

## پیش‌بینی رخداد مه به کمک برخی روش‌های تجربی (فرودگاه‌های تهران و مشهد)

سحر تاج بخش<sup>۱\*</sup>، محمد مرادی<sup>۲</sup>، مهدی رشیدزاد<sup>۳</sup> و محمدرضا محمدپور پنجاه<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه کاوش‌های جوی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه هواشناسی هوانوردی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۳. کارشناس ارشد هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۶/۳/۲۲، پذیرش نهایی: ۹۶/۸/۲)

## چکیده

مه یکی از پدیده‌های وضع هواست که در نشست و برخاست هواپیماها، به سبب کاهش دید، نقش مهمی دارد. در این مطالعه سعی شده است در دو فرودگاه مهرآباد تهران و شهید هاشمی‌نژاد مشهد، ضمن ارائه الگوهای هم‌مدیدی شرایط مه‌آلود، روشی به منظور بهبود حدس اولیه برای پیش‌بینی مه ارائه شود. با در نظر گرفتن داده‌های موجود، ۲۵ مطالعه موردی برای رخداد مه به کمک دو روش تجربی متداول (سندرس و کروداک-پرپچازر) در فرودگاه‌های یادشده بررسی و دمای نقطه مه با داده‌های واقعی و پیش‌بینی تعیین شد. الگوهای هم‌مدیدی در حالت‌های موردی معرف حضور پرفشار قوی با مقادیر حداقل ۱۰۲۰ هکتوپاسکال در نوار شمالی ایران است که با فرارفت هوای سرد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، بادهای شمالی و نم و یخه ۶ تا ۸ گرم بر کیلوگرم همراه است. ارزیابی به روش بایاس نشان داد که روش سندرس در ۷۵٪ حالات با رخداد مه در فرودگاه‌های یادشده هم‌خوانی دارد. این ارزیابی برای روش کروداک-پرپچازر به ۶۵٪ کاهش یافت. با هدف استفاده از این روش‌ها برای پیش‌بینی رخداد مه، روش‌های یادشده به کمک خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی WRF نیز مطالعه شد و ارزیابی نتایج صحت کمتری (۵۰٪) را نشان داد. از این رو به نظر می‌رسد روش تجربی سندرس برای حدس اولیه رخداد مه روش مناسبی باشد و در صورت افزایش صحت و دقت خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی برای ۱۲ ساعت آینده قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: حداقل دید فرودگاه، دمای نقطه مه، روش سندرس، مه، مدل پیش‌بینی عددی WRF.

## ۱. مقدمه

تشکیل می‌شود (سازمان هواشناسی جهانی، WMO، World Meteorological Organization، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۲). وقوع مه، به عوامل متعدد جوی بستگی دارد و در زمان و مکان‌های مختلف شرایط شکل‌گیری آن متفاوت است. مه انواع متفاوتی دارد. بسته به عامل ایجادکننده مه، طبقه‌بندی‌های گوناگونی برای رخداد این پدیده در نظر گرفته شده است. در سال ۱۹۲۸، ویلت و همکاران، یازده نوع مه را طبقه‌بندی و برای هر کدام ویژگی‌ها و شرایط جوی خاصی را لحاظ کردند. متداول‌ترین انواع مه‌ها، مه تابشی، مه فرارفتی، مه جبهه‌ای و مه -فراشیب هستند. در مه تابشی وقوع هم‌زمان سه عامل کلیدی سرمایش در لایه‌های جو نزدیک سطح زمین، رطوبت کافی و باد ملایم منجر به تولید مه می‌شود. آسمان صاف و بدون ابر به تقویت این نوع مه کمک می‌کند. در مه فرارفتی، عامل اصلی وزش بادهای بیشتر از ۶ نوات است (ون و همکاران،

مه از مهم‌ترین مخاطرات وضع هوا از دیدگاه هوانوردی است (سازمان هواپیمایی کشوری بین‌المللی، ICAO، International Civil Aviation Organization، ۲۰۱۰). این پدیده می‌تواند به کاهش دید افقی منجر شود. تأخیر یا لغو پروازها کمترین مشکلاتی است که در مواجهه با این پدیده ایجاد می‌شود (ICAO، ۲۰۱۶). سوانح هوایی زیادی در دنیا به موجب کاهش دید افقی ناشی از رخداد مه در فرودگاه‌ها رخ داده است که سانحه فرود ناموفق هواپیمای ایلوشن در فرودگاه شهید هاشمی‌نژاد مشهد در سال ۱۳۸۸ از آن جمله است. از این رو پیش‌بینی دقیق و با کیفیت مه در سلامت پرواز و روان‌سازی ترافیک هوایی نقش بسزایی دارد.

مه به شرایطی گفته می‌شود که قطره‌های آب یا بلورهای یخی موجود در هوا دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش دهند (لستر، ۲۰۰۷). در همین شرایط اگر دید به

سیستم پیش‌بینی (FSL, Forecast System Laboratory) وابسته به مرکز مدیریت جوی و اقیانوسی آمریکا اجرا می‌شود. این رابطه به صورت زیر است که در آن T معرف دما، Td، دمای نقطه شبنم و RH رطوبت نسبی است (دوران و همکاران، ۱۹۹۹).

$$Vis = 6000 \times \frac{T - T_d}{RH^{1.75}} \quad (2)$$

در مدل پیش‌بینی عددی (WRF, Weather Research and Forecasting Model) نیز یک رابطه تجربی بر اساس نسبت اختلاط در نظر گرفته می‌شود و با در نظر گرفتن توزیع بیول، دید افقی در شرایط مه‌آلود محاسبه می‌شود (کریگاتن و همکاران، ۲۰۱۴).

$$VisFog [m] = 1500 \times (105 - RH) \times (5 / Mix) \quad (3)$$

که در رابطه ۳ Vis معرف دید افقی بر حسب مایل RH رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری و Mix نسبت اختلاط در ارتفاع ۲ متری بر حسب gr/kg می‌باشند در مطالعه‌ای که توسط حجام و همکاران در سال ۱۳۹۳ انجام گرفته است، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (MLP, Multilayer Perceptron)، رخداد مه در فرودگاه ارومیه پیش‌بینی شده است. استفاده از داده و اطلاعات جو بالا نیز ابزار بسیار مناسبی برای شناخت نیمرخ قائم متغیرهای جوی به‌ویژه دما، دمای نقطه شبنم و باد برای یک ایستگاه است که می‌توانند در پیش‌بینی کوتاه‌مدت پدیده‌های جوی از جمله مه به کار گرفته شوند. روش سندرس (۱۹۵۷) یکی از روش‌های پیش‌بینی مه تابشی با استفاده از داده و اطلاعات رادیو سوند است. با وجود اینکه این روش مربوط به سال‌های بسیار دور است اما در بسیاری از مناطق دنیا از جمله اداره هواشناسی انگلستان استفاده می‌شود (WMO, ۲۰۱۲). در این روش از شاخصی به نام دمای نقطه مه استفاده می‌شود. این شاخص معرف دمایی است که در آن مه تشکیل می‌شود (سندرس، ۱۹۶۰). دمای نقطه مه بر اساس داده‌های سطح زمین و جو بالا برآورد و محاسبه می‌گردد که به

پوشنی ایجاد می‌شود که بارش مداوم باران به افزایش رطوبت در سطح زمین منجر می‌شود. در مه فراشیب نیز، شیب کوه منجر به صعود هوا می‌شود؛ هوای صعودکننده سرد و متراکم شده و مه در نزدیکی قله کوه تشکیل می‌شود. تاردیف و راسموسن در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که فرارفت دما و رطوبت هم در برخی موارد می‌تواند به تشکیل مه تابشی منجر شود. همچنین سرمایش تابشی می‌تواند در ایجاد انواع دیگر مه نقش داشته باشد. می‌یر و لالا در سال ۱۹۹۰ نشان دادند که بررسی گزارش‌های هوای مه‌آلود از بررسی روزهای مه‌آلود مناسب‌تر است؛ چراکه تعریف روز مه‌آلود در منابع مختلف متفاوت است. تاردیف و راسموسن نیز رویداد مه را به شرایطی اطلاق نمودند که رخداد مه حداقل سه ساعت با دید کمتر از ۱۶۰۰ متر ادامه داشته باشد و طی این سه ساعت، حداقل در یکی از گزارش‌ها، دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده باشد.

برای پیش‌بینی مه نیز، روش‌های متفاوتی ارائه شده است. ژاکوبز و همکاران در سال ۲۰۰۷ روش‌های پیش‌بینی مه در کشورهای مختلف اروپایی را ارائه کردند و نشان دادند که پیش‌بینی زمان وقوع و از بین رفتن مه بسیار مشکل است. پیش‌بینی به کمک مدل‌های عددی (وجویک و ولجویک، ۲۰۰۸؛ زو و همکاران، ۲۰۰۹)، روش‌های آماری (هانسن، ۲۰۰۷)، روش‌های تجربی و پیش‌بینی بسیار کوتاه‌مدت (ژاکوبز و همکاران، ۲۰۰۵) از متداول‌ترین روش‌های پیش‌بینی مه هستند. در مدل پیش‌بینی عددی (RUC, Rapid Update Cycle) از یک رابطه تجربی بر اساس رطوبت نسبی برای محاسبه دید افقی در شرایط مه‌آلود استفاده شده است (لی و چانگ، ۲۰۰۳).

$$Vis = 60 \exp \left[ -2/5 \times \frac{(RH-15)}{80} \right] \quad (1)$$

که در این رابطه Vis معرف دید افقی بر حسب کیلومتر و RH رطوبت نسبی است. رابطه دیگری مربوط به مدلی است که در آزمایشگاه

هوای مه‌آلود تعریف نموده‌اند. تاج‌بخش (۱۳۹۵) نشان داد که بر اساس داده‌های آماری بازه زمانی بیست‌ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۴)، بیشترین رخداد مه در فرودگاه مهرآباد از نوع (CBL, Cloud Base Lowering) و در فرودگاه مشهد از نوع تابشی در هوای صاف و با شرایط باد آرام می‌باشد. این مه‌ها غالباً در فصول سرد زمستان (ماه‌های ژانویه و دسامبر)، ساعت‌های UTC ۰۳ و ۰۰، در هوای آرام (باد کمتر از ۶ نات) و ابرهای پایین با ارتفاع پایه کمتر از ۳۰۰۰ پارخ می‌دهند.

