

بررسی شرایط هواشناختی یخ‌زدگی هواپیما در دو بررسی موردی (فرودگاه مهرآباد-تهران)

سحر تاج‌بخش^{۱*}، پروین غفاریان^۲ و فاطمه صحرائیان^۳

^۱ سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳ عضو هیأت علمی پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۱/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۰/۴/۱۳)

چکیده

به منظور تعیین آستانه‌های عددی برخی از مهم‌ترین شاخص‌های شناسایی و پیش‌بینی یخ‌زدگی هواپیما، دو بررسی موردی در فرودگاه مهرآباد و در فصل زمستان صورت گرفته است. مورد اول مربوط به تاریخ ۲ ژانویه ۲۰۰۸ است که یخ‌زدگی موتور، منجر به آتش‌سوزی و فرود اضطراری هواپیما در فرودگاه مهرآباد تهران شده است. بررسی دوم نیز مربوط به تاریخ ۶ ژانویه ۲۰۰۸ است که سامانه پُرفشار سرد سیبری در نوار شمالی کشور مستقر شد و بارش مداوم برف و سرمای بسیار شدید بخش‌های شمالی کشور را در بر گرفت. در بررسی دوم اگرچه به سبب لغو شدن همه پروازها از/ به فرودگاه مهرآباد، گزارش یخ‌زدگی موجود نیست اما از آنجا که فعالیت سامانه پیش‌گفته قابل ملاحظه بود، در تعیین و مقایسه شاخص‌ها، مورد مناسبی به نظر می‌آید. در این تحقیق علاوه بر عرضه الگوهای بزرگ‌مقیاس جوی در بررسی‌های یاد شده، برخی از خروجی‌های مرتبط با یخ‌زدگی یک مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا (MM5) شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت قائم و محتوای آب مایع بررسی و آستانه عددی این خروجی‌ها در منطقه تهران با مقادیر آستانه‌ای شاخص‌های یاد شده در دیگر تحقیقات مقایسه شده است. همچنین شاخص‌های ناپایداری از جمله LI، KI، SI، TT، SWEAT، CAPE و CIN و همچنین تفاضل نقطه شبنم (دیفیسیته) تعیین و بررسی شده‌اند. مهم‌ترین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوهای بزرگ‌مقیاس قادرند شرایط رخداد یخ‌زدگی را به صورت کیفی نمایش دهند. خروجی‌های دما، رطوبت نسبی و سرعت قائم مدل پیش‌بینی عددی MM5 با نتایج مشاهدات و برخی تحقیقات دیگر در این باره هم‌خوانی مناسبی نشان می‌دهند و آستانه‌های مقادیر عددی آنها با آستانه‌های به دست آمده در دیگر تحقیقات کم‌وبیش هماهنگ است و اختلاف‌های جزئی احتمالا ممکن است به علت شرایط توپوگرافی در مدل منطقه‌ای روی داده باشد که البته این امر نیاز به بررسی بیشتری در شرایط مرزی مدل نیز دارد. با این حال مقادیر عددی محتوای آب مایع با آستانه‌های موجود هم‌خوان نیستند و تحقیقات و بررسی‌های بیشتری را در این زمینه می‌طلبد. شاخص‌های ناپایداری نیز در هر دو مورد مقادیر عددی قابل توجهی را نشان نمی‌دهند که البته علت آن وجود ابرهای پوششی به نسبت کم عمق در تحقیقات یاد شده پیش‌بینی مقادیر عددی کوچک آنها دور از انتظار نیست. مقادیر عددی به دست آمده در این بررسی نشان می‌دهد که تفاضل نقطه شبنم کمتر از 3°C ، دمای بین 10° تا صفر، سرعت قائم صعودی با بزرگی $-0.2 \frac{\text{hPa}}{\text{s}}$ ، رطوبت نسبی بیش از ۷۰٪ در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، براساس خروجی‌های مدل منطقه‌ای MM5، با مقادیر آستانه‌ای تحقیقات دیگر، می‌توانند در حکم شاخص‌های عددی مناسبی در حدس‌های اولیه برای یخ‌زدگی هواپیما در ایستگاه مهرآباد تهران مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: یخ‌زدگی هواپیما، مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا MM5، محتوای آب مایع، سرعت قائم

Meteorological aircraft icing in two case studies, (Tehran-Mehrabad Airport)

Tajbakhsh, S.¹, Ghaffarian, P.² and Sahraian, F.³

¹ Iranian Meteorological Organization, Tehran, Iran

² Ph. D. Student of Meteorology, Islamic Azad University, Research and Science Branch, Tehran, Iran

³ Faculty member of Atmospheric Science and Meteorology Research Center(ASMERC), Tehran, Iran

(Received: 11 Apr 2009, Accepted: 4 July 2011)

Abstract

Ice can form on aircraft surface at 0° C or colder temperatures when liquid water is present. This can happen both on the ground and at the flight levels of the aircraft. Aircraft icing has not only an impact on flight safety but has also an economic impact. According to the report of research department of the FAA (Federal Aviation Administration), from 1982 to 2001, 13% of accidents due to aircraft icing resulted in loss of human life, about 30 cases in 20 years.

This research refers to case studies in Mehrabad airport during winter in order to determine the threshold values of some important indices in aircraft icing forecast. In the first case study, aircraft engine failed and emergency landing occurred due to aircraft icing. Second case study is considered because of domination of a very cold outbreak in northern parts of Iran and all Mehrabad flights were cancelled.

In addition to study the synoptic and thermodynamic weather patterns, the relevant MM5 outputs including vertical velocity, liquid water content (LWC) and relative humidity are surveyed and their thresholds are compared with other studies in this area including Ellrod and Bailey in 2007 and Henderson in 2006.

Synoptic conditions are analyzed using GFS data with 1° resolutions in latitude and longitude directions (<http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php>). The initial and boundary conditions come from the operational 12Z runs of global forecasting system (GFS) of NCEP (National Center for Environmental Prediction) for MM5 (Meso scale Model version 5) model (Dudhia 1993; Grell et al. 1994) to survey the NWP model outputs. Satellite images as the other reference in this study, are taken from METEOSAT-7 which provides one image every 30 minutes over Iran. Thermodynamic charts are drawn by RAOB software using Mehrabad station upper air sounding data to determine the threshold values of instability indices such as LI, KI, SI, and SWEAT.

The most important results of this research show that large scale patterns are not a suitable factor to determine the type and severity of icing. Relative humidity and vertical velocity as the outputs of the MM5 regional numerical weather prediction model does have a rather good consistence with the observations and their thresholds are quite similar with other thresholds gained from the other parts of the world and the small differences can be due to topographical and boundary conditions in the regional model. The liquid water content values do not match the available thresholds and require more research. Thermodynamic charts show temperature and dew point deficits values can show the aircraft icing conditions but the thermodynamic indices such as LI, KI, SI, and SWEAT are not suitable and did not satisfy icing conditions. It can be said that due to shallow stratiform clouds which are reported in Mehrabad station observations provides threshold values so that the dew point deficit is less than 3°C, temperature between zero and -10°C, vertical velocity -0.2 hPa/s, relative humidity more than 75% in 700 hPa level are good diagnosis in the first guess in aircraft icing and they make easy icing forecast for the Mehrabad airport area.

Key words: Aircraft icing, Regional numerical weather prediction model MM5, Liquid water content, Vertical velocity, Relative humidity

۱ مقدمه

پرنده‌ای که به ابزارهای ضد یخ و یخ‌زدا مجهز نیستند، از مهم‌ترین مخاطرات پرواز است. تحقیقی در این خصوص از سوی پتی و فلویید در ۲۰۰۴ صورت گرفت و مشخص

یخ‌زدگی، از جمله پدیده‌های جوی مخاطره آمیز و تاثیر گذار بر هواپیما است و می‌تواند ایمنی و کارایی پرواز را به شدت به خطر اندازد. این پدیده، به‌ویژه برای وسایل

شد که در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۰ فقط کمتر از ۲٪ هواپیماهای سنگین مسافربری در ایالات متحد در اثر یخزدگی دچار سانحه شده‌اند. در ۱۹۵۴ سازمان هواشناسی جهانی مفاهیم هواشناختی یخزدگی هواپیما را تشریح کرد. یخزدگی به هر نوع نهشت یا پوشش یخ روی هواپیما اطلاق می‌شود (لستر، ۲۰۰۱). این نهشت در اثر اصابت و یخزدگی قطرات آب که غالباً به صورت ابر سرد هستند، رخ می‌دهد. اثرات یخزدگی روی عملیات هواپیما از سال‌های دور به طور وسیعی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. رشد یخ روی بدنه هواپیما باعث افزایش جرم آن می‌شود و منجر به تغییراتی در راستای طولی تعادل هواپیما می‌شود (یخزدگی ساختاری). این تاثیر روی هواپیماهای سنگین نسبتاً کوچک است. یخزدگی علاوه بر بدنه می‌تواند در داخل موتور نیز منجر به ایجاد اختلال‌های فنی برای پرواز هواپیماها و بالگردها شود (یخزدگی القایی). یخزدگی روی بدنه هواپیما یا یخزدگی ساختاری به صورت‌های شبنم یخی، یخ کدر، یخ مخلوط و یخ شفاف ظاهر می‌شود. این طبقه‌بندی براساس دمای بدنه هواپیما تعریف شده است (سازمان هواشناسی جهانی، ۱۹۵۴). عناصر نیروی محرکه هواپیما شامل موتورها، پروانه‌ها و بخش‌های چرخان نیز نقاط مناسبی برای یخزدگی هستند. این نوع یخزدگی که از آن به یخزدگی القایی تعبیر می‌شود منجر به ریزش یخ در ابزارهای درونی موتورهای توربو جت می‌شود و می‌تواند به خاموش شدن موتور در حین پرواز و یا حتی آتش‌سوزی موتور نیز منجر شود (حالتی که در بررسی موردی اول در این تحقیق رخ داده است).

علاوه بر نوع و محل نهشت یخ، شدت رشد یخ نیز در یخزدگی هواپیما اهمیت زیادی دارد، از این رو شناخت عوامل جوئی موثر در یخزدگی ضروری به نظر می‌رسد. برخی از مهم‌ترین پارامترهایی که به‌منظور پیش‌بینی یخزدگی از آنها استفاده می‌شود عبارت‌اند از دمای هوا

(شامل تراز 0°C)، رطوبت نسبی، محتوای آب مایع، سرعت قائم و چینش قائم باد که در ادامه به اختصار توضیح داده شده‌اند. همچنین فرایند استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برای پیش‌بینی شرایط قابل‌ملاحظه جوّ از دیدگاه هوانوردی بر اساس معیارهای اپلمن (۱۹۸۴) عرضه شد. سند و همکاران در (۱۹۸۴) ضمن پرواز با یک هواپیمای تحقیقاتی، شرایط هواشناختی در حین رویارویی با یخزدگی را مشخص کردند. تاثیر فیزیک تجمع یخ بر پیش‌بینی یخزدگی از سوی هنسمن و همکاران (۱۹۸۹) بررسی شد. تحقیقات برن استین و همکاران (۱۹۹۲) به مقایسه ۲۷۰۰ گزارش یخزدگی از خلبان‌ها و الگوهای همدیدی در ۳۷ مورد زمستانی پرداخته است. کاری و ليو (۱۹۹۲) نیز به کمک داده‌های ماهواره شرایط یخ زدگی هواپیما را بررسی کرده‌اند. لی و همکاران (۱۹۹۴) و همچنین مدیکا و همکاران (۱۹۹۴) بر اهمیت قطرات آب ابر سرد در نوع و شدت یخزدگی تاکید کرده‌اند. بر همین اساس ترمبلی و همکاران (۱۹۹۵) نیز روشی را برای پیش‌بینی تشکیل قطرات آب ابرسرد عرضه کردند. برخی روش‌های ارزیابی پیش‌بینی یخزدگی در چندین تحقیق از سوی براون و مورفی (۱۹۹۲) و براون و همکاران (۱۹۹۵) عرضه شده است. پولیتوویچ نیز (۱۹۹۶) روشن ساخت که دماهای گرم‌تر محدوده صفر تا 10°C - می‌تواند با مخاطرات بیشتر یخ شفاف با شدت متوسط تا شدید یا یخ مخلوط با مقادیر زیاد محتوای آب مایع همراه شوند و در دماهای سردتر از 15°C -، به‌ویژه در ابرهای پوشنی، به علت کاهش محتوای آب مایع و کوچک‌تر شدن قطرات، احتمال رخداد یخزدگی کمتر می‌شود. مینیس و همکاران (۲۰۰۱) به‌منظور بررسی وضع هوا و اقلیم روشی را عرضه کردند که در آن به کمک داده‌های ماهواره‌ای بررسی ویژگی‌های ابرها با دقت بیشتری امکان‌پذیر شد. لبت (۲۰۰۴) سامانه‌ای را معرفی کرد که در آن به

شناسایی انواع یخزدگی براساس موقعیت‌های جغرافیایی در منطقه امریکا پرداخته شده است. البته به موجب شرایط پیچیده فیزیکی و هواشناختی یخزدگی، عوامل فرایابی و پیش‌یابی یخزدگی هواپیماها حین پرواز، دائماً به چالش کشیده می‌شد تا اینکه الرود و بیلی (۲۰۰۷) روشن ساختند که مهم‌ترین پارامترهایی که می‌توانند در یخزدگی‌های هواپیما، به‌ویژه برای شدت‌های متوسط تا سنگین در نظر گرفته شوند شامل دما، فاز آبی ابر، قطرات درشت داخل ابر با قطر بیشتر از ۳۰ میکرومتر، حرکت‌های فراسو و محتوای آب مایع زیاد، هستند.

