST ICING POTENTIAL

FIP je automatski generirani prognostički indeks potencijala za zaleđivanje razvijen u NCAR-u. Algoritam FIP se u procjeni potencijala za zaleđivanje i postojanje prehladnih velikih kapi koristi izlazom RUC modela horizontalne rezolucije 20 km (McDonough i sur., 2004). Prognoza se radi svaka 3 sata i vrijedi 3, 6, 9 i 12 sati.

Current Icing Potential-CIP algoritam služi kao predložak za FIP. CIP kombinira satelitska i radarska motrenja, METAR-e (METAR izvješće, eng. *METeorological Aerodrome Report*) i PIREP-e s izlazom RUC modela kako bi procijenio potencijal za zaleđivanje svakoga sata. Kako takva motrenja nisu na raspolaganju u prognostičkom modu, FIP se mora kao surogatima poslužiti izlazima numeričkog modela da bi procijenio temperaturu vrha oblaka, vrstu oborine i druge za zaleđivanje relevantne parametre. Ostatak algoritma oponaša CIP-ov pristup dijagnozi potencijala za zaleđivanje.

FIP koristi relativnu vlažnost dobivenu modelom da bi odredio sadrži li stupac naoblaku ili ne, visine vrhova i podnica oblaka te broj slojeva. Podaci o naoblaci kombiniraju se s onima o temperaturi da bi se dobila informacija o rasponu temperatura oblačnih slojeva. Nakon što su određeni položaji oblaka i oborine, FIP kombinira podatke temperature, temperatura vrhova oblaka, relativne vlažnosti, vertikalne brzine, prehladnu tekuću vodu i QPF (kvantitativna prognoza oborine, eng. *Quantitative Percipitation Forecast*) za određivanje potencijala za zaleđivanje. Svi ovi podaci kombinirani su u fizikalno osnovanom situacijskom logičkom sustavu koji koristi mape interesa. Mape interesa predstavljaju relevantnost pojedinog parametra za zaleđivanje. Funkcije članstva (eng. *membership functions*) za mape interesa variraju ovisno o zatečenoj situaciji za svaki stupac modela (npr. jedan sloj oblaka koji ne daje oborinu, konvektivni oblaci, itd.). Na ovaj način FIP djeluje kao živi prognostičar, primjenjujući izlaze modela na najbolji mogući način, ovisno o situaciji, kako bi dao prognozu potencijala za zaleđivanje. Funkcije članstva zasnivaju se na prognostičkom

iskustvu, in situ setovima podataka prikupljenima istraživačkim zrakoplovima, i konzistentne su s velikim setovima PIREP-a. FIP daje točne prognoze u usporedbi s razrađenim primjerima i PIREP-ima, a performanse su mu slične CIP-ovima.

8. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA ZRAKOPLOVA NAD HRVATSKOM

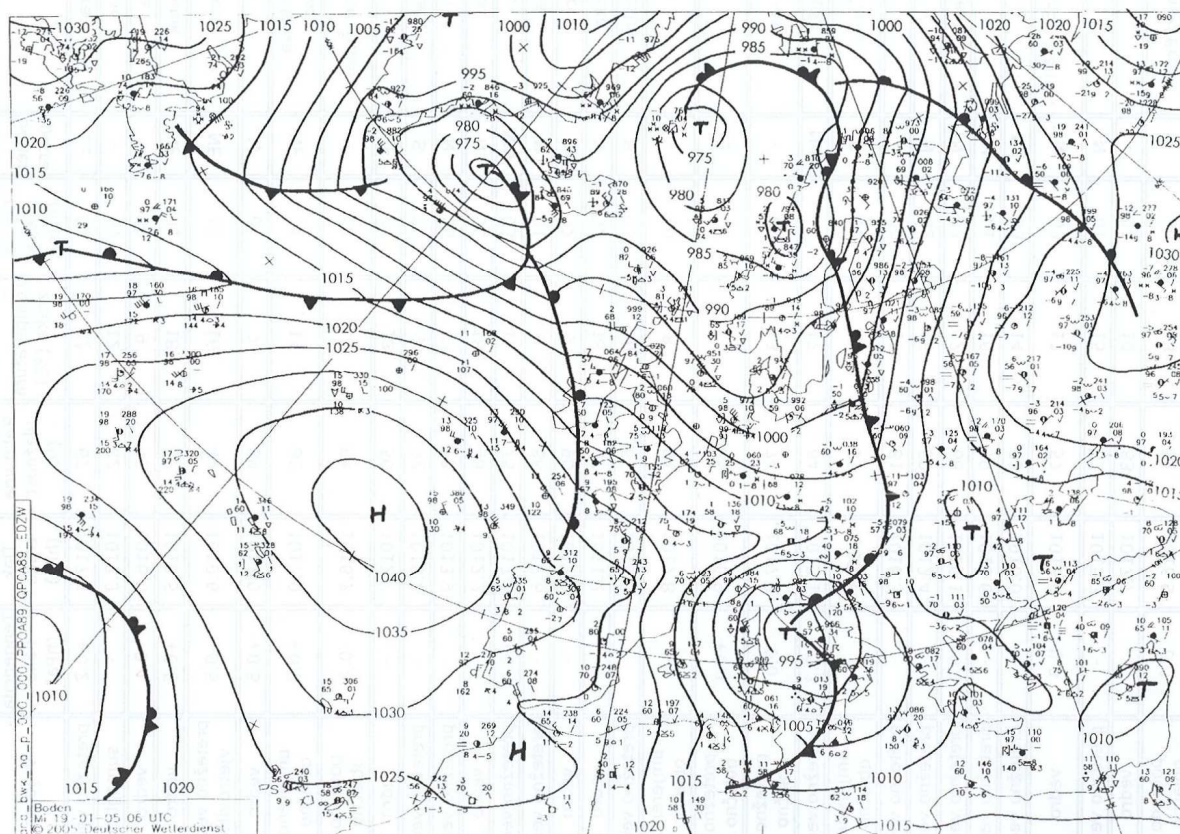
8.1. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA 19.01.2005.

