

## بررسی اقلیمی مه در فرودگاه مشهد

راضیه پهلوان<sup>۱</sup>، محمد مرادی<sup>۲\*</sup>، سحر تاجبخش<sup>۳</sup>، مجید آزادی<sup>۴</sup>، مهدی رهنما<sup>۵</sup>

۱- کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

۲ و ۴- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳ و ۵- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

### چکیده

کاهش دید ناشی از رخدادهای مه می‌تواند بر ترافیک هوایی تأثیر بگذارد و در برخی موارد علت اصلی سوانح هوایی است. مه وضعیتی است که در آن قطرات آب یا بلورهای یخ در لایه هوای نزدیک سطح زمین، دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش می‌دهند. پدیده مه در فرودگاه مشهد به طور مکرر باعث تأخیر یا لغو پروازها شده است. بنابراین بررسی اقلیمی رخدادهای مه در این فرودگاه به شناخت بهتر این پدیده و بهبود پیش‌بینی آن کمک می‌کند. برای این منظور انواع رخدادهای مه با استفاده از داده‌های دیدیابی ساعتی متناوبی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ و بر اساس الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) شناسایی شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده، رایج‌ترین نوع مه در طول دوره مطالعه در این فرودگاه مه CBL بود. در بررسی غلظت مه مشاهده شد که در طول دوره مورد مطالعه، کمینه دید افقی مربوط به مه تابشی و CBL بود. همچنین مه بارشی دارای بیشترین کمینه دید و در نتیجه کم‌ترین غلظت بود. همچنین در همه ماه‌های سال، فراوانی رخدادهای مه شبه غلیظ با کمینه دید ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر بیشتر از انواع دیگر مه بود و رخدادهای مه با کمینه دید ۱۰۰ متر دارای بیشترین فراوانی در بین کمینه دیدهای ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر بودند. با توجه به این‌که مه غلیظ نشست و برخاست هواپیما را دچار مشکل می‌کند، اهمیت رخدادهای مه در این فرودگاه از نظر ترافیک هوایی مشخص می‌شود. در طول سال‌های مورد مطالعه در ساعات نیمه شب و قبل از طلوع آفتاب، بیش‌ترین گزارش رخداد مه ثبت شده بود.

**کلیدواژه‌ها:** اقلیم‌شناسی مه، نوع مه، مه تابشی، مه بارشی، مه CBL.

## مقدمه

مه پدیده‌ای است که همه ما در زندگی تجربه می‌کنیم و بر فعالیت‌ها و محیط‌زیست ما تأثیر می‌گذارد. کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر به دلیل وجود قطرات آب یا بلورهای یخ در لایه هوای نزدیک به سطح زمین، مه نامیده می‌شود (اداره ملی جو و اقیانوس، ۱۹۹۵؛ لستر، ۲۰۰۷). مه یکی از عوامل مهم حوادث و تأخیر پرواز در صنعت هوانوردی است. در واقع، مه دومین پدیده جوئی خطرناک است که فعالیت‌های هوانوردی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۹). تأخیر و لغو پرواز به دلیل کاهش دید ناشی از مه در صنعت هوانوردی باعث صدها میلیون دلار هزینه می‌شود (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۷). مه دومین عامل وقوع سوانح هوایی مرتبط با وضعیت هوا پس از بادهای شدید است (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۹). رخداد مه به عوامل مختلف جوئی بستگی دارد و شرایط تشکیل آن در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت است (تیلور، ۱۹۱۷؛ ویلت، ۱۹۲۸؛ روچ و همکاران، ۱۹۷۶؛ لپیر، ۱۹۹۴؛ کلوزل، ۱۹۹۲). مه یک پدیده محلی است، زیرا شرایط لازم برای تشکیل آن شامل افزایش رطوبت و/یا خنک شدن توده هوا معمولاً تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی مکانی است که در آن مه تشکیل می‌شود (پیس، ۱۹۶۹). فراوانی و توزیع فضایی مه ارتباط نزدیکی به وجود کوهستان و مجاورت با دریا دارد (اوبرین و همکاران، ۲۰۱۲؛ بلاس و همکاران، ۲۰۰۲). بررسی رخداد مه در ایالات متحده آمریکا توسط پیس (۱۹۶۹) نشان داد که مه غلیظ طی ۲۰ روز در سال در ۵۰ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی اصلی آمریکا رخ می‌دهد و در طول ۳۰ سال فراوانی مه غلیظ بیشتر از انواع دیگر مه بوده است. بیشترین فراوانی رخداد مه غلیظ در سواحل غربی آمریکا، کوه‌های آپالچی و سواحل خلیج اتفاق می‌افتد. هاردویک (۱۹۷۳) نقشه‌های توزیع فراوانی ماهانه و سالانه روزهای همراه با مه غلیظ را در قاره آمریکا ایجاد کرد. مایر و لالا (۱۹۹۰) از اصطلاح رخداد‌های مه به جای روزهای مه‌آلود استفاده کردند تا از شمارش چندگانه یک رخداد مه اجتناب کنند و ویژگی‌های متغیر مه را در نظر بگیرند (به عنوان مثال، مدت تشکیل و تکامل مه). بر اساس نتایج آنها، بیشینه تعداد رخداد‌های مه تابشی در ماه‌های

سپتامبر و اکتبر در آلبانی، نیویورک است. در طول دوره مورد مطالعه (۱۹۷۰-۱۹۷۹)، رخداد‌های مه تابشی ۷۱٪ از کل رخداد‌های مه در این منطقه بودند. تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) دریافتند که داده‌های دیدبانی ساعتی برای شناسایی و تشخیص رخداد‌های مه مفید هستند. آنها یک الگوریتم تشخیص مه را بر اساس سازوکارهای مؤثر برای تشکیل مه برای استنباط و تحلیل شکل‌گیری انواع مختلف مه پیشنهاد کردند و رخداد‌های مه را در شهر نیویورک شناسایی و دسته‌بندی کردند.