دما یکی از بهترین پارامترهایی است که می‌تواند پدیده یخزدگی را توصیف کند. این شاخص در مدل‌های عددی به طور معمول محاسبه می‌شود و بسیار قابل دسترس است. علاوه بر این، جزئیات پوشش فضایی آن به حد کافی زیاد است و می‌توان به کمک آن مناطق دارای مخاطره یخزدگی را دقیقاً مشخص کرد. در یک تقسیم‌بندی، دمایی بین سطوح گوناگون ابر که آمار دیدبانی‌های متعدد یخزدگی در طول مسیر پرواز هواپیماها آن را تایید کرده‌اند، نشان می‌دهد که یخزدگی در ترازهای با دمای کمتر از -20°C به ندرت رخ می‌دهد و بیشترین موارد یخزدگی هواپیماها در سطوحی با دمای بین -3°C تا -7°C گزارش شده‌اند (هندرسون، ۲۰۰۶). الرود و بیلی (۲۰۰۷) نیز بر رخداد یخزدگی در دمای بین صفر تا -20°C تاکید کرده‌اند. در واقع در دماهای سردتر از -20°C اغلب محتوای آب مایع ابر کاهش می‌یابد و قطرات آب ابر سرد بسیار کوچک می‌شوند و احتمال یخزدگی هواپیما کاهش پیدا می‌کند. البته تحقیقات بیشتری باید صورت گیرد تا بتوان به طور دقیق این شرایط را در دماهای حدی توضیح داد. پتانسیل یخزدگی هوای اشباع را می‌توان به کمک رطوبت نسبی هوا، مشخص کرد. اگر رطوبت نسبی به‌طور صحیح برآورد شود، می‌توان از آن در حکم پارامتری برای تعیین مناطق بدون

پتانسیل یخزدگی استفاده کرد. در مدل‌های پیش‌بینی عددی، رطوبت نسبی نیز مانند دما پارامتری است که غالباً محاسبه می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل یخزدگی زمانی بیشینه مقدار خود را دارد که رطوبت نسبی بیش از ۷۵٪ و یا دماهای مناسبی همراه آن باشد (هندرسون، ۲۰۰۶). وی همچنین بر شاخص کمبود دمای نقطه شبنم تاکید می‌کند که این شاخص با مقادیر کمتر از 3°C در یک جبهه سرد نیز حکایت از رخداد ۱۰۰٪ یخزدگی دارد. محتوای آب مایع (LWC, Liquid Water Content) نیز شاخص دیگری برای بررسی یخزدگی است. محتوای آب مایع در ابرهای پایدار (پوشنی، فراز پوشنی و پوشنی باران یا باران‌زا) از 0.1 تا 0.5 g/m^3 است. محتوای آب مایع در ابرهای ناپایدار شامل ابرهای کومه‌ای، فراز کومه‌ای، کومه‌ای باران از ۱ تا ۵ گرم بر متر مکعب است. شدت پتانسیل یخزدگی بر پایه محتوای آب مایع را می‌توان به این شرح تعیین کرد: $LWC < 0.1 \text{ g/m}^3$ یخزدگی سبک، $0.1 < LWC < 0.2 \text{ g/m}^3$ یخزدگی متوسط و $LWC > 0.2 \text{ g/m}^3$ یخزدگی شدید. سرعت قائم، به‌ویژه هنگامی که خروجی مدل پیش‌بینی شامل محتوای آب مایع LWC نباشد، به‌منزله یک پارامتر تکمیل‌کننده در شناسایی شرایط یخزدگی به کار می‌رود. میدان‌های سرعت قائم غالباً شناسایی همه حالت‌های یخزدگی را نشان نمی‌دهند اما پارامتر مناسبی برای کمی کردن شرایط مشخص یخزدگی است. خروجی مدل پیش‌بینی عددی مرکز هواشناسی فرانسه (ARPEGE 1.5) نشان‌دهنده یخزدگی با سرعت‌های قائم صعودی با بزرگی بیش از 0.2 hPa/s - در تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال است (هندرسون، ۲۰۰۶).

در این مقاله ضمن بررسی الگوهای بزرگ‌مقیاس جوئی در دو بررسی موردی در ایستگاه مهرآباد تهران، کوشش شده است تا برخی از خروجی‌های مرتبط با

قابل تحقیق و بررسی اند.

۳ بررسی های موردی

در این تحقیق دو بررسی موردی یخزدگی هواپیما در فصل زمستان صورت گرفته است. بررسی موردی اول به تحقیق در این پدیده در شرایطی می پردازد که یک یخزدگی القایی حین بلند شدن از باند هواپیما گزارش شده است اما شرایط همدیدی آن ناپایداری های شدید جوّی را نشان نمی دهد. از آنجاکه این حادثه در ساعت UTC ۰۴ گزارش شده است، به بررسی نقشه های واقعی در ساعت UTC ۰۰ و خروجی های مدل پیش بینی عددی در ساعت UTC ۰۳ (نزدیک ترین ساعت پیش بینی به رخداد دیدبانی شده) پرداخته می شود.

در بررسی موردی دوم، شرایط جوّی بسیار سردی بر ایستگاه حاکم است به گونه ای که غالب پروازها لغو شده اند و رخداد یخزدگی حین پرواز بدیهی است. این بررسی از این جهت انتخاب شده است که حین بارش سنگین برف در تهران، آستانه های عددی برخی شاخص هایی که می توان براساس آنها به وجود یخزدگی در شرایط برف سنگین پی برد، بررسی و با مورد اول مقایسه شوند. از آنجاکه بیشترین شدت بارش بین ساعت های ۰۰ تا UTC ۱۲ گزارش شده است بررسی نقشه های سطح زمین و نقشه های سطوح بالای جوّ و نمودارهای SKEW-T در ساعت های ۰۰ و UTC ۱۲ صورت گرفته است و خروجی های مدل در ساعت های ۰۰، ۰۳، ۰۶ و UTC ۱۲ آورده شده اند. به این ترتیب در این بخش تلاش می شود تا ضمن بررسی الگوهای همدیدی، آستانه های عددی شاخص های دما، رطوبت، سرعت قائم و محتوای آب ابر و همچنین شاخص های ترمودینامیکی برای هر دو حالت محاسبه و با نتایج دیگر تحقیقات منتشر شده مقایسه شوند.

یخزدگی مدل منطقه ای MM5 تحلیل شده و آستانه های عددی رخداد یخزدگی در این بررسی موردی با برخی تحقیقات دیگر در این زمینه مقایسه شود.

۲ داده ها و روش کار

برای بررسی همدیدی بررسی موردی یاد شده، از نقشه های سینوپتیک مرکز پیش بینی سازمان هواشناسی کشور استفاده شده است. این نقشه ها براساس داده های دیدبانی در مقیاس بزرگ تهیه و تحلیل می شوند. از این رو برای پدیده های میان مقیاس و خرد مقیاس ضروری است از شاخص های دیگری نیز استفاده شود. لذا به منظور بررسی پدیده های میان مقیاس از جمله یخزدگی هواپیما از مدل های منطقه ای استفاده می شود که در این تحقیق از مدل پیش بینی عددی منطقه ای MM5 استفاده شده است. این مدل که مرکز (NCAR, National Center for Atmospheric Research) با همکاری های دانشگاه پنسیلوانیا آن را تهیه کرده است، همه روزه به شکل منطقه ای در مرکز پیش بینی سازمان هواشناسی کشور اجرا می شود. این مدل توانایی اجرا با تفکیک های گوناگون را دارد و در این تحقیق با تفکیک افقی ۳۵ کیلومتر اجرا شده است. ورودی های این مدل داده های جهانی (AVN, Aviation data) است و خروجی های آن انواع اطلاعات (از جمله دما، باد، رطوبت) و محصولات هواشناسی (شامل سرعت قائم، تاوایی، محتوای آب مایع و مانند آن) است. در این تحقیق فقط به شاخص های دما، رطوبت، سرعت قائم و محتوای آب مایع بسنده شده است.

همچنین برای تحلیل شاخص های ترمودینامیکی از نرم افزار RAOB استفاده شده است. به کمک این نرم افزار به تحقیق و بررسی در شاخص های ناپایداری از جمله LI، KI، SI، SWEAT، TT، CAPE و CIN پرداخته شده است. همچنین شاخص های یخزدگی کاربراتور و بدنه

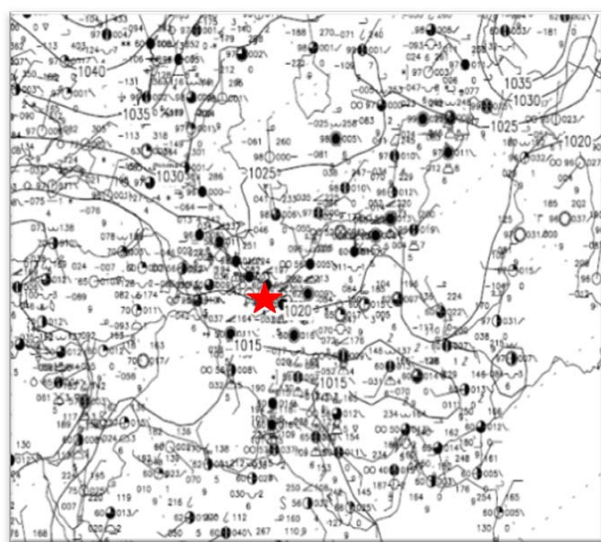
۳-۱ پدیده مورخ ۲ ژانویه ۲۰۰۸

در ساعت ۰۴ UTC دوم ژانویه ۲۰۰۸ یکی از موتورهای هواپیمای فوکر ۱۰۰ متعلق به یکی از شرکت‌های هواپیمایی داخلی حین ترک کردن باند ۲۹ چپ فرودگاه مهرآباد به مقصد شیراز دچار نقص فنی شد که این امر انحراف هواپیما از باند و آتش گرفتن موتور و بخش‌هایی از هواپیما را به دنبال داشت. شرکت هواپیمایی متبوع احتمال رخداد یخ‌زدگی را برای این سانحه در نظر گرفته است. خوشبختانه این سانحه تلفات جانی نداشت و فقط چند تن از خدمه هواپیما مصدوم شدند. به منظور تحقیق هواشناختی رخداد یخ‌زدگی در این سانحه به بررسی نقشه‌های هواشناسی در تاریخ یادشده پرداخته می‌شود.

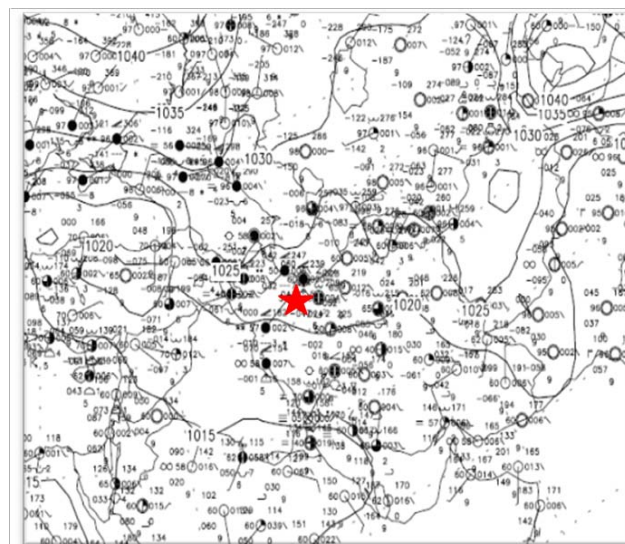
در نقشه سطح زمین ساعت ۰۰ UTC روز دوم ژانویه پشته یک سامانه پُرفشار روی کشور گسترده شده است به طوری که پربند ۱۰۲۰ هکتوپاسکال از منطقه تهران عبور کرده است. (شکل ۱-الف). این الگو در ساعت ۰۶ UTC با تقویت سلول پُرفشار یادشده روی کشور همراهی می‌شود که نشان از استقرار توده هوای بسیار سردی در منطقه دارد. وضعیت یادشده در شکل ۱-ب نمایش داده

شده است. وقوع یخ‌زدگی در ساعت ۰۴ UTC (وضعیت گذار بین دو شکل پیش گفته) ثبت شده است.

الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در تاریخ یادشده فرارفت هوای سرد را در حاشیه غربی و فرارفت هوای گرم را در شرق کشور نشان می‌دهد. این وضعیت معرف عبور یک جبهه مخلوط سرد در منطقه است. ضمن اینکه در این تراز هم‌دمای صفر درجه سلسیوس از ایستگاه مهرآباد تهران نیز عبور کرده است. در این نقشه مشابه سطح زمین غالب نقاط کشور در دامنه زبان‌های یک مرکز ارتفاع زیاد واقع شده‌اند. (شکل ۲-الف). الگوی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز که در شکل ۲-ب دیده می‌شود، موید حضور امواج کوتاهی است که اثرات آنها در الگوهای مقیاس همدیدی به خوبی مشهود نیست. این امواج در دامنه ناوه مرکز کم‌ارتفاعی است که مرکز آن در جنوب اروپا مستقر است. ضمن اینکه سلول هم‌دمای ۱۵- درجه سلسیوس نیز در شمال دریای خزر مشهود است که نشان از ریزش هوای سرد روی کشور در تراز یادشده دارد.