در این پژوهش کوشش می‌شود با انتخاب دو روش از روش‌های بالا، به کمک داده‌های واقعی، عملکرد این روش‌ها و هم‌خوانی آن‌ها با شرایط واقعی در چند مطالعه موردی رخداد مه برای فرودگاه‌های منتخب بررسی شوند و در صورت هم‌خوانی با شرایط واقعی و تأیید نتایج این روش‌ها در منطقه مورد مطالعه، همین فرایند با استفاده از خروجی‌های یک مدل پیش‌بینی عددی انجام شود. با توجه به نتایج تاج‌بخش (۱۳۹۵) در خصوص شناسایی نوع مه فرودگاه‌های مشهد و تهران در یک دوره زمانی بیست‌ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۶)، بررسی‌های موردی پیش‌بینی مه در این پژوهش نیز از همان بازه زمانی بیست‌ساله انتخاب شده‌اند که مه فرودگاه‌های منتخب شناخته شده باشد. سپس در بند بعد، پس از معرفی شرایط جغرافیایی فرودگاه‌های منتخب (مشهد و تهران)، داده‌ها و روش‌های مورد استفاده در این مطالعه معرفی می‌شوند. بند سوم به بررسی شرایط همدیدی دو مطالعه موردی در مشهد و تهران و همچنین تحلیل نتایج روش‌های استفاده شده می‌پردازد. در بند چهارم نتایج این تحقیق ارائه می‌شود.

## ۲. داده‌ها و روش کار

فرودگاه‌های مهرآباد تهران و شهید هاشمی‌نژاد مشهد اولین و دومین فرودگاه پرتراфик کشور است (انتشارات بین‌المللی هوانوردی (AIP, Aeronautical Information Publication, ۲۰۱۷). از این رو تأخیر یا لغو پروازها، حتی برای چند ساعت، می‌تواند با مشکلات زیادی همراه

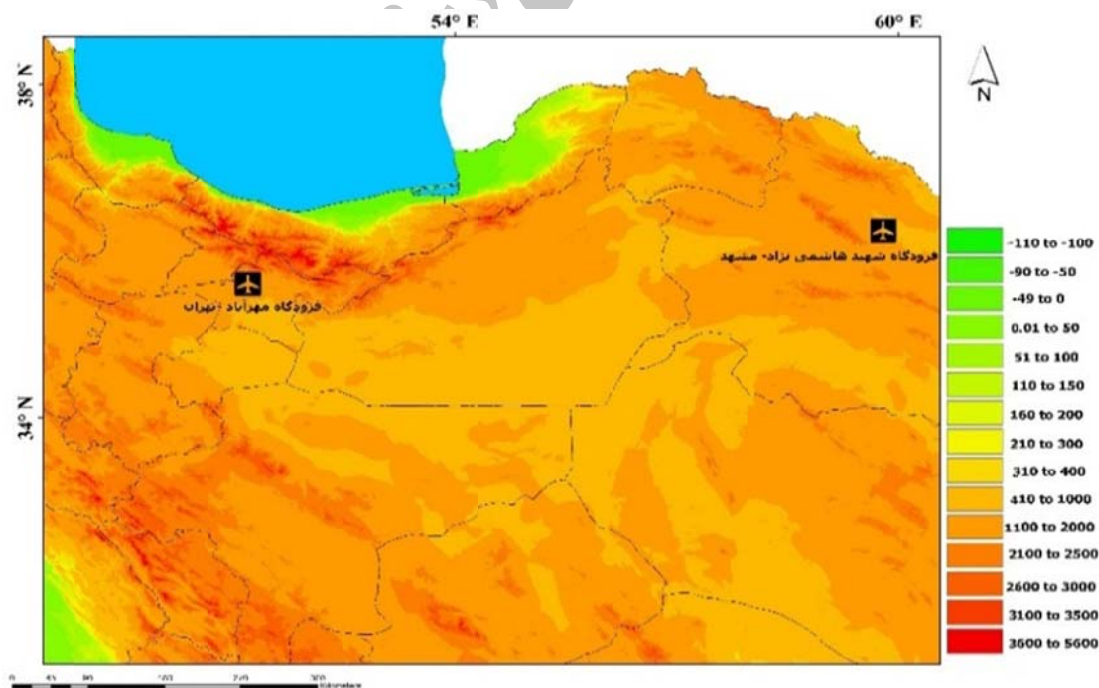
روش‌های متعددی از جمله دو روش سندرس و کروداک-پریچارد تعیین می‌شود. ژاکوبز و همکاران در سال ۲۰۰۵ روش‌های تجربی را به‌عنوان حدس اولیه در مراکز پیش‌بینی معرفی کردند. ژاکوبز و همکاران در سال ۲۰۰۷ روش‌های تجربی را به‌عنوان حدس اولیه در مراکز پیش‌بینی معرفی کردند. روش‌های تجربی نیز از سال‌های پیشین توسط پیش‌بین‌ها در مراکز معتبر و علمی دنیا به‌عنوان حدس اولیه استفاده می‌شود. برای مثال شاخص پایداری مه (FSI, Fog Stability Index) از شناخته‌شده‌ترین روش‌های پیش‌بینی مه است که با استفاده از دما و دمای نقطه شبنم در سطح زمین و تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال محاسبه می‌شود (هولتس لاگ، ۲۰۱۰).

$$FSI = 2.(T-Td) + 2.(T-T850) + W850 \quad (۴)$$

که در این رابطه T و Td به ترتیب دما و دمای نقطه شبنم در سطح زمین هستند. T850 و W850 دما و باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال هستند. این روش به کمک الگوریتم درخت تصمیم‌گیر به‌صورت عملیاتی برای فرودگاه بوداپست مجارستان استفاده شده است. کراداک و پریچارز (۱۹۵۱) نیز به کمک روش‌های رگرسیونی در محاسبات آماری رابطه‌ای بین دما، دمای نقطه شبنم و دمای نقطه مه به دست آوردند؛ البته در این روش میزان ابرناکی و سرعت باد ۱۰ متری نیز به معادله اضافه شد. هولتس لاگ (۲۰۱۰) شاخص پایداری مه را بر حسب دمای تر تراز ۸۵۰ میلی باری معرفی نمود. به علت پایداری پارامتر دمای پتانسیل تر در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ( $\theta_{w850}$ )، این کمیت، فراسنج کاربردی مناسبی برای شناسایی توده‌های هوا است که در شناسایی نوع مه کمک مؤثری است (والاس و هاب، ۲۰۰۶). شاخص تهدید مه (FT, Fog Threat) نیز بر اساس اختلاف دمای تر تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و دمای زمان وقوع مه تعریف می‌گردد. استولینگا و وارنر (۱۹۹۹) رابطه‌ای را بر اساس ضریب خاموشی و میزان محتوای آب ابر برای تعیین دید افقی در

کمتراز حد اقل دید باشد، فرود هواپیما در آن فرودگاه مجاز نیست (انتشارات بین‌المللی هوانوردی، ۲۰۱۷). بر اساس کتاب اطلاعات هوانوردی شرکت فرودگاه‌های کشور منطبق با ضمیمه ۱۵ ایکائو، در فرودگاه‌های مهرآباد و مشهد کمیته دید افقی برای عملیات نشست و برخاست هواپیما ۸۰۰ متر است (ICAO، ۲۰۱۶). مطالعات موردی به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که رخداد مه، در محدوده حد اقل دید فرودگاه (۸۰۰ متر) گزارش شده‌اند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی فرودگاه‌های مشهد و تهران را نشان می‌دهد. فرودگاه مشهد در موقعیت ۳۶ درجه شمالی و ۵۹ درجه شرقی قرار دارد و جهت باند در راستای شمال غرب-جنوب شرق (۳۱۰-۱۳۰ درجه) است. کوه‌های بینالود در غرب و شمال غرب این فرودگاه قرار دارند. فرودگاه مهرآباد تهران در موقعیت جغرافیایی ۳۵ و ۴۱ درجه شمالی و ۵۱ و ۱۹ درجه شرقی قرار دارد و راستای باند این فرودگاه نیز شمال غربی-جنوب شرقی (۲۹۰-۱۱۰ درجه) است.

شود. به همین منظور پیش‌بینی صحیح و به موقع رخداد مه می‌تواند در مدیریت پروازهای نشست و برخاستی در این فرودگاه‌ها نقش مؤثری داشته باشد. علاوه بر ترافیک پرواز، موضوع تعداد گزارش‌های هوای مه‌آلود نیز شاخص دیگری برای انتخاب فرودگاه‌های مورد مطالعه است. بررسی تاج‌بخش در ۱۳۹۵ نشان داده که در یک مطالعه بیست‌ساله (۱۹۹۷-۲۰۱۶) فرودگاه‌های کشور، فرودگاه مشهد دومین فرودگاه کشور با بالاترین آمار رخداد مه در نیمه سرد سال (ماه‌های اکتبر تا مارس) است. به این ترتیب به علت ترافیک پروازهای نشست و برخاستی (هم در فرودگاه مهرآباد و هم در فرودگاه مشهد) و هوای مه‌آلود (به‌ویژه در فرودگاه مشهد)، این دو فرودگاه به عنوان فرودگاه‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. در تمامی فرودگاه‌ها، عملیات نشست و برخاست هواپیما در دید کم، با توجه به دستگاه‌های ناوبری آن فرودگاه، بر اساس حد اقل دید فرودگاه انجام می‌گیرند و چنانچه دید افقی در یک فرودگاه به هر دلیلی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی فرودگاه‌های مهرآباد تهران و مشهد.

است که خارج از بحث این مقاله است. شاخص تهدید مه نیز عمدتاً پتانسیل رخداد مه تابشی را نشان می‌دهد که بر اساس دمای نقطه مه تعریف شده است (سمینی و همکاران، ۲۰۱۴). از این رو با محاسبه دمای نقطه مه به یکی از روش‌ها (مثلاً سندرس) می‌توان به همین شاخص نیز استناد کرد. شاخص پایداری مه نیز به‌تنهایی کاربردی نیست و برای هر فرودگاه باید بر اساس جداولی که آستانه‌های تابش، باد، رطوبت و میزان ابرناکی را تعیین می‌کند، اصلاح شود (ژاکوبز و همکاران، ۲۰۰۵). به این ترتیب از میان شاخص‌های تجربی باقیمانده موردبررسی، کروداک و پریچارز به‌عنوان دومین شاخص استفاده شده است که در ادامه به اختصار تشریح می‌شوند.

