

## مطالعه موردی یخزنی هواپیما در مسیرهای مختلف پروازی در ایران

رنجبر سعادت آبادی<sup>۱</sup>، عباس<sup>۱</sup>، عموزاد مهدیرجی، طاهره<sup>۲\*</sup> و پوریانی، جابر<sup>۳</sup>

۱- رییس مرکز ملی خشکسالی، همتراز استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد تهران شمال، تهران، ایران

۳- خلبان نیروی هوایی ارتش جمهوری اسلامی ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۰۸)

### چکیده

یخزنی هواپیما یعنی تشکیل یخ روی سطح هواپیمای در حال پرواز که یکی از عمده‌ترین حوادث در هوانوردی می‌باشد. یخزنی جزء پدیده‌های جوی است که از نظر نوع و میزان شدت، کاملاً قابل پیش‌بینی نیست. در این مطالعه رخداد یخزنی‌های گزارش شده توسط خلبانان بررسی شده است. علاوه بر گزارش‌های خلبان، گزارش‌های هواشناسی، نقشه‌های فشار سطح‌زمین و ارتفاع ژئوپتانسیلی ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ میلی‌بار و نمودارهای نیم‌رخ دما، رطوبت و باد (نمودار Skew-T) استفاده گردید. سپس با تحلیل نقشه‌های هواشناسی و بررسی الگوهای همدیدی مؤثر بر یخزنی، شدت یخزنی با استفاده از محتوای آب ابر، محاسبه‌ی ارتفاع سطح یخ‌بندان با استفاده از دمای سطح‌زمین، بررسی چگونگی رخداد یخزنی با استفاده از روش 8D- و شاخص‌های پایداری در زمان‌های مورد نظر محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین یخزنی‌ها در ماه آوریل بوده و الگوهای همدیدی مؤثر در ایجاد یخزنی بر روی کشور، در بیشتر موارد کم‌فشارهای دینامیکی است و یخزنی‌ها در مناطقی که ناوه و جبهه‌ی سرد فعالیت دارند، رخ داده‌اند. یخزنی‌های شدید همراه با ابرهای کومه‌ای با گسترش قائم زیاد ( $Cb$ ) همراه بوده است. هم‌چنین روش 8D- برای یخزنی‌های شدید که در ماه‌های آوریل رخ داده، مناسب بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** یخزنی هواپیما، مسیرهای مختلف پروازی، شدت یخزدگی، سطح یخ‌بندان

## مقدمه

پرسنل هواشناس و خلبانان بایستی در مورد شرایط جوی هر نقطه‌ای که پرواز صورت می‌گیرد، آگاهی داشته باشند. هواشناسی می‌تواند به نحو مطلوب هوای حاضر و یا اعلام خطرات جوی را برای فرودگاه و باند پروازی خودش تهیه نماید و در صورت نیاز به اطلاعات جوی مناطق دیگر، از طریق رادار و ماهواره‌های هواشناسی و هم‌چنین کلیه ایستگاه‌های هواشناسی در سطح زمین، با همکاری‌های بین‌المللی می‌توان آن‌ها را مورد کنترل و بررسی قرار داد. یکی از امتیازات هواشناسی در هر کشور مسئله‌ی جهانی بودن آن است و علت هم آن است که عوامل جوی و پدیده‌های مهم جوی، مجموعه‌ی سیستم متحرک و مرتبطی است که دارای مبدأ و عزیمت دور و مسیر حرکت طولانی می‌باشد که سطح وسیعی از زمین را می‌پوشاند. خلبانی که با هواپیما مافوق صوت پرواز می‌نماید، در مدت کوتاهی مسافت خیلی زیادی را طی خواهد کرد و به همین دلیل پرسنل هواشناسی و خلبانان بایستی وسایل و تجهیزاتی در اختیار داشته باشند تا این‌که بتوانند از وضعیت جوی فواصل دورتر در بعد وسیعی اطلاع یافته و پدیده‌های خاص مخاطره‌آمیز از نظر پروازی را پیش‌بینی نمایند. رادارهای هواشناسی از جمله دستگاه‌هایی می‌باشند که قادر هستند از فاصله‌ی دور پدیده‌های مهم جوی را کشف و نقش مهمی را در ایمنی پرواز و دیگر فعالیت‌های انسانی ایفا کنند. از این رو این اطلاعات در امور هواپیمایی و هم‌چنین پیش‌بینی‌های هواشناسی بسیار مهم می‌باشد.

در هوانوردی و به‌ویژه در بخش هواپیمایی عمومی یخ‌زدگی عبارت است از تشکیل یخ بر روی سطوح بال و دم هواپیما، که جریان یکنواخت هوا را روی این قسمت‌ها قطع کرده و باعث کاهش نیروی بالابرنده و افزایش وزن هواپیما و در نتیجه کاهش سرعت هواپیما می‌شود. در این مطالعه ابتدا تحلیل‌های موردی با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی انجام می‌گیرد تا رخداد پدیده‌ی یخ‌زدگی در هر ماه به‌دست آید. سپس همان‌طور که خواهیم دید تحلیل سامانه‌های همدیدی و نوع آن‌ها با استفاده از نقشه‌های همدیدی هنگام وقوع پدیده‌ی یخ‌زدگی صورت می‌پذیرد. بررسی نمودارهای نیم‌رخ قائم دما، سطح مقطع قائم باد، نوع ابرها و ارتفاع سطح یخ‌بندان می‌تواند در پیش‌بینی رخداد پدیده‌ی یخ‌زدگی مؤثر واقع شود.

هم‌چنین در این ماه تأثیر روی‌سان‌های جوی کم‌فشار قبل از رسیدن سامانه‌ی کم‌فشار که باعث یخ‌زدگی می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به مطالب فوق، نظر به اهمیت یخ‌زدگی و ایجاد خطرات ناشی از آن، بر آن شدیم تا با انجام تحقیق توصیفی به بررسی این موضوع بپردازیم.