فرودگاه شهید هاشمی نژاد مشهد بعد از مهرآباد تهران، دومین فرودگاه پرتردد کشور است که به طور متوسط در ایام عادی سال روزانه ۱۸۰ پرواز ورودی و خروجی در آن انجام می‌شود (خبرگزاری جمهوری اسلامی ایران). پدیده مه در این فرودگاه به طور مکرر باعث تأخیر یا لغو پروازها شده است. به طوری که در مطالعه تاج‌بخش (۱۳۹۵) این فرودگاه در بین هشت فرودگاه مورد مطالعه در طول دوره آماری ۲۰ ساله، رتبه سوم را از نظر تعداد رخداد مه داشته است. با توجه به ترافیک پروازی زیاد این فرودگاه، شناخت اقلیم مه در این فرودگاه می‌تواند نقش مؤثری در بهبود پیش‌بینی مه و کاهش خطرات جانی و مالی ناشی از آن داشته باشد.

از مطالعات انجام شده در مورد رخداد مه در فرودگاه مشهد، می‌توان به مطالعه آماری رخداد مه در هشت فرودگاه کشور از جمله فرودگاه مشهد توسط تاج‌بخش (۱۳۹۵) اشاره کرد. همچنین تاج‌بخش و رهنما (۱۳۹۷) به پایش و تحلیل یک رخداد مه در اطراف شهر مشهد با کمک داده‌های زمینی و سنجش از دور پرداختند.

در این مطالعه خصوصیات اقلیمی رخداد مه در فرودگاه مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل تعدد تأخیر و لغو پروازهای این فرودگاه به علت کاهش دید ناشی از رخداد مه، شناخت اقلیم مه در این فرودگاه باعث بهبود پیش‌بینی مه و کاهش خطرات جانی و مالی ناشی از آن می‌شود.

این مقاله به این صورت طراحی شده است: مواد و روش کار در بخش ۲ شرح داده شده است، بحث و نتایج مربوطه در بخش ۳ ارائه شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۴ آمده است.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه به بررسی اقلیمی رخداد مه در فرودگاه مشهد پرداخته می‌شود. فرودگاه بین‌المللی شهید هاشمی نژاد مشهد در ارتفاع ۹۹۵ متری از سطح دریا و در جنوب شرقی شهر مشهد در ۵۹/۶۳ درجه‌ی طول جغرافیایی و ۳۶/۲۳ درجه‌ی عرض جغرافیایی واقع شده است. شکل ۱ ناهمواری بخش‌های شمال شرق ایران (متر) را نشان می‌دهد. فرودگاه مشهد در شکل مشخص شده است.

به منظور بررسی اقلیمی رخداد مه در فرودگاه مشهد، پس از جداسازی رخداد‌های مه از داده‌های دیدبانی ساعتی متار در مدت ۲۰ سال (از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰)، انواع مه بر اساس الگوریتم تشخیص مه تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) (شکل ۲) مشخص شد. سپس رخداد مه از نظر فراوانی، تراکم و مدت زمان رخداد، تنوع فصلی و روزانه، تغییرات سالانه و غلظت مورد بررسی قرار گرفت.

## بحث و نتایج

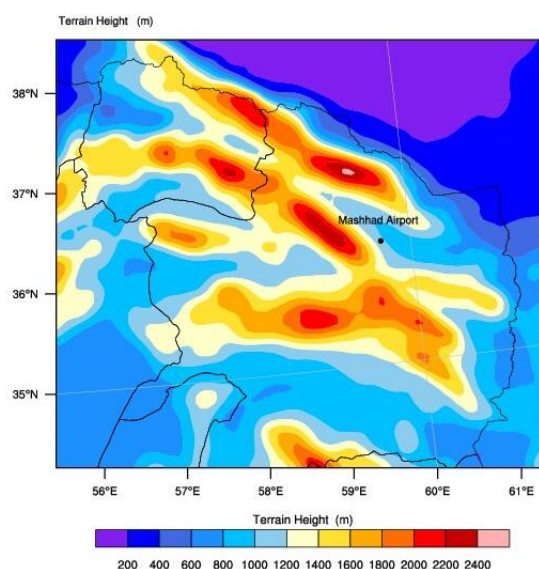
به منظور بررسی مه در فرودگاه مشهد، پس از شناسایی رخداد‌های مه از داده‌های متار طی ۲۰ سال دوره مطالعاتی، انواع مه بر اساس الگوریتم تشخیص مه تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) مشخص شد و سپس رخداد مه در این فرودگاه از

نظر فراوانی انواع مه، تراکم مه و مدت زمان رخداد مه، تنوع فصلی و روزانه مه، تغییرات سالانه رخداد مه و غلظت مه مورد بررسی قرار گرفت.

