

مطالعه وضعیت اقلیمی مه در فرودگاه اردبیل در دوره آماری ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

راضیه پهلوان^{۱*}، محمد مرادی^۲، سحر تاجبخش^۳، مجید آزادی^۲ و مهدی رهنما^۳

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲ دانشیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۳ استادیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

وجود مه باعث کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر می‌شود و خدمت‌رسانی حمل و نقل هوایی را دچار اختلال می‌کند و می‌تواند نشست و برخاست هواپیماها را غیر ممکن سازد. رخداد مه در صنعت هوانوردی به دلیل تأخیر و لغو پروازها هزینه‌ای بالغ بر صدها میلیون دلار به بار می‌آورد، بنابراین شناخت وضعیت اقلیمی مه در فرودگاه‌ها می‌تواند به تشخیص و پیش‌بینی بهتر آن کمک کند و مدیریت پروازها را به صورت بهینه و کمترین هزینه ممکن سازد. در این مطالعه، از داده‌های متار (METAR) فرودگاه اردبیل طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ برای تشخیص و جداسازی انواع مه از الگوریتم تردیف و راسموسن استفاده و وضعیت اقلیم مه در طول مدت مورد مطالعه تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین و کمترین فراوانی مه به ترتیب از نوع تابشی و بارشی است. از نظر مدت زمان رخداد نیز مه تابشی و بارشی به ترتیب، طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین انواع مه بودند. بیش‌ترین گزارش رخداد مه در طول سال‌های مورد مطالعه، ساعات ۳ و ۴ گرینویچ بود. توزیع ماهانه مه تابشی نشان داد که اغلب رخدادهای فصل پاییز و اوایل زمستان (سپتامبر تا دسامبر) است. در طول سال‌های مورد مطالعه، تغییرات سالانه رخداد مه، روند مشخصی را در تعداد ساعات مه، به جز سه سال آخر که روند کاهشی دارند، نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی: اقلیم‌شناسی مه، نوع مه، مه تابشی، مه فرارفتی

۱ مقدمه

قرار دارد (پیس، ۱۹۶۹). در مناطق مستعد مه در جهان، برخی از دانشمندان برای بهبود پیش‌بینی و درک درست چگونگی تشکیل مه، خردفیزیک مه را مورد بررسی قرار داده و فراوانی مکانی و زمانی مه مطالعه کرده‌اند. علاوه بر این، روش‌هایی برای شناسایی و طبقه‌بندی مه ارائه شده است. یکی از رویکردهای اصلی مطالعات مه، تحقیقات اقلیمی در یک منطقه خاص برای درک بهتر و پیش‌بینی مه در آن منطقه است. متداول‌ترین روش‌شناسی، تحلیل میانگین سالانه یا ماهانه روزهای مه آلود در یک منطقه است (مانند پیس، ۱۹۶۹؛ هاردویک، ۱۹۷۳؛ یوشینو، ۱۹۷۵؛ لادوچی، ۲۰۰۵). تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) رخدادهای مه را از داده‌های دید افقی در شهر نیویورک شناسایی کردند و هر یک از رخدادهای

وجود مه می‌تواند دید افقی را کاهش داده و حمل و نقل هوایی را دچار مشکل کند و نشست و برخاست هواپیماها را غیر ممکن سازد. اثر مه در صنعت هوانوردی هزینه‌ای بالغ بر صدها میلیون دلار به دلیل تأخیر و لغو پروازها به دنبال دارد (گالتپ و همکاران، ۲۰۱۷). مه پدیده‌ای جوی است که به دلیل وجود قطره‌های معلق آب در نزدیکی سطح زمین، دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش می‌دهد (اداره ملی اقیانوس و جو، ۱۹۹۵؛ سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۱۱). مه یک پدیده محلی است، زیرا شرایط لازم برای تشکیل آن افزایش میزان رطوبت و یا کاهش دمای توده هوا) به‌طور معمول تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی محل تشکیل مه

ساعات ۴ تا ۶ صبح و کمینه آن در ساعات ۱ تا ۳ بعد از ظهر محلی دیده شده است.