U pilotskim izvješćima 19.01.2005. javljeno je zaleđivanje ispod 600 m nad zračnim prostorom Hrvatske. Nažalost, nema podataka o tome gdje i kada je točno zaleđivanje primijećeno.

U 0600 UTC područje Hrvatske se nalazilo neposredno ispred tople fronte, u sektoru nadilaženja ciklone sa središtem iznad središnje Italije (Slika 8.1.). Hladna fronta u sustavu ove ciklone protezala se preko Sicilije do Tunisa. Topla fronta se pružala preko Mađarske te je bila spojena preko druge hladne fronte iznad Poljske sa sustavom ciklone sa središtem u Norveškom moru. Nad Atlantikom, kao i nad istočnim Sredozemljem, bila su središta visokog tlaka. Ciklona iznad središnje Italije je imala zatvorenu cirkulaciju do iznad visine plohe AT 300 hPa.

Iz prizemnih motrenja oborine vidljivo je da je u 0600 UTC na Plesu zabilježena prehladna oborina u prethodnom satu. Od 0900 do 1200 UTC u središnjoj Hrvatskoj pada slab do umjeren snijeg, na Jadranu kiša. Nakon podneva na prostoru Hrvatske više nije bilo oborina. Sjever i istok Hrvatske cijeli dan bilježe maglu.

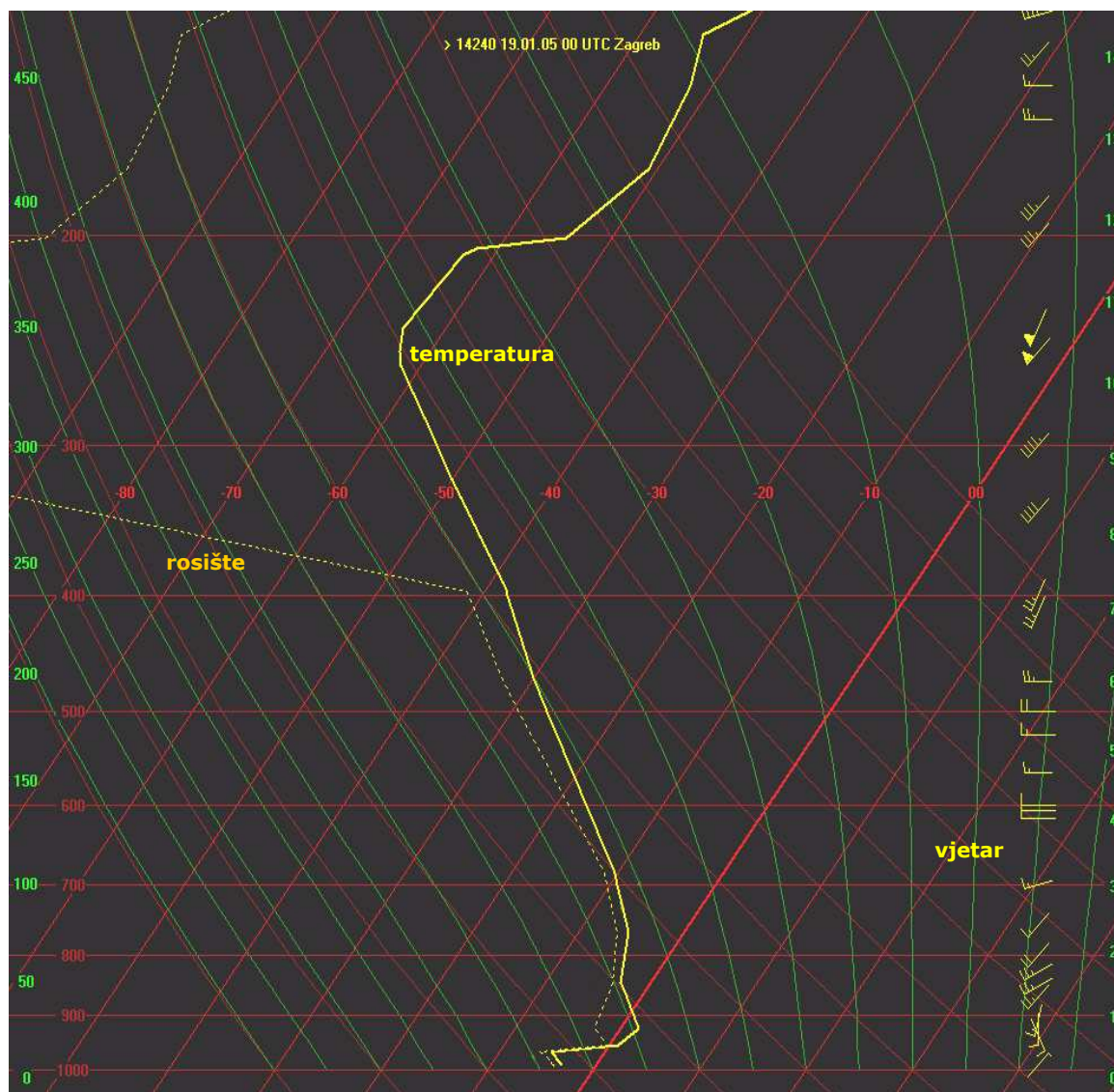
Iz prizemnih motrenja naoblake vidljivo je da je područje Hrvatske do 0300 UTC bilo prekriveno stratusnom naoblakom (stratusom i/ili altostratusom). Nakon 1500 UTC pojavilo se nešto kumulusne naoblake (stratokumulus i altokumulus). Općenito je kasnije poslijepodne i navečer bilo manje naoblake.