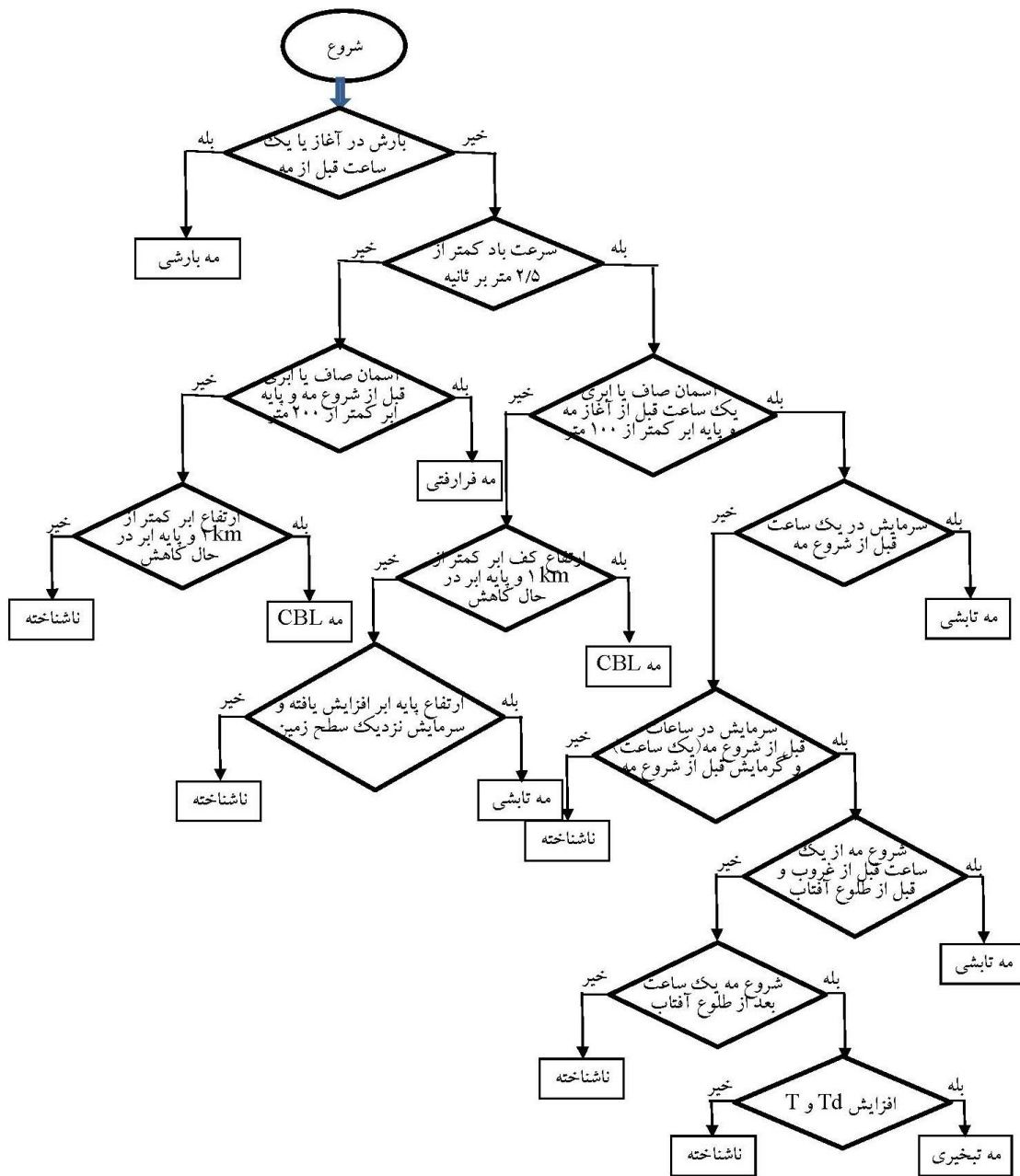
## فراوانی انواع مه

الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) جهت دسته‌بندی نوع هر رخداد مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد به کار رفت. بر این اساس و آنچه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در مجموع تقریباً ۹۸٪ از تمام رخداد‌های مه در یکی از سه نوع مه (تابشی، CBL و بارشی) دسته بندی شدند و تنها ۲٪ از آنها ناشناخته باقی ماند.