در بسیاری از شهرک‌های صنعتی جهان، شدیدترین نوع مه از نظر ماندگاری و تراکم و غلظت در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ مشاهده شده است، یکی از معروف‌ترین این رخدادهای دید کم ناشی از مه در ترکیب با آلودگی شدید هوا، رخداد بزرگ مه دود لندن در سال ۱۹۵۲ بود که باعث مرگ ۱۲۰۰۰ نفر شد (اداره هواشناسی انگلستان metoffice, ۲۰۰۵). در طول این رویداد، دید کمتر از ۱۰ متر در هیترو نزدیک به ۴۸ ساعت طول کشید. بعدها به دلیل وضع قانون هوای پاک و کاهش ذرات معلق در هوا، اقلیم مه به‌طور قابل توجهی تغییر کرده و بسیاری از سایتها کاهش فرکانس مه را تجربه کرده اند (بندیکس، ۲۰۰۲؛ ویتو و لادوچی، ۲۰۰۸؛ شی و همکاران، ۲۰۰۸). در کشورهای در حال توسعه مانند هند، با رشد سریع صنعت و افزایش انتشار آلودگی، فراوانی رخداد مه افزایش یافته و دید افقی به سرعت طی ۳۰ سال گذشته کاهش یافته است (سینگ و دی ۲۰۱۲؛ سید و همکاران ۲۰۱۲).

نتایج بررسی‌های جهانگیری و عسگری (۱۳۹۶) نشان داد که ۸۸ درصد موارد کاهش دید در اردبیل در دوره مورد مطالعه به دلیل مه بوده است، فراوانی نسبی تعداد روزهای همراه با مه در دوره مورد مطالعه ۱/۲۵ درصد بود. توزیع فصلی مه بیانگر فراوانی نسبی رخداد مه در پاییز، زمستان، بهار و تابستان به ترتیب با ۳۴٪، ۲۹٪، ۲۷٪ و ۱۰٪ است. تغییرات رخداد مه در دوره مطالعاتی بیانگر یک روند منفی معنی‌دار بود که یکی از علل آن را افزایش دما به ویژه دمای کمینه بیان کردند.

بر اساس مطالعات ۵ ساله‌ی صلاحی و محمدی (۱۳۹۰)، مه در فرودگاه اردبیل شامل انواع مه تابشی، جبهه‌ای و فرارفتی است. آن‌ها دریافتند که بهترین زمان برای انجام عملیات پروازی در فرودگاه اردبیل در ماه‌های آوریل، می، سپتامبر و اکتبر از ساعت ۰۸ تا ۱۴ گرینویچ، در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس از ساعت ۰۹ تا ۱۲ گرینویچ و در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت از ظهر تا قبل از غروب آفتاب است. ترافیک هوایی در فرودگاه اردبیل اغلب توسط مه مختل می

را با استفاده از یک الگوریتم طبقه‌بندی و بر اساس سازوکارهای مؤثر برای تشکیل مه دسته‌بندی کردند. هافلین و همکاران (۲۰۱۰) نیز رخدادهای مه را در پاریس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی توسط تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) طبقه‌بندی کرد. آکیموتو و کوزاکا (۲۰۱۴) الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) را ساده‌سازی کرده و به بررسی اقلیم مه در مناطق مختلف ژاپن پرداختند.