#### ۲-۱. روش سندرس

در این روش (سندرس، ۱۹۵۱)، رطوبت هوا با استفاده از دمای نقطه شبنم ( $T_d$ ) در سراسر لایه سرد بر اساس داده‌های رادیو سوند محاسبه می‌شود و تراز میعان با استفاده از دمای پیشینه و دمای نقطه شبنم در زمان دمای پیشینه تعیین می‌شود. سپس با تعیین آمیختگی مرطوب تراز میعان، دما در نقطه‌ای که خط نسبت آمیختگی مرطوب هم‌فشار سطح زمین را قطع می‌کند، قرائت می‌شود. دمای این نقطه دمای مورد انتظار برای تشکیل مه است ( $T_f$ ). این فرایند (تعیین دمای نقطه مه) برای انواع مختلف گمانه‌زنی‌ها کمی تغییر می‌کند. در نوع اول گمانه‌زنی (شکل ۲-الف)، آهنگ کاهش دمای شبنم به جز در نزدیکی سطح زمین تقریباً ثابت است. در نزدیکی زمین، دمای نقطه شبنم سمت راست فرسوی منحنی دمای نقطه شبنم سطوح فوقانی قرار دارد.  $T$  دما و  $T_d$  دمای نقطه شبنمی باشند. اگر شرایط ابر بی‌درو برقرار باشد، به جای  $T$  از  $T_c$  (دمای همرفتی) استفاده می‌شود که در آن اثرات ابر بی‌درویی حذف شود. خطوطی از نقاط  $T$  یا  $T_c$  و  $T_d$  در سطح زمین به ترتیب به موازات خطوط بی‌دروی خشک و نسبت آمیختگی روی نمودار ترسیم می‌شوند تا تراز میعان در نقطه  $A$  به دست آید.

برای بررسی شرایط مه‌آلود ابتدا در دو مطالعه موردی (یکی برای تهران و دیگری برای مشهد) الگوهای هم‌مدیدی میدان فشار در تراز متوسط دریا، میدان ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، دما، نم ویژه و باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و نیز میدان باد و نم ویژه تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال استفاده می‌شود. این داده‌ها در محدوده صفر تا ۸۰ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی از بایگانی (NCEP/NCAR, National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) استخراج شده است و گام مکانی این داده‌ها دو نیم درجه طول و عرض جغرافیایی می‌باشد. دوره زمانی بازه بیست‌ساله ۱۹۹۷-۲۰۱۶ و منطبق با محدوده زمانی شناسایی نوع مه است که بر اساس مقاله تاج‌بخش (۱۳۹۵) انتخاب شده است. شایان ذکر است که موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiim (کدهای چهار حرفی که توسط ICAO تعیین شده‌اند) مشخص شده است.

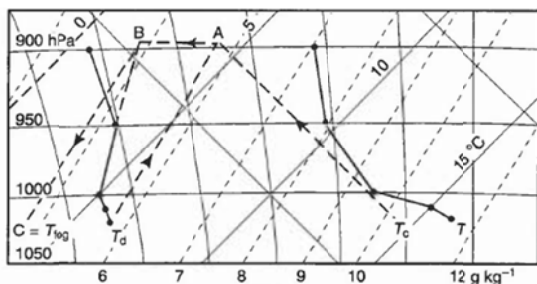
بر اساس نتایج تاج‌بخش (۱۳۹۵) که نشان داد عمده مه‌های شکل‌گرفته در فرودگاه مشهد از نوع مه تابشی است و ذکر این نکته که روش سندرس که عمدتاً برای مه تابشی جوابگو است و استفاده از آن توسط سازمان هواشناسی جهانی نیز توصیه شده است (WMO، ۲۰۰۸)، این روش، به عنوان یکی از روش‌های بررسی رخداد مه در این مطالعه انتخاب می‌شود. از میان سایر روش‌های تجربی معرفی‌شده در بالا، روش‌هایی که در مدل‌های پیش‌بینی عددی استفاده می‌شوند (روابط ۱ و ۲)، به محاسبه دید افقی در هوای مه‌آلود اشاره دارند که همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در رابطه ۱ با فرض رطوبت نسبی ۱۰۰٪ و نسبت اختلاط ۱ دید افقی مقدار ۴۵۰۰ متر را نتیجه می‌دهد، در صورتی که می‌دانیم دید افقی در هوای مه‌آلود کمتر از ۱۰۰۰ متر است. از این رو فرایندهای پس‌پردازش یا سایر تصحیحاتی که باید روی خروجی مدل‌ها انجام گیرد برای تصحیح آن‌ها ضروری

وجود می‌آید:

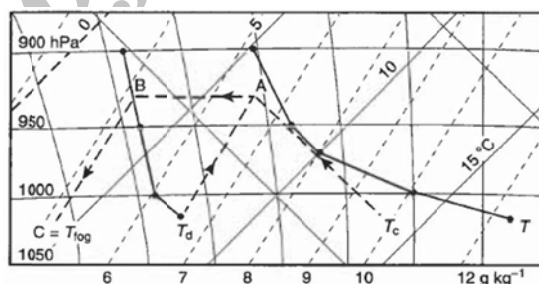
الف) اگر افت دما در پایین‌ترین لایه کمتر از آهنگ بی‌دروی خشک باشد، ساختار نوع یک برقرار می‌شود (شکل ۲-ج)؛

ب) اگر افت دما در پایین‌ترین لایه مساوی یا بزرگ‌تر از آهنگ بی‌دروی خشک باشد (وارونگی دما)، دمای نقطه مه برابر دمای نقطه شبنم در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-د). سازمان هواشناسی جهانی برای تعیین مه، مقایسه  $T_f$  را با دمای کیمبه روز بعد پیشنهاد می‌دهد، به گونه‌ای که پس از محاسبه دمای نقطه مه چنانچه مقادیر این دما بزرگ‌تر از صفر باشد رخداد مه انتظار می‌رود. مقادیر دمای نقطه مه بین ۲- تا صفر معرف وقوع دمه (مه رقیق) است و کمتر از ۲- عدم رخداد مه را نشان می‌دهد. سندرس بیان می‌کند که دمای نقطه شبنم معادل  $2^\circ\text{C}$  در ارتفاع دو متری، حدس اولیه مناسبی برای  $T_f > 2^\circ\text{C}$  است.

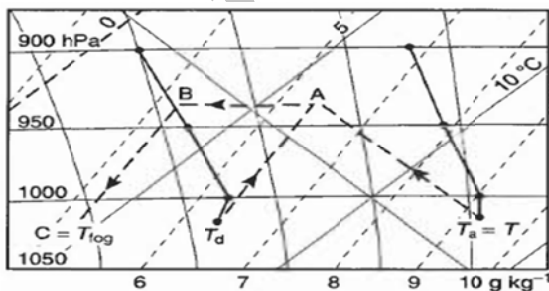
سپس از این نقطه به موازات ترازهای فشاری خطی رسم می‌شود تا نیمرخ دمای شبنم را در نقطه  $B$  قطع کند. از نقطه  $B$  به موازات نسبت اختلاط تا سطح زمین خطی به پایین تا سطح ایستگاه رسم می‌شود. دمای محل تلاقی در سطح ایستگاه ( $C$ ) دمای نقطه مه است (شکل ۲-الف). در نوع دوم (شکل ۲-ب) دمای نقطه شبنم با ارتفاع افزایش می‌یابد. در این حالت پس از تعیین تراز میعان و امتداد آن به موازات تراز فشاری، به علت خشکی هوا در لایه‌های بالاتر جو، خط موازی با هم‌فشارها نیمرخ  $T_d$  را قطع نمی‌کند. در این حالت، نقطه  $B$  را با برون‌یابی امتداد بخش پایینی منحنی نقطه شبنم به دست آورده و سپس مشابه حالت الف به موازات خطوط بی‌درو اشباع تا سطح زمین امتداد می‌یابد. (شکل ۲-ب). در نوع سوم نیمرخ دمای نقطه شبنم در نزدیک سطح زمین روند افزایشی دارد و در این حالت دو احتمال به



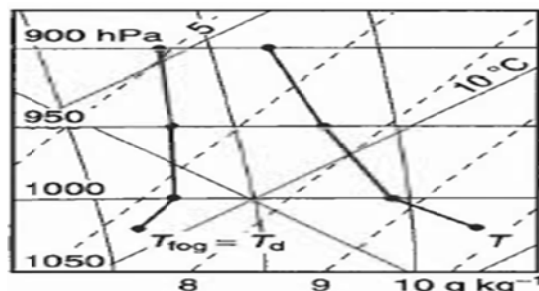
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. تخمین دمای نقطه مه به روش سندرس روی نمودار skew-t. خطوط توپر معرف نیمرخ دما و دمای نقطه شبنم هستند و خط چین‌ها چگونگی محاسبه دمای مه را نشان می‌دهند.

## ۲-۲. روش تجربی کراداک-پریچاردز

در این روش (کروداک و پریچارد، ۱۹۵۱)، دمای نقطه مه با استفاده از داده‌های دما و دمای نقطه شبنم ساعت UTC ۱۲ بر اساس رابطه رگرسیونی زیر و برای غالب مه‌ها از جمله مه تابشی محاسبه می‌شود:

$$T_f = 0.044(T_{12}) + 0.88(T_{d12}) - 0.5 + A \quad (1)$$

در این رابطه،  $T_f$  دمای نقطه مه،  $T_{12}$  دمای سطح زمین در ساعت ۱۲ UTC و  $T_{d12}$  دمای نقطه شبنم در ساعت ۱۲ UTC روز گذشته است. همان گونه که دیده می‌شود رابطه ۱ بر اساس دما و رطوبت آماده شده است و نقش ابرناکی و باد در آن دیده نمی‌شود. شاخص  $A_{luvt}$  مقادیر ثابتی است که بر اساس پیش‌بینی مقدار ابر و سرعت باد زمینگرد به شرح جدول ۱ برآورد می‌شود. ضرایب رابطه ۱ بر اساس داده‌های ۱۳ ایستگاه در کشور انگلستان برآورد شده است و می‌تواند برای سایر

ایستگاه‌ها در سایر نقاط دنیا متفاوت باشد. پس از محاسبه نقطه مه  $T_f$ ، دمای کمینه به روش کروداک که در ادامه آمده است، برآورد می‌شود. این رابطه نیز مشابه رابطه ۱ یک معادله تجربی است که از بررسی‌های ۱۶ ایستگاه شرق انگلستان به شرح زیر برآورد شده است:

$$T_{min} = 0.316T_{12} + 0.548T_{d12} - 1.24 + k \quad (2)$$

در این رابطه،  $T_f$  دمای نقطه مه،  $T_{12}$  دمای سطح زمین در ساعت ۱۲ UTC و  $T_{d12}$  دمای نقطه شبنم در ساعت ۱۲ UTC روز گذشته است. مشابه رابطه ۱، شاخص  $k$  بر حسب  $(^{\circ}C)$ ، تنظیمی است که به پیش‌بینی مقدار ابر و باد زمینگرد به شرح جدول زیر می‌باشد: بر اساس جدول ۲ تعیین می‌کند.