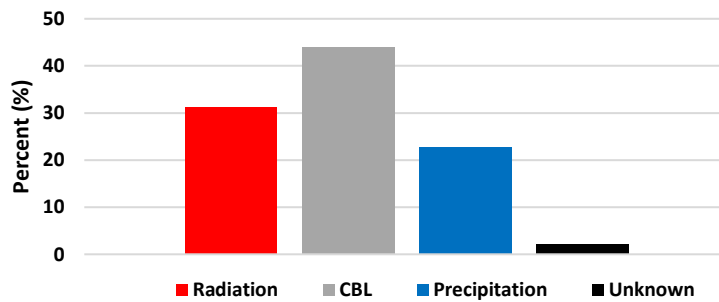
نتایج نشان می‌دهد که مه CBL رایج‌ترین نوع مه در ایستگاه مشهد با ۴۳/۹۴٪ (معادل ۸۷ رخداد مه) از کل رخداد‌های مه است (شکل ۳). مه تابشی با فراوانی ۳۱/۳۱٪ (معادل ۶۲ رخداد مه) از کل رخداد‌ها در ایستگاه مشهد مشاهده شد. مه بارشی دارای فراوانی ۲۲/۷۲٪ (معادل ۴۵ رخداد مه) از کل رخداد‌های مه در ایستگاه مشهد طی ۲۰ سال مطالعه بوده است. مه فرارفتی نیزکه تحت تأثیر محیط دریایی شکل می‌گیرد، در این ایستگاه مشاهده نشد. همچنین ۲٪ از رخداد‌های مه (معادل ۴ رخداد مه) طبق الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) ناشناخته باقی ماندند.



شکل ۱- ناهمواری بخش‌های شمالی و شمال شرق ایران (متر). فرودگاه مشهد در شکل مشخص شده است.



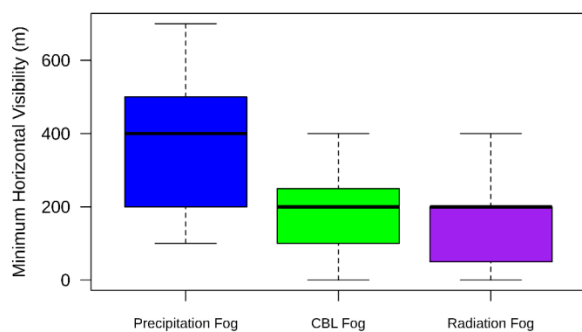
شکل ۲- الگوریتم دسته‌بندی انواع مه (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)



شکل ۳- فراوانی انواع مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰.

مه بارشی CBL بیشتر از ۷ ساعت به طول انجامیده است. مه بارشی تمایل به ماندگاری بیشتری نسبت به مه CBL داشته است به طوری که ۵۰٪ از رخدادها بیش از ۵ ساعت و ۲۵٪ از رخدادهای مه تابشی بیش از ۹ ساعت طول کشیده است. توزیع کمینه دید ثبت شده در طول هر نوع رخداد مه در ایستگاه فرودگاه مشهد در دوره زمانی مورد بررسی در شکل ۴-ب آمده است. رخدادهای مه تابشی و CBL دارای کمینه دید کمتر از ۲۰۰ متر برای ۵۰٪ از رخدادها بودند. مه بارشی دارای غلظت کمتری به نسبت انواع دیگر مه است، به طوری که فقط ۲۵٪ از رخدادهای مه بارشی دارای دید کمتر از ۲۰۰ متر بوده و نیمی از آن دارای دید بیش از ۴۰۰ متر و ۲۵٪ از رخدادهای این نوع مه دارای دید بیش از ۵۰۰ متر بودند. غلظت کمتر رخداد مه بارشی با نتایج تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) مطابقت دارد.

ب) کمینه دید افقی



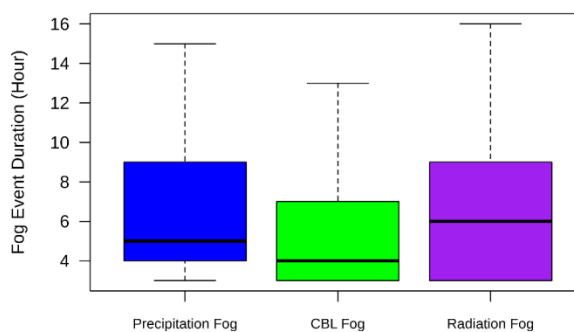
شکل ۴- الف) توزیع مدت زمان رخدادهای مه برای هر نوع مه و ب) توزیع کمینه دید افقی ثبت شده در طول هر نوع رخداد مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد و در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰.

شکل دیده می‌شود، ناشی از انواع دیگر مه است (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷؛ هافلین و همکاران، ۲۰۱۰). هم‌چنین افزایش دما و کاهش نم نسبی در ساعات ظهر و بعدازظهر علت اصلی کاهش تعداد گزارشات مه در این ساعات است (سپیلو و همکاران، ۲۰۱۹). تاج‌بخش (۱۳۹۵) نیز با بررسی داده‌های همدیدی ۲۰ ساله در فرودگاه مشهد، بیشینه رخداد مه را در ساعات ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گزارش کرده است.