سابقه فعالیت‌های علمی در این زمینه متعدد نیست؛ از جمله کارهای انجام شده در این زمینه در سطح جهانی کار برن اشتاین (۲۰۰۲) در مورد شرایط یخ‌زدگی هواپیما در شمال شرقی کلرادو در زمستان سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۴ می‌باشد. در این مقاله بسیاری از جنبه‌های یخ‌زدگی از قبیل هواشناسی همدیدی، میان مقیاس شرایط یخ‌زدگی، محتوای آب ابرها، ویژگی‌های میکروفیزیکی ابر و نوع و شدت یخ‌زدگی بررسی شد. به این نتیجه رسیدند که اکثر ابرها با جبهه‌های سرد یا با موج سرد یا با گردش چرخند و یا واچرخند همراه هستند. اکثر شرایط یخ‌زدگی که توسط خلبانان گزارش شد، با شدت سبک و متوسط از نوع یخ‌پوشه‌ی مات بودند. مقاله‌ی دیگر از برن اشتاین (۱۹۹۷) گزارش یخ‌زدگی هواپیما توسط خلبان را با شرایط هواشناسی از قبیل توده‌های هوا، جبهه‌ها، مراکز کم‌فشار، نوع و پوشش ابر بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌تر شرایط یخ‌زدگی در قطب شمال هست- توده‌هواها در غرب ساحل و شرق ساحل هستند- ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر جلوتر از جبهه‌ی گرم فعال و پایدار (ساکن) هستند- در مناطقی که بارش در حال وقوع بود، نم باران انجماد، باران انجماد و گلوله‌های یخ وجود داشت- و در مناطقی که بارش در حال وقوع نبود، آسمان تیره و پوشیده از ابر بود.

ریچارد کی. جک (۱۹۸۷) یخ‌زنی هواپیما را در نزدیک واشنگتن‌دی‌سی بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که برای لایه‌های پایدار، ابرها پوشنی و از نوع یخ‌پوشه‌ی مات هستند و برای لایه‌های ناپایدار، ابرها کومه‌ای و از نوع یخ شفاف هستند. هم‌چنین دمای یخ‌زدگی برای یخ شفاف بین صفر تا ۸- درجه سلسیوس، و برای یخ مخلوط دمای مورد انتظار بین ۸- تا ۱۵- درجه سلسیوس است. برای دماهای زیر ۱۵- درجه صرف نظر از پایداری فقط یخ‌پوشه‌ی مات پیش‌بینی می‌شود. مقاله‌ای از گری پی.الرود و اندرو آ.بیلی (۲۰۰۷) از طریق ماهواره، ناحیه‌های یخ‌زدگی هواپیما را همراه با ارتفاعات قله‌ی ابر نشان می‌دهند. آن‌ها با این روش توانستند پوشش فضایی و بیشینه ارتفاع یخ‌زدگی را در شرایط یخ‌زدگی به دست آورند، اما

سرد مقایسه کردند. یا در مقاله‌ای از گلوریا کولسا (۲۰۰۵) در سپتامبر ۲۰۰۱، آمار تأخیر پروازها به دلیل شرایط نامناسب هوا از جمله توفان تندی، یخ‌زدگی هواپیما و کاهش دید و تلاطم بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ماه آوریل در نقشه شماره ۱ نشان داده می‌شود.

۱- ۱۹ آوریل ۲۰۰۵ در ساعت ۱۶ به وقت محلی در ارتفاع ۱۷۰۰۰ پایی روی فرودگاه شیراز پدیده یخ‌زدگی رخ داده است.

۲- ۸ آوریل ۲۰۰۸ ساعت ۹ به وقت محلی در پرواز شناسایی از تهران به سمت شمال غربی ایران در ارتفاع ۱۰۰۰۰ پایی، روی کوه بی‌بی‌شهربانو پدیده یخ‌زدگی رخ داده است.

۳- ۱۳ آوریل ۲۰۰۹ ساعت ۱۰ به وقت محلی در ارتفاع ۸۰۰۰ پایی روی کهریزک به سمت مهرآباد پدیده یخ‌زدگی رخ داده است.

۴- ۲۹ آوریل ۲۰۰۹ ساعت ۹:۴۵ به وقت محلی در ارتفاع ۲۰۰۰۰ پایی روی امیدیه این پدیده رخ داده است.

۵- ۳۰ آوریل ۲۰۰۹ ساعت ۱۰ به وقت محلی در ارتفاع ۲۰۰۰۰ پایی در هشتاد مایلی چابهار این پدیده رخ داده است.



شکل ۱- نقشه و موقعیت جغرافیایی ایران

نتوانستند شدت و نوع یخ‌زدگی و هم‌چنین کمینه ارتفاع یخ‌زدگی را تعیین کنند. استوارت جی. کوبر (۲۰۰۱) محیط‌های یخ‌زدگی هواپیما را که شامل قطره‌های ابر سرد هستند، طی ۳۸ پژوهش اندازه‌گیری کردند که هدفشان مجموعه‌ای از داده‌های میکروفیزیکی به منظور مشخص کردن محیط‌های یخ‌زدگی هواپیما همراه با قطره‌های ابر سرد می‌باشد. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که ابرها با دمای کم‌تر یا مساوی صفر درجه هستند و بیشینه اندازه‌ی قطره‌ی به دست آمده بزرگتر یا مساوی ۵۰ میلی‌متر و غلظت کریستال‌های یخ کم‌تر از  $1 L^{-1}$  می‌باشد. در مقاله‌ای از متیو کلچ و لیندا وارنون (۱۹۹۶)، گزارش‌های خلبان از یخ‌زدگی و تلاطم هواپیما با پیش‌بینی این پدیده توسط سازمان هواشناسی برای یک دوره‌ی ۴۵ روزه در کلرادو بررسی و مقایسه شد. تعدادی از مقایسه‌ها بر اساس رویداد گزارش شده و ارتفاع هواپیما انجام شد و چنین به دست آمد که مشاهدات مثبت یخ‌زدگی با پیش‌بینی‌های تلاطم، و مشاهدات منفی تلاطم با پیش‌بینی‌های یخ‌زدگی مشابه است.