با در دست داشتن دمای نقطه مه و دمای کمینه، به کمک جدول ۳ رخداد دید افقی پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۱. مقدار شاخص  $A$  بر اساس مقادیر پیش‌بینی میانگین ابر و باد زمینگرد- در ساعت‌های ۱۸:۰۰، ۰۰:۰۰ و ۰۶:۰۰ UTC (دجمال، ۲۰۱۰).

| میانگین مقدار ابر (اکتان) |     |     |      | میانگین سرعت باد (نات) |
|---------------------------|-----|-----|------|------------------------|
| ۶-۸                       | ۴-۶ | ۲-۴ | ۰-۲  |                        |
| ۱/۵                       | ۱/۰ | ۰/۰ | ۰۰   | ۰-۱۲                   |
| ۰/۵                       | ۰/۵ | ۰/۰ | -۱/۵ | ۱۳-۲۵                  |

جدول ۲. مقدار شاخص  $k$  بر اساس مقادیر پیش‌بینی میانگین ابر و باد زمینگرد- در ساعت‌های ۱۸:۰۰، ۰۰:۰۰ و ۰۶:۰۰ UTC (دجمال، ۲۰۱۰).

| میانگین مقدار ابر (اکتان) |      |      |      | میانگین سرعت باد زمینگرد (نات) |
|---------------------------|------|------|------|--------------------------------|
| ۶-۸                       | ۴-۶  | ۲-۴  | ۰-۲  |                                |
| ۰                         | -۰/۶ | -۱/۷ | -۲/۲ | ۰-۱۲                           |
| ۱/۱                       | ۰/۶  | ۰    | -۱/۱ | ۱۳-۲۵                          |
| ۱/۱                       | ۰/۶  | ۰    | -۰/۶ | ۲۶-۳۸                          |
| -                         | ۲/۸  | ۱/۷  | ۱/۱  | ۳۹-۵۱                          |

جدول ۳. وقوع مه بر اساس دختلاف دمای کمینه و  $T_f$  (دجمال، ۲۰۱۰).

| $T_f - T_{min}(^{\circ}C)$ | پیش‌بینی مه                             |
|----------------------------|---|
| $\geq 1$                   | مه گسترده پیش‌بینی می‌شود               |
| $= 0/5$                    | مه در اواخر شب                          |
| $= 0$                      | مه تکه‌تکه در نزدیکی صبح                |
| $-1/5$ تا $-0/5$           | امکان شکل‌گیری مه تکه‌ای در مناطق مستعد |
| $\leq -2$                  | مه انتظار نمی‌رود                       |

احتمالی برای مقایسه پیش‌بینی‌ها به کمک خروجی‌های مدل و دیدبانی‌ها استفاده می‌شود. جدول احتمالی به صورت زیر تعریف می‌شود.

جدول ۴. جدول احتمالی ۲\*۲. بخش a معرف رخداد دیدبانی و پیش‌بینی‌شده، بخش b معرف رخداد دیدبانی و پیش‌بینی‌نشده، بخش c رخداد دیدبانی‌شده و پیش‌بینی‌نشده و بخش d معرف رخداد دیدبانی‌نشده و پیش‌بینی‌نشده هستند.

| پیش‌بینی | دیدبانی |     |
|----------|---------|-----|
|          | خیر     | بلی |
| بلی      | B       | a   |
| خیر      | D       | c   |

بخش a معرف شرایطی است که رخداد یک پدیده هم دیدبانی و هم پیش‌بینی شده‌اند (احتمال آشکارسازی یا POD) بخش b شرایطی است که پدیده دیدبانی نشده اما پیش‌بینی شده است (احتمال هشدار غلط یا FAR). در بخش c پدیده دیدبانی شده اما پیش‌بینی نشده است و بخش d نشان‌دهنده شرایطی است که رخداد پدیده نه دیدبانی و نه پیش‌بینی شده است (احتمال آشکارسازی مقادیر منفی صحیح یا POFD). برای بررسی میزان صحت پیش‌بینی‌های صحیح، نسبت پیش‌بینی‌های درست (a) به مجموع پیش‌بینی‌ها  $(\frac{a}{a+c})$  در شرایط رخداد هم بررسی می‌شود. این مقادیر بین صفر تا ۱ متغیر هستند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشند پیش‌بینی صحیح‌تر است. همچنین در حالت FAR نسبت پیش‌بینی‌های غلط به کل دیدبانی‌ها تعیین می‌شود  $(\frac{b}{a+b})$ ؛ این مقادیر نیز بین صفر تا ۱ متغیر می‌باشند و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند پیش‌بینی صحیح‌تر است (هایوارینن و همکاران، ۲۰۰۹).

در این تحقیق، همچنین، از مدل WRF نسخه ۳/۷/۱ برای شبیه‌سازی استفاده شده است (اسکاماروک و کلمپ، ۲۰۰۸).

ویژگی‌های مدل به شرح جدول ۵ است.

برای این پژوهش، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است. داده‌های جو بالا برای دو فرودگاه منتخب به منظور بررسی وقوع مه با استفاده از روش سندرس، در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که در روش سندرس داده‌های جو بالا در دو دیدبانی متوالی لازم است (ساعت ۱۲:۰۰ و ۰۰:۰۰ روز بعد)، با توجه به کمبود داده‌های ثبت‌شده جو بالا در روزهای مه‌آلود، امکان انتخاب‌های متعدد فراهم نیست. به این ترتیب تنها ۳۵ مورد گزارش با شرایط بالا به دست آمد که با در نظر گرفتن دیدبانی‌های هماهنگ در سطح زمین شامل رخداد مه با دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر، ۲۰ مورد گزارش برای فرودگاه‌های مشهد و تهران انتخاب شدند. داده‌های سطح زمین شامل دما و دمای نقطه شبنم، در گزارش‌های هوای مه‌آلود شامل کدهای همدیدی ۱۰، ۱۱، ۲۸ و ۴۱ تا ۴۹ برای حداقل سه ساعت هستند (تاریف و راسموسن، ۲۰۰۷) که برای روش کروداک و پریچارز در نظر گرفته شده‌اند. گزارش‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که دید فرودگاه در اثر رخداد مه به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده باشد تا محدوده حداقل دید فرودگاه را در برگیرد. سپس به کمک دو روش سندرس و کروداک-پریچارز دمای نقطه مه برای این دو فرودگاه محاسبه شد. به منظور شناسایی روش مناسب‌تر، از جدول احتمالی استفاده شده است. در این جدول معمولاً رخداد‌های پیش‌بینی و دیدبانی با هم مقایسه می‌شوند و میزان صحت پیش‌بینی‌ها تعیین می‌شود. در این مقاله از این جدول در دو مرحله استفاده می‌شود. ابتدا رخداد‌های دیدبانی با نتایج محاسباتی از روش‌های سندرس و کروداک-پریچارز با هم مقایسه می‌شوند و روش مناسب‌تر معرفی می‌شود. سپس به کمک خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی WRF داده‌های مورد نیاز شامل دما، فشار، دمای نقطه شبنم و ... استخراج و با استفاده از روش پیشنهادی بالا، رخداد مه پیش‌بینی می‌شود. در این مرحله نیز، دوباره، از جدول



جدول ۵. مشخصات مدل WRF که در این مقاله استفاده شده است.

| ردیف | عنوان                              | مشخصات  |
|------|------------------------------------|---|
| ۱    | تفکیک آشیانه اول                   | ۲۷ کیلومتر  |
| ۲    | تفکیک آشیانه دوم                   | ۹ کیلومتر   |
| ۳    | تفکیک افقی                         | ۱۰ دقیقه (۱۹ کیلومتر)                                 |
| ۴    | نگاشت                              | لامیرت  |
| ۵    | میکرو فیزیک ابر                    | Single-moment 3-class, 5-class (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶) |
| ۶    | طرحواره تابش طول موج امواج کوتاه   | روش دوهیا (دوهیا، ۱۹۸۹)                               |
| ۷    | طرحواره تابش امواج با طول موج بلند | روش فرایند RRTM (وایلد و همکاران، ۲۰۰۰)               |
| ۸    | مدل لایه سطحی مدل                  | مونین - اوبوکوف (اوبوکوف، ۱۹۷۱)                       |
| ۹    | مدل لایه سطح خاک                   | طرحواره نوا (چن و دوهی، ۲۰۰۱؛ اریک و همکاران، ۲۰۰۳)   |
| ۱۰   | داده‌های ورودی                     | FNL (استاندر، ۱۹۹۷)                                   |

(که تقریباً با سایر موارد برای هر فرودگاه مشابه است) پرداخته می‌شود.