Slika 8.1. Prizemna sinoptička karta 19.01.2005. u 0600 UTC

Zagreb je 19.01.2005. u 0000 UTC imao sondužu karakterističnu za sektor nadilaženja (Slika 8.2.). Postojala je niska inverzija te sloj zraka temperature iznad 0 °C na visini od 500 do 1050 m. Postojala su dva sloja oblaka: plitak prizemni sloj od tla do visine od 600 m, te dubok oblačni sloj od 1100 do ~7000 m. Temperatura prizemnog sloja do visine od 500 m nije prelazila 0 °C, a najniža temperatura u sloju je iznosila -6 °C, pa se do te visine oblak najvjerojatnije sastojao od prehladnih kapljica i u njemu je postojao rizik od zaleđivanja. Temperatura gornjeg sloja se spuštala do -40 °C i taj je sloj najvjerojatnije bio u potpunosti sačinjen od ledenih kristala s obzirom da nije bilo jačih vertikalnih gibanja, međutim moguće je da su u njegovom donjem dijelu još preživljavale prehladne kapljice. U prilog tome da je glacijacija nastupila u cijeloj dubini gornjeg sloja (1100 - ~7000 m) ide i činjenica da je zaleđivanje javljeno na visini do 600

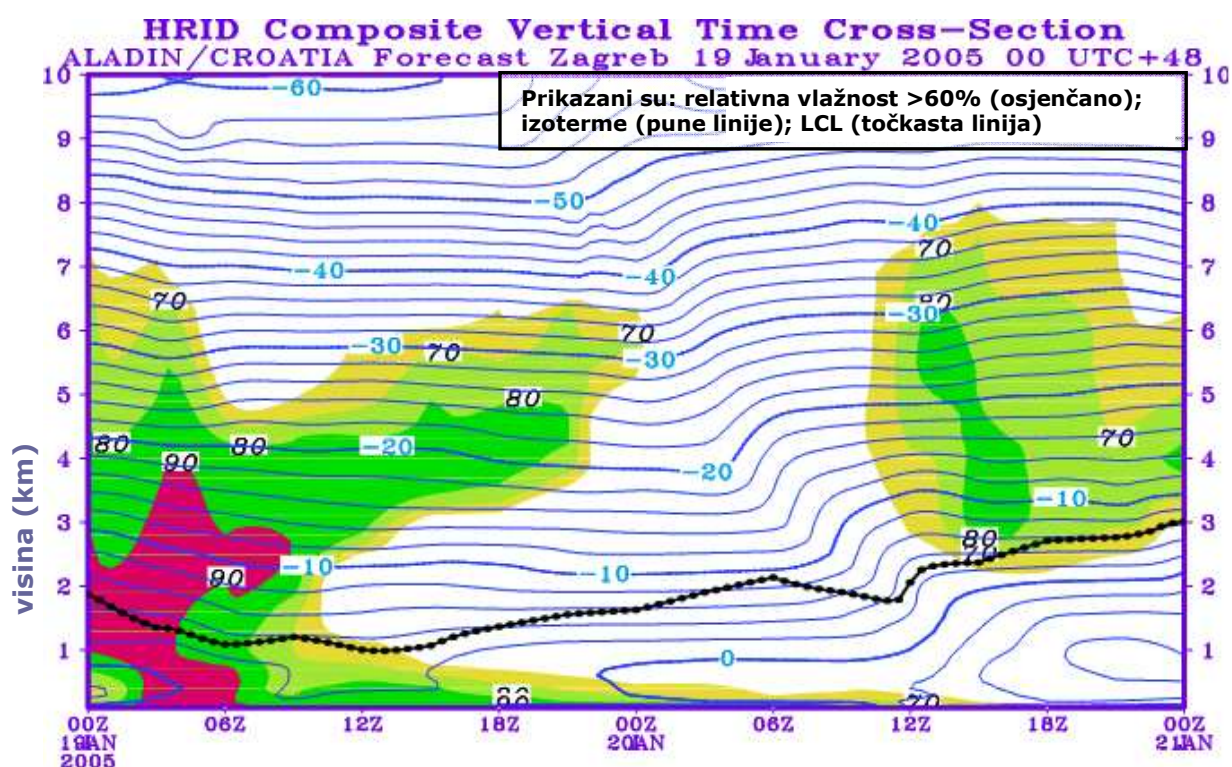
m. Ukoliko je iz ovog sloja (1100 - ~7000 m) padala oborina, ona se talila u toplom sloju (500 - 1050 m) i u donjem sloju (0 - 500 m) je postajala prehladnom.