هم‌چنین لاس ماکونن (۲۰۰۱) دقت باد را در شرایط یخ‌زدگی مورد بحث و اندازه‌گیری قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اندازه‌گیری متوسط سرعت باد در شرایط یخ‌زدگی با تکنولوژی حاضر با دقت حدود ۵٪ با بادسنج‌های چرخشی و صوتی انجام می‌شود، اما در محیط‌های بسیار شدید، تنها برخی از بادسنج‌های چرخشی قابل اعتماد است. باربارا جی. برون (۱۹۹۷) پیش‌بینی شرایط یخ‌زدگی در پرواز را با استفاده از الگوریتم‌های مدل عددی اتا و *RAP* بررسی کردند. مدل اتا، آب مایع ابر را برای شناسایی مناطق یخ‌زنی با نرخ ۳۰٪ برآورد کرد و الگوریتم *RAP* اطلاعات کافی برای شناسایی سازوکار فیزیکی شرایط پیش‌بینی یخ‌زنی فراهم کرد. هم‌چنین گرگوری تامسون (۱۹۹۷) نشان دادند که هدف برنامه‌های هوانوردی پیش‌بینی بهبود یخ‌زدگی است و با استفاده از مدل عددی داده‌های اتا، نقشه‌ها، و مدل *MM5* این پیش‌بینی‌ها انجام شد. آرنولد تافرر (۲۰۰۳) یک سیستم پیشرفته‌ی هشداردهنده طراحی کرد که برای تشخیص محیط‌های یخ‌زدگی هواپیما مناسب است که در این سیستم، شرایط یخ‌زدگی هواشناسی با شرایط معمولی یخ‌زدگی توصیف می‌شود.

مقاله‌ای دیگر از برن اشتاین (۲۰۰۵)، که الگوریتم (*CIP*) ترکیب ماهواره‌ای، رادار، ردوبرق و مشاهدات گزارش خلبان را با خروجی مدل سه بعدی برای وجود یخ‌زدگی و قطره‌های ابر

## روش مطالعه

هدف از این تحقیق، پیدا کردن عوامل مؤثر بر یخ‌زنی، زمان‌هایی که بیش‌ترین فرکانس را دارند، چگونگی تشکیل آن و محاسبه شدت و ارتفاع پایه آن است. برای این منظور ابتدا براساس گزارش‌های خلبان، زمان‌های رخداد طی دوره مورد مطالعه مشخص گردید. سپس از نقشه‌های هواشناسی سطح زمین، ۵۰۰ و ۸۵۰ میلی‌باری مربوط به تاریخ‌های مورد بررسی، گزارش‌های ساعت به ساعت هواشناسی و داده‌های جو بالایی ایستگاه‌های هواشناسی برای بررسی مواد مذکور استفاده گردید. هم‌چنین شاخص‌های SI و KI و نمودارهای نیم‌رخ قائم دما از پایگاه‌های اینترنتی *NOA* و دانشگاه وایومینگ جمع‌آوری شده است که برای این منظور بر اساس این داده‌ها، ارتفاع سطح یخ‌بندان طی دوره‌ی مورد مطالعه استخراج می‌گردد. سپس بر اساس ارتفاع سطح یخ‌بندان و با توجه به سامانه‌ی قرار گرفته در ایستگاه‌ها، نوع پدیده در تاریخ‌های مورد مطالعه تعیین می‌گردد. با این طبقه‌بندی، مقدار شدت یخ‌زدگی در ماه‌های مورد مطالعه، روی‌سان‌های همدیدی بررسی شده و تغییرات آن‌ها تعیین می‌گردد. بررسی روی‌سان‌های مختلف به این ترتیب که نوع روی‌سان‌های وارد شده به کشور در سطوح ۵۰۰ و ۸۵۰ میلی‌باری و سطح زمین و تحلیل سامانه‌های همدیدی، با استفاده از نقشه‌های همدیدی هنگام وقوع پدیده‌ی یخ‌زدگی و نوع ابرها صورت می‌پذیرد. شدت یخ‌زدگی و ارتفاع سطح یخ‌بندان در زمان‌های موردنظر انجام می‌شود. شاخص‌های ناپایداری SI و KI و نمودارهای *T - SKEW* در ساعت‌های وقوع پدیده با هم مقایسه شده و سپس نتیجه‌گیری‌های موردنظر انجام می‌شود.

درجه‌ی یخ‌زنی یا به‌عبارت دیگر شدت یخ‌زنی به وسیله‌ی ضخامت کل پوشش یخ بر روی سطح هواپیما بر حسب گرم بر متر مکعب بیان می‌گردد. یخ‌زنی به وسیله‌ی کلمات سبک، ملایم، متوسط و شدید مشخص می‌شود. ظاهر و ساختار یخ‌زنی هواپیما ممکن است شفاف، نیمه‌شفاف و کدر سفید به صورت یخ‌پوشه‌ی مات باشد. هم‌چنین شدت یخ‌زنی یا نرخ افزایش یخ به چند عامل بستگی دارد و توسط فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$LWC_{i+1} = \frac{1}{R} \left[ \frac{(M_i - M_{i+1})}{T_i} \right] P_i \quad (1)$$

که *LWC* محتوای آب مایع در سطح *i* ( $g/m^3$ )،  $M_i$  : نسبت آمیختگی در سطح *i* ( $g/kg$ )،  $T_i$  : دما در سطح *i* ( $K$ )،  $P_i$  : فشار در سطح *i* (پاسکال) و  $R$  : ثابت گازها برای هوای خشک ( $287 J/kg K$ ) می‌باشد که  $M$  و  $T$  و  $P$  متغیر هستند و شاخص  $i$  به سمت بالا افزایش می‌یابد.