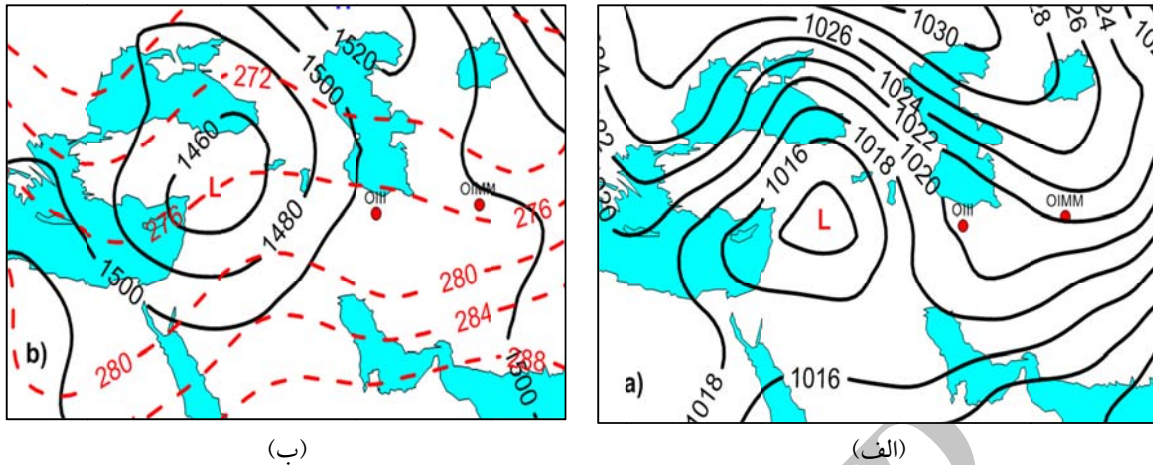
### ۳-۱. الگوی همدیدی مطالعه موردی ۲۷ نوامبر ۲۰۱۴ (رخداد مه در فرودگاه مشهد)

شکل ۳ میدان فشار سطح متوسط دریا (۳-الف) و میدان ارتفاع و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (۳-ب) را در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ ۲۷ نوامبر ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که پشته فشاری ناشی از پرفشار عرض‌های شمالی، از شمال شرقی، وارد ایران شده است و تمام مناطق کشور را، به جز نوار غربی، تحت تأثیر قرار داده است. در شرق دریای مدیترانه نیز یک کم‌فشار قرار گرفته است که نوار غربی ایران را تحت تأثیر قرار داده است (۳-الف). از بررسی میدان ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که هماهنگ با سطح متوسط دریا، پشته ارتفاع ناشی از پُرافتخا شمال دریای خزر، سراسر مناطق شمال، شمال‌شرق، شرق، جنوب شرقی، مرکز، جنوب و جنوب‌غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است و یک مرکز کم‌ارتفاع نیز که در منطقه شرق دریای مدیترانه و جنوب دریای سیاه قرار دارد، شمال‌غرب و غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است. بررسی میدان دما در این تراز نیز نشان می‌دهد که جریان‌های شمالی ناشی از پشته ارتفاع، توانایی انتقال هوای سرد عرض‌های بالا به سوی شمال‌شرق و شرق ایران را دارا می‌باشند (۳-ب).

طرحواره‌ها به صورت پیش‌فرض انتخاب شده‌اند (کین، ۲۰۰۴) و داده‌های شبیه‌سازی شده شامل دما، دمای نقطه شبنم در سطح زمین و ترازهای مورد نیاز جو بالا (برای روش سندرس) هستند. به این ترتیب پس از تعیین روش مناسب‌تر به کمک جدول احتمال، محاسبات با استفاده از خروجی‌های مدل انجام می‌پذیرد و نتایج پیش‌بینی شده نیز طبق جدول ۴ با رخداد دیدبانی شده مقایسه می‌شوند.

### ۳. بحث و نتایج

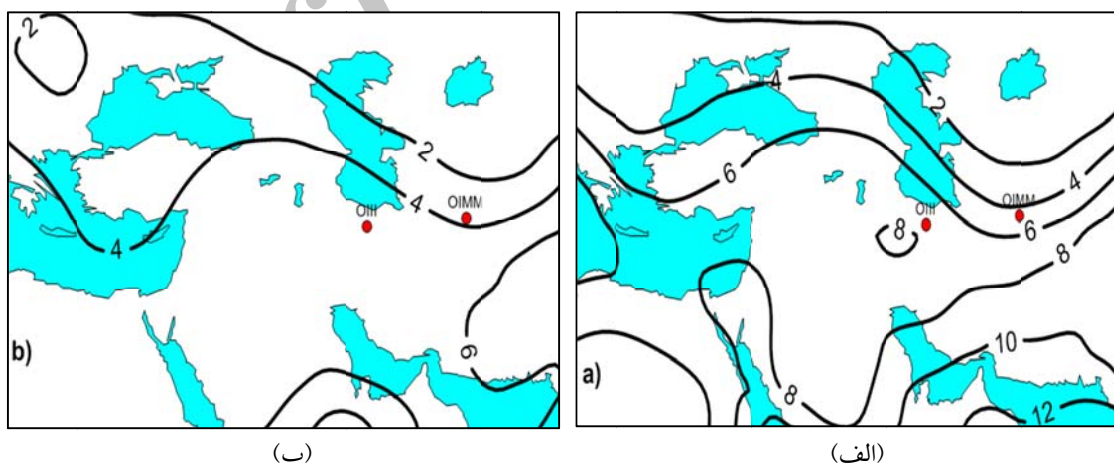
با توجه به شناسایی رخداد مه تابشی در فرودگاه مشهد و مه CLB در فرودگاه مهرآباد تهران در دوره بیست ساله ۱۹۹۷-۲۰۱۶ (تاج‌بخش، ۱۳۹۵) در این بخش ۲۰ مطالعه موردی برای فرودگاه‌های تهران و مشهد جهت بررسی صحت و دقت روابط تجربی بالا برای هوای مه‌آلود انتخاب شدند که رخداد مه در آنها با روش‌های سندرس و کروداک-پریچارد آزمون می‌شوند. همچنین ۵ مطالعه موردی برای شرایط غیر مه (هوای صاف) در نظر گرفته شده است تا احتمال وقوع پیش‌یابی اشتباه نیز شناسایی شود. پیش از بررسی شرایط ترمودینامیکی مطالعات موردی، ابتدا الگوهای همدیدی در دو مطالعه موردی برای فرودگاه‌های تهران و مشهد بررسی می‌شوند. به لحاظ مشابهت الگوهای بزرگ‌مقیاس در ۹ مورد فرودگاه مهرآباد و ۱۱ مورد فرودگاه مشهد، جهت رعایت حجم مقاله برای هر فرودگاه تنها به ارائه یک الگوی همدیدی



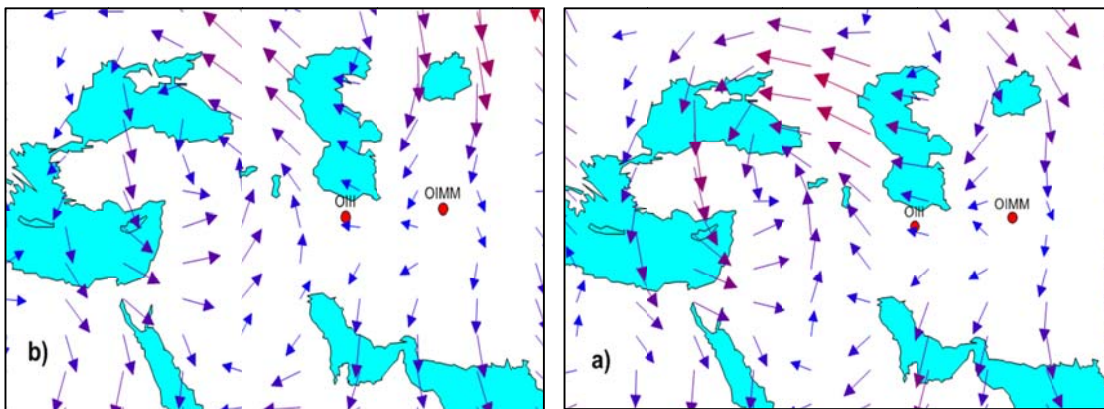
شکل ۳. الف: میدان فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال و ب: میدان ارتفاع بر حسب ژئوپتانسیل متر و دما بر حسب کلون در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۲۷-۱۱-۲۰۱۴. فاصله هم‌مقدارهای فشار ۲ هکتوپاسکال، ارتفاع ۲۰ ژئوپتانسیل متر و دما ۴ کلون است. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه هستند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiii مشخص شده است.

این رو به نظر می‌رسد که رخداد پدیده مه در مشهد در اثر کاهش دمای هوا ایجاد شده است. شکل ۵ میدان باد را در ترازهای ۱۰۰۰ (الف-۵) و ۹۲۵ (شکل ۵-ب) هکتوپاسکال را در تاریخ ذکر شده نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در هر دو تراز، بادهای شمالی از روی دریاچه بالخاش به شمال شرق ایران شارش یافته است. این شرایط نیز بیانگر ریزش هوای سرد به شمال شرق ایران است.

شکل ۴ گرتة نم ویژه ترازهای ۱۰۰۰ (شکل ۴-الف) و ۸۵۰ (شکل ۴-ب) هکتوپاسکال را در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ ۲۷ نوامبر ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. الگوی نم ویژه در هر دو تراز نشان می‌دهد که در این حالت موردی مقادیر کم نم ویژه در شمال شرق ایران و مشهد قرار گرفته است و معرف استقرار هوای سرد و خشک در این روز است. از آنجا که کاهش دما یا افزایش نم نسبی شرایط را برای حالت اشباع بخار آب فراهم می‌کند، از



شکل ۴. گرتة نم ویژه بر حسب گرم بر کیلوگرم در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۲۷-۱۱-۲۰۱۴ برای الف. تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و ب. تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. فاصله هم‌مقدارهای نم ویژه ۲ گرم بر کیلوگرم است. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه می‌باشند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiii مشخص شده است.



(ب)

(الف)

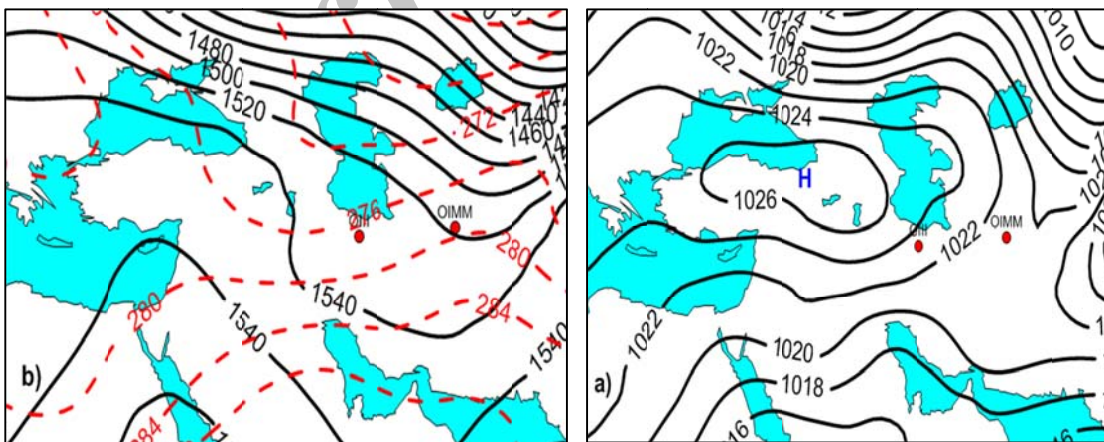
شکل ۵. میدان باد بر حسب متر بر ثانیه در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۲۷-۱۱-۲۰۱۴ برای الف: تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و ب: تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه می‌باشند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiii مشخص شده است.