Slika 8.2. Sondaža za Zagreb 19.01.2005. u 0000 UTC

Dakle, daleko rizičniji uvjeti za zaleđivanje postojali su u prvom dijelu dana, i najvjerojatnije se zaleđivanje koje je javljeno PIREP-om dogodilo iznad Zagreba, na prilazu aviona pisti s obzirom da je javljeno ispod 600 m. Za pretpostaviti je da je viša naoblaka nad cijelom Hrvatskom bila ledene

faze jer su vrhovi gornjeg sloja oblaka vrlo niskih temperatura, jer je padao snijeg, i jer nijedan PIREP nije javljen iznad 600 m. Prehladna oborina na Plesu je nastala u donjem sloju oblaka (od tla do 600 m visine) i/ili padanjem iz gornjeg ledenog sloja kroz topli sloj ($t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), pa prehladivanjem u donjem hladnom sloju. Ovakva situacija je predstavljala opasnost od jakog zaleđivanja prozirnim ledom. Opasnost je prošla pojavom snijega.

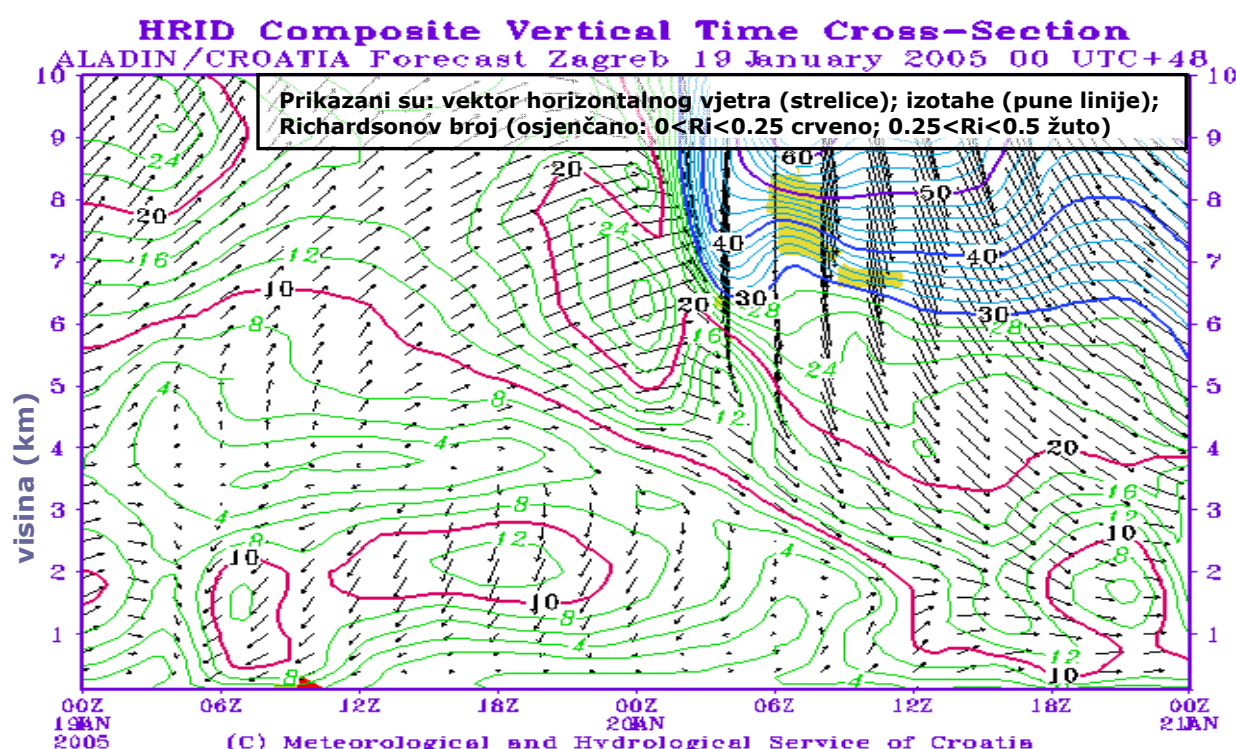


Slika 8.3. HRID profil Aladina za Zagreb za 19.01.2005.

Sondaža (nije prikazana) za Zagreb za 1200 UTC također odaje karakteristike toplog prodora, ali je cijeli profil hladniji i suši (cijeli profil temperature je ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uzrok tome je pojava i jačanje vjetera početno sjevernog, sjeverozapadnog, zatim sjeveroistočnog smjera gotovo od tla do visine 3000 m, i time hladne advekcije. Sjeverni je vjetar u ovom sloju vezan uz približavanje centra visokog tlaka sa zapada. Prema vertikalnom profilu HRID-a (Izentropski model visoke rezolucije, eng. *High Resolution Isentropic Diagnosis*) (Slika 8.4.) sjeverni se vjetar pojavio u 0400 UTC i zadržao se do

kraja dana. Topla fronta se gotovo nije pomaknula do 1200 UTC, međutim do kraja dana je centar visokog tlaka potisnuo ovaj ciklonalni sustav i zauzeo cijelo područje Hrvatske. Shodno tome uslijedilo je razvedranje, i smanjena je mogućnost za pojavu zaleđivanja.

Vertikani vremenski presjek HRID-a za Zagreb otkriva da se topli sloj ($> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) zadržao do 0400 UTC (Slika 8.3.). Kasnije počinje padati snijeg i cijeli se duboki oblačni sloj tada najvjerojatnije sastoji od ledenih kristala.