جدول ۱- رابطه بین محتوای آب مایع و شدت یخ‌زدگی

<i>LWC strat</i>	<i>LWC cumul</i>	<i>Icing Category</i>
< 0.11	< 0.07	<i>Trace</i>
0.11 – 0.69	0.07 – 0.50	<i>Light</i>
0.69 – 1.33	0.50 – 1.0	<i>Moderate</i>
> 1.33	> 1.0	<i>Severe</i>

(منبع: تافر، ۲۰۰۳)

مقدار متوسط کاهش دما نسبت به ارتفاع ۲ درجه سلسیوس به ازای هر ۱۰۰۰ پا می‌باشد. لذا برای به دست آوردن حداقل ارتفاع سطح یخ‌بندان، دما در سطح زمین به ۲ درجه سلسیوس تقسیم‌شده و سپس عدد به‌دست‌آمده در ۱۰۰۰ پا ضرب می‌شود. عدد حاصله حداقل ارتفاع سطح یخ‌بندان را از بالای سطح زمین (*agl*) نشان خواهد داد.

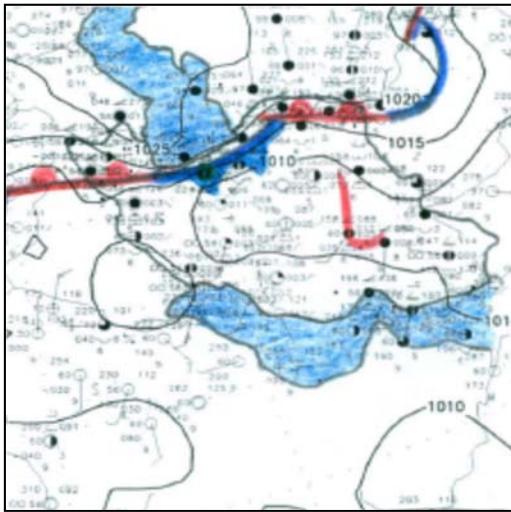
$$\text{Freezing Level} = \frac{TT}{2} \times 1000ft \quad (2)$$

1000ft

(جعفری: ۱۳۸۴)

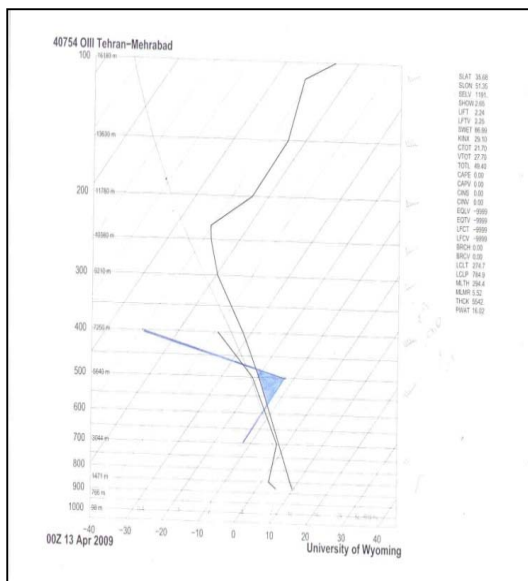
بررسی همدیدی سامانه‌های جوی ۱۳ آوریل ۲۰۰۹  
در تاریخ ۱۳ آوریل ۲۰۰۹ در ساعت ۱۰ به وقت محلی  
هواپیمای ( $C - 130$ ) در ارتفاع ۸۰۰۰ پایی روی کهریزک به

$\frac{16}{2} = 8 \rightarrow 8 \times 1000 = 8000$  ارتفاع سطح یخبندان در  
 ۱۳ آوریل ۲۰۰۹



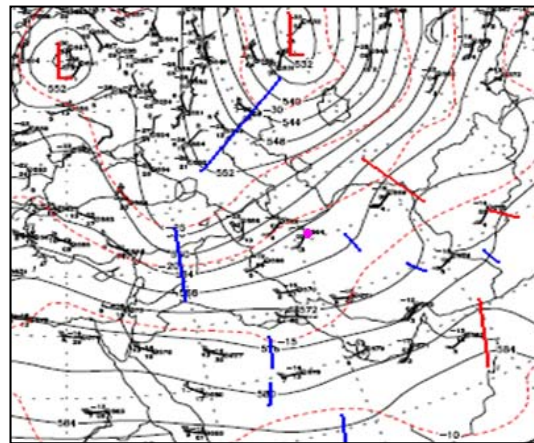
شکل ۴- نقشه هم‌فشار سطح زمین در ساعت 06 UTC روز ۱۳ آوریل ۲۰۰۹.

استفاده از روش 8D-، به طوری که ابتدا اختلاف دما و دمای شبین را به دست آورده و این اختلاف را در 8- ضرب کرده، اگر نمودار حاصل در سمت راست نمودار دمای اسکیتوتی واقع شد، در محدوده‌ی موردنظر پدیده‌ی یخ‌زدگی رخ می‌دهد. در شکل زیر محلی که با رنگ آبی نمایش داده شده است، محل یخ‌زدگی می‌باشد.



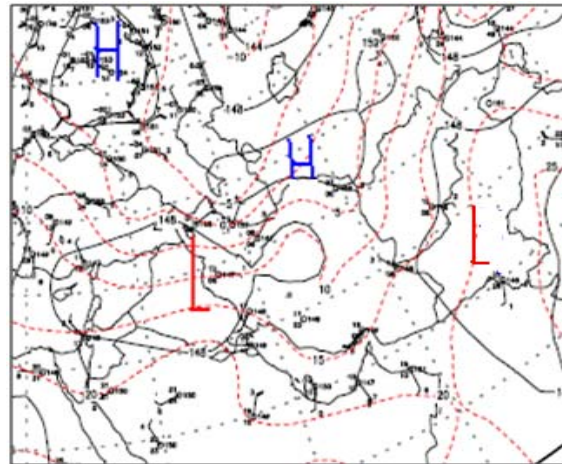
شکل ۵- نمودار اسکیتوتی ۱۳ آوریل ۲۰۰۹ به روش 8D-

سمت مهرآباد با پدیده‌ی یخ‌زدگی مواجه شده است که تکه‌های یخ روی بدنه و شیشه‌ی هواپیما را پوشانده است.



شکل ۲- خطوط کنتوری (بر حسب ژئوپتانسیل دکامتر) و خطوط هم‌دمای (بر حسب درجه سلسیوس) تراز ۵۰۰ میلی‌باری در ساعت 00 UTC روز ۱۳ آوریل ۲۰۰۹.