از بررسی میدان ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود که هماهنگ با سطح متوسط دریا، پشته ارتفاع در روی دریای مدیترانه قرار گرفته است که تا شرق دریای مدیترانه امتداد دارد. تهران و مناطق اطراف رشته کوه البرز نیز تحت تأثیر ناوه ارتفاعی ناشی از کم ارتفاع شمال دریاچه اورال است (۶-الف). بررسی میدان دما در این تراز نیز نشان می‌دهد که گرادیان دمایی مناسب روی ایران قرار گرفته است (۶-ب).

۲-۳. الگوهای همدیدی ۰۲-۱۲-۲۰۰۰ ساعت

۰۰ UTC (رخداد مه در فرودگاه مهرآباد تهران)

شکل ۶ میدان فشار سطح متوسط دریا (۶-الف) و میدان ارتفاع و دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (۶-ب) را در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه دوم دسامبر ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که پشته فشاری ناشی از پرفشار شرق دریای مدیترانه، از شمال غرب وارد ایران شده است و تمام مناطق اطراف رشته کوه البرز را تحت تأثیر قرار داده است (۶-الف).



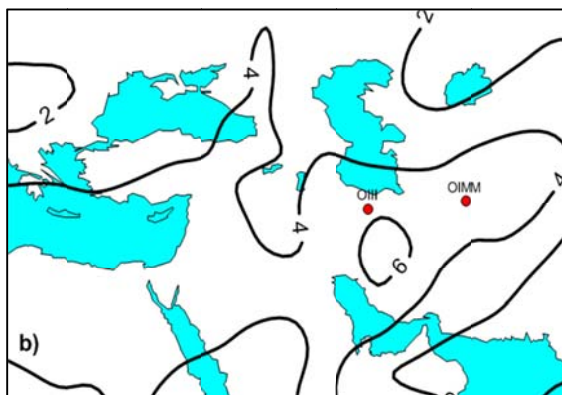
(ب)

(الف)

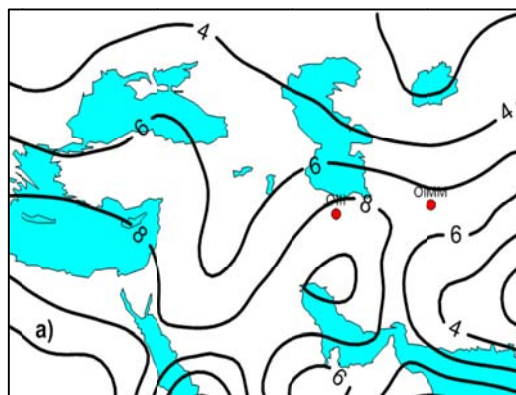
شکل ۶. الف: میدان فشار سطح متوسط دریا بر حسب هکتوپاسکال و ب: میدان ارتفاع بر حسب ژئوپتانسیل متر و دما بر حسب کلون در تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۰۲-۱۲-۲۰۰۰. فاصله هم مقدارهای فشار ۲ هکتوپاسکال، ارتفاع ۲۰ ژئوپتانسیل متر و دما ۴ کلون است. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه می‌باشند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiii مشخص شده است. حروف H و L نیز به ترتیب به پُر مقدار و کم مقدار اشاره می‌کند.

این شکل نشان می‌دهد که در هر دو تراز، بادهای شمالی از روی دریای خزر به سوی جنوب در حال وزش است. این شرایط می‌تواند رطوبت کافی را به سمت ارتفاعات البرز انتقال دهد. در صورتی که رطوبت بتواند از مناطق کم‌ارتفاع البرز عبور کرده و به دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی برسد، می‌تواند شرایط را برای ایجاد مه فراهم کند.

شکل ۷ گرتة نم ویژه ترازهای ۱۰۰۰ (۷-الف) و ۸۵۰ (۷-ب) هکتوپاسکال را در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخ دوم دسامبر ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. الگوی نم ویژه در هر دو تراز نشان می‌دهد که در این حالت موردی مقادیر نم ویژه در دامنه‌های جنوبی البرز و تهران مناسب است. شکل ۸ میدان باد را در ترازهای ۱۰۰۰ (۸-الف) و ۹۲۵ (۸-ب) هکتوپاسکال در تاریخ ذکر شده نشان می‌دهد.

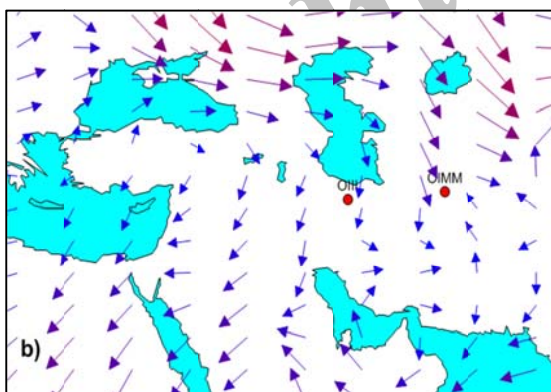


(ب)

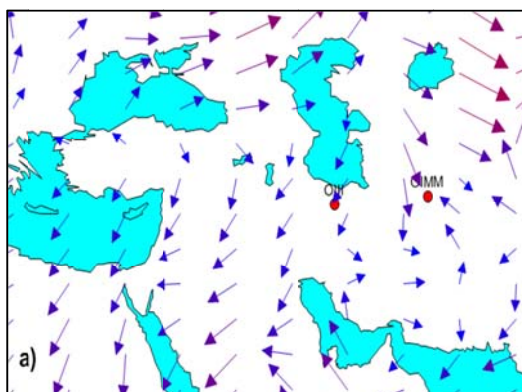


(الف)

شکل ۷. گرتة نم ویژه بر حسب گرم بر کیلوگرم در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۰۲-۱۲-۲۰۰۰ برای الف. تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و ب. تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. فاصله هم‌مقدارهای نم ویژه ۲ گرم بر کیلوگرم است. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه می‌باشند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiim مشخص شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸. میدان باد بر حسب متر بر ثانیه در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ مورخه ۰۲-۱۲-۲۰۰۰ برای الف. تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و ب. تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. محورهای مختصات، طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه هستند. موقعیت ایستگاه‌های مشهد و تهران در روی شکل به ترتیب با oimm و oiim مشخص شده است.

سپس به کمک رابطه ۲ دمای کمیته محاسبه شد و با استفاده از جدول ۳ رخداد مه تعیین شد و با دیدبانی‌ها مقایسه گردید. نتایج این مقایسه‌ها در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. جدول احتمالی مقایسه روش کروداک-پریچارز با دیدبانی.

| مقایسه به روش<br>کروداک-پریچارز | دیدبانی |     |
|---------------------------------|---------|-----|
|                                 | خیر     | بلی |
| بلی                             | ۰       | ۱۳  |
| خیر                             | ۵       | ۷   |

همان‌گونه که در این جدول نیز دیده می‌شود در روش سنדרس  $POD=13/20=0.65$  می‌باشد؛ به بیان دیگر در ۶۵ درصد حالات روش کروداک-پریچارز با واقعیت منطبق است. مقادیر FAR نیز در این روش 0.35 است. از این رو در مقایسه با روش سنדרس صحت کمتری دارد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که روش سنדרس نتایج بهتری را برای ایستگاه‌های مورد نظر نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند ناشی از ضرایب به کاررفته در معادله‌های ۱ و ۲ باشد که کروداک و پریچارز برای ۱۳ ایستگاه انگلستان استفاده کرده‌اند. این ضرایب می‌توانند برای ایستگاه‌های ایران نیز به همین روش برآورد شوند که احتمالاً می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد. با وجود این نتایج به دست آمده خیلی خلاف واقعیت نیستند و در بیش از ۶۰ درصد موارد تطابق دارند.

در مرحله سوم و پس از انتخاب روش سنדרس برای پیش‌بینی مه، از خروجی‌های دما، فشار و دمای نقطه شبنم مدل پیش‌بینی عددی WRF در سطح زمین و ترازهای فشاری ۸۵۰، ۸۰۰، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال برای تاریخ‌های قبلی استفاده می‌شود. به این ترتیب نتایج پیش‌بینی مه به روش سنדרس بر اساس خروجی‌های مدل WRF به شرح زیر در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. جدول احتمالی مقایسه پیش‌بینی مه به کمک مدل با دیدبانی.

| پیش‌بینی | دیدبانی |     |
|----------|---------|-----|
|          | خیر     | بلی |
| بلی      | ۱       | ۱۰  |
| خیر      | ۵       | ۹   |

۳-۳. ارزیابی روش‌های سنדרس، کروداک - پریچارز و خروجی مدل پیش‌بینی عددی

در بررسی‌های انجام گرفته ۱۱ گزارش جو بالا برای دیدبانی‌های فرودگاه مهرآباد و ۹ گزارش برای فرودگاه مشهد در ساعت ۱۲ UTC در نظر گرفته شد که در هر دو مورد گزارش هوای مه‌آلود با دید کمتر از ۱۰۰۰ متر در ایستگاه دیدبانی شده‌اند. همچنین ۵ گزارش بررسی شده است که در آن‌ها مه گزارش نشده است تا صحت کیفی روش‌های مورد مطالعه (روش سنדרس و روش کروداک پریچارز) بهتر تعیین شود. در واقع شاخص‌های سنדרس و کروداک برای روزهایی که هوا مه‌آلود نیست نیز محاسبه شدند تا عملکرد آن‌ها برای هوای صاف نیز مشخص شود و خانه‌های b و c جدول ۴ نیز تکمیل شوند. به این ترتیب ۲۵ گزارش برای بررسی دو روش مورد نظر انتخاب شده‌اند. به کمک این اطلاعات و با استناد روش سنדרس به شرح بند دوم، رخداد مه برآورد شده است. این مقادیر با دیدبانی‌های وقوع مه (روز بعد) مقایسه شده‌اند. نتایج این بررسی‌ها بر اساس روش bias در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. جدول احتمالی مقایسه روش سنדרس با دیدبانی.

| مقایسه به روش سنדרس | دیدبانی |     |
|---------------------|---------|-----|
|                     | خیر     | بلی |
| بلی                 | ۰       | ۱۵  |
| خیر                 | ۵       | ۵   |

همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود در روش سنדרس  $POD=15/20=0.75$  است. به بیان دیگر در ۷۵ درصد حالات روش سنדרس با واقعیت منطبق است. مقادیر FAR نیز معادل 0.25 است. از این رو به نظر می‌رسد روش سنדרس در این دو ایستگاه برای پیش‌بینی مه مناسب است.