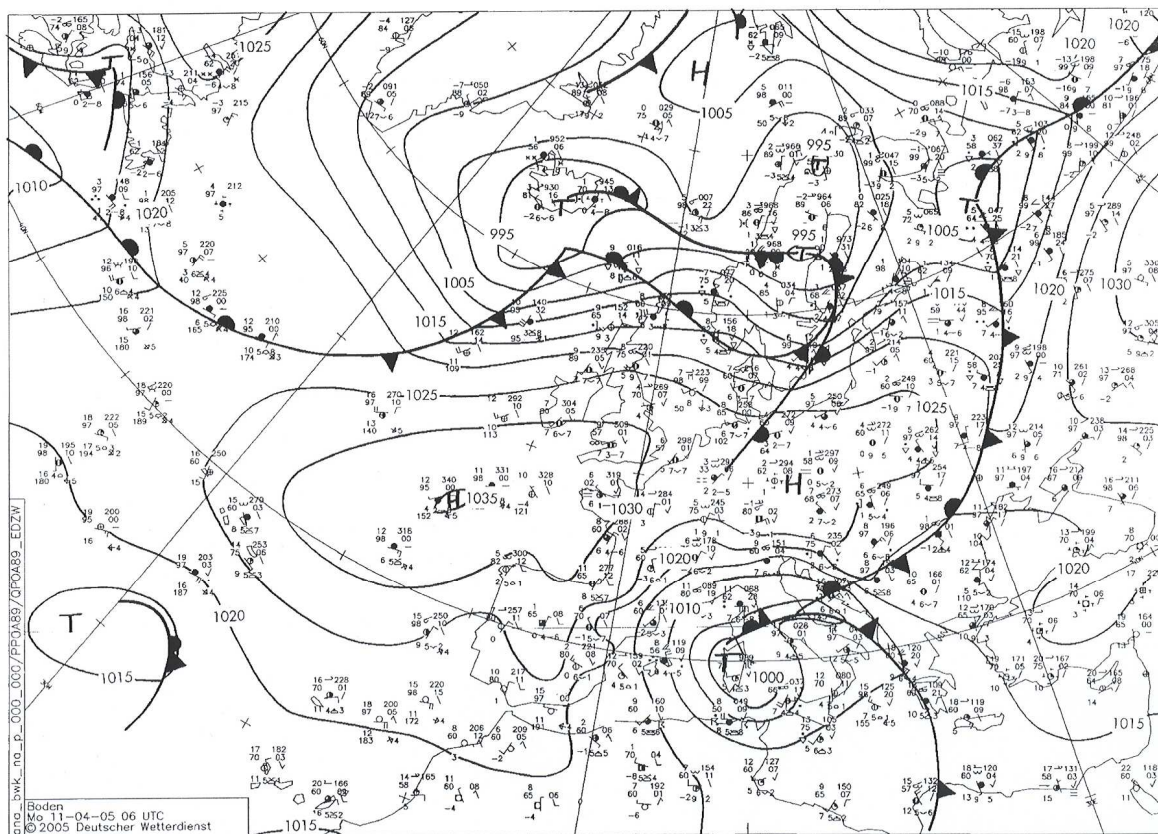
Slika 8.4. HRID vertikalni profil za Zagreb za 19.01.2005., plave linije označavaju mlaznu struju ($\geq 30\text{ m/s}$)

Na vertikalnom profilu HRID-a za Zagreb za 20.01.2005. (Slika 8.4.) vidljiva je mlazna struja (spuštanje gustih izotaha vrijednosti iznad 30 m/s na 6 - 10 km visine).