#### تراکم مه و مدت زمان رخداد مه

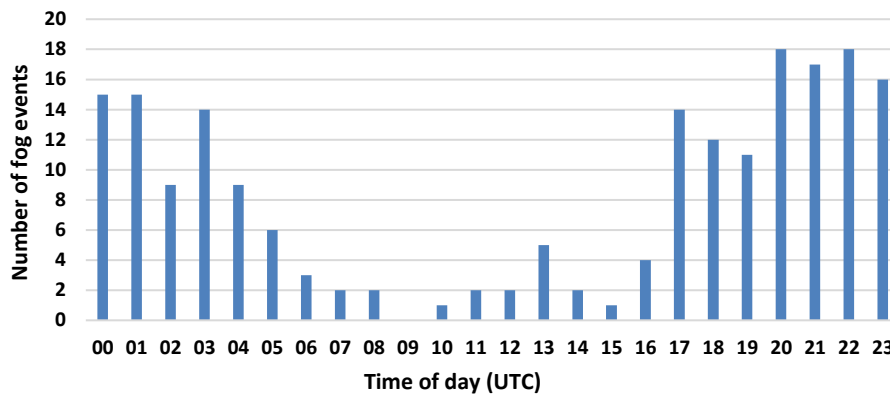
توزیع مدت زمان رخدادهای مه و کمینه دید افقی برای هر نوع مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد طی دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-الف در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه فرودگاه مشهد، مه تابشی طولانی‌ترین نوع مه از نظر مدت زمان ماندگاری بوده است. ۵۰٪ از رخدادها بیش از ۶ ساعت و ۲۵٪ از رخدادهای این نوع مه بیش از ۹ ساعت به طول انجامیده است. همان طور که در بخش قبل اشاره شد، دلیل طولانی بودن مدت زمان ماندگاری این نوع مه این است که مه تابشی معمولاً در شب ایجاد می‌شود و معمولاً تا طلوع آفتاب ادامه می‌یابد. مدت زمان رخداد مه CBL در مقایسه با انواع دیگر مه کوتاهتر بوده است به طوری که ۵۰ درصد رخدادها کمتر از ۴ ساعت طول کشیده است و تنها ۲۵٪ از رخدادهای

الف) مدت زمان رخداد مه



#### تنوع فصلی و روزانه مه

تعداد رخداد مه ثبت شده در ساعات مختلف شبانه روز در طول دوره آماری در ایستگاه فرودگاهی مشهد در شکل ۵ آمده است. با توجه به شکل ۵، بیش‌ترین گزارش رخداد مه طی ساعات ۲۰ تا ۰۱ گرینویچ بوده است. دلیل این امر می‌تواند سرمایه‌ش تابشی در ساعات شب باشد. زیرا کاهش دمای شدید باعث افزایش نم نسبی تا صد درصد و تشکیل مه می‌شود. در ساعات شب با کاهش دمای هوا، تعداد رخدادهای مه تابشی افزایش یافته و با طلوع خورشید و افزایش دمای هوا، مه تابشی که در اثر سرمایه‌ش تابشی تشکیل شده بود از بین می‌رود و فراوانی رخداد مه از ساعت ۳ گرینویچ به بعد به سرعت کاهش می‌یابد. رخدادهای مه که با تعداد کم پس از طلوع خورشید در

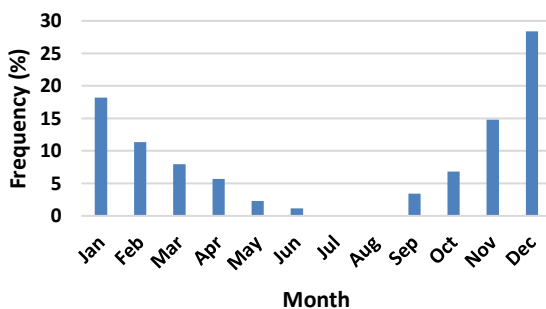


شکل ۵- تعداد رخداد‌های مه ثبت شده در ساعات مختلف شبانه روز در طول دوره آماری در ایستگاه فرودگاهی مشهد.

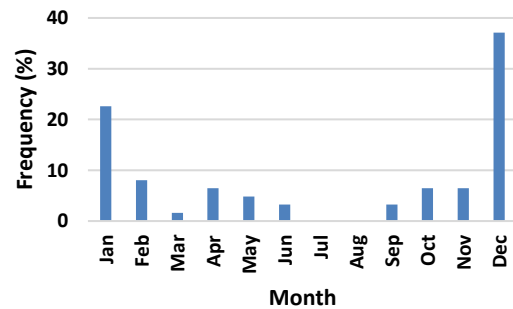
سامانه‌های جوّی بزرگ مقیاس مرتبط باشد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷). رخداد‌های فصل پاییز نیز می‌تواند به همین سامانه‌های جوّی مرتبط باشد. بسامد ماهانه مه بارشی در شکل ۶- ج نشان داده شده است. بیشینه رخدادها در فصل زمستان تا اوایل بهار (ژانویه تا مارس) دیده می‌شود. از اواسط تا اواخر فصل پاییز (نوامبر و دسامبر) تعداد رخداد‌های مه بارشی کمتر بوده و در ماه آوریل نیز کمترین بسامد رخداد مه مشاهده می‌شود. در ماه‌های می تا اکتبر رخداد مه بارشی مشاهده نشد. از آنجا که مه بارشی به عوامل بزرگ مقیاس بستگی دارد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)، این نوع مه در پاییز و زمستان دیده می‌شود. با توجه به شکل ۶ بسامد رخداد انواع مه در ماه‌های دسامبر و ژانویه بیشتر از ماه‌های دیگر سال است. این نتیجه با تاج‌بخش (۱۳۹۵) همخوانی دارد.