(ب)

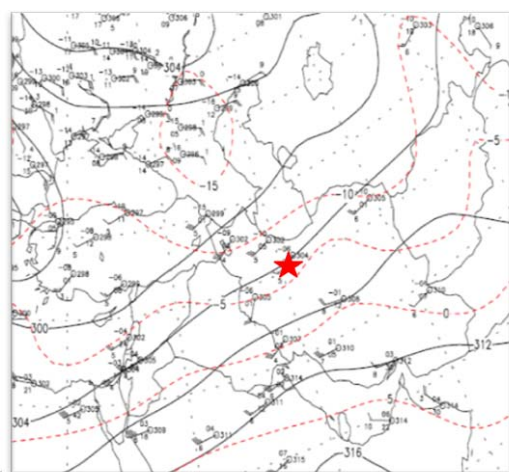


(الف)

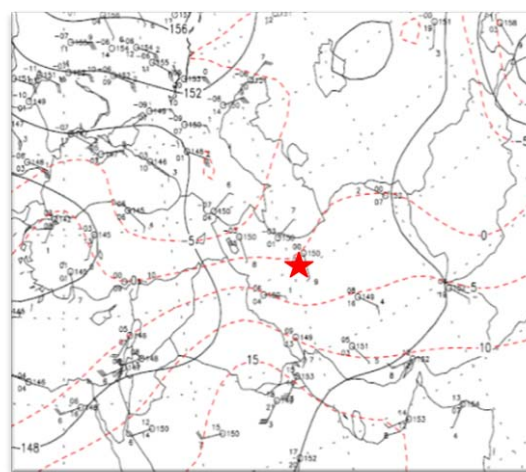
شکل ۱. نقشه‌های سطح زمین ۲ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های الف) ۰۰ UTC و ب) ۰۶ UTC. خطوط توپو هم‌مقدارهای فشار هستند که با فواصل ۵ هکتوپاسکال رسم شده‌اند. موقعیت تهران با ستاره توپو سرخ مشخص شده است.

فلسطین) دیده می‌شود. سرعت باد در این تراز و در غالب ایستگاه‌های کشور بیش از ۱۰۰ نات گزارش شده است به‌طوری‌که سرعت باد در ایستگاه مهرآباد تهران معادل ۱۱۰ نات است. این ایستگاه در بخش چرخندی رودباد قرار گرفته است. داده‌های دیدبانی شده در این تاریخ و در ساعت ۰۴ UTC نشان از بارش سنگین برف همراه با دید افقی یک کیلومتر دارد. سرعت باد در این ساعت آرام گزارش شده است. میزان ابر نیز معادل ۸/۸ (تمام‌بری) و نوع آنها شامل کومه‌ای بار (CB)، کومه‌ای پوشنی (SC) و پوشنی بار (NS) است.

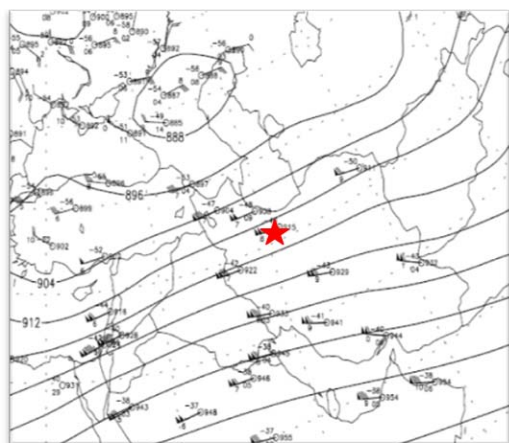
در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال که کم‌ویش مشابه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال است، یک مرکز کم‌ارتفاع با محور شرقی - غربی در شمال دریای خزر به چشم می‌خورد. جریان‌های کاملاً مداری آن در حال عبور از نیمه شمالی ایران است و به نظر می‌رسد که ناوهای کوچک مقیاسی در حال گذر از منطقه هستند. الگوهای دمایی در این نقشه نیز تقریباً مشابه الگوهای پربندی است (شکل ۲-ج). همچنین نقشه ۳۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲-د) معرف استقرار رودباد بسیار فعالی در منطقه خاورمیانه است که محور آن با مقدار عددی ۱۵۰ نات در شرق خاور میانه (



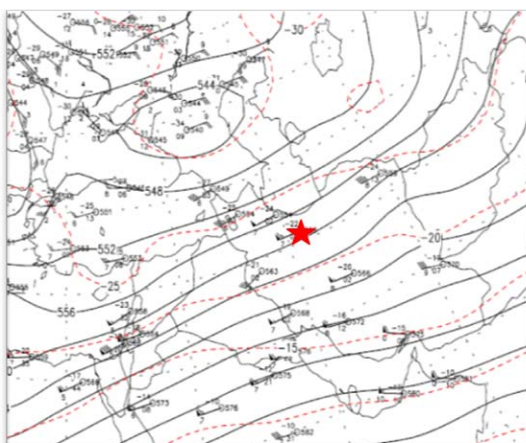
(ب)



(الف)



(د)



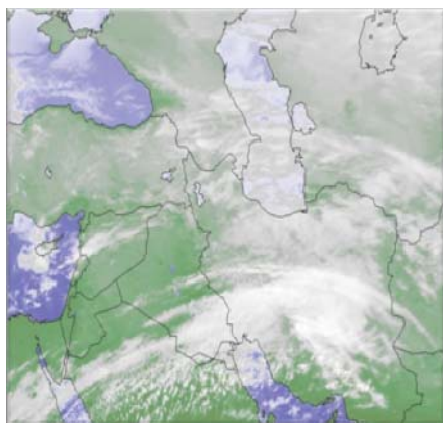
(ج)

شکل ۲. نقشه‌های الف (۸۵۰، ب) ۷۰۰، ج) ۵۰۰ و د) ۳۰۰ هکتوپاسکال ۲ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت ۰۰ UTC. خطوط توپو پربندهای ارتفاع با فواصل ۴۰ متر (فقط در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ۸۰ متر) و خطچین‌ها پربندهای دما با فواصل ۵ درجه سلسیوس هستند. موقعیت تهران با ستاره توپو سرخ مشخص شده است.

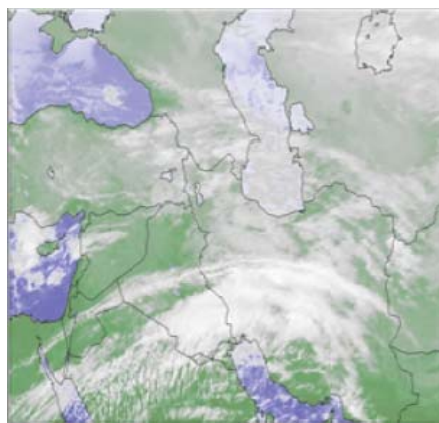
از این رو شرایط الگوهای جوّ بالا نیز مساعد رخداد شرایط جوّی ناپایدار در لایه‌های بالایی جوّ و مبین عبور یک جبهه مخلوط سرد از نیمه شمالی کشور است به این ترتیب ایستگاه مهرآباد از نقطه نظر همدیدی شرایط مناسبی برای یخزدگی دارد؛ یعنی در منطقه جبهه سطح زمین، شرق ناوهای موج کوتاه تراز میانی جوّ و خروجی بخش چرخندی رودباد ۳۰۰ هکتوپاسکال واقع شده است که با توجه به دمای آن می‌توان احتمال رخداد یخزدگی را به صورت کیفی برای آن در نظر گرفت.

مجموعه شکل‌های ۳ تصاویر دریافتی از ماهواره METEOSAT-7 هستند که برای ساعت‌های ۰۰، ۰۴ و ۰۶ UTC منظور شده‌اند. در این تصاویر عبور یک رودباد

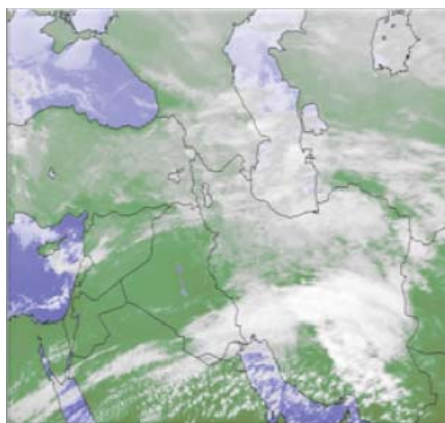
قوی از روی کشور به وضوح دیده می‌شود. محور این رودباد در بخش‌های جنوبی ایران واقع شده است. همچنین ناوهای کم عمقی که در جریان‌های مداری لایه میانی جوّ روی نقشه‌های ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در شکل‌های ۲-ب و ۲-ج دیده می‌شوند در حال گذر از از نیمه شمالی کشورند. گزارش‌های دیدبانی سطح زمین نیز این شرایط را تایید می‌کند، به گونه‌ای که از ساعت ۰۰ تا ۰۶ UTC ابرهای باران (NS)، کومه‌ای باران (CB) و کومه‌ای پوشنی (SC) در گزارش‌های سینوپ، دیدبانی شده‌اند. به این ترتیب تصاویر ماهواره‌ای نیز عبور ابرهای همراه با یک جبهه مخلوط سرد را از نیمه شمالی کشور تایید می‌کنند که می‌توان احتمال رخداد یخزدگی را براساس آنها پیش‌بینی کرد.



(ب)



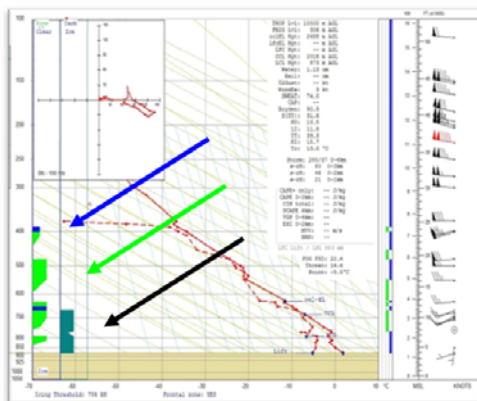
(الف)



(ج)

شکل ۳. تصاویر دریافتی از ماهواره در ۲ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران به ترتیب در ساعت‌های الف) ۰۲، ب) ۰۴، و ج) ۰۶ UTC.

از این رو طبیعتاً شاخص‌های یادشده نباید معرف ناپایداری قائم جوّی باشند. اما شاخص‌های یخزدگی که روی نقشه دیده می‌شوند (یخ شفاف، یخ کدر و یخ کاربراتور) نشان از یخزدگی داخل کاربراتور از سطح زمین تا تراز ۷۰۰ میلی‌باری (پیکان سیاه روی شکل ۴) و یخ کدر از تراز ۸۵۰ تا ۴۰۰ هکتوپاسکال (پیکان سبز روی شکل ۴) دارند. یخزدگی داخل کاربراتور می‌تواند رخداد آتش‌سوزی موتور هواپیما را تایید کند. برای وضوح بیشتر، اطلاعات دما، رطوبت، دمای نقطه شبنم و یخزدگی مربوط به شکل ۴ در جدول ۱ آمده است. براساس این جدول، پارامترهای جوّی مرتبط با یخزدگی که پیش‌تر به آنها اشاره شد، وضعیت مساعدی را برای رخداد این مخاطره جوّی نشان می‌دهند. به‌طوری‌که دما در پایین‌ترین لایه ابر بین صفر تا منهای ۱ درجه سلسیوس و میزان رطوبت نسبی بین ۸۳ تا ۵۹ درصد در نوسان است. ضمن اینکه این جدول نیز انواع یخزدگی ساختاری را از سطح زمین تا ارتفاعات بالا به تناوب نشان می‌دهد. اما نکته قابل‌ذکر، نوع یخزدگی است که اغلب از نوع کدر است و این موضوع موید وجود قطرات نه چندان درشت آب ابرسرد در داخل ابر است که البته دیدبانی نوع ابر و مقادیر دما در جدول ۱ نیز این موضوع را تایید می‌کند.



به‌منظور بررسی دقیق‌تر یخزدگی هواپیما در بررسی موردی حاضر، نمودار SKEW-T با استفاده از نرم‌افزار RAOB رسم شده است. در این نمودار، علاوه بر شاخص‌های متداول ترمودینامیکی، برخی از اطلاعات کاربردی مفید درباره یخزدگی از جمله نوع یخزدگی (ساختاری و القایی)، ارتفاع وقوع آن و برخی از شاخص‌های ناپایداری جوّی آورده شده است. این نمودار براساس داده‌های دیدبانی شده در ساعت ۰۰ UTC ۰۰ رسم و خروجی‌های آن محاسبه شده است. از این رو اطلاعات آن مربوط به حدود سه ساعت قبل از گزارش یخزدگی است. برای بررسی بیشتر در چگونگی تعیین نوع و شدت یخزدگی به سایت http://www.tpub.com/icicng_forecast // ارجاع داده می‌شود.