8.2. ANALIZA SLUČAJA ZALEĐIVANJA 11.04.2005.

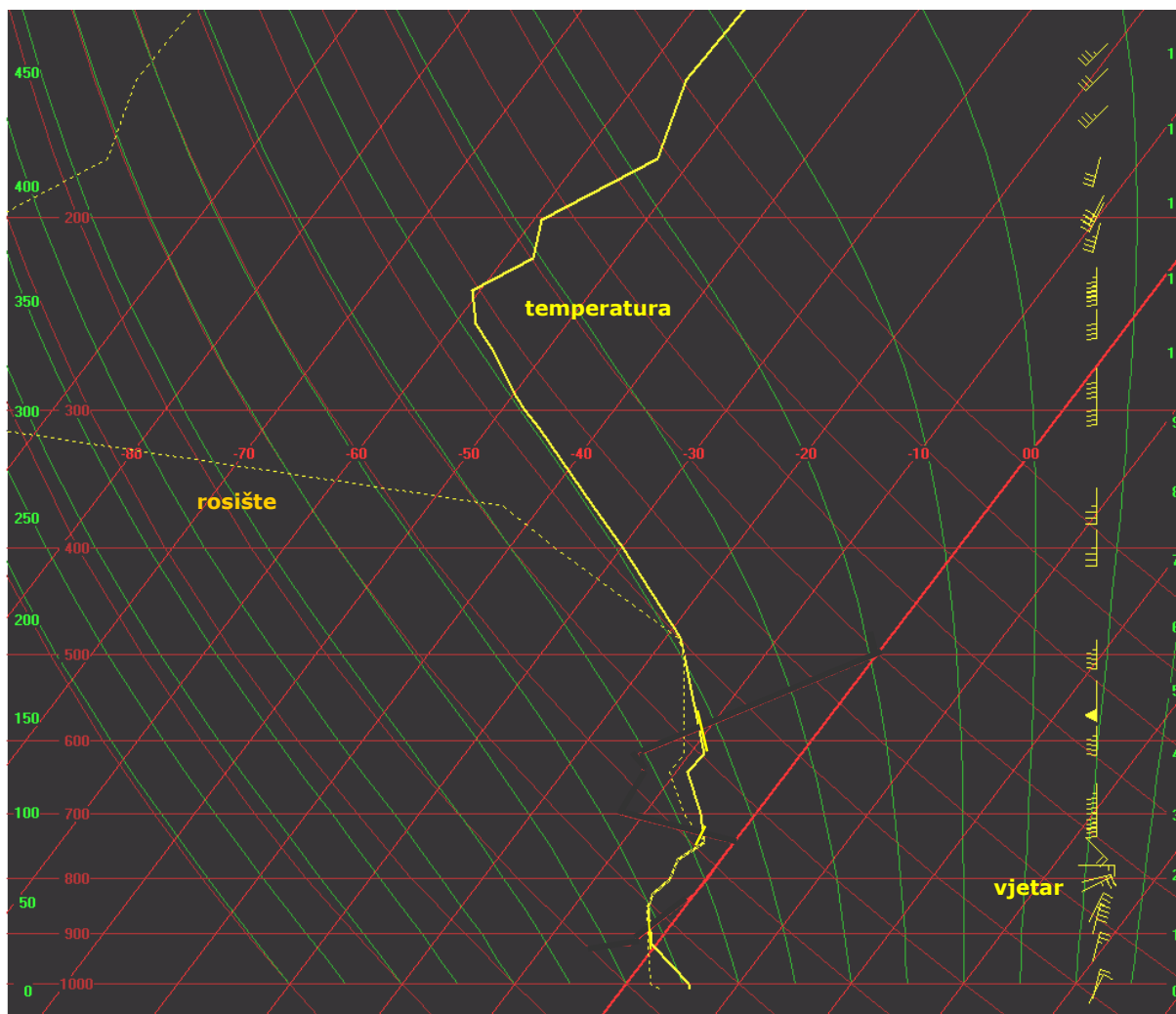
U pilotskim izvješćima 11.04.2005. javljeno je jako zaleđivanje između ~2400 – 3700 m nadmorske visine nad zračnim prostorom Hrvatske. Nažalost, kao i u prvom slučaju, nema podataka o tome gdje i kada je točno zaleđivanje primijećeno.

U 0600 UTC nad Jadranom se nalazila stacionarna fronta, u sustavu duboke ciklone sa središtem iznad Sardinije (Slika 8.5.). Ciklona je imala zatvorenu cirkulaciju gotovo do plohe 200 hPa. Nad Austrijom se nalazio centar visokog tlaka. Do 1200 UTC stacionarna fronta je prešla u toplu i takva se situacija zadržala do kraja dana. Gotovo cijeli dan je padala kiša promjenljivog intenziteta.



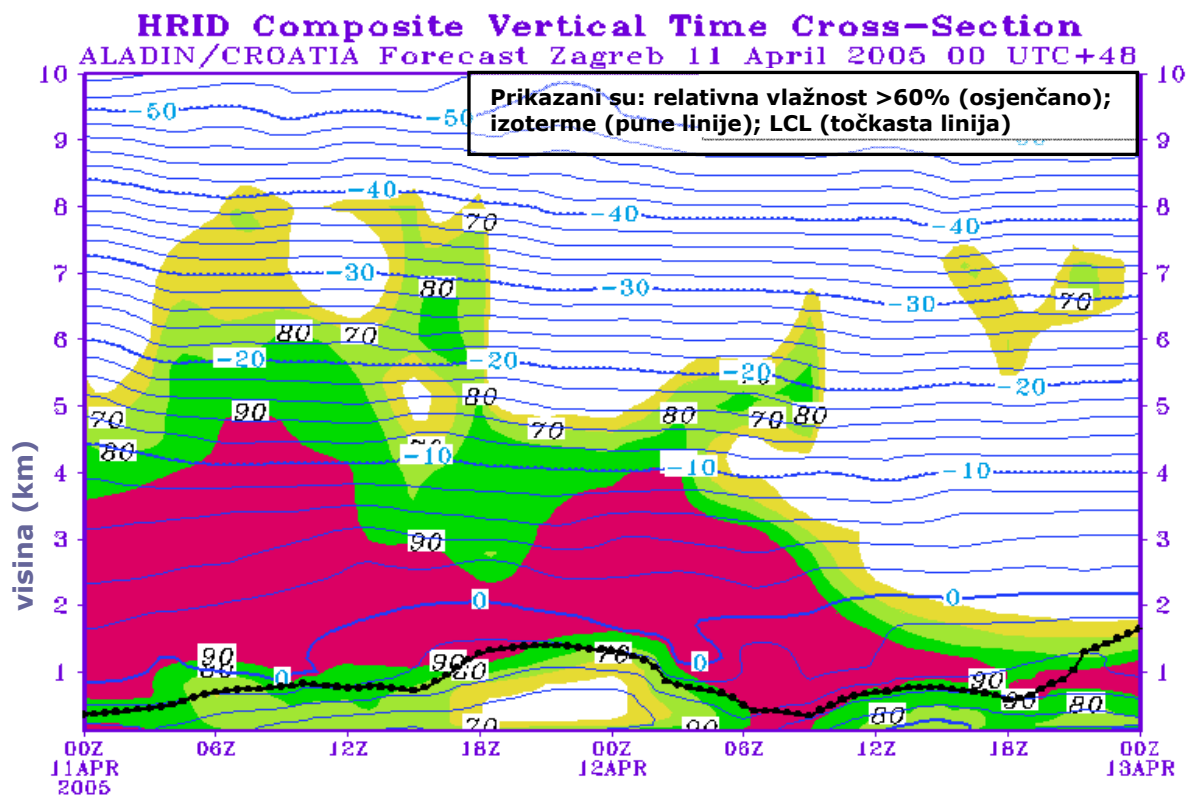
Slika 8.5. Prizemna sinoptička karta 11.04.2005. u 0600 UTC