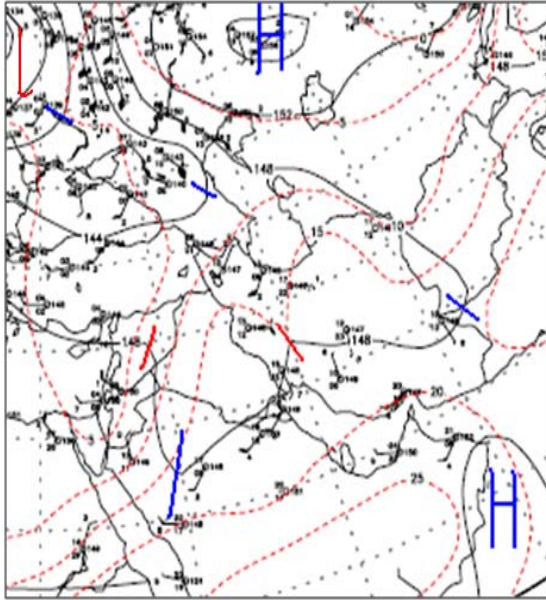
با توجه به رخداد پدیده به وقت محلی، نقشه‌های همدیدی سطوح ۵۰۰ و ۸۵۰ میلی‌باری در ساعت 00 UTC و نقشه‌ی سطح زمین در ساعت 06 UTC مورد بررسی قرار می‌گیرد.



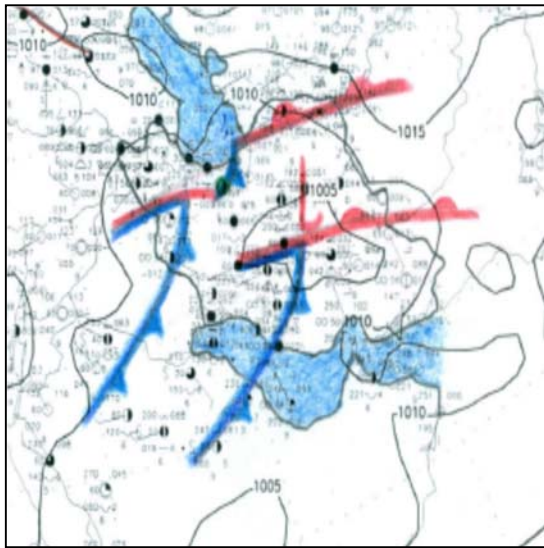
شکل ۳- خطوط کنتوری (بر حسب ژئوپتانسیل دکامتر) و خطوط هم‌دمای (بر حسب درجه سلسیوس) تراز ۸۵۰ میلی‌باری در ساعت 00 UTC روز ۱۳ آوریل ۲۰۰۹.

در تهران منطقه‌ای که پدیده‌ی یخ‌زدگی اتفاق افتاده است، مقدار ابر  $\frac{7}{8}$  و نوع ابر  $C_L = 3$  و  $C_M = 2$  می‌باشد. تهران روی جبهه‌ی سرد واقع شده است. دمای تهران نیز ۱۶ درجه سلسیوس می‌باشد.





شکل ۷- خطوط کنتوری (برحسب ژئوپتانسیل دکامتر) و خطوط همدمای (برحسب درجه سلسیوس) تراز ۸۵۰ میلی باری در ساعت 00 UTC روز ۸ آوریل ۲۰۰۸



شکل ۸- نقشه هم فشار سطح زمین در ساعت 00 UTC روز ۸ آوریل ۲۰۰۸

در تهران منطقه‌ای که پدیده یخ زدگی رخ داده است، مقدار ابر  $\frac{5}{8}$  است و ابر از نوع  $C_H = 7$  می باشد که معرف ابر پراپوشنی است که تمام آسمان را یک دست پوشانیده است. تهران در روی جبهه سرد واقع شده است. دما در سطح تهران ۱۶ درجه می باشد.

جهت باد با ارتفاع تغییر کرده و به صورت ساعت گرد می چرخد. مقادیر شاخص های  $SI$  و  $KI$  به صورت زیر می باشد:  $SI = 2.65$  و  $KI = 29.10$

شدت یخ زدگی با استفاده از فرمول (۱) محاسبه می شود. لذا با توجه به داده های به دست آمده داریم:

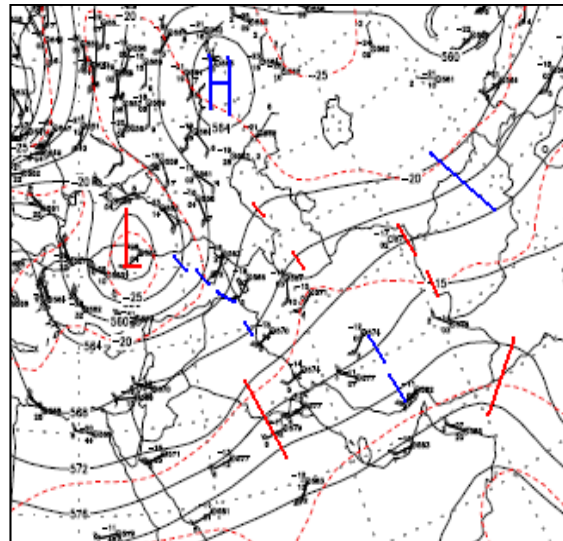
$$P_i = 70000 \text{ و } M_i = 3.37 \text{ و } T_i = -3.7^\circ\text{C}$$

$$T_{i+1} = -3.7 + 273.15 = 269.45 \text{ و } M_{i+1} = 1.25$$

$$LWC_{i+1} = \frac{1}{287} \left[ \frac{3.37 - 1.25}{269.45} \right] 70000 = 1.9$$

که در نتیجه شدت یخ زدگی شدید است.