بسامد مه در ماه‌های مختلف سال برای هر نوع مه در شکل ۶ آمده است. توزیع زمانی مه تابشی (شکل ۶- الف) نشان می‌دهد که رخداد‌های مه اغلب در فصل زمستان (دسامبر و ژانویه) بوده است. کمینه بسامد رخداد مه تابشی نیز در ماه‌های فوریه تا ژوئن و سپتامبر تا نوامبر دیده می‌شود. در ماه‌های ژوئیه و اوت نیز رخداد مه تابشی مشاهده نشد. توزیع ماهانه‌ی مه CBL (شکل ۶- ب) نشان می‌دهد که بیشینه بسامد رخداد مه CBL در ماه دسامبر اتفاق افتاده است. سپس تا ماه ژوئن روند نزولی بسامد رخداد مه مشاهده می‌شود. در ماه‌های ژوئیه و اوت رخداد مه CBL وجود نداشته و از ماه سپتامبر تا دسامبر روند صعودی مشاهده می‌شود. بیشترین رخداد‌های مه CBL در فصول بهار، پاییز و زمستان دیده می‌شود. سرمایه‌ی لایه‌ی مرزی مهم‌ترین فرآیندی است که باعث ایجاد مه در فصل بهار می‌شود، در حالی که رخداد‌های فصل زمستان می‌تواند به

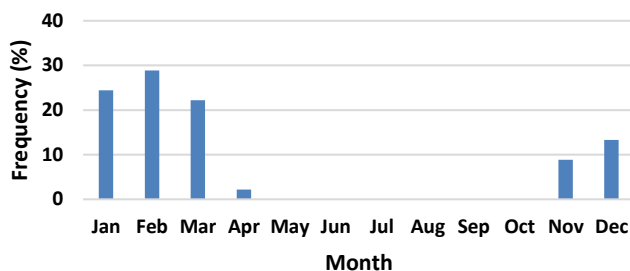
شکل ۶- ب) CBL Fog



شکل ۶- الف) Radiation Fog



ج) Precipitation Fog



شکل ۶- بسامد مه در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه فرودگاهی مشهد برای الف) مه تابشی، ب) CBL و ج) بارشی.

تغییرات سالانه رخداد مه

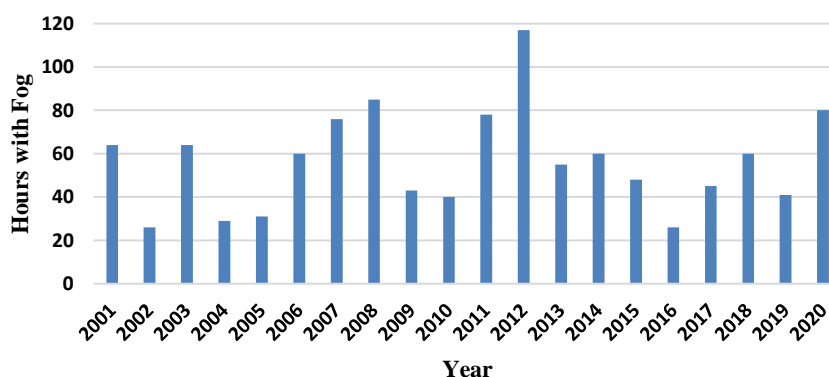
تغییرات فراوانی ساعات‌های همراه با مه در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سال‌های مورد مطالعه روند مشخصی در تعداد ساعات همراه با مه دیده نمی‌شود (شکل ۷). بیشینه تعداد ساعات‌های همراه با مه در سال ۲۰۱۲ به دلیل ۴ رخداد مه بارشی است که طی بارش‌های دی ماه ۱۳۹۲ در شهر مشهد رخ داده است. مجموع زمان این ۴ رخداد مه ۵۰ ساعت بوده است.

غلظت مه

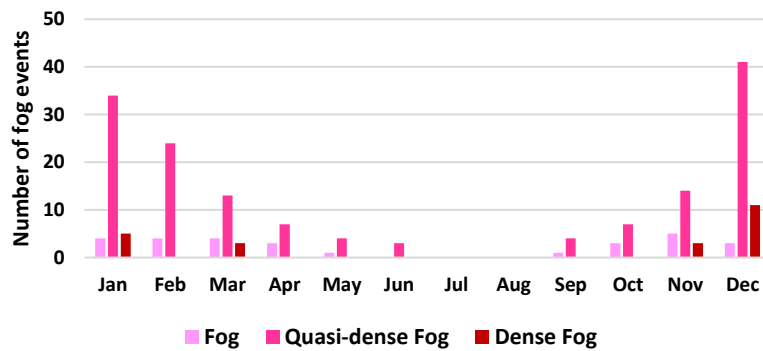
انواع مه از نظر غلظت نیز در فرودگاه مشهد مورد بررسی قرار گرفت. همه رخداد‌های مه در فرودگاه مشهد در طول دوره مورد مطالعه، براساس کمینه دید دسته‌بندی شدند.

شکل ۸ فراوانی رخداد انواع مه از نظر غلظت در ماه‌های مختلف سال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در همه ماه‌ها، تعداد رخداد‌های مه شبه غلیظ در فرودگاه مشهد بیشتر از مه و مه غلیظ است. همچنین در اغلب ماه‌ها، تعداد رخداد مه بیشتر از تعداد رخداد‌های مه غلیظ است (به جز ماه‌های دسامبر و ژانویه).