Na prizemnim kartama naoblake vidi se da je Hrvatska cijeli dan bila prekrivena stratusnom naoblakom (većinom stratus i altostratus).



Slika 8.6. Sondaža za Zagreb 11.04.2005. u 0000 UTC

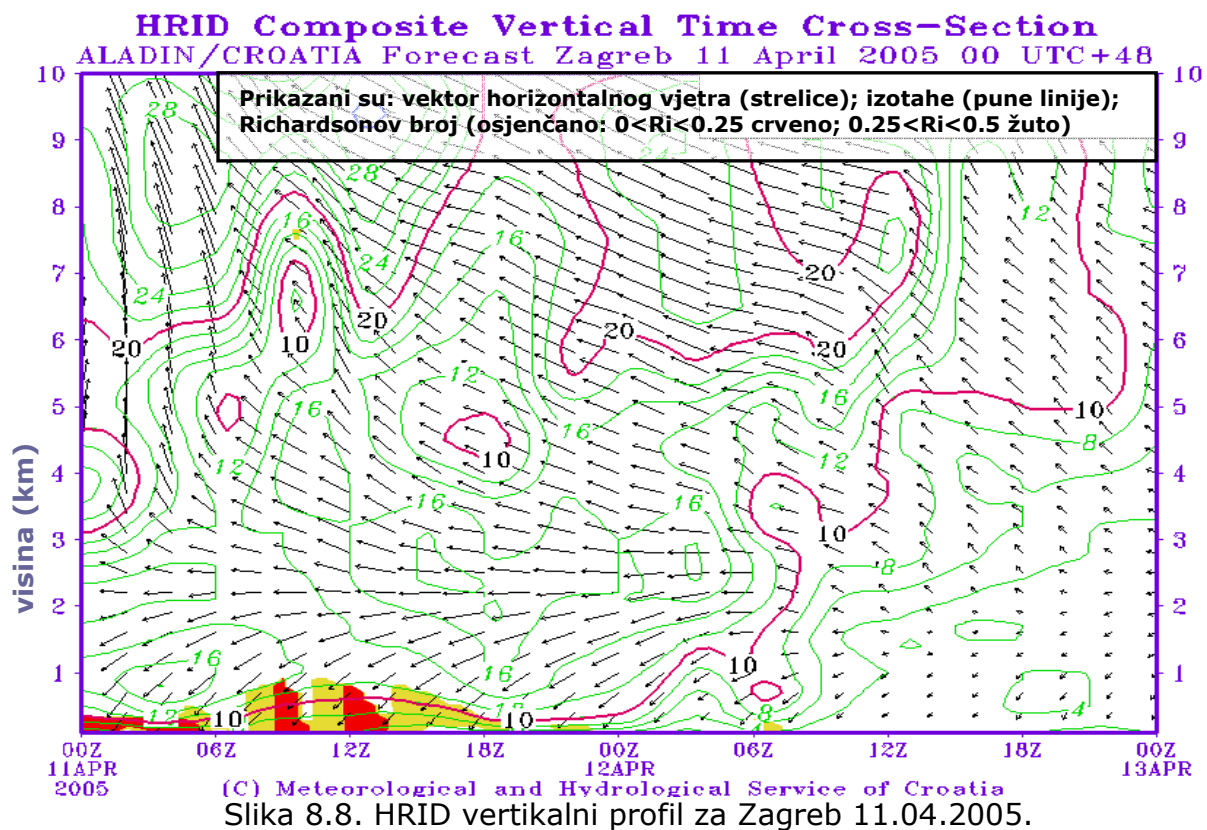
Sondaža za Zagreb 11.04.2005. u 0000 UTC (Slika 8.6.) odaje karakteristike sektora nadilaženja (prisutna je inverzija kao posljedica tople intruzije na visini ~1500 - 3000 m). Cijela inverzija se nalazi ispod 0 °C, pa sloja taljenja nema. Dubok oblačni sloj proteže se od ispod 500 m do preko 6000 m, a temperatura vrha oblaka je oko -23 °C.



Slika 8.7. HRID vertikalni profil za Zagreb 11.04.2005.

Vertikalni profil HRID-a za Zagreb (Slika 8.7.) predviđa sličnu situaciju za cijeli dan; također, vertikalni profili HRID-a predviđaju sličnu situaciju i za druge gradove (Osijek, Kutjevo, Split i Rijeka, nije prikazano).

Na vertikalnom profilu HRID-a za Zagreb 11.04.2005. (Slika 8.8.) uočljive su niske vrijednosti Richardsonovog broja (žuto i crveno) u sloju do 1 km visine, a na presjeku na slici 8.7. vidljivo je nisko isušivanje od 1800 UTC 11.04.2005. do 0030 UTC 12.04.2005. povezano s jakim sjeveroistočnim vjetrom.