مه می‌تواند با شرایط آلودگی هوا همراه شود در نتیجه ذرات آلاینده هوا در قطرات مه گرفتار شده و به غلظت‌های بالایی می‌رسند و باعث تشکیل مه دود یا در بعضی موارد مه اسیدی می‌شوند (بندیکس، ۲۰۰۲؛ بلاس و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویتو و لادوچی ۲۰۰۸؛ سید و همکاران ۲۰۱۲). هم‌چنین آلودگی هوا و وجود ذرات آلاینده در هوا یکی از عوامل افزایش رخداد مه است (چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ موهان و پایرا، ۲۰۰۹). با این حال، مه به‌عنوان یک منبع رطوبت، در سلامت اکوسیستم‌ها و انسان نقش مهمی دارد (ساجویو و کوپکه، ۱۹۹۷؛ سرسدا و همکاران، ۲۰۰۲؛ لانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ اوبرین و همکاران، ۲۰۱۲). به علاوه، مه نقش مهمی در حفظ تعادل تابش دارد (بندیکس، ۲۰۰۲).

مه یک پدیده محلی است که می‌تواند در نتیجه فرارفت، سرمایش تابشی یا حرکت جبهه هوا در منطقه ایجاد شود. فراوانی و توزیع فضایی آن ارتباط نزدیک با وجود کوهستان و مجاورت با دریا دارد (اوبرین و همکاران، ۲۰۱۲؛ بلاس و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویتو و لادوچی ۲۰۰۸؛ سید و همکاران ۲۰۱۲). فراوانی بیشتر رخداد مه در ارتفاعات معمولاً نتیجه سرمایش ناشی از اثر کوه‌نگاری است (لانگ و همکاران ۲۰۰۳). وقوع مه هم‌چنین به گردش هوا و ویژگی‌های جغرافیایی منطقه بستگی دارد، بنابراین در مناطق مختلف جهان متفاوت است (سرسدا و همکاران ۲۰۰۲). به‌عنوان مثال، بیش‌ترین میزان فراوانی رخداد مه در تایپه در ماه مارس است، در حالی که در این ماه در مکزیک کم‌ترین فراوانی رخداد مه را می‌توان مشاهده کرد (تسای و همکاران ۲۰۰۷؛ گارسیا-گارسیا و زارالوکی ۲۰۰۸). طبق مطالعات پیشین، تحت تأثیر تغییرات روزانه دمای هوا، بیشینه وقوع مه بین

داده شده است، بحث و نتایج مربوطه در بخش ۳ ارائه شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۴ آمده است.

۲ مواد و روش‌ها

با استفاده از داده‌های دیدبانی ساعتی در مدت ۱۰ سال (از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰)، به بررسی اقلیمی رخدادهای ایستگاه فرودگاه اردبیل پرداخته شد. فرودگاه بین‌المللی اردبیل در ارتفاع ۱۳۱۵ متری از سطح دریا و در فاصله ۱۳ کیلومتری از شهر اردبیل در ۴۸/۲۸ درجه طول جغرافیایی و ۳۸/۲۵ درجه عرض جغرافیایی بنا شده است. بر طبق برآوردها و آمار رسمی منتشر شده از این فرودگاه، به‌طور میانگین در طول هر هفته ۶۰ پرواز در این فرودگاه انجام می‌گیرد.

از داده‌های دید افقی، رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری، دمای هوا و دمای نقطه شبنم، ارتفاع پایه ابر و مقدار پوشش ابر، سرعت و جهت باد در ارتفاع ۱۰ متری، فشار متوسط سطح دریا و وضع هوای حاضر و گذشته از گزارش‌های وضع هوای متار (METAR) فرودگاه اردبیل از اول ژانویه ۲۰۱۱ تا آخر دسامبر ۲۰۲۰ برای تشخیص و جداسازی انواع مه استفاده شد. سپس بر اساس الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) که در شکل ۱، آمده است، نوع رخداد مه (فرارفتی، تابشی، بارشی، تبخیری و مه ناشی از کاهش ارتفاع پایه ابر) مشخص شد. سپس به بررسی تغییرات سالانه، ماهانه و ساعتی مه در طول مدت مورد مطالعه پرداخته شد. در این تحقیق انواع مه از نظر غلظت نیز در فرودگاه اردبیل مورد بررسی قرار گرفت. همه رخدادهای مه در فرودگاه اردبیل در طول دوره مورد مطالعه، بر اساس کمینه دید دسته بندی شدند. مه غلیظ رخدادهایی هستند که کمینه دید کمتر از ۱۰۰ متر داشته باشند. مه شبه غلیظ و مه نیز به ترتیب رخدادهای مهمی هستند که دارای کمینه دید کمتر از ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر هستند (آکیموتو و کوزاکا، ۲۰۱۴). مه از نظر سازوکارهای شکل‌گیری انواع متفاوتی دارد. بعضی از آنها با پایین آمدن ابرهای استراتوس، بعضی با فرارفت، بعضی با سرمایش تابشی در نزدیکی زمین و برخی دیگر پس از بارش باران یا برف ایجاد می‌شوند. مه تابشی اغلب در اثر سرمایش تابشی ایجاد می‌شود. این نوع مه در شب‌های صاف و آرام، با وجود باد بسیار ملایم رخ می‌دهد