بررسی همدیدی سامانه های جوی ۸ آوریل ۲۰۰۸ در تاریخ ۸ آوریل ۲۰۰۸ ساعت ۹ به وقت محلی، هواپیمای (C-130) در پرواز شناسایی از تهران تا سمت شمال غربی ایران در ارتفاع ۱۰۰۰۰ پایی، روی کوه بی بی شهربانو پدیده یخ زدگی رخ داده است. با توجه به رخداد پدیده به وقت محلی و در دست نداشتن نقشه ی سطح زمین در ساعت 06 UTC، این پدیده در ساعت 00 UTC مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۶- خطوط کنتوری (برحسب ژئوپتانسیل دکامتر) و خطوط همدمای (برحسب درجه سلسیوس) تراز ۵۰۰ میلی باری در ساعت 00 UTC روز ۸ آوریل ۲۰۰۸

در سطح ۴۸۰ میلی‌باری مقادیر عبارت است از:  
 $T_i = -16.1$  و  $M_i = 2.10$  و  $P_i = 49400$  و  
 $M_{i+1} = 1.96$  می‌باشد.

$$LWC_{i+1} = \frac{1}{287} \left[ \frac{2.10-1.96}{257.05} \right] 49400 = 0.09$$

مقایسه‌ی نمودارهای  $SKEW - T$  ماه آوریل

جدول ۲- رابطه مقادیر شاخص‌های  $SKEW - T$  ماه آوریل

تاریخ	شاخص	SI	KI
روز ۱۹ آوریل ۲۰۰۵ ساعت ۱۲ UTC		-۰/۳۹	۱۸/۵۰
روز ۸ آوریل ۲۰۰۸ ساعت 00 UTC		۴/۲۹	۱۷/۱۰
روز ۱۳ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC		۲/۶۵	۲۹/۱۰
روز ۲۹ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC		۰/۲۶	۳۳/۴۳

همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، زمانی که مقادیر شاخص  $SI$  در ماه آوریل بزرگ‌تر از صفر باشد، هوا پایدار خواهد بود، به جز در تاریخ ۱۹ آوریل که مقادیر این شاخص کم‌تر از صفر بوده و مقادیر شاخص  $KI$  بزرگ‌تر از ۱۷ می‌باشد که در نتیجه، پتانسیل اندکی برای همرفت وجود دارد.

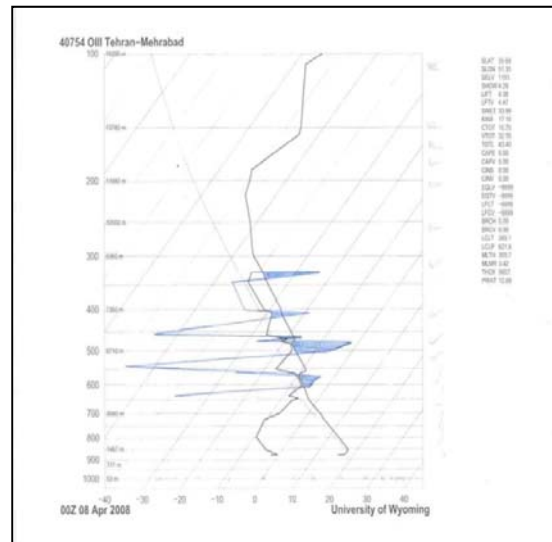
مقایسه‌ی میدان باد با ارتفاع در ماه آوریل

جدول ۳- رابطه تغییر جهت باد با ارتفاع در ماه آوریل

تاریخ	تغییر جهت باد با ارتفاع	ساعتگرد	پاد ساعتگرد	تغییر نمی‌کند
روز ۱۹ آوریل ۲۰۰۵ ساعت ۱۲ UTC		✓		
روز ۸ آوریل ۲۰۰۸ ساعت 00 UTC		✓		
روز ۱۳ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC		✓		
روز ۲۹ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC		✓		

$$\frac{16}{2} = 8 \rightarrow 8 \times 1000 = 8000$$

یخ‌بندان در ۸ آوریل ۲۰۰۸



شکل ۹- نمودار اسکیتوی ۸ آوریل ۲۰۰۸ به روش 8D

در حدود ارتفاع ۵۸۰ میلی‌باری در حدود چندصد متر با افزایش ارتفاع، دما افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی وارونگی دمایی و ناپایداری در حدود این لایه می‌باشد. بعد تا چندصد متر شرایط عادی پایداری برقرار است که با افزایش ارتفاع، دما تا حدود ارتفاع ۴۸۰ میلی‌باری کاهش می‌یابد که در این محدوده، دما و دمای شبنم با هم برابر می‌شود که نشانه‌ی رطوبت بالا و ناپایداری و یخ‌زدگی در این لایه می‌باشد. در حدود ارتفاع ۴۸۰ میلی‌باری و ارتفاع ۷۳۸۰ متری در حدود چندصد متر با افزایش ارتفاع، دما افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی وارونگی ضعیف و ناپایداری در حدود این لایه‌ها می‌باشد و بعد تا چندصد متر شرایط عادی پایداری برقرار است. هم‌چنین جهت باد با ارتفاع تغییر کمی داشته و به صورت ساعتگرد می‌چرخد. هم‌چنین مقادیر شاخص‌های  $SI$  و  $KI$  به صورت زیر می‌باشد.

$$M_i = T_i = -6.5^\circ\text{C} \text{ و } KI = 17.10 \text{ و } SI = 4.29$$

$$T_i = 3.77 \text{ و } M_{i+1} = 3.49 \text{ و } P_i = 60300$$

$$-6.5 + 273.15 = 266.65$$

$$LWC_{i+1} = \frac{1}{287} \left[ \frac{3.77-3.49}{266.65} \right] 60300 = 0.22$$

در ۸ آوریل روی تهران نوع ابر مشخص نیست و نمی‌توان

شدت یخ‌زنی را براساس نوع ابر تشخیص داد.

است. پدیده‌ی یخزدگی بیش‌تر از سایر فصول رخ می‌دهد. به‌طوری که بیش‌ترین رخداد پدیده‌ی یخزدگی در ماه آوریل رخ داده است.