Nad Hrvatskom je, dakle, prevladavala prilično jednolična situacija duboke stratusne naoblake s oborinom, te je iznad razine 0 °C predstavljala veliku opasnost od zaleđivanja, čak od zaleđivanja prehladnim velikim kapima, i time prozirnim ledom. Opasnost od zaleđivanja je bila smanjena na onoj razini na kojoj je faza oblaka bila pretežno ledena, a to je najvjerojatnije iznad razine -15 °C.

9. ZAKLJUČAK

Napravljen je pregled meteoroloških uvjeta koji pogoduju zaleđivanju. Opisani su procesi sinoptičke i mezo-skale, te fizikalni mehanizmi čije bi poznavanje moglo pomoći u određivanju rizika za zaleđivanje. Obrađena je upotreba radarskih podataka u otkrivanju procesa koji pogoduju zaleđivanju. Za zrakoplovstvo je posebno pogubno zaleđivanje prehladnim velikim kapima (zaleđivanje u prehladnoj oborini), pa je toj temi posvećena posebna pažnja. Obrađena su dva slučaja zaleđivanja nad zračnim prostorom Hrvatske, pri čemu su, između ostalog, korišteni i vertikalni vremenski presjeci HRID-a. Vertikalni vremenski presjeci HRID-a na kojima je prikazana kombinacija izoterma i relativne vlažnosti bi mogli biti vrlo korisni u prognozi zaleđivanja. Jedna od većih zapreka u istraživanju meteoroloških uvjeta zaleđivanja jest nedostatak kvalitetnih podataka o tome gdje i kada se zaleđivanje javlja, odnosno ne javlja (o izostanku zaleđivanja nema nikakvih podataka).

10. LITERATURA

Bernstein, B., T. Omeron, F. McDonough, and M. Politovich 1997: The relationship between aircraft icing and synoptic scale weather conditions. *Wea. Forecasting*, 12, 742-762.

Bocchieri, J., 1980: The objective use of upper air soundings to specify precipitation type. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 596-603.

Gelo, B., 2005: Meteorološki pojmovnik i višejezični rječnik: hrvatski, engleski, njemački i francuski jezik. Državni hidrometeorološki zavod: Hinus

Holton, J. R., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Third Edition. Academic Press

Martner, B., J. Snider, R. Zamora, G. Byrd, T. Niziol, and P. Joe, 1993: A remote-sensing view of a freezing-rain storm. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2562-2577.

Marwitz, J., M. Politovich, B. Bernstein, F. Ralph, P. Neiman, R. Ashenden, and J. Bresch, 1997: Meteorological conditions associated with the ATR72 aircraft accident near Roselawn, Indiana, on 31 October 1994. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 41-52.

McDonough, F., Bernstein, B.C., Politovich, M.K., and Wolff, C.A., 2004: The forecast icing potential (FIP) algorithm. 20th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology

Pobanz, B., J. Marwitz, and M. Politovich, 1994: Conditions associated with large drop regions. *J. Appl. Meteor.*, 33, 1366-1372.

Politovich, M.K., and B.C. Bernstein, 1995: Production and depletion of supercooled liquid water in a Colorado winter storm. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2631-2648

Politovich, M., 1998a: Forecasting Aviation Icing: Icing Type and Severity (Web based module: www.meted.ucar.edu/icing/pcu6/index.htm), University Corporation for Atmospheric Research

Politovich, M., 1998b: Icing Assessment Using Soundings and Wind Profiles (Web based module: www.meted.ucar.edu/icing/pcu62/pcu621/), University Corporation for Atmospheric Research

Politovich, M., 1999: Icing Assessment Using Observations and Pilot Reports (Web based module: www.meted.ucar.edu/icing/pcu62/pcu622/), University Corporation for Atmospheric Research

Politovich, M., F. McDonough, and B. Bernstein, 2004: The CIP inflight icing severity algorithm. 20th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology

Prater, E., and A. Borho, 1992: Doppler radar wind and reflectivity signatures with overrunning and freezing rain episodes; preliminary results. *J. Appl. Meteor.*, 31, 1350-1358.

Rasmussen, R., M. Politovich, J. Marwitz, W. Sand, J. McGinley, J. Smart, R. Pielke, S. Rutledge, D. Wesley, G. Stossmeister, B. Bernstein, K. Elmore, N. Powell, E. Westwater, B.B. Stankov, and D. Burrows, 1992: Winter Icing and Storms Project (WISP), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 951-974.

Rasmussen, R., B. Bernstein, M. Murakami, G. Stossmeister, and J. Reisner, 1995: The 1990 Valentine's Day outbreak. Part I: Mesoscale and microscale structure and evolution of a Colorado Front Range shallow upslope cloud. *J. Appl. Meteor.*, 34, 1481-1511.

Sand W., W. Cooper, M. Politovich, and D. Veal, 1984: Icing conditions encountered by a research aircraft. *J. Climate and Appl. Meteor.*, 28, 856-868.

Schultz, P., and M. Politovich, 1992: Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States. *Wea. Forecasting*, 7, 491-500.

Thompson, G., T. Lee, and R. Bullock, 1997: Using satellite data to reduce spatial extent of diagnosed icing. *Wea. Forecasting*, 12, 185-190.

Wallace, J. M., and P.V. Hobbs, 1977: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, 169-173.