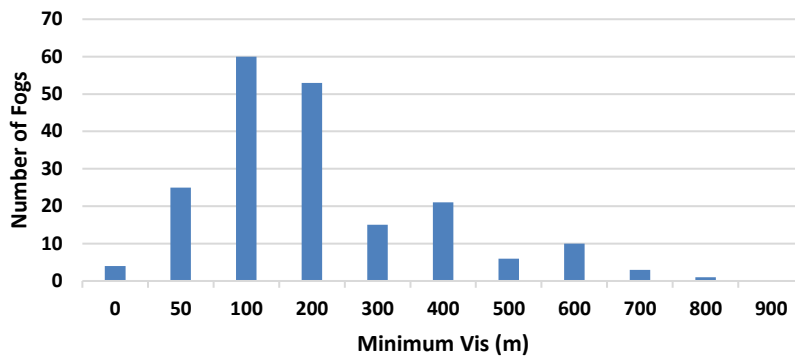
شکل ۹ توزیع فراوانی کمینه دید افقی رخداد‌های مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد را در طول دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ رخداد‌های مه با دید کمینه ۱۰۰ متر و سپس ۲۰۰ متر دارای بیشترین تعداد هستند که اهمیت پیش‌بینی درست رخداد مه را در این فرودگاه از نظر صنعت هوانوردی نشان می‌دهد.



شکل ۷- توزیع سالانه فراوانی ساعات همراه با مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰.



شکل ۸- فراوانی رخداد انواع مه از نظر غلظت در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه فرودگاهی مشهد.



شکل ۹- توزیع فراوانی کمینه دید افقی در طول رخداد‌های مه در ایستگاه فرودگاهی مشهد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رخداد مه در فرودگاه مشهد از نظر اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های دیدبانی ساعتی متار استفاده شد و همه رخداد‌های مه در طول ۲۰ سال دوره‌ی مطالعه (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) از داده‌های اصلی تفکیک و سپس طبق الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) نوع رخداد‌های مه مشخص شد.

نتایج نشان داد که مه CBL رایج‌ترین نوع مه از نظر فراوانی با ۴۳/۹۴٪ از کل رخداد‌های مه در فرودگاه مشهد است. مه بارشی نیز با ۲۲/۷۲٪ از کل رخداد‌های مه کمترین فراوانی را در بین انواع مه دارد. مه فرارفتی نیز که تحت تأثیر محیط دریایی شکل می‌گیرد، در این ایستگاه مشاهده نشد. با توجه به اینکه مه تابشی معمولاً در شب ایجاد می‌شود و معمولاً پس از طلوع آفتاب از بین می‌رود، این نوع مه طولانی‌ترین نوع مه از نظر مدت زمان ماندگاری در این فرودگاه بوده است. همچنین مدت زمان رخداد مه CBL در مقایسه با انواع دیگر مه کوتاهتر بوده است.

کمینه دید رخداد‌های مه‌های تابشی و CBL در این فرودگاه کمتر از انواع دیگر مه بود. همچنین مه بارشی دارای کم‌ترین غلظت نسبت به انواع دیگر مه بود که با نتایج تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) مطابقت دارد. بیش‌ترین گزارش رخداد مه در فرودگاه مشهد در طول سال‌های مورد مطالعه، در ساعات نیمه شب و قبل از طلوع آفتاب بود که می‌تواند به علت سرمایش تابشی در ساعات شب و قبل از طلوع آفتاب باشد که به بیش‌ترین حد خود می‌رسد (هوچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیپلو و همکاران، ۲۰۱۹؛ زوزوآ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ورسند و همکاران، ۲۰۱۷). این نتیجه با مطالعه‌ی سیپلو و همکاران (۲۰۱۹) و تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) همخوانی دارد. تاج‌بخش (۱۳۹۵) نیز با بررسی داده‌های همدیدی ۲۰ ساله در فرودگاه مشهد، بیشینه رخداد مه را در ساعات ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گزارش کرده است. همچنین فراوانی رخداد مه از ساعت ۳ گرینویچ به بعد به سرعت کاهش می‌یابد. توزیع ماهانه انواع مه در فرودگاه مشهد نشان داد که مه تابشی اغلب در فصل زمستان رخ می‌دهد و مه CBL از



4. Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, S., Gharabaghi, B., Feltz, W., Temimi, M., Dimri, A.P., Dietz, S., França, G., Almeida, M., Albuquerque, F., Pu, Z., Kneringer, P. & Thobois, L. (2019). A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Journal of Pure and Applied Geophysics*, 176, 1869–1921. [10.1007/s00024-019-02168-6](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6).
5. Haeffelin, M., Bergot, T., Elias, T., Tardif, R., Carrer, D., Chazette, P., Colomb, M., Drobinski, P., Dupont, E., Dupont, J. C., Gomes, L., Musson-Genon, L., Pietras, C., Plana-Fattori, A., Protat, A., Rangognio, J., Raut, J.-C., Rémy, S., Richard, D., Sciare, J., & Zhang, X. (2010). PARISFOG: shedding new light on fog physical processes. *B. Am. Meteorol. Soc*, 91, 767–783, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2671.1>.
6. Hardwick, W.C. (1973). Monthly fog frequency in the continental United States. *Mon. Weather Rev*, 101 (10), 763–766.
7. Hoch, SW., Whiteman, DC., & Mayer, B. (2011). A systematic study of longwave radiative heating and cooling within valleys and basins using a three-dimensional radiative transfer model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2473–2489, DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-083.1>.
8. Kloesel, K. A. (1992). Marine stratocumulus cloud clearing episodes observed during FIRE. *Monthly Weather Review*, 120, 565–578.
9. Leipper, D. F. (1994). Fog on the U.S. west coast: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 229–240
10. Lester, P. (2007). *Aviation weather*, Jeppesen Pub. U.S.A.
11. Meyer, M.B. & Lala, G.G. (1990). Climatological Aspects of Radiation Fog Occurrence at Albany. *New York. J. Climate*, 3, 577–586. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0577:CAORFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0577:CAORFO>2.0.CO;2) fog with regional
12. O'Brien, TA., Sloan, LC., Chuang, PY., Faloona, IC., & Johnstone, JA. (2012). Multidecadal simulation of coastal climate model. *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-012-1486-x
13. Peace, R.L. Jr. (1969). Heavy-Fog Regions In The Conterminous United States. *Mon. Weather Rev*, 97, 116–123. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0116:HRITCU>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0116:HRITCU>2.3.CO;2)
- اواخر پاییز تا اواسط بهار وجود داشته است. سرمایش لایه‌ی مرزی مهم‌ترین فرآیندی است که باعث ایجاد مه در فصل بهار می‌شود، در حالی که رخداد‌های فصل زمستان می‌تواند به سامانه‌های جوّی بزرگ مقیاس مرتبط باشد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷). بیشینه بسامد ماهانه مه بارشی در این فرودگاه در فصل زمستان است. رخداد‌های فصل پاییز نیز می‌تواند به همین سامانه‌های جوّی مرتبط باشد. از آنجا که مه بارشی به عوامل بزرگ مقیاس بستگی دارد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)، بیشینه رخداد این نوع مه در زمستان مشاهده می‌شود. به طور کلی بسامد رخداد انواع مه در ماه‌های دسامبر و ژانویه بیشتر از ماه‌های دیگر سال است. این نتیجه با تاج‌بخش (۱۳۹۵) همخوانی دارد.
- تغییرات فراوانی ساعت‌های همراه با مه در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سال‌های مورد مطالعه روند مشخصی در تعداد ساعات همراه با مه دیده نمی‌شود. از نظر غلظت مه، در همه ماه‌های سال، تعداد رخداد‌های مه شبه غلیظ با کمینه دید ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر بیشتر از انواع دیگر بود. همچنین تعداد رخداد‌های مه با کمینه دید ۱۰۰ متر و سپس ۲۰۰ متر دارای بیشترین تعداد بودند. این قضیه اهمیت بررسی اقلیمی و پیش‌بینی رخداد مه را در این فرودگاه از نظر صنعت هوانوردی نشان می‌دهد، زیرا مه غلیظ باعث ایجاد اختلال در نشست و برخاست هواپیما می‌شود.

## منابع

1. Błas, M., Sobik, M., Quiel, F., & Netzel, P. (2002). Temporal and spatial variations of fog in the Western Sudety Mts., Poland. *Atmos Res*, 64:19–28
2. Cséplő, A., Sarkadi, N., & Horváth, Á., Schmeller, G., & Lemler, T. (2019). Fog climatology in Hungary. *Quarterly Journal Of The Hungarian Meteorological Service*, 123 (2), 241–264. <http://doi.org/10.28974/idojaras.2019.2.7>.
3. Gultepe, I., Milbrandt, J. A., & Zhou, B. (2017). Marine fog: A review on microphysics and visibility prediction (Chap. 7). In D. Koracin & C. E. Dorman (Eds.), *Marine fog: Challenges and advancements in observations, modeling and forecasting*. New York: Springer.

14. Roach, W., Brown, R., Caughey, S. J., Garland, J. A., & Readings, C. J. (1976). The physics of radiation fog: I – A field study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 313–333.
15. Tajbakhsh, S., 2017, Forecasting fog using some experimental methods (Tehran and Mashhad airports), *Journal of Climate Research*, 7(27-28), 43-56.
16. Tajbakhsh, S., Rahnama, M., 2017, Monitoring and analyzing foggy events using ground and remote sensing data Case Study April 4, Nivar 42(100-101), 35-44.
17. Tardif, R., & Rasmussen, R.M. (2007). Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteorol. Climatol*, 46 (8), 1141–1168.
18. Taylor, G. I., (1917). The formation of fog and mist. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 43, 241–268.
19. Wærsted, E. G., Haefelin, M., Dupont, J. C., Delanoë, J. & Dubuisson, P. (2017). Radiation in fog: quantification of the impact on fog liquid water based on ground-based remote sensing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10811–10835, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10811-2017>.
20. Willett, H. C. (1928). Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting. *Monthly Weather Review*, 56, 435–468.
21. Zouzoua, M., Lohou, F., Assamoi, P., Lothon, M., Yoboue, V., Dione, C., Kalthoff, N., Adler, B., Babić, K., Pedruzo-Bagazgoitia, X. & Derrien, S. (2021). Breakup of nocturnal low-level stratiform clouds during the southern West African monsoon season. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2027–2051, <https://doi.org/10.5194/acp-21-2027-2021>