شود. دید کم ناشی از مه در این فرودگاه سبب تأخیر و یا لغو پروازها شده و خسارت مالی زیادی را به دنبال دارد. پیش‌بینی دقیق مه در این فرودگاه برای ارائه خدمات حمل و نقل هوایی بهتر و کاهش تأخیر، لغو و زیان اقتصادی بسیار مهم است.

موقعیت خاص جغرافیایی استان اردبیل سبب گردیده است که این استان در فصل‌های سرد سال تحت تأثیر توده‌های هوا از شمال، شمال غرب و غرب قرار گیرد. در فصل تابستان نیز گاهی سیستم‌های کم فشار باران‌زا بر منطقه تأثیر گذاشته و بارندگی‌های تابستانه را ایجاد می‌کند. دریای خزر در شرق استان بر شرایط دمایی و رطوبتی آن اثر گذاشته و موجب تعدیل آب و هوا می‌شود. از نظر باد غالب، به‌طور کلی، شهر اردبیل تحت تأثیر دو نوع با قرار دارد:

الف) باد شرقی که در فصول مختلف سال می‌وزد و به باد مه یا باد خزری معروف است. این باد از طرف شرق به طرف غرب می‌وزد و رطوبت دریای خزر را با خود به این منطقه می‌آورد.

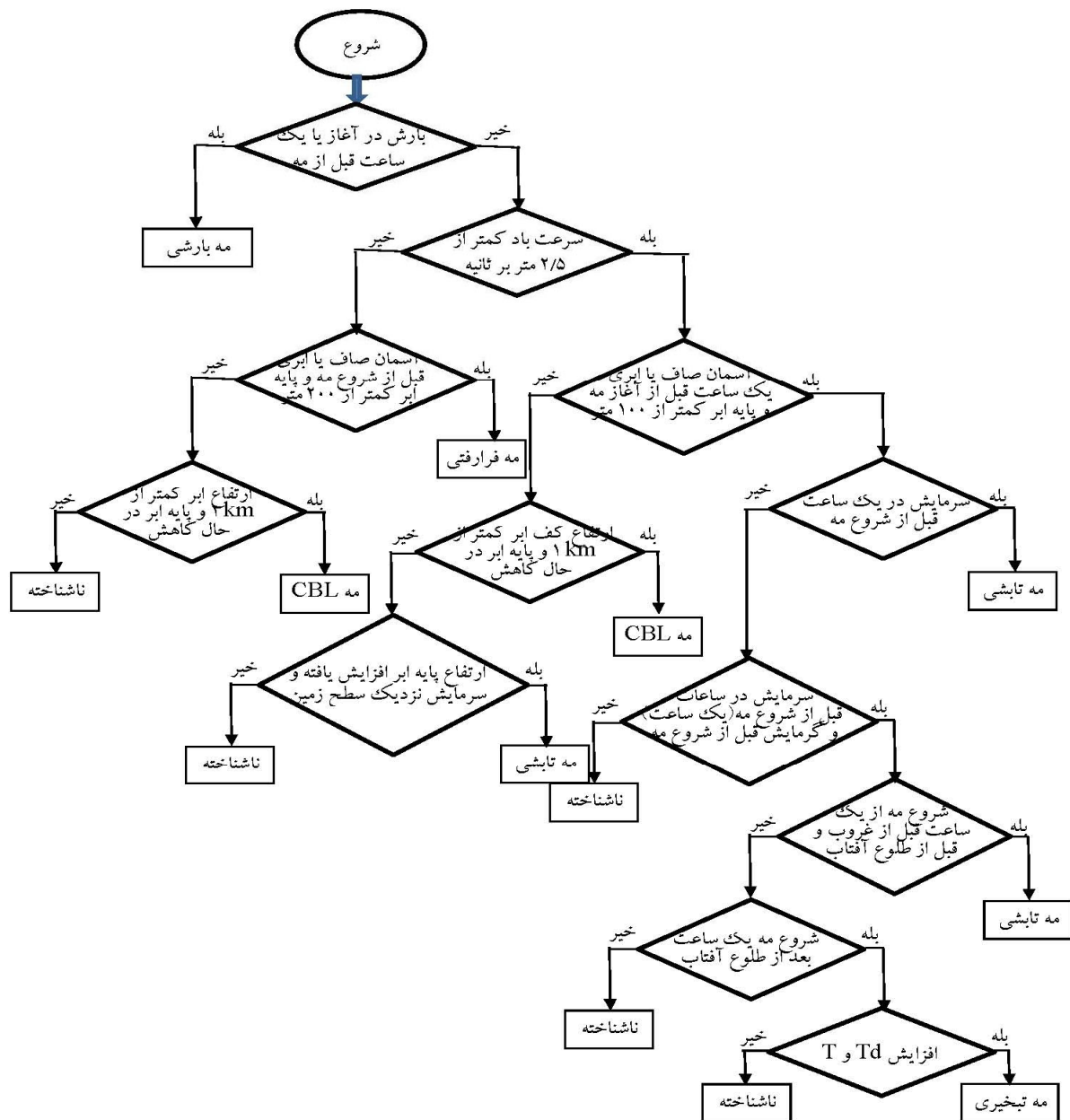