۲- ایجاد یخزنی در همه‌ی روزها همراه با ناوهای سطوح میانی و فوقانی جو همراه با کم‌فشار سطح زمین بوده و وجود این شرایط برای یخزنی لازم است. یخزنی رخ داده در کشور طی دوره‌ی مطالعه شده همراه با جبهه‌ی سرد بوده، به‌طوری که اغلب در جلوی جبهه‌ی سرد رخ می‌دهند. نیم‌رخ یا میدان باد در سطوح مختلف برای حالت‌های بررسی شده، بیان‌گر تغییر جهت باد به صورت ساعتگرد با ارتفاع می‌باشد.

۳- نتایج نشان می‌دهد که مقادیر اختصاص‌یافته برای شاخص‌های  $SI$ ،  $KI$  هم‌خوانی مناسبی با شرایط ناپایداری محلی ندارد. به‌عبارت دیگر برای ناپایداری محلی  $SI < 0$  و منفی بوده که در حقیقت پتانسیل اندک برای همرفت وجود دارد و  $KI$  بزرگ می‌باشد. ولی برای حالت‌های بررسی شده در این مطالعه  $SI > 0$  بوده است.

#### بحث و نتیجه‌گیری

برن اشتاین معتقد است که اکثر ابرها با جبهه‌های سرد و یا با موج سرد و یا با گردش سیکلونی و یا آنتی‌سیکلونی همراه هستند. و اکثر شرایط یخزدگی که توسط خلبانان گزارش شد، با شدت ملایم و متوسط و از نوع مات مات بودند. با این وجود، مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که اکثر ابرها با جبهه‌های سرد و گردش سیکلونی همراه هستند و شرایط یخزدگی که توسط خلبانان گزارش شد، با شدت سبک، ملایم و شدید بوده است.

هم‌چنین اشتاین بیان می‌کند که بیش‌ترین شرایط یخزدگی در قطب شمال رخ می‌دهد- توده‌ها در غرب و شرق ساحل هستند- ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر جلوتر از جبهه‌ی گرم فعال و پایدار(ساکن) هستند- در مناطقی که بارش در حال وقوع هست، نم باران انجماد، باران انجماد، و گلوله‌های یخ وجود دارد- و در مناطقی که بارش در حال وقوع نیست، آسمان تیره و پوشیده از ابر هست. در حالی که بررسی‌های انجام شده بیان‌گر این است که بیش‌تر شرایط یخزدگی، در مناطق کم‌فشار جایی که آسمان تیره و پوشیده از ابر است، اتفاق می‌افتد.

ریچارد بیان می‌کند که برای لایه‌های پایدار، ابرها استراتژی فرمی و از نوع  $rime$  و برای لایه‌های ناپایدار، ابرها

طبق جدول جهت باد با ارتفاع در روزهای ماه آوریل به صورت ساعتگرد تغییر کرده و فرارفت هوای گرم وجود دارد و ناپایداری ایجاد می‌شود و به‌دلیل ایجاد ناپایداری، امکان پدیده‌ی یخزدگی وجود دارد.

#### مقایسه‌ی نوع سامانه در ترازهای مختلف و شدت یخزنی در ماه آوریل

جدول ۴- رابطه‌ی نوع سامانه در ترازهای مختلف و شدت یخزنی ماه آوریل

تاریخ	نوع سامانه در تراز ۵۰۰ میلی‌باری	نوع سامانه در تراز ۸۵۰ میلی‌باری	نوع سامانه در سطح زمین	نوع ابر	شدت یخزنی	نوع جبهه
۱۹ آوریل ۲۰۰۵ ساعت 12 UTC	ناوه	ناوه	ناوه	$C_L = 2$	شدید	جلوی جبهه سرد
۸ آوریل ۲۰۰۸ ساعت 00 UTC	ناوه	ناوه	ناوه	مشخص نیست	مشخص نیست	روی جبهه سرد
۱۳ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC	ناوه	ناوه	ناوه	$C_L = 3$ $C_M = 2$	شدید	روی جبهه سرد
۲۹ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC	ناوه	ناوه	ناوه	$C_L = 3$ $C_M = 1$	شدید	جلوی جبهه سرد
۳۰ آوریل ۲۰۰۹ ساعت 00 UTC	ناوه	ناوه	ناوه	ابر نداریم	مشخص نیست	جلوی جبهه سرد

#### نتیجه‌گیری

در این مطالعه الگوهای جوی پدیده‌ی یخزدگی در روزهای مختلف بررسی گردید؛ برای این منظور ابتدا گزارش‌های خلبانان از یخزدگی هواپیما تهیه شده و سپس سامانه‌های جوی حاکم و مؤثر بر یخزدگی مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان می‌دهد که:

۱- در اواخر زمستان و اوایل بهار با عبور سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی که با ناوهای اغلب موج‌کوتاه سطوح فوقانی همراه



۴- تصاویر ماهواره‌ای لازم است تا بتوان نتیجه‌گیری دقیق‌تری انجام داد؛ ولی این تصاویر در دسترس سازمان هواشناسی نبود که پیشنهاد می‌شود که این سازمان ترتیبی اتخاذ نماید که این تصاویر، به‌منظور امکان مطالعه‌ی دقیق‌تر، به‌صورت ۶ یا ۱۲ ساعته تهیه گردند.

#### پی‌نوشت‌ها

- ۱- Bernstein
- ۲- Richard K.Jeck
- ۳- Gary P.Ellrod
- ۴- Andrew A.Bailey
- ۵- Stewart G.Coher
- ۶- Matthew Kelsch
- ۷- Linda Wharton
- ۸- Lasse Makkonen
- ۹- Barbara G.Brown
- ۱۰- Gregory Thompson
- ۱۱- Arnold Taffermer
- ۱۲- Gloria Kulesa

#### منابع و مراجع

- [۱] بنی‌هاشم، تاج‌الدین، "هواشناسی عمومی"، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۷.
- [۲] جعفری، غلامحسین، "هواشناسی"، دانشکده هواشناسی و علوم جو، ۱۳۸۴.
- [۳] سبحان، اکبر، "مبانی هواشناسی"، دانشکده هوافضای ارتش، ۱۳۸۸.
- [۴] عبدالحسینی، محمد علی، "هواشناسی پروازی"، دانشکده پرواز، ۱۳۸۱.
- [۵] علیزاده، امین، "هوا و اقلیم شناسی"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸.
- [۶] نوحی، احمد، "هواشناسی عمومی"، انتشارات سازمان هواشناسی کشور.