از سوی دیگر اطلاعات دیدبانی سطح زمین شامل دما، دمای شبنم، سرعت باد و مقدار ابر برای تاریخ‌های بالا در هر دو فرودگاه مهرآباد تهران و مشهد جمع‌آوری شد و به کمک روش کروداک-پریچارز رخداد مه محاسبه شد.

به این ترتیب دیده می‌شود، برای پیش‌بینی‌های صحیح،  $POD=10/20=0.5$  که نشان از صحت ۵۰ درصدی خروجی‌های مدل است. بنابراین به نظر نمی‌رسد که به کمک خروجی‌های مدل بدون پس‌پردازش بتوان نتایج قابل‌اعتمادی به دست آورد. از این رو پیشنهاد می‌شود ضمن بررسی‌های موردی بیشتر روش‌های پس‌پردازش برای خروجی‌های مدل استفاده شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

برخی از پدیده‌های وضع هوا در مناطق مختلف جغرافیایی، می‌توانند سلامت عملیات پرواز را به‌ویژه هنگام فرود هواپیما به خطر اندازند. در بین آن‌ها، مه یکی از دلایل اصلی سوانح، لغو، تأخیر یا تغییر فرودگاه مقصد به فرودگاه جایگزین است که موجب می‌شود شرکت‌های هواپیمایی هزینه‌های بیشتری را متحمل شوند. پدیده مه در رطوبت نسبی بالا و با دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر تشکیل می‌شود. در این شرایط، فرایند تقرب و انجام عملیات فرود در مقایسه با رخدادهای پدیده‌های جوی دیگر مانند بارندگی، تگرگ، رعدوبرق و ... برای خلبان پرواز مشکل‌تراست.

الگوهای همدیدی راهکار متداولی برای بررسی هوای مه‌آلود است. از این رو در این تحقیق به بررسی موردی آن‌ها در فرودگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است. در بررسی الگوهای همدیدی دو مطالعه موردی به‌عنوان نماینده سایر مطالعات برای فرودگاه‌های منتخب در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که در سایر بررسی‌ها شرایط همدیدی کم و بیش مشابه است. در این الگوها میدان‌های فشار تراز دریا، فرارفت دما در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، نم و یژه در ترازهای ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال و سمت و سرعت باد در ترازهای ۱۰۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال بررسی شد. نتایج بررسی همدیدی نشان‌دهنده آن است که سامانه‌های پرفشار عامل مهمی در ایجاد سرمای ترازهای زیرین جو هستند. در این مطالعه بررسی میدان فشار در فرودگاه‌های منتخب مقادیر کمتر از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال را

نشان نمی‌دهد. مقادیر نم و یژه برای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بین ۶ تا ۸ گرم بر کیلوگرم و در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال بین ۴ تا ۶ گرم بر کیلوگرم است. با توجه به استقرار سامانه پرفشار، بادها غالباً شمالی یا شرقی هستند و فرارفت هوای سرد در ایستگاه‌های منتخب دیده می‌شود (فرارفت هوای سرد در شمال‌شرق ایران برای مطالعه موردی ۲۷ نوامبر ۲۰۱۴ و در منطقه تهران برای مطالعه موردی ۲ دسامبر ۲۰۰۰).

روش‌های بسیار متعددی در دنیا برای پیش‌بینی مه استفاده می‌شود. در این مقاله با کمک دو روش از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های موجود (روش‌های سندرس و پریچارز-کروداک) در ۲۵ مطالعه موردی در فرودگاه‌های شهید هاشمی‌نژاد مشهد و مهرآباد تهران کوشش شده است تا بهترین نتایج برای حدس اولیه رخداد مه ارائه شود. از این رو ابتدا میزان صحت این روابط در فرودگاه‌های مهرآباد تهران و شهید هاشمی‌نژاد مشهد با مقایسه شرایط واقعی به روش بایاس بررسی شده است بعد از آن روش مناسب‌تر انتخاب و سپس همین روش به کمک خروجی‌های مدل پیش‌بینی عددی WRF محاسبه شده است. در هر دو روش این روش‌ها از شاخصی به نام دمای نقطه مه استفاده شده است که با محاسبه این دما و مقایسه آن با دمای کمینه، وقوع مه تعیین شده است.

در روش سندرس با استفاده از داده‌های رادیو سوند ساعت UTC ۱۲۰۰، دمای نقطه مه محاسبه می‌شود. سپس این دما با دمای کمینه روز بعد مقایسه می‌شود و چنانچه اختلاف آن‌ها کوچک‌تر از  $2^{\circ}\text{C}$  باشد، رخداد مه منتفی می‌شود. سندرس این روش را عمدتاً برای مه تابشی مناسب می‌داند. در روش کروداک-پریچارز که به کمک برقراری یک ارتباط رگرسیونی بین دما و دمای نقطه شبنم انجام می‌گیرد، دمای نقطه مه تعیین می‌شود. در این روش نیز چنانچه اختلاف دمای نقطه مه و دمای کمینه از ۲- کمتر باشد، مه تشکیل نمی‌شود. اطلاعات ۲۵ مورد دیدبانی رخداد مه برای فرودگاه‌های مورد نظر در این بررسی در نظر گرفته شد که نقشه‌های ساعت

نظر گرفته شد. اکنون مقادیر دما و دمای نقطه شبنم با استفاده از مدل پیش‌بینی عددی WRF برای ۱۲ ساعت آینده تعیین شد و مجدداً از روش سنדרس برای پیش‌بینی مه (با استفاده از داده‌های پیش‌بینی‌شده) انجام گرفت. نتایج این بررسی نیز به کمک روش ارزیابی بایاس بررسی شد که چندان قابل قبول نبود، به گونه‌ای که در ۵۰٪ موارد با واقعیت تطابق داشت. از این رو به نظر می‌رسد برای استفاده از این روش‌ها به کمک خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی دقت نظر بیشتری لازم است.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور به علت در اختیار قرار دادن داده‌های گزارش مه در ایستگاه‌های سطح زمین و داده‌های جو بالا در روزهای مرتبط با بررسی‌های موردی در ایستگاه‌های فرودگاهی تهران-مهرآباد و مشهد صمیمانه تشکر و سپاس‌گزاری می‌کنند.

#### مراجع

تاج بخش، س.، ۱۳۹۵، مطالعه آماری و شناسایی نوع مه به کمک یک الگوریتم در مهمترین فرودگاه‌های کشور، بولتن پژوهش‌های اقلیم‌شناسی (در دست انتشار).

حجام، س.، برخوردار، ج. و مشکوتی الف.، ح.، ۱۳۹۳، تعیین مناسب‌ترین شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی کوتاه مدت مه در فرودگاه ارومیه، مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی تصادفات جاده‌ای، سوانح ریلی و هوایی، زنجان، ایران.

Cimini, D., Caumont, O., Löhnert, U., Alados-Arboledas, L., Bleisch, R., Huet, T., Ferrario, M. E., Madonna, F., Haefele, A., Nasir, F., Pace, G. and Posada, R., 2014, A data assimilation experiment of temperature and humidity profiles from an international 1 network of groundbased microwave radiometers, Proc. Microrad 2014, Pasadena, USA, 24-27 March, 2014.

Chen, F. and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system.

UTC ۱۲:۰۰ و UTC ۰۰:۰۰ روز بعد آن موجود باشند. از این تعداد ۹ مورد مربوط به هوای مه‌آلود در مشهد و ۱۱ مورد مربوط به تهران است. ۵ مطالعه موردی هم برای شرایط غیر مه‌آلود بررسی شد تا احتمال خطای روش‌ها در شرایط غیر مه‌آلود نیز بررسی شود. پس از محاسبه دمای نقطه مه به روش سنדרس و مقایسه آن با دیدبانی‌های واقعی، مشخص شده است که از مجموع ۲۵ مورد، در ۱۵ مورد رخداد مه دیدبانی با محاسبه به روش سنדרس همخوانی دارد. همچنین در ۵ مورد عدم رخداد مه، نتایج این روش با واقعیت تطابق داشت. بنابراین روش ارزیابی بایاس مقدار ۷۵٪ را برای احتمال آشکارسازی (PDO) نشان می‌دهد. همین فرایند عیناً برای روش کروداک-پریچارز نیز انجام گرفته است. در این روش یک رابطه خطی بین دما، دمای نقطه شبنم و دمای نقطه مبر قرار است. شرایط باد و ابرناکی نیز به صورت تجربی در قالب یک جدول ارائه شده است که برای مقادیر مختلف این دو عامل، مقدار عددی بین ۱/۵ تا ۱/۵- به دمای نقطه مه اضافه می‌شود (مقدار A در جدول ۱). با محاسبه دمای نقطه مه به روش کروداک-پریچارز و مقایسه آن با دمای کمینه بر اساس جدول ۲ رخداد مه تعیین می‌شود. در این روش نیز مشابه روش سنדרس نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی مقایسه شد. این بررسی نشان داد که در ۱۳ مورد از ۲۰ مورد رخداد مه بررسی، به درستی پاسخ گرفته شد و ۵ مورد عدم رخداد مه نیز با واقعیت تطابق داشت. بنابراین شاخص POD به ۶۵٪ کاهش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده در بالا، روش سنדרس روش مناسب‌تری برای حدس اولیه پیش‌بینی مه در فرودگاه مورد مطالعه در

Part I: Model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review 129 (4), 569-585.

Cradock, J. M. and Prichards, D. L., 1951, forecasting the formation of radiation fog — a preliminary approach. Meteorological Research Paper No. 624. Meteorological Office (unpublished).

Dejmal, K. and Repal, V., 2010, Implementation of methods for the radiation fog prediction, International Journal of Energy and environment, 4, 79-88.