شاخص‌های محاسبه شده LI (۱۰/۵)، KI (۱۵/۷) و CAPE که از جمله علائم نشان‌دهنده ناپایداری هستند و جورج (۱۹۶۰) و گالوی (۱۹۵۶) آن را عرضه کرده‌اند، مقادیر قابل‌توجهی در این شکل نشان نمی‌دهند (در جدول سمت راست شکل ۴). در واقع همان‌طور که در تصاویر ماهواره‌ای دیده می‌شود (شکل ۳) ناحیه وسیعی از جبهه مخلوط با ابرهای پوشنی باران (NS) همراه است که مربوط به ویژگی هوای نسبتاً پایدار می‌شود (همیلتون، ۲۰۰۰)

مقدار شاخص‌های ناپایداری	مقدار محاسبه شده در این تحقیق	مقادیر نوعی شاخص در برخی ناپایداری‌ها
LI	۱۰/۵	بین ۲۰ تا -۲ (احتمال رخداد رگبار بر فویل‌ها)
KI	۱۵/۷	بین ۲۰ تا ۱۵ (احتمال توفان تندرگی کمتر از ۲۰ درصد است)
SI	۱۰/۱	بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ (به ندرت هوای به رخ می‌دهد)
SWEAT	۷۴	بین ۴۵ تا ۹۴ (رطوبت ملایم)
TT	۳۹/۳	بین ۱۰ تا ۱۰۰ (ناپایداری کمر است)
CAPE	-	(کمتر از ۱۵) (هوای خوب همراه با شکل‌گیری ابرهای کومه‌ای)
CIN	-	

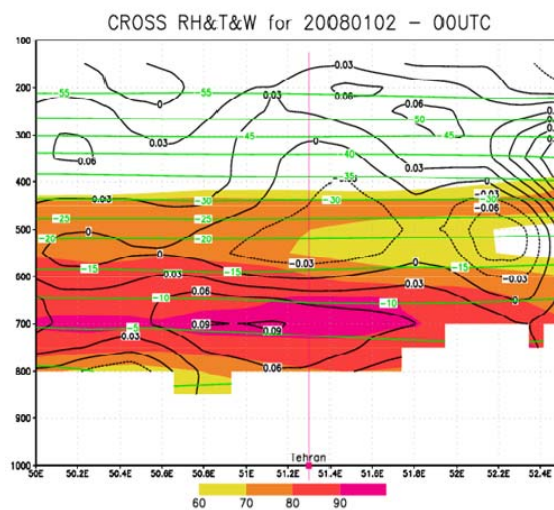
شکل ۴. نمودار skew-T برای ساعت ۰۰ UTC مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۲. خط توپُر و خط چین سرخ به‌ترتیب معرف تغییرات دما و دمای نقطه شبنم هستند. شاخص‌های یخ شفاف، یخ کدر و یخ کاربراتور به‌ترتیب با پیکان‌های آبی، سبز و سیاه همراه با ارتفاع رخداد آنها دیده می‌شود (شکل سمت چپ). مقادیر عددی شاخص‌های ناپایداری در بررسی موردی یادشده در نمودار سمت راست نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱. مقادیر عددی ارتفاع (m)، فشار (hPa)، دما (°C)، دمای نقطه شبنم (°C)، رطوبت نسبی (%) و نوع یخزدگی استخراج شده از نرم افزار RAOB برای ساعت ۰۰ UTC مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۲.

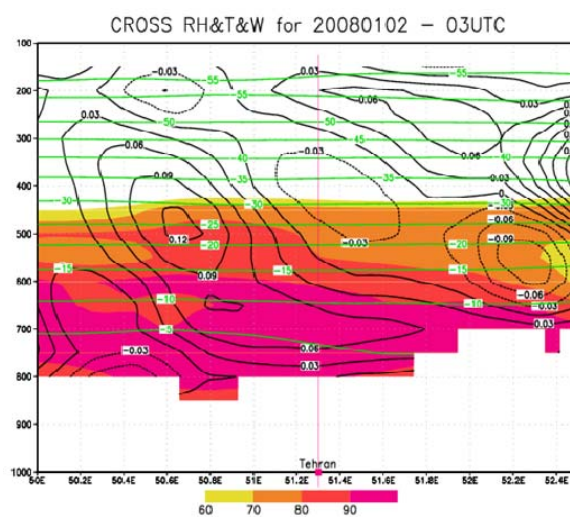
ارتفاع (m-AGL)	فشار (hPa)	دما (°C)	دمای نقطه شبنم (°C)	تفاضل دما و دمای نقطه شبنم (°C)	رطوبت نسبی (%)	نوع و شدت یخزدگی
۴۳۹۹	۵۰۰	-۲۱/۹	-۲۳/۲	۱/۳	۸۹	یخ کدر سبک
۱۸۵۱	۷۰۰	-۵/۷	-۷/۴	۱/۷	۸۸	یخ کدر سبک
۱۷۶۱	۷۰۸	-----	-----	-----	-----	-----
۱۳۸۰	۷۴۳	-۲/۷	-۵/۲	-۲/۵	۸۳	یخ کدر سبک
۱۲۲۱	۷۵۸	۰	-----	-----	-----	-----
۱۱۴۸	۷۶۵	-۰/۹	-۵/۹	۵	۶۹	-----
۱۱۰۶	۷۶۹	-۰/۹	-۷/۹	۷	۵۹	-----
۹۱۲	۷۸۸	-۱/۷	-۴/۲	۲/۵	۸۳	یخ کدر سبک
۶۸۲	۸۱۱	-۰/۷	-۴/۱	۳/۴	۷۸	یخ کدر سبک
۵۷۴	۸۲۲	-۱/۳	-۴/۵	۲/۲	۷۹	رد یخ کدر
۳۰۶	۸۵۰	۰	-۴/۵	۴/۵	۷۲	(ارتفاع پایه ابر)
۰	۸۸۳	۱/۸	-۵/۲	۳/۴	۶۰	-----

بعد از بررسی شرایط واقعی دیدبانی شده در ساعت ۰۰ UTC که غالب آنها احتمال وقوع یخزدگی را تایید می کند، به بررسی یخزدگی براساس خروجی های مدل های پیش بینی عددی MM5 پرداخته می شود. همان طور که پیش از این بیان شد، پارامترهای دما، رطوبت، محتوای آب مایع و چینش باد از مهم ترین شاخص های بررسی یخزدگی اند که در ادامه به آنها پرداخته می شود. نمودار سطح مقطع قائم دما، رطوبت نسبی و سرعت قائم در راستای مداری برای بررسی موردی مفروض در شکل ۵ نمایش داده شده است. این الگو به کمک خروجی های مدل منطقه ای MM5 با تفکیک ۳۰ کیلومتر ترسیم شده است. پارامترهای یاد شده برای ساعت های ۰۰ و ۰۳ UTC که نزدیک ترین ساعت به زمان رخداد یخزدگی است، رسم شده اند (شکل ۵). موقعیت تهران در شکل ۵ روی محور افقی این شکل دیده می شود. لازم به ذکر است که با توجه به ارتفاع ایستگاه مهرآباد و شرایط پستی و بلندی سطح زمین در این منطقه، خروجی های مدل پیش بینی عددی منطقه ای در محدوده تهران از تراز حدوداً ۸۰۰ هکتوپاسکال به بالا دیده می شوند. همان طور که در این شکل دیده می شود، مقادیر

عدد دما در پایین ترین ارتفاعی که در منطقه تهران مشاهده می شود، بین صفر تا منهای ۵ درجه سلسیوس برای هر دو ساعت مشاهده می شود که معرف شرایط دمایی مساعدی برای یخزدگی است. رطوبت نسبی در ساعت ۰۰ UTC حدود ۸۵٪ است که این مقدار برای ساعت ۰۳ UTC یا نزدیک ترین زمان به رخداد سانحه، به بیش از ۹۰٪ رسیده است و حرکتهای صعودی در تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰ UTC معادل $ms^{-1} 0.6$ یا $hPa/s 0.6$ (بافرض $g \cong \frac{10m}{s^2}$ و $p \cong \frac{1kg}{m^3}$) است. این مقدار با توجه به آستانه های معرفی شده برای وقوع یخزدگی (یافته های هندرسون، ۲۰۰۶ و الرود و بیلی، ۲۰۰۷) نشان وضعیت مناسبی برای احتمال ایجاد شرایط یخ بندان است. این مقادیر برای ساعت ۰۳ UTC اندکی کاهش یافته ($ms^{-1} 0.3$ یا $hPa/s 0.3$) که البته هنوز بیشتر از آستانه های معرفی شده است. از این رو به نظر می رسد که آستانه های عددی این سه شاخص برای حدس اولیه پیش بینی یخزدگی، راهنمای مناسبی باشند. از سوی دیگر نوع ابرهای دیدبانی شده و همچنین نقشه های همدیدی (شکل ۱) نیز به طور کیفی احتمال یخزدگی را تایید می کند.



(الف)

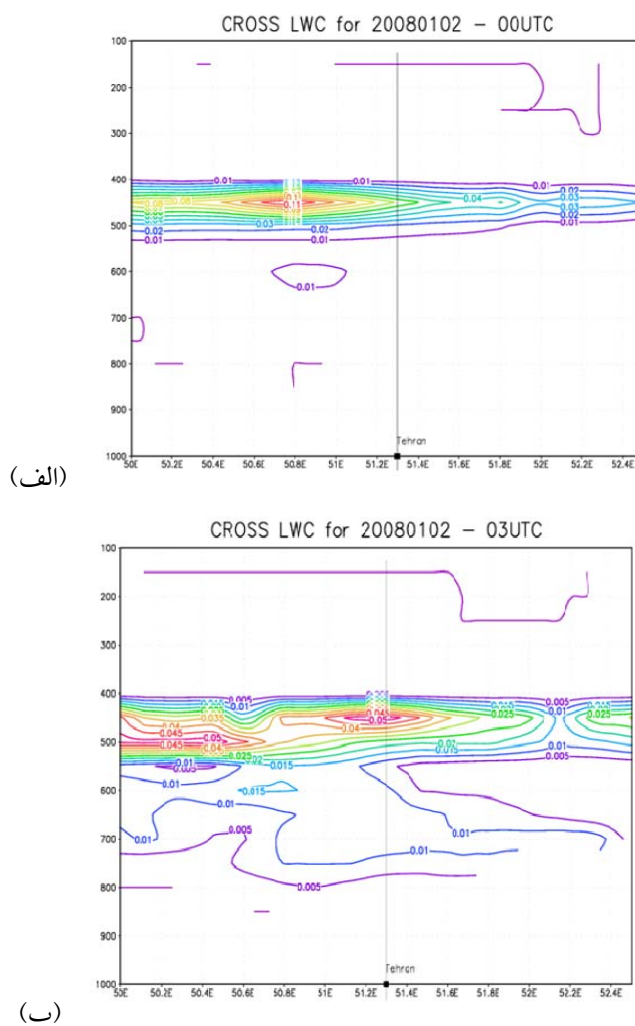


(ب)

شکل ۵. سطح مقطع قائم دما ($^{\circ}\text{C}$)، سرعت قائم (ms^{-1}) و رطوبت نسبی (%) مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۲ ساعت ۰۳ UTC. خط چینها و خطوط توپر مشکی به ترتیب معرف حرکت های نزولی و صعودی، خط چین سبز معرف دما است و محدوده های هاشور خورده رنگی میزان رطوبت را برحسب الگوی زیر شکل نشان می دهند. موقعیت تهران با خط توپر سرخ روی محور افقی دیده می شود.

حدود 0.05 g/kg برای ساعت ۰۳ UTC محاسبه شده است. با توجه به مقادیری که در مقدمه درخصوص رخداد یخزدگی در انواع گوناگون ابرها آورده شد و با در نظر گرفتن نوع ابرهای دیدبانی شده در ساعت ۰۴ UTC روز یادشده (NS و SC) که غالباً ابرهای پوشنی هستند، به نظر می رسد که مقادیر عددی این پارامتر هم خوانی خوبی با داده های عرضه شده ندارند.

آخرین شاخصی که در این تحقیق برای بررسی یخزدگی به کمک خروجی های مدل پیش بینی عددی مورد بحث قرار می گیرد، محتوای آب مایع است. مقادیر عددی پیش بینی این شاخص نیز برای ساعت های ۰۰ و ۰۳ UTC در شکل ۶ دیده می شود. بیشینه مقادیر LWC در این تحقیق در لایه ۴۰۰-۵۰۰ هکتوپاسکالی دیده می شود که در منطقه تهران حدود 0.02 g/kg برای ساعت ۰۰ UTC و



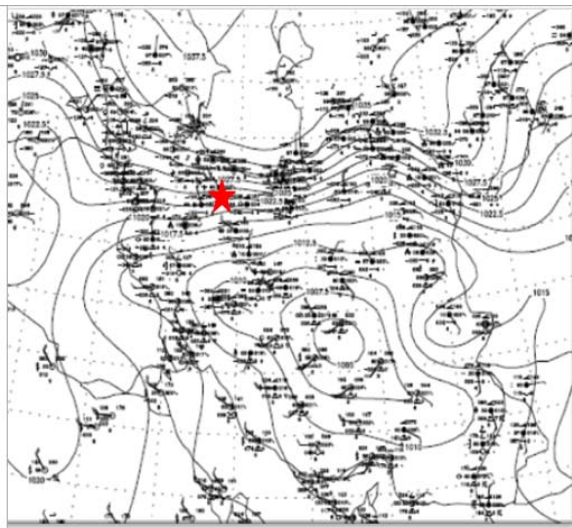
شکل ۶. سطح مقطع قائم LWC برحسب gr/kg. موقعیت تهران با خط توپر سرخ روی محور افقی دیده می‌شود.

۲-۳ پدیده مورخ ۶ ژانویه ۲۰۰۸

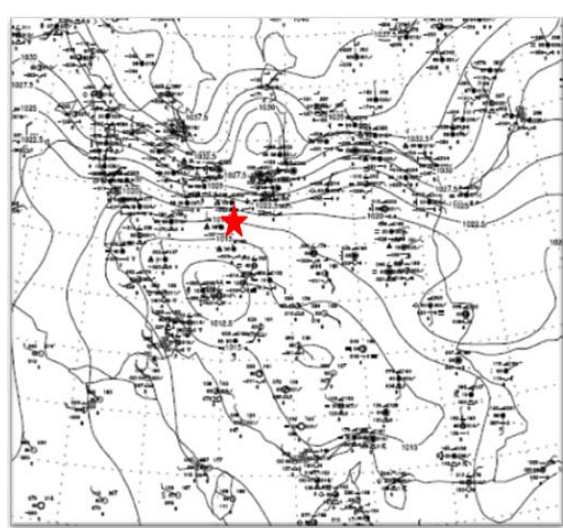
در تاریخ ۶ ژانویه ۲۰۰۸ بارش سنگین برف در تهران منجر به مختل شدن بسیاری از امور جاری و عادی روزمره از جمله نشست و برخاست هواپیماها شد. مشابه حالت قبل، ابتدا به بررسی نقشه‌های سطح زمین و سطوح بالای جو و همچنین نمودار SKEW-T و سپس به آستانه‌های عددی شاخص‌های هواشناسی پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷-الف دیده می‌شود، زبانه‌های یک سامانه پرفشار تا جنوب دریای خزر گسترده شده به‌طوری‌که سه پربند فشاری ۱۰۳۵، ۱۰۳۰ و ۱۰۲۵ هکتوپاسکال در نیمه جنوبی این دریا قرار گرفته‌اند. از

سوی دیگر سلول کم‌فشاری در نیمه جنوبی کشور ایران مستقر شده که تا حاشیه جنوبی رشته‌کوه البرز گسترده شده است. از این‌رو گرادیان فشاری قابل‌ملاحظه‌ای در حاشیه شمالی کشور شکل گرفته است. به این ترتیب شرایط مساعدی در سطح زمین برای ایجاد همگرایی جریان‌های جوی به وجود آمده است. در ساعت ۱۲UTC با تقویت کم‌فشار از سمت عرض‌های جنوبی، گرادیان فشاری در نیمه شمالی کشور، به‌ویژه حاشیه رشته‌کوه البرز شدت یافته است به گونه‌ای که چهار پربند فشاری در منطقه یاد شده دیده می‌شود اما الگوی کاملاً مداری آنها روی شکل ۷-ب به وضوح مشهود است.



(ب)

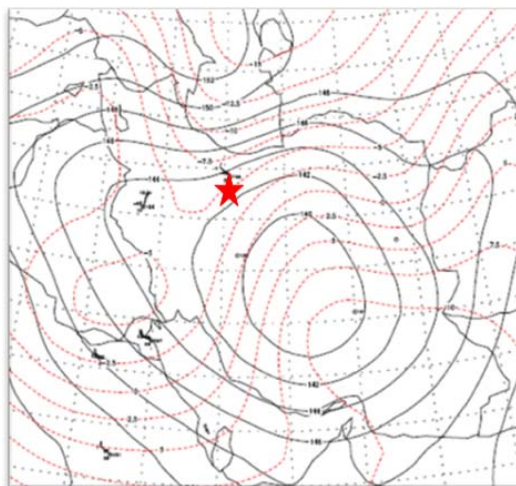


(الف)

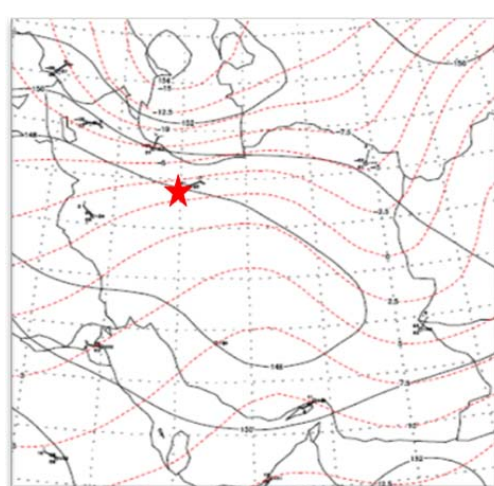
شکل ۷. نقشه‌های سطح زمین ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های الف) ۰۰ UTC و ب) ۱۲ UTC. خطوط توپو معرف هم‌مقدارهای فشار با فواصل ۵ هکتوپاسکال است. موقعیت تهران با ستاره توپو سرخ مشخص شده است.

نمایش وضعیت بالا دمای ایستگاه مهرآباد را در ساعت و در تراز یاد شده 1°C - نشان می دهد. ۱۲ ساعت بعد (شکل ۸-ب) با تقویت سلول کم‌ارتفاع در کل کشور، فرارفت هوای گرم در نواحی مرکزی و شرقی و فرارفت هوای سرد در نیمه غربی کشور دیده می‌شود. در ساعت یاد شده، جهت باد در ایستگاه مهرآباد شمال غربی شده است.

الگوهای سطوح فوقانی جو نیز در ساعت ۰۰ UTC نشان از حاکمیت شرایط مناسب جو برای وقوع ناپایداری در منطقه دارد. به گونه‌ای که در نقشه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به دنبال استقرار یک مرکز کم‌ارتفاع در نیمه شمالی و زبانه سامانه ارتفاع زیاد در روی دریای خزر شرایط مساعدی برای ایجاد فرارفت هوای گرم در دامنه‌های رشته‌کوه البرز به وجود آمده است. شکل ۸-الف ضمن



(ب)



(الف)

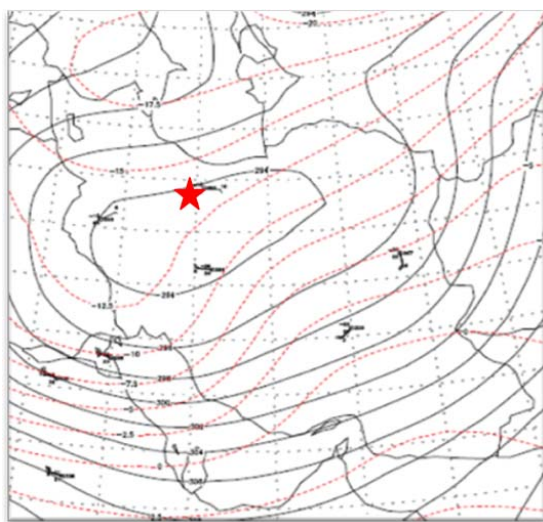
شکل ۸. نقشه‌های تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های الف) ۰۰ UTC، ب) ۱۲ UTC. خطوط توپو پربندهای ارتفاع با فواصل ۴۰ متر و خط چین‌ها پربندهای دما با فواصل ۵ درجه سلسیوس هستند. موقعیت تهران با ستاره توپو سرخ مشخص شده است.

در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز سلول کم‌ارتفاع با محور شمال شرق- جنوب غرب از روی دریاچه آرال تا غرب ایران گسترده شده است و غالب نقاط کشور از جمله البرز مرکزی و جنوبی و همچنین منطقه تهران در دامنه فعالیت آن قرار دارد. این شرایط در ساعت ۱۲ UTC با حرکت شرق‌سوی مرکز کم‌ارتفاع همراه شده است و به نظر می‌رسد که تهران در پشت جبهه سرد همراه با آن سامانه در ساعت یاد شده قرار دارد (شکل‌های ۹-الف و ب).

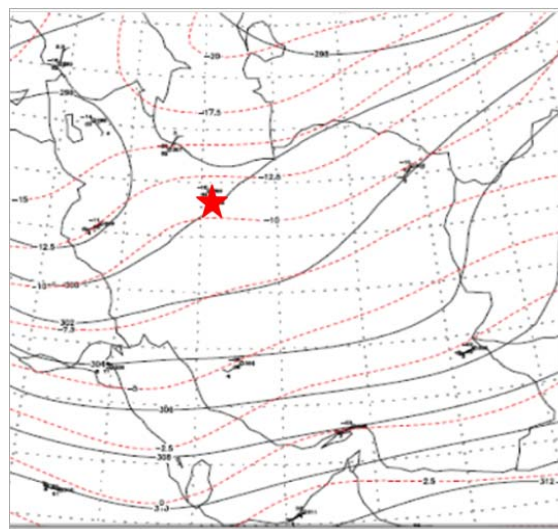
الگوهای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز مشابه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال است، با این تفاوت که در این تراز حرکت مرکز کم‌ارتفاع با سرعت کندتری صورت گرفته است، به‌طوری‌که در ساعت ۱۲ UTC منطقه تهران همچنان در جلوی ناوه این تراز قرار دارد. این وضعیت در شکل‌های ۱۰-الف و ب دیده می‌شود. همچنین سلول هوای سردی در شمال غرب کشور دیده می‌شود که با مقدار عددی منهای ۳۰ درجه سلسیوس، حکایت از ریزش هوای سرد در لایه میانی جو دارد. در الگوی

ساعت ۱۲ UTC این تراز، مرکز شمالی سامانه از نوار شمالی کشور عبور کرده است به‌طوری‌که جهت باد در تراز یاد شده در ایستگاه مهرآباد غربی است. اما نیمه جنوبی کشور همچنان تحت تأثیر فعالیت این سامانه است. با عبور ناوه تراز میانی جو از منطقه تهران و هم‌خوان با دیدبانی‌های سطح زمین، انتظار می‌رود که شدت بارش در منطقه کاهش یابد.

در نقشه تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۰۰ UTC که در شکل ۱۱-الف دیده می‌شود، مرکز کم‌ارتفاع با محور شمال شرق- جنوب غرب از روی دریاچه آرال تا شمال غرب کشور گسترده شده است. سرعت باد در همه ایستگاه‌های واقع در نیمه جنوبی کشور بیش از ۹۰ نات است. در ساعت ۱۲ UTC (شکل ۱۱-ب) با حرکت شرق‌سوی سلول کم‌ارتفاع، مرکز این سامانه کاملاً در منطقه تهران بسته شده و محور رودباد ۱۴۰ ناتی نیز روی ایستگاه کویت دیده می‌شود. جریان‌های جتی همراه با این سامانه تقریباً شمالی- جنوبی است.

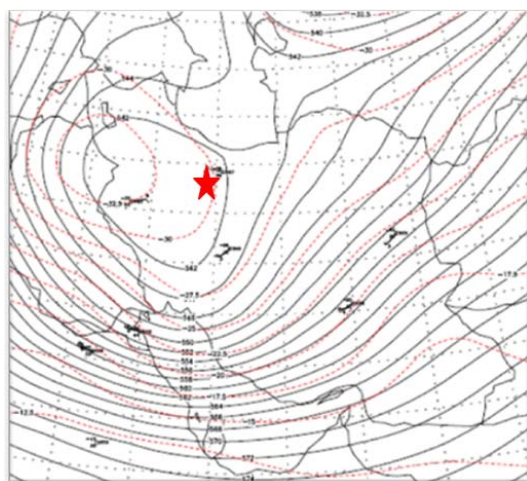


(ب)

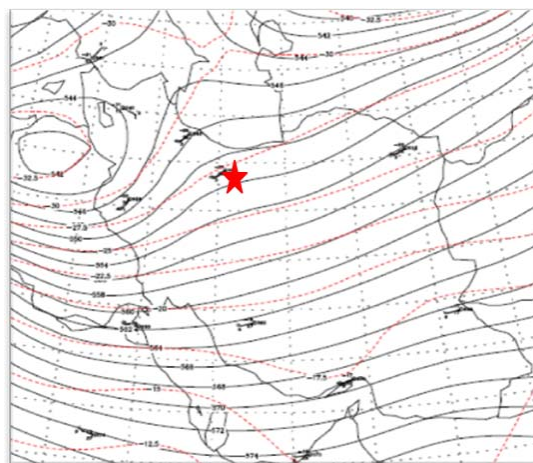


(الف)

شکل ۹. نقشه‌های تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های الف) ۰۰ UTC، ب) ۱۲ UTC. خطوط توپو، پریندهای ارتفاع با فواصل ۴۰ متر و خط‌چین‌ها پریندهای دما با فواصل ۵ درجه سلسیوس هستند. موقعیت تهران با ستاره توپو سرخ مشخص شده است.

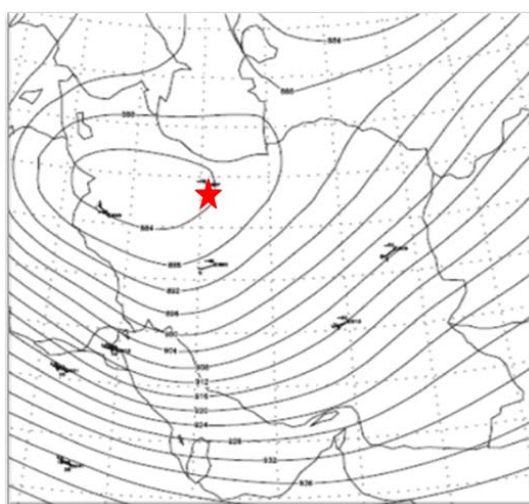


(ب)

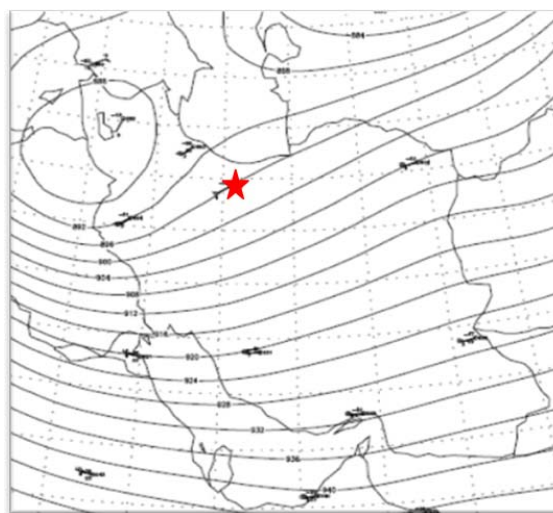


(الف)

شکل ۱۰. نقشه‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های (الف) ۰۰ UTC، (ب) ۱۲ UTC. خطوط توپوگرافیک پربندهای ارتفاع با فواصل ۴۰ متر و خطچین‌ها پربندهای دما با فواصل ۵ درجه سلسیوس هستند. موقعیت تهران با ستاره توپوگرافیک مشخص شده است.



(ب)

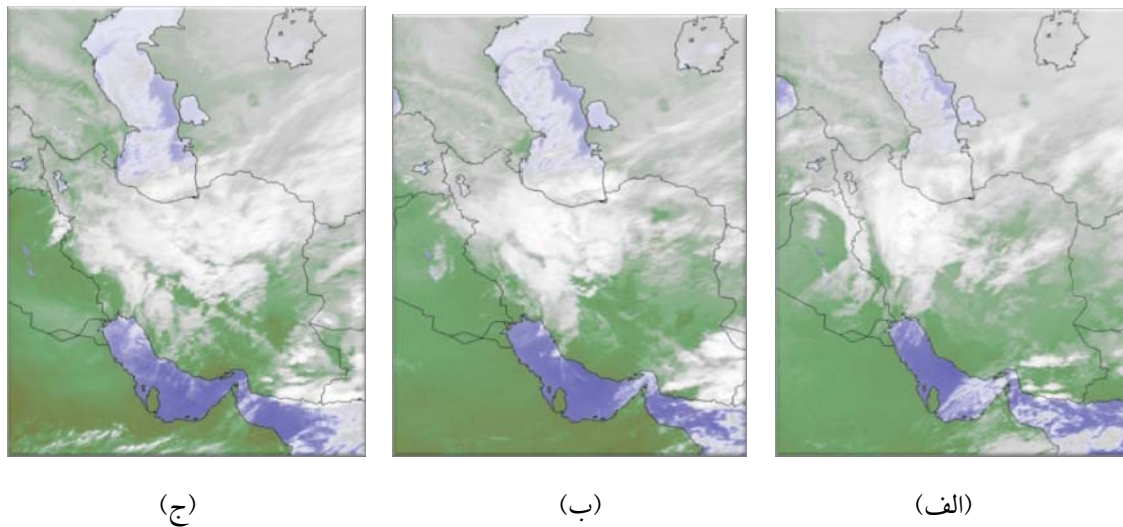


(الف)

شکل ۱۱. نقشه‌های تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران و در ساعت‌های (الف) ۰۰ UTC، (ب) ۱۲ UTC. خطوط توپوگرافیک پربندهای ارتفاع با فواصل ۸۰ متر هستند. موقعیت تهران با ستاره توپوگرافیک مشخص شده است.

تصاویر دریافتی از ماهواره‌های هواشناسی نیز در تاریخ یاد شده موید عبور یک سامانه فعال در نیمه شمالی کشور است که جبهه‌های گرم و سرد همراه با آن به وضوح در مجموعه شکل‌های ۱۲ دیده می‌شود. گزارش‌های دیدبانی در سطح زمین نیز عبور ابرهای CB، FS، SC و NS تأیید می‌کند.

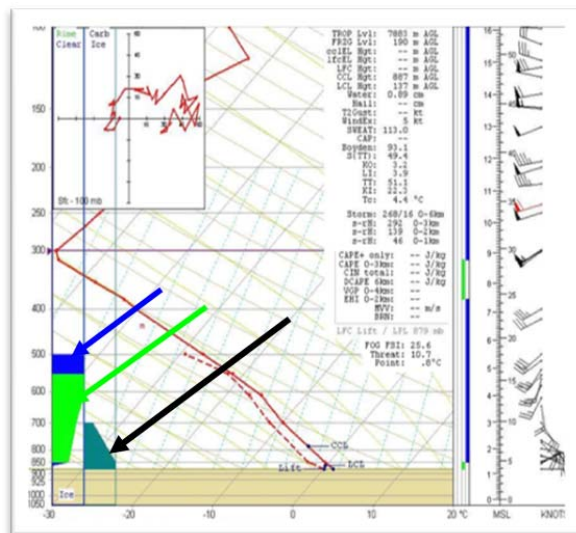
به این ترتیب محور فضایی سامانه یاد شده از سطح زمین تا سطوح بالایی جو کاملاً شمال غربی است و الگوهای جوی همدیدی همراه با این سامانه یک سامانه کژ فشار کاملاً کلاسیک را به دست می‌دهند. از این رو انتظار می‌رود که شرایط جوی با گذر این سامانه از روی کشور ایران کاملاً ناپایدار باشد.



شکل ۱۲. تصاویر دریافتی از ماهواره ۶ ژانویه ۲۰۰۸ در منطقه ایران به ترتیب در ساعت‌های الف) ۰۰، ب) ۰۶ ج) ۱۲ UTC.

هکتوپاسکال معرف رطوبت بسیار مناسبی برای ساعت ۰۰ UTC روی ایستگاه مهرآباد تهران است. همچنین دمای هوا از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به زیر صفر می‌رسد که نشان از شرایط مساعدی برای رخداد یخ‌زدگی دارد. پیش‌گرد باد از سطح زمین تا ترازهای میانی جو به خوبی در سمت راست شکل دیده می‌شود.

به منظور بررسی شاخص‌های ناپایداری در الگوهای ترمودینامیکی از نمودار Skew-T برای ساعت ۰۰ و ۱۲ UTC در این بررسی موردی استفاده شده است. این نمودارها به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود الگوی نمایه قائم دما و دمای نقطه شبنم از سطح زمین تا تراز ۵۰۰



مقادیر نوعی شاخص دربرخی ناپایداری‌ها	مقدار محاسبه شده در این تحقیق	شاخص‌های ناپایداری
LI (بین ۳- تا ۰-)	۳	احتمال رخداد رگیا ریزش‌باران
KI (بین ۲۰ تا ۱۵-)	۲۲	احتمال توفان تندری کمتر از ۲۰ درصد است
SI	۸/۹	
SWEAT (بین ۱۵۰ تا ۳۰۰-)	۱۱۳	به ندرت هوای بد رخ می‌دهد
TT (بین ۴۴ تا ۴۵-)	۵۱	رعدوبرق ملایم
CAPE	۰	بین (۰ تا ۱۰۰۰) ناپایداری کم است
CTN	۰	(کمتر از ۱۵) هوای خوب همراه با شکل‌گیری ابرهای کوم‌دای

شکل ۱۳. نمودار Skew-T برای ساعت ۰۰ UTC ۲۰۰۸/۰۱/۰۶. خط توپ و خط چین سرخ به ترتیب معرف تغییرات دما و دمای نقطه شبنم هستند. شاخص‌های یخ شفاف، یخ کدر و یخ کاربراتور به ترتیب با پیکان‌های آبی، سبز و سیاه همراه با ارتفاع رخداد آنها دیده می‌شود (شکل سمت چپ). مقادیر عددی شاخص‌های ناپایداری در بررسی موردی یادشده در نمودار سمت راست نمایش داده شده است.

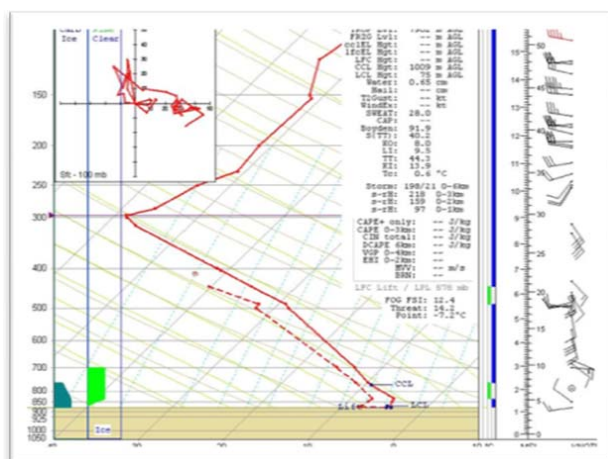
که دمای هوا حدود منهای ۰/۵ درجه سلسیوس است یخزدگی شفاف اما با شدت ضعیف را نشان می‌دهد. دمای هوا از کف پایین‌ترین لایه ابر تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بین منهای ۰/۵ تا منهای ۲۹/۳ درجه سلسیوس و میزان رطوبت نسبی بین ۹۵ تا ۸۲ درصد در نوسان است.

۱۲ ساعت بعد یعنی در ساعت ۱۲ UTC نمودار SKEW_T به صورت شکل ۱۴ است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اگرچه دمای هوا نسبت به شکل ۱۳ در کل نمودار کاهش یافته است اما «تفاضل دما و دمای نقطه شبنم» افزایش یافته است. به بیان بهتر، رطوبت در این شکل کاهش یافته است لذا انتظار می‌رود که میزان یخزدگی نیز کاهش یابد. این موضوع در حاشیه سمت چپ شکل زیر که انواع یخزدگی‌ها را نشان می‌دهد به وضوح نمایان است (پیکان‌های سبز و سیاه). در واقع یخزدگی کاربراتور در لایه ۸۵۰ تا ۷۵۰ هکتوپاسکال و یخزدگی کدر در لایه ۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود و یخزدگی از نوع شفاف عملاً وجود ندارد. شاخص‌های محاسبه شده نیز در این شکل، به‌خصوص شاخص KI حکایت از کاهش شدت ناپایداری دارد به‌طوری که مقدار آن حدود ۱۴ است. اما دیگر شاخص‌ها مقادیر قابل توجهی را نشان نمی‌دهند.

در این تحقیق نیز شاخص‌های ناپایداری از جمله LI، CAPE و CIN مقادیر قابل توجهی را در ساعت ۰۰ UTC نشان نمی‌دهند. از سوی دیگر شاخص‌های یخزدگی شامل یخزدگی ساختاری کاربراتور، یخزدگی از نوع یخ کدر و شفاف که در سمت چپ شکل نمایش داده شده‌اند نشان‌دهنده یخزدگی داخل کاربراتور از سطح زمین تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی (پیکان سیاه روی شکل ۱۳)، یخ کدر از تراز ۸۵۰ تا ۵۵۰ هکتوپاسکال (پیکان سبز روی شکل ۱۳) و یخ شفاف بین ترازهای ۵۰۰ تا ۵۵۰ هکتوپاسکال و حدود ۸۵۰ هکتوپاسکال (پیکان آبی روی شکل ۱۳) است. از این رو به‌نظر می‌رسد با توجه به شرایط مساعد برای یخزدگی در ساعت ۰۰ UTC و تقویت سامانه ناپایدار روی کشور طی ساعت‌های آینده، این شرایط در ساعت‌های بعد نیز ادامه داشته باشد. اطلاعات گمانه‌زنی شکل ۱۳ در جدول ۲ آورده شده است که نشان‌دهنده شرایط مساعد یخزدگی از سطح زمین تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. همان‌طور که در این جدول نیز دیده می‌شود پارامترهای جوئی که به‌منزله شاخص‌های یخزدگی مطرح می‌شوند، وضعیت مساعدی را برای رخداد این مخاطره جوئی نشان می‌دهند؛ به‌طوری که در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال رخداد یخ شفاف با شدت زیاد مشاهده می‌شود. این وضعیت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

جدول ۲. مقادیر عددی ارتفاع (m)، فشار (hPa)، دما (°C)، دمای نقطه شبنم (°C)، رطوبت نسبی (%) و نوع یخزدگی استخراج شده از نرم‌افزار RAOB برای ساعت ۰۰ UTC مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۶.

ارتفاع (m- AGL)	فشار (hPa)	دما (°C)	دمای شبنم (°C)	تفاضل دما و دمای نقطه شبنم (°C)	رطوبت نسبی (%)	نوع و شدت یخزدگی
	۵۰۰	-۲۷/۱	-۲۹/۳	۲/۲	۸۲	یخ شفاف شدید
۳۶۰۷	۵۵۱	-۲۱/۳	-۲۱/۹	۰/۶	۹۵	یخ کدر شدید
۲۸۲۲	۶۱۲	-۱۵/۵	-۱۷	۱/۵	۸۸	یخ کدر شدید
۱۷۹۶	۷۰۰	-۹/۹	-۱۱/۶	۱/۷	۸۷	یخ کدر متوسط
۲۶۹	۸۵۰	-۰/۵	-۲/۶	۲/۱	۸۶	یخ شفاف سبک
۰	۸۷۹	۱/۲	۰/۱	۱/۱	۹۲	



مقادیر نوعی شاخص دربرخی ناپایداری‌ها	مقدار محاسبه شده درلین تحقیق	شاخص‌های ناپایداری
(بین ۲ تا ۲۰-) احتمال رخداد رگبار برف و یاران	۳	LI
(بین ۱۵ تا ۲۰) احتمال توفان تندی کمتر از ۲۰ درصد است	۱۳/۹	KI
	۸/۹	SI
(بین ۱۵۰ تا ۳۰۰) به ندرت هوای بد رخ می‌دهد	۲۸	SWEAT
بین (۴۵ تا ۵۵) رعدوبرق ملایم	۴۴/۳	TT
بین (۱۰ تا ۱۰۰) ناپایداری کم است	۰	CAPE
(کمتر از ۱۵) هوای خوب همراه با شکل‌گیری ابرهای کومه‌ای	۰	CIN

شکل ۱۴. نمودار skew-T برای ساعت ۱۲ UTC مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۶. خط توپو و خط چین قرمز به ترتیب معرف تغییرات دما و دمای نقطه شبنم می‌باشند. شاخص‌های یخ شفاف، یخ کدر و یخ کاربراتور به ترتیب با پیکانهای آبی، سبز و سیاه همراه با ارتفاع رخداد آنها دیده می‌شود (شکل سمت چپ). مقادیر عددی شاخص‌های ناپایداری در بررسی موردی یادشده در نمودار سمت راست نمایش داده شده است.

مجموعه شکل‌های ۱۵ سطح مقطع قائم دما، رطوبت نسبی و سرعت قائم را در ساعت‌های متفاوت نشان می‌دهند. در شکل ۱۵-الف (ساعت ۰۰ UTC) لایه‌های پایین جو رطوبت زیادی دارند به‌طوری‌که در این ساعت میزان رطوبت در منطقه تهران بیش از ۹۰ درصد است. حرکت‌های صعودی نیز در این تاریخ در لایه ۸۰۰ تا تقریباً ۶۵۰ هکتوپاسکال حدود 0.09 ms^{-1} است که این نشان‌دهنده صعود مناسب جریان‌های جوی است. دما در این ساعت و در تراز ۸۰۰ میلی‌باری حدود 7°C است. در ساعت ۰۳ UTC لایه با رطوبت بیش از ۹۰٪ تا عمق تقریباً ۶۰۰ هکتوپاسکالی جو کشیده شده است و مقدار عددی سرعت قائم در محدوده 0.1 ms^{-1} تا 0.25 ms^{-1} در ترازهای ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال در نوسان است.

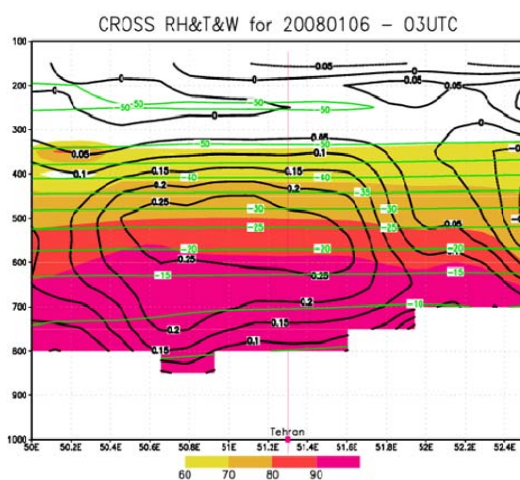
جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که در این ساعت، فقط یخ‌زدگی کدر آن هم با شدت سبک در لایه‌های نزدیک سطح زمین (۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود دما و رطوبت در لایه‌های همراه با یخ‌زدگی به‌ترتیب بین منهای ۴ تا منهای ۱۳ درجه سلسیوس و ۷۵ تا ۸۹ درصد در نوسان است. از این‌رو همه عوامل مورد بررسی بر عبور سامانه و کاهش شدت یخ‌زدگی در ساعت ۱۲ دلالت می‌کنند. در ادامه با در نظر گرفتن حرکت سامانه جوی مورد تحقیق، به بررسی و تحلیل نقشه‌های محتوای آب مایع و سطح مقطع قائم دما، رطوبت و سرعت قائم در ساعت‌های ۰۰، ۰۳، ۰۶ و ۱۲ UTC به کمک خروجی‌های مدل منطقه‌ای MM5 پرداخته می‌شود.

جدول ۳. مقادیر عددی ارتفاع (m)، فشار (hPa)، دما ($^\circ \text{C}$)، دمای نقطه شبنم ($^\circ \text{C}$)، تفاضل دما و دمای نقطه شبنم ($^\circ \text{C}$)، رطوبت نسبی (%) و نوع یخ‌زدگی استخراج شده از نرم‌افزار RAOB برای ساعت ۱۲ UTC مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۶.

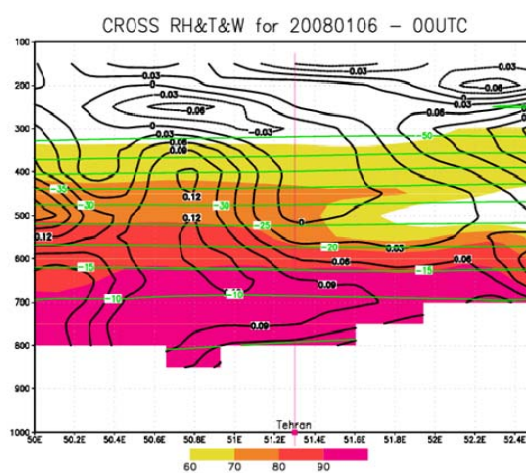
ارتفاع (m-AGL)	فشار (hPa)	دما ($^\circ \text{C}$)	دمای شبنم ($^\circ \text{C}$)	تفاضل دما و دمای نقطه شبنم ($^\circ \text{C}$)	رطوبت نسبی (%)	نوع و شدت یخ‌زدگی
۱۷۶۰	۷۰۰	-۱۳/۳	-۱۵/۴	۲/۱	۸۴	یخ کدر سبک
۱۰۹۸	۷۶۳	-۹/۵	-۱۱/۳	۱/۸	۸۹	یخ کدر سبک
۳۸۶	۸۳۶	-۴/۹	-۷/۴	۲/۵	۸۳	یخ کدر سبک
۲۵۵	۸۵۰	-۴/۷	-۷/۶	۲/۹	۸۰	رد یخ کدر
۱۸	۸۷۶	-۴/۳	-۸/۱	۳/۸	۷۵	

نیز نشان از کاهش نسبی بارش در ساعت یادشده نسبت به ساعت‌های پیشین دارد. در ادامه یعنی در ساعت ۱۲ UTC با نزدیک شدن یک سلول کم‌فشار دیگر به منطقه، به‌نظر می‌رسد که شاخص همگرایی تا حدی تقویت شده است؛ به‌گونه‌ای که دوباره رطوبت بیش از ۹۰٪ در حال حرکت به سمت شرق است (شکل ۱۶-د) اما دیدبانی‌ها حکایت از کاهش بارش در منطقه دارد.

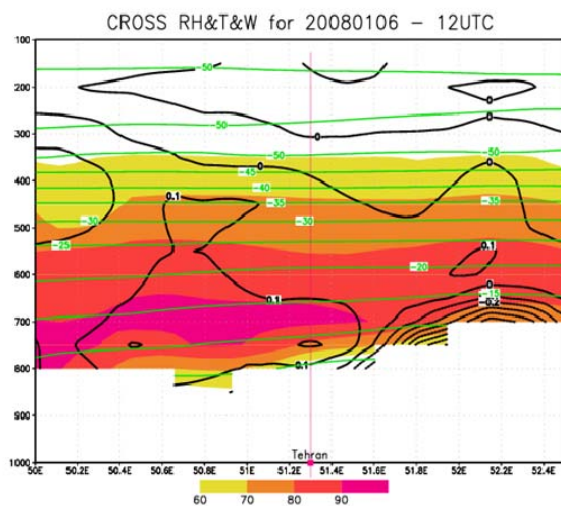
این شرایط در شکل ۱۵-ب دیده می‌شود. در ساعت ۰۶ به‌نظر می‌رسد که سامانه مورد بررسی، اندکی تضعیف شده است، به‌گونه‌ای که مقادیر عددی رطوبت نسبی به کمتر از ۹۰٪ و سرعت قائم به مقدار 1 ms^{-1} در لایه‌های ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۱۶-ج دیده می‌شود، کاهش رطوبت در کل لایه جو از تراز ۸۵۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال رخ داده است. دیدبانی‌های سطح زمین



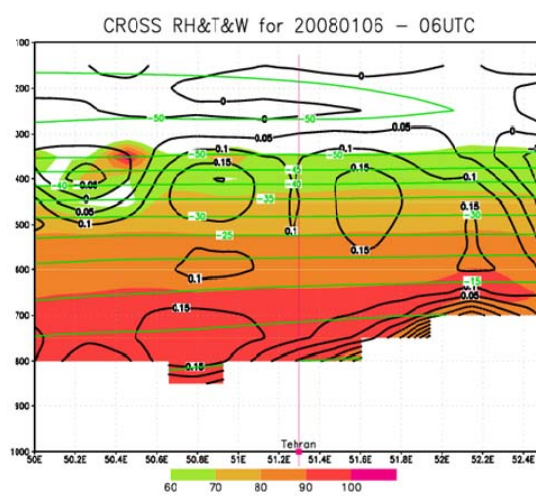
(ب)



(الف)



(د)



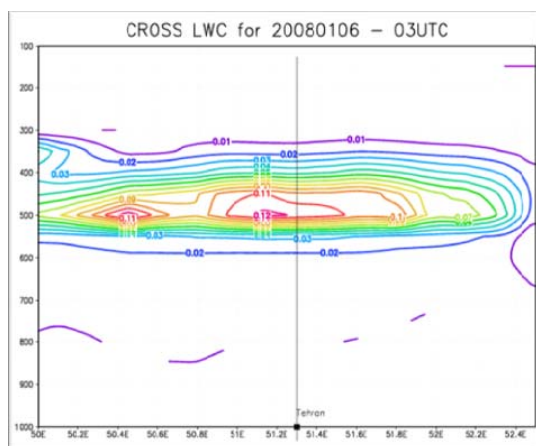
(ج)

شکل ۱۵. سطح مقطع قائم دما ($^{\circ}\text{C}$)، سرعت قائم ($10^1 \times \text{ms}^{-1}$) و رطوبت نسبی (%) مورخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۶ ساعت‌های ۰۶ و ۱۲ UTC. خط‌چین‌های سبز، سیاه و خطوط توپُر مشکی به‌ترتیب معرف دما، حرکت‌های نزولی و صعودی است. محدوده‌های هاشورخورده رنگی، میزان رطوبت را برحسب الگوی زیر شکل نشان می‌دهند. موقعیت تهران با خط توپُر سرخ روی محور افقی دیده می‌شود.

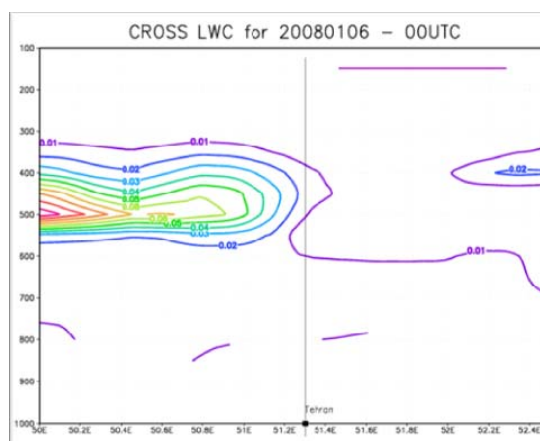
مهرآباد تهران با مقدار عددی 0.11 g/kg دیده می‌شود. در واقع در این ساعت بزرگی عددی این پارامتر یک مرتبه از ساعت‌های دیگر در منطقه موردنظر (تهران) بیشتر است. در ساعت ۰۶ میزان محتوای آب ابر حدود g/kg 0.07 گزارش شده است و در ساعت ۱۲ UTC با وجود اینکه بیشترین مقدار این پارامتر تقریباً در محدوده تهران گزارش شده است اما مقدار عددی آن به حدود g/kg 0.08 رسیده است که احتمالاً بر عبور سامانه از منطقه موردنظر دلالت دارد. لازم به یادآوری است که بیشینه مقادیر عددی این شاخص در لایه ۴۰۰-۵۰۰ هکتوپاسکال در همه ساعت‌ها مشاهده می‌شود.

از این رو به نظر می‌رسد که همگرایی در سطح زمین در این ساعت چندان قابل توجه نبوده است به طوری که مقادیر عددی سرعت قائم افزایش نیافته است (حدود 0.1 متر بر ثانیه) و روند کاهش بارش و ناپایداری در دیدبانی‌ها گزارش شده است.

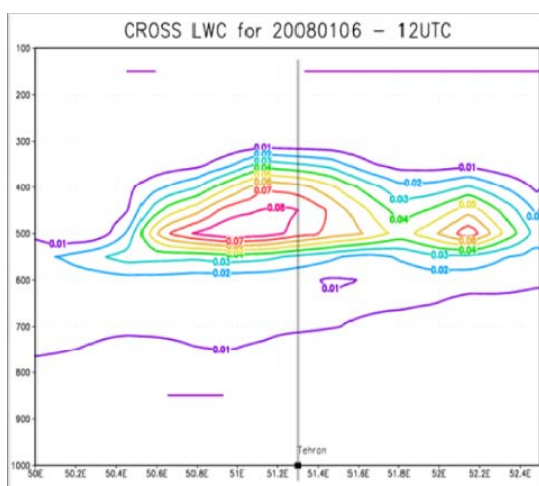
مجموعه شکل‌های ۱۶ محتوای آب مایع داخل ابر را در ساعت‌های ۰۰، ۰۳، ۰۶ و ۱۲ UTC نشان می‌دهد. با بررسی پربندها و مقادیر عددی این پارامتر در ساعت‌های یادشده مشاهده می‌شود که در ساعت ۰۰ UTC کمترین مقدار این شاخص در ایستگاه مهرآباد وجود دارد و بیشترین مقدار آن در ساعت ۰۳ UTC روی ایستگاه



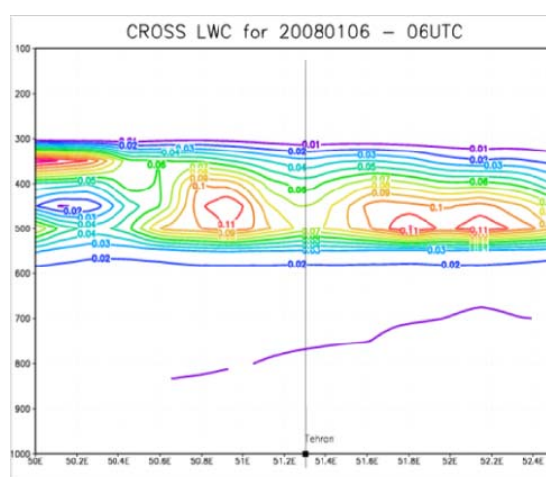
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۶. سطح مقطع قائم LWC برحسب kg/kg . موقعیت تهران با خط توپر سیاه روی محور افقی دیده می‌شود.

به بعد از روی ایستگاه مهرآباد تهران دارد.

۴ بحث

در این تحقیق به بررسی برخی از متغیرهای جو در خصوص تحقیق و پیش‌بینی یخزدگی هواپیما پرداخته شد. از مهم‌ترین این شاخص‌ها می‌توان به دمای هوا، رطوبت نسبی، محتوای آب مایع و سرعت قائم اشاره کرد.

بررسی‌ها نشان داد که اگرچه الگوهای همدیدی و بزرگ‌مقیاس جو، راهنمای مناسبی برای بررسی کمی و دقیق یخزدگی هواپیما نیستند اما به سادگی می‌توان با بررسی روند حرکت سامانه‌ها و همچنین به کمک پارامترهای دما و رطوبت ایستگاه‌ها، بر بودن یا نبودن یخزدگی تاکید کرد. البته همان‌طور که در این تحقیق نیز دیده شد، الگوهای جو در مقیاس همدیدی به تنهایی نمی‌توانند جواب‌گوی نیازهای پیش‌بینی یخزدگی باشند. همان‌طور که در مجموعه شکل‌های ۱ و ۲ دیده شد، الگوی همدیدی در بررسی موردی اول و در سطح زمین و سطوح فوقانی جو، یک سامانه کاملاً فعال جو را نمایش نمی‌دهند در صورتی که شرایط یخزدگی روی منطقه حاکم است؛ تا حدی که این یخزدگی منجر به ایجاد نقص فنی برای هواپیمای در حال پرواز می‌شود. از این رو این گونه ناپایداری‌های جو، در الگوهای غیر کلاسیک و غیر قابل انتظار بزرگ‌مقیاس نیز می‌توانند رخ دهند و گاه ممکن است عواقب غیر قابل جبرانی در پی داشته باشند.

در نمودارهای ترمودینامیکی شاخص «تفاضل دما و دمای نقطه شبنم» یکی از پارامترهای مفید در رخداد یخزدگی است. در این تحقیق نیز نشان داده شد که یخزدگی‌ها با مقادیر عددی «تفاضل دما و دمای نقطه شبنم» کمتر از 3°C رخ می‌دهند. اما شاخص‌های ناپایداری نمی‌توانند نقش موثری در بررسی رخداد یخزدگی داشته باشند. در این تحقیق دیده شد که شاخص‌های CIN، SWEAT، SI، KI، LI و CAPE در

به این ترتیب تقویت و یا تضعیف سامانه جو مورد نظر براساس الگوهای همدیدی با روند مقادیر عددی خروجی‌های مدل هم‌خوانی مناسبی را نشان می‌دهد؛ به گونه ای که در ساعت ۰۰ UTC که گرادیان فشار در سطح زمین در حال تقویت شدن است رطوبت نسبی بیش از ۹۰٪ و سرعت قائم حدود ۰/۱ متر بر ثانیه محاسبه شده است. همچنین بیشینه مقدار عددی محتوای آب مایع در منطقه تهران در داخل ابرهای موجود شامل کومه‌ای‌بارا (کومولونیمبوس)، پوشش کومه‌ای (استراتوکومولوس) و بارپوشنی (نیمواستراتوس) که براساس دیدبانی‌ها، ارتفاع آنها بین ۹۰۰ تا ۲۴۰۰ پا (۲۷۰ الی ۷۲۰ متر) گزارش شده، حدود 0.1 g/kg است. در ساعت ۰۳ UTC که رطوبت نسبی مشابه ساعت ۰۰ UTC است سرعت قائم به ۰/۲۳ متر بر ثانیه و محتوای آب مایع به حدود 0.12 g/kg افزایش یافته است. سه ساعت بعد یعنی در ساعت ۰۶ UTC با تضعیف سامانه سطح زمین شاخص‌های مورد نظر نیز کاهش یافته است به گونه‌ای که مقدار عددی رطوبت نسبی به محدوده ۸۰٪ تا ۹۰٪ می‌رسد. شاخص سرعت قائم نیز به ۰/۱۵ متر بر ثانیه کاهش یافته و محتوای آب مایع حدود 0.09 g/kg است. نوع و ارتفاع ابرهای دیدبانی شده در ساعت‌های ۰۳ و ۰۶ مشابه ساعت ۰۰ UTC است. در ساعت ۱۲ UTC اگرچه رطوبت نسبی در حال افزایش است و مقدار آن مجدداً به محدوده ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ می‌رسد اما سرعت قائم و محتوای آب مایع روند کاهشی را نشان می‌دهند به طوری که به ترتیب به مقادیر ۰/۱ متر بر ثانیه و 0.08 g/kg رسیده‌اند. ضمن اینکه مشاهدات نشان از کاهش مقدار و ارتفاع لایه ابرهای موجود در منطقه تهران دارند به طوری که ابرهای پوشنی تکه‌ای (فرکتو استراتوس)، پوشش کومه‌ای و بارپوشنی در لایه‌ای به ضخامت ۷۵۰ تا ۲۱۰۰ پایی (۲۲۵ الی ۶۳۰ متر) آسمان تهران را پوشش داده‌اند. دیدبانی‌ها نیز حکایت از عبور جبهه سرد همراه با سامانه یادشده از ساعت ۱۲ UTC

رطوبت، «تفاضل نقطه شبنم»، سرعت قائم و محتوای آب ابر پرداخته شد.

روش بررسی براساس مطالعه نقشه‌های همدیدی، نمودارهای ترمودینامیکی و خروجی مدل پیش‌بینی عددی منطقه‌ای MM5 شامل دما، رطوبت، سرعت قائم و محتوای آب مایع در دو بررسی موردی استوار است که یکی از بررسی‌های موردی به فرود اضطراری هواپیما در اثر رخداد این پدیده منجر شده است. مقادیر عددی آستانه یخ‌زدگی برای هریک از شاخص‌ها تعیین و با نتایج تحقیقات متفاوت در نقاط گوناگون دنیا مقایسه شده است.

نتایج این تحقیق روشن ساخت که از مجموع خروجی‌های بررسی شده، مدل MM5، در این دو بررسی موردی فقط مقادیر عددی محتوای آب مایع با مقادیر این شاخص در دیگر تحقیقات و آستانه‌های مورد استفاده در مراکز پیش‌بینی بزرگ دنیا هم‌خوانی ندارد. این نبود هم‌خوانی ممکن است ناشی از همخوان نبودن روش پارامتری کردن مدل پیش‌بینی عددی باشد که البته نیازمند تحقیق و بررسی موردهای بیشتری است. همچنین براساس الگوهای ترمودینامیکی جو نیز می‌توان به «تفاضل نقطه شبنم» به‌منزله پارامتر مهمی در تحلیل رخداد یا رخ ندادن یخ‌زدگی توجه کرد. اما شاخص‌های ترمودینامیکی ناپایداری جو از جمله LI، KI، CAPE و SWEAT از جمله شاخص‌هایی هستند که نمی‌توانند به پیش‌بینی دقیق‌تر این پدیده کمک چندانی کنند.

منابع

- Appleman, H., 1984, Design of a cloud-phase chart, Bull. Amer. Meteor. Soc., 35, 223-225.
Bernstein, B. C., Baker, I., Wesley, D., Smart, J., Wharton, L. and Wirshborn, J., 1992, The utility of a high resolution volunteer snow observer Proceedings, 11th Int'l Conf. on Clouds and Precip, Montreal, 17-21 August. Amer. Meteor. Soc., Boston, 991-994

حداقل در ۳ بررسی موردی یخ‌زدگی (ساعت UTC ۰۰ تاریخ ۲۰۰۸/۰۱/۰۲، ساعت UTC ۰۰ تاریخ ۰۶/۰۱/۲۰۰۸ و ساعت UTC ۱۲ تاریخ ۰۲/۰۱/۲۰۰۸)، معرف مقادیر عددی قابل‌توجهی نبوده‌اند. این امر به‌ویژه در ابرهای پوشنی که ضخامت و طبیعتاً ناپایداری کمتری دارند، بیشتر مشهود است.

اما خروجی‌های مدل منطقه‌ای کمک بزرگی برای پیش‌بینی پدیده‌هایی از این دست است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که شاخص‌های مهم دما، رطوبت، سرعت قائم و محتوای آب مایع، کمک موثری در پیش‌بینی این پدیده می‌کنند. اما در این تحقیق با بررسی شکل‌های ۵ و ۱۵ دیده شد که آستانه‌های عددی شاخص‌های دما، رطوبت و سرعت قائم مدل منطقه‌ای MM5 در بررسی‌های موردی رخداد یخ‌زدگی با آستانه‌های موجود در دیگر تحقیقات و مورد استفاده در مراکز پیش‌بینی بزرگ دنیا هماهنگ هستند. براساس این نتایج، دماهای بین منهای ۳ تا منهای ۷ درجه سلسیوس، رطوبت بیش از ۷۵٪ و سرعت قائم حداقل 0.02 ms^{-1} شرایط مناسب وقوع یخ‌زدگی است. اما مقادیر عددی خروجی محتوای آب مایع مدل منطقه‌ای MM5 در این دو بررسی موردی، چندان با رخداد یخ‌زدگی هماهنگ نبود. تحقیقات نشان می‌دهند که مقدار این شاخص در ابرهای پوشنی از مرتبه 10^{-1} و در ابرهای کومه‌ای از مرتبه ۱ است اما در تحقیق حاضر مقادیر عددی این شاخص یک مرتبه کوچک‌تر از آستانه‌های عددی رخداد یخ‌زدگی براساس LWC بود (شکل‌های ۶ و ۱۶). از این رو به تحقیقات بیشتر و بررسی حالت‌های بسیار دیگری نیاز است تا بتوان نتیجه‌گیری درستی عرضه کرد.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آستانه‌های رخداد یخ‌زدگی براساس برخی از پارامترهای هواشناسی از جمله دما،

- properties from satellites for weather and climate studies, Proc. AMS 11th Conf. Satellite Meteorology and Oceanography, Madison, WI. 15- 18 Oct, 477- 480.
- Petty, K. R. and Floyd, C. D. J., 2004, A statistical review of aviation airframe icing accidents in the U.S., Preprints, 11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteor., Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM.
- Politovich, M., 1996, Response of research aircraft to icing and evaluation of a severity index, *J. Aircraft*, **28**, 291–297.
- Sand, W. R., Cooper, W. A., Politovitch, M. K. and Veal, D. L., 1984, Icing conditions encountered by a research aircraft, *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 1427–1440.
- Tremblay, A., Glazer, A., Szyrmer, W., Isaac, G., and Zawadzki, I., 1995, Forecasting of supercooled clouds, *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2098–2113.
- World Meteorological Organization, 1954, Meteorological aspects of aircraft icing, WMO Tech. Note 3, WMO-30-TP9, Geneva, Switzerland, 18 pp.
- Brown, B. G. and Murphy, A. H., 1992, Verification of aircraft icing forecasts, The use of standard measures and meteorological covariates, Preprints, 13th Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, San Francisco, 21-23 February. Amer. Meteor. Soc., Boston, 251-252.
- Brown, B., Bullock, R., Thompson, G. and Brintjes, R., 1995, WISP94 real-time icing prediction and evaluation program (WIREP), Statistical issues and forecast verification results, Preprints, Sixth Int. Conf. on Aviation Weather Systems, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 207–212.
- Curry, J. A. and Liu, G., 1992, Assessment of aircraft icing potential using satellite data, *J. Appl. Meteor.*, **31**, 605–621.
- Ellrod, P. and Bailey, A., 2007, Assessment of Aircraft Icing Potential and Maximum Icing Altitude from Geostationary Meteorological Satellite Data, **22**, 160-174.
- Galway, J. G., 1956, The lifted index as a predictor of latent instability, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **37**, 528-529.
- George, J. J., 1960, *Weather Forecasting for Aeronautics*, Academic Press, 673 pp.
- Hamilton, T., 2004, <http://www.balloonlife.com>.
- Hansman, R. J., 1989, The influence of ice accretion physics on the forecasting of aircraft icing conditions, Preprints, Third Int. Conf. on the Aviation Weather System, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 154–158.
- Henderson, A., 2006, Thundestorms, Website: www.caem.wmo.int/moodle/login/index.
- Lebot, Christine, 2004, SIGMA: System of Icing Geographic identification in Meteorology for Aviation, 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace, Hyannis, Mass. 4-8 October 2004, American Meteorological Society (Boston).
- Lee, T. F., Clark, J. R. and Swadley, S. D., 1994, Potential applications of the SSM/ I cloud liquid water parameter to the estimation of marine aircraft icing, *Wea. Forecasting*, **9**, 173–182.
- Lester, P., 2001, *Aviation Weather*, Jeppesen Standard Inc., 456 pp.
- Modica, G. D., Johnson, D. W. and Rasmussen, R. M., 1994, Application of an explicit microphysics mesoscale model to a regional icing event, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 53–64.
- Minnis, P., Smith, W. L., Young, D. F., Nguyen, L., Rapp, A. D., Heck, P. W., Sun-Mack, S., Trepte, Q. and Chen, Y., 2001, A near real-time method for deriving cloud and radiation