[7] Zverev, A.S., "Practical Work in Synoptic Meteorology", 1972.

[8] Laster, p, "Aviation Weather", 2004.

[9] Retallack, B.J., "Aeronautical Meteorology".

[10] Reinhold, V, "A Pilot Meteorology".

کومولی‌فرمی و از نوع *clear* هستند؛ وی هم‌چنین دمای یخ‌زدگی را برای انواع یخ‌زدگی بیان می‌کند. در این مقاله نشان داده شد که ابرها کومولی‌فرمی و از نوع *clear* هستند.

پی‌ال‌رود توانست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پوشش فضایی و حداکثر ارتفاع سطح یخ‌بندان را در شرایط یخ‌زدگی به‌دست آورد، اما نتوانست شدت و نوع یخ‌زدگی و هم‌چنین حداقل ارتفاع سطح یخ‌بندان را تعیین کند. در این تحقیق با وجود دردسترس نبودن تصاویر ماهواره‌ای، توانسته شد شدت یخ‌زدگی را به‌دست آورد. هم‌چنین با توجه به نیم‌رخ قائم دما، حداقل ارتفاع سطح یخ‌بندان نیز به‌دست آمد.

بر طبق تحلیل آماری صورت‌گرفته در این مقاله، به‌منظور امنیت پروازی بهتر است:

۱- نقشه‌های هواشناسی که توسط رایانه کشیده می‌شوند، حتماً کنترل و بازنگری گردند تا اشتباهات احتمالی توسط کامپیوتر تصحیح شوند. به همین ترتیب، در زمان‌هایی که سامانه‌های جوی از روی منطقه عبور می‌کنند، نقشه‌ها در بازه‌های ۳ ساعته و درمقیاس بزرگ‌تر ترسیم شوند که بتوان استفاده‌های علمی و عملی بهتری از آن‌ها نمود. هم‌چنین اطلاعات هواشناسی به‌موقع در دسترس خدمه‌ی پروازی قرار گیرد.

۲- اطلاعات رادیوسوند در اغلب ایستگاه‌ها در یک نوبت در شبانه‌روز اندازه‌گیری می‌شوند؛ این باعث می‌شود که اغلب نتیجه‌گیری‌هایی که به اطلاعات رادیوسوند بستگی دارند، از صحت کمی برخوردار باشند و نتوان نتیجه‌گیری دقیق و قابل اعتمادی داشت. به عنوان مثال در تاریخ ۲۹ و ۳۰ آوریل ۲۰۰۹ در ساعت *00 UTC* و *12 UTC* اطلاعات رادیوسوند موجود نیست. اگر در بررسی‌ها و پژوهش‌ها نیاز به اطلاعات رادیوسوند باشد، ضروری است که ایستگاه‌ها، در نوبت‌های بیش‌تری اندازه‌گیری‌های داده‌های رادیوسوند را داشته باشند؛ مثلاً در بازه‌های ۶ ساعته. در این صورت خیلی خوب می‌توان در تحقیقات و پژوهش‌ها، به داده‌های رادیوسوند نیز مراجعه کرد و نتیجه‌ی مطلوبی به‌دست آورد. ولی با شرایط فعلی فقط در زمان‌های نزدیک جمع‌آوری داده‌های رادیوسوند، می‌توانیم تحقیقات و ارجاعات قابل اعتمادی داشته باشیم.

۳- پیشنهاد می‌شود با اطلاعات به‌دست آمده از این تحقیق در ماه آوریل پروازی انجام نشود؛ چون شدت یخ‌زدگی در این پروازها از نوع *Sever* بوده است.

- [19] Ben C. Bernstein & et.al., "The Relationship between Aircraft Icing and Synoptic-Scale Weather Conditions", 1997.
- [20] Barbara G. Brown & et.al., "Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part II: Statistical Verification Results", 1997.
- [21] Gloria Kulesa, "How Does Weather Affect The Safety And How Does FAA Work To Manage Weather-Related Effect? Wea Forecasting", 2005.
- [22] Richard K. Jeck, "Aircraft Icing Environment In Low Ceiling Condition Nears Washington, D.C.", 1987.
- [23] W.B. Tucker, "Current Procedures for Forecasting Aviation Icing", 1995.
- [24] Peter F. Lestar, "Aviation Weather", 2001.
- [25] Sanderson, "Advance Pilot Manual", 1981.
- [26] <http://www.weather.uwyo.edu>
- [27] <http://www.nws.noaa.gov/os/aviation/front/04feb-front.pdf>
- [28] <http://www.tpub.com/weather3/6a-28.htm>
- [29] <http://www.tpub.com/weather3/6a-26.htm>
- [30] <http://www.aviation-safety.net>
- [31] <http://www.sat.dundee.ac.uk>
- [32] <ftp://80.191.68.149>
- [11] Kelsch, M. & Wharton. L., "Comparing PIREPs with NAWAU Turbulence and Icing Forecasts: Issues and Results", 1996.
- [12] Gregory, T. & et.al., "Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part I: WISP94 Real-Time Icing Prediction and Evaluation Program", 1997.
- [13] Taffermer, A., "ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments", 2003.
- [14] Bernstein, T., "Aircraft Icing Conditions in Northeast Colorado", 2002.
- [15] Cober, S. & et.al., "Characterizations of Aircraft Icing Environments that Include Supercooled Large Drops", 2001.
- [16] Bernstein, T. & et.al., "Current Icing Potential: Algorithm Description and Comparison with Aircraft Observations", 2005.
- [17] Gary P. Ellrod & Andrew A. Bailey, "Assessment of Aircraft Icing Potential and Maximum Icing Altitude from Geostationary Meteorological Satellite Data", 2007.
- [18] Lasse Makkonen, "Anemometry in Icing Conditions", 2001.