ب) باد غربی که در فصول مختلف سال می‌وزد و در اصطلاح محلی به باد گرمیچ معروف است. این باد در اثر عبور توده هوای مدیترانه‌ای می‌وزد و معروفترین باد در منطقه به شمار می‌رود که سبب تبخیر و خشکاندن زمین می‌شود.

این مطالعه خصوصیات اقلیمی رخداد مه در فرودگاه اردبیل را بررسی می‌کند. نزدیکی شهر اردبیل به دریای خزر و هم‌چنین وجود شهرک صنعتی در فاصله ۵ کیلومتری فرودگاه اردبیل باعث شده است تا تعداد رخدادهای مه در فرودگاه اردبیل به نسبت، زیاد باشد. به دلیل تعدد رخدادهای مه در فرودگاه اردبیل، شناخت اقلیم مه در این فرودگاه کمک بزرگی به تشخیص و پیش‌بینی به موقع این رخداد نموده و باعث کاهش تأخیر، لغو و یا خطرات جانی و مالی ناشی از آن می‌شود.

این مقاله به شرح زیر طراحی شده است: یک مرور کلی از انواع مه و داده‌های دیدبانی و روش کار در بخش ۲ شرح

می‌گیرد که هوای سرد و پایدار روی آب گرمتر حرکت کرده و اشباع شده و مه تبخیری یا مه بخار یا مه دود دریایی ایجاد می‌شود (آرنز و هنسان، ۲۰۱۸). مه (Cloud CBL) (Base Lowering fog) در اثر سرمایش قسمت پایین لایه مرزی و کاهش ارتفاع پایه ابر استراتوس ایجاد می‌شود (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

(رومن کسکان و همکاران، ۲۰۱۹). در شب دمای هوا در اثر سرمایش تابشی تا رسیدن به دمای نقطه شبنم کاهش می‌یابد و مه تابشی روی خشکی ایجاد می‌شود. مه فرارفتی در اثر جابه‌جایی و حرکت افقی هوای گرم و مرطوب دریا روی منطقه خنک ساحلی به وجود می‌آید (لین و همکاران، ۲۰۱۷). مه تبخیری یک نوع مه فرارفتی است و زمانی شکل



شکل ۱. الگوریتم دسته بندی انواع مه (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)

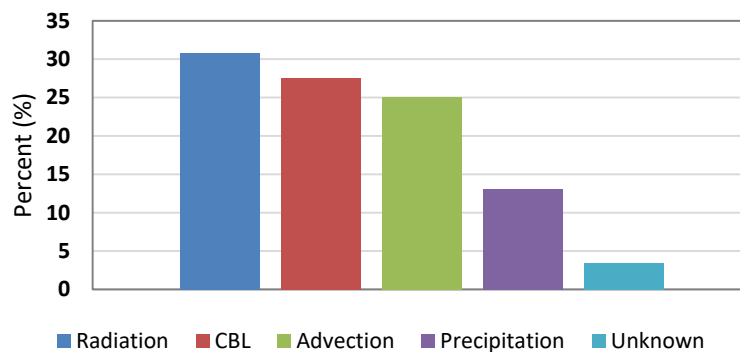
۳-۱- فراوانی انواع مه

الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) جهت طبقه‌بندی نوع هر رخداد مه در ایستگاه فرودگاه اردبیل به کار رفت. بر این اساس و آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است، در مجموع ۹۶/۵٪ از تمام رخداد‌های مه در یکی از چهار نوع مه دسته بندی شدند و تنها ۳/۵٪ از آنها ناشناخته باقی ماند. نتایج نشان می‌دهد که مه تابشی رایج‌ترین نوع مه در ایستگاه اردبیل با ۳۰/۸۴٪ از کل رخداد‌های مه است (شکل ۲). فراوانی مه ناشی از پایین آمدن پایه ابر، ۲۷/۵٪ و فراوانی مه فرارفتی که اغلب تحت تأثیر محیط دریایی شکل می‌گیرد، ۲۵٪ است. همچنین کمترین فراوانی رخداد مه مربوط به مه بارشی با فراوانی ۱۳٪ است. همچنین ۳/۵٪ از رخداد‌های مه طبق الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) ناشناخته باقی ماندند. تشکیل مه تبخیر صبحگاهی که ناشی از تبخیر سطح هنگام طلوع آفتاب است، در این ۱۰ سال در ایستگاه فرودگاه اردبیل دیده نشد.

مه بارشی زمانی رخ می‌دهد که باران یا برف نسبتاً گرم در هوای خنک و تقریباً اشباع می‌بارد و تبخیر قطرات باران یا برف هوای خنک را اشباع می‌کند. این نوع مه می‌تواند متراکم و غلیظ شود، برای مدت طولانی باقی بماند و ممکن است در مناطق وسیعی گسترش یابد. اگرچه این نوع مه معمولاً با جبهه‌های گرم رخ می‌دهد، ولی می‌تواند با جبهه های سردی که آهسته حرکت می‌کنند نیز همراه شود.

۳ بحث و نتایج

به منظور بررسی مه در فرودگاه اردبیل، پس از جداسازی رخداد‌های مه از داده‌های متار، انواع مه بر اساس الگوریتم تشخیص مه تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) مشخص شد و سپس 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 گرفتند.



شکل ۲. فراوانی انواع مه در ایستگاه اردبیل در دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

تابشی تمایل به ماندگاری بیشتر دارد به طوری که ۲۵٪ از رخداد‌های مه تابشی بیش از ۹ ساعت طول کشیده است. با توجه به اینکه مه تابشی معمولاً در شب ایجاد می‌شود و معمولاً پس از طلوع آفتاب از بین می‌رود، زمان رخداد این نوع مه طولانی‌تر است. پس از مه تابشی، مدت زمان رخداد مه فرارفتی طولانی‌