Doran, J. A., Rohr, P. J., Beberwyk, D. J., Brooks,

- G. R., Gayno, G. A., Williams, R. T., Lewis, J. M. and Lefevre, R. J., 1999, TheMM5at the AF Weather Agency—New products to support military operations. Preprints, Eighth Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 115–119.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
- Erik, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G. and Tarpley, J. D., 2003, Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research atmosphere*, 108, (22), 8851.
- Glenn Creighton, G., Kuchera, E., Adams-Selin, R., McCormick, J., Rentschler, S. and Wickard, B., 2014, AFWA Diagnostics in WRF, U.S.A.
- Hansen, B., 2007, a Fuzzy Logic–Based Analog Forecasting System for Ceiling and Visibility, *Weather and Forecasting*, 22, 1319–1330.
- Hong, S. Y., Dudhia, J. and Chen, S. H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
- Hong, S., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* 134 (9), 2318–2341.
- Holtzlag, M. C., Steeneveld, G. J. and Holtzlag A. M., 2010, Fog forecasting: “old fashioned” semi-empirical methods from radio sounding observations versus “modern” numerical models, 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew Münster, Germany, 25–30 July 2010.
- Hyvarinen, O., Erola, K., Siljamo, N. and Koskenin, J., 2009, Comparison of Snow Cover from Satellite and Numerical Weather Prediction Models in the Northern Hemisphere and Northern Europe, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 1199–1216.
- ICAO, 2010, Technical specifications related to meteorological observations and reports: Annex 3 International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada.
- International Civil Aviation Organization, 2016, Aeronautical information services: Annex 15, ICAO publication, Montreal, Canada.
- Iran airports and air navigation companies, 2017, Aeronautical Information publications (AIP).
- Jacobs, W., Nietosvaara, V., Michaelides, S. and Gmoser, H., 2005, COST Action 722, Meteorology and Short-range forecasting methods of fog, visibility and low clouds. Official European Communities in Luxembourg, p 270.
- Jacobs, W., Nietosvaara, V., Bott, A., Bendix, J., Cermak, J. and Michaelides, I., 2007, COST Action 722, Earth System Science and Environmental Management, Final report on Short Range Forecasting Methods of Fog, Visibility and Low Clouds. Available from COST- 722, European Science Foundation, p 500
- Kain, J. S., 2004, The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- Lee, H. Y. and Chang, D.-E., 2003, A numerical experiment of fog in Yongdong Province and the northeast air current, *Atmosphere Res.*, 13(3), 108–109.
- Lester, J. F., 2007, Aviation weather, Jepson Pub. U.S.A.
- Meyer, M. B. and Lala, G. G., 1990, Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York. *J. Climate*, 3, 577–586.
- Obukhov, A. M., 1971, Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature. *Boundary-Layer Meteorology* 2 (1), 7–29.
- Saunders, W. E., 1951, A method of forecasting the temperature of fog formation. *Meteorological Mag.*, 79, 213–219.
- Saunders, W. E., 1957, Variation of visibility in fog at Exeter airport and the time of fog dispersal. *Meteorol Mag*, 86, 362–368.
- Saunders, W. E., 1960, The clearance of water fog following the arrival of a cloud sheet during the night *Meteorol Mag*, 89, 8–10.
- Skamarock, W. C. and Klemp, J. B., 2008, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comp. Phys.* 227 (7), 3465–3485.
- Stoelinga, M. T. and Warner, T. T., 1999, Nonhydrostatic, Mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. *J. Appl. Meteor.*, 38, 385–404.
- Stunder, B. J. B., 1997, NCEP Model Output – FNL ARCHIVE DATA, TD.
- Tardif, R. and Rasmussen, R. M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 46, 1141–1168.
- Van Schalkwyk, L. and DYSON, L. L., 2013, Climatological Characteristics of Fog at Cape Town International Airport. *J. Appl. Meteor. Climatol.* vol28, pp 631–646.



- Viojovic, D. and Veljovic, K., 2008, Fog Analysis in Belgrade International Airport, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, P. 1.
- Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., 2006, The Boundary Layer .Atmospheric Science, Second Edition: An Introductory Survey , Elsevier Inc., 375-412.
- Wild, O., Zhu, X. and Prather, M. J., 2000, Fast-J: Accurate simulation of in-and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models. Journal of Atmospheric Chemistry 37 (3), 245-282.
- Willet, H. C., 1928, Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting. Mon. Wea. Rev., 56, 435-468.
- World Meteorological Organization, No. 728. 2008, Aerodrome Reports and Forecasts: A Users' Handbook to the Codes, WMO publication. Geneva, Switzerland
- World Meteorological Organization, No. 306, 2014, Manual on Codes, International Codes, Volume I, Part A – Alphanumeric Codes , WMO publication. Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization, No. 407, 2012, Manual on the observation of clouds and other meteors. , WMO publication. Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization, , 2012, Mist and Fog Forecasting Techniques, HYPERLINK  
"http://www.caem.wmo.int/\_pdf/low\_cloud\_visibility/lowcloudvis\_04\_mist\_fog.pdf " [www.caem.wmo.int/\\_pdf/low\\_cloud\\_visibility/lowcloudvis\\_04\\_mist\\_fog.pdf](http://www.caem.wmo.int/_pdf/low_cloud_visibility/lowcloudvis_04_mist_fog.pdf) ,.WMO publication. Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization, 2016, Saunders fog point technique, [http://www.caem.wmo.int/\\_pdf/](http://www.caem.wmo.int/_pdf/), WMO publication. Geneva, Switzerland
- Zhou, B., Du, J., McQueen, J. and Dimego, G., 2009, Ensemble forecast of ceiling, visibility, and fog with NCEP Short-Range Ensemble Forecast system (SREF). Preprints, Aviation, Range, and Aerospace Meteorology Special Symp. On Weather-Air Traffic Management Integration, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 4.5

Archive of SID

## Forecasting fog using some experimental methods (Tehran and Mashhad airports)

Tajbakhsh, S.<sup>1\*</sup>, Moradi, M.<sup>2</sup>, Rashidzad, M.<sup>3</sup> and Mohammadpur Panja, M. R.<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Atmospheric Survey Research Group, Atmospheric Science and Meteorological Research Center(ASMERC), Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Aeronautical Meteorology Group, Atmospheric Science and Meteorological Research Center(ASMERC), Tehran, Iran

3. M.Sc. in Meteorology, Atmospheric Science and Meteorological Research Center(ASMERC), Tehran, Iran

(Received: 12 Jun 2017, Accepted: 24 Oct 2017)

### Summary

Fog is among the most important weather hazards from the aviation perspective. This phenomenon can substantially lead to horizontal visibility reduction. Therefore, accurate prediction is essential for flight safety and easing air traffic. Fog consists of a weather condition in which water drops and ice crystals reduce the horizontal visibility to less than 1000 meters. Various methods are suggested for fog forecasting. Numerical and statistical methods, experimental approaches, and very short range fog forecasting are some of the most common methods. Experimental methods are commonly used for first guess in forecasting centers. Saunders technique is one of the forecasting methods for radiation fogs using radio sounds data. Although this technique goes back to many years ago, it is being used in many parts of the world, including UK Met Office, and is recommended by World Meteorological Organization.

Present study tries to evaluate the performance of two experimental methods using real data after studying synoptic condition of fog occurrence in two selected airports. The validity of them is then measured with the real occurrence in a number of case studies of fog occurrence for the selected airports using the bias technique in order to choose the more appropriate method. In the next step, the more appropriate method is administered using the numerical prediction model output and is again evaluated with the bias technique. In both these methods, an index called fog point temperature has been used, and the fog occurrence has been determined by calculating this temperature and comparing it with the minimum temperature. The selected airports are Mehrabad Airport, Tehran and Shahid Hasheminezhad Airport, Mashhad, which have been chosen because of high flight traffic (in Tehran) and high fog occurrence (in Mashhad). Experimental methods examined in this study are Saunders and Prichars-Crodack techniques, which 25 case studies in selected Airports tried to offer the best results for first guess of fog occurrence. The accuracy of these relations was evaluated comparing real conditions using Bias technique. After choosing the more appropriate method, a similar process has been carried out using numerical prediction model of WRF for the next 12 hours.

Results of synoptic evaluations show that high-pressure systems are a major factor in creating coldness in lower levels of the atmosphere. Evaluation of pressure field in this study doesn't show figures below 1020 hPa. Specific humidity values were 6-8 g/kg and 4-6 g/kg for 1000 and 925 hPa levels respectively. Winds are frequently northern or eastern and cold weather advection is seen in selected stations.

In Saunders technique, using radio sound data of 1200 UTC in 25 case studies for mentioned airports, the fog point is calculated. This temperature is then compared with next day's minimum temperature and if the difference is less than  $-2^{\circ}\text{C}$ , fog occurrence would be ruled out. Saunders considers this method mostly useful for radiation fog. In Crodack-Prichars technique, which is performed by creating a regression association between temperature and dew point temperature, the fog point temperature is determined. Here again, fog is not formed if the temperature difference is less than  $-2^{\circ}\text{C}$ .

After calculating fog point temperature using Saunders technique and comparing it with actual observation, it was found that among 25 cases, 15 fog observations were consistent with Saunders technique calculations. In the five cases of fog nonoccurrence, the results of this method were consistent with reality. So, Bias evaluation technique shows 75% for probability of detection.

The same process has been carried out for Crodack-Prichars technique. In this method, a linear relationship exists between temperature, dew point temperature, and fog point temperature. Wind condition and cloudiness are also presented experimentally in the form of a table. For different amounts of these two factors, a numerical amount of 1.5 to -1.5 is added to the fog point temperature. Fog occurrence is determined by calculating fog point temperature using Crodack-Prichars technique and comparing it with the minimum temperature according to table 2. This evaluation showed that in 13 of 20 fog occurrence cases, the right answer were obtained, and 5 cases of fog nonoccurrence, were consistent with reality. Therefore, POD index was reduced to 65%. Based on the results, Saunders technique has been considered as the more appropriate method for initial guessing in fog forecasting in the airports under study. Now, the values of temperature and dew point temperature were determined for the next 12 hours using WRF numerical prediction model, and Saunders technique was used again for predicting fog (using predicted data). The results of this evaluation were also investigated using Bias evaluation technique, which were not so agreeable, so that it was consistent with reality in 50% of cases. Hence, it seems that careful consideration of numerical prediction models output is needed.

**Keywords:** fog, Sanders Method, fog point, WRF numerical weather prediction.

\* Corresponding author:

sahartajbakhsh@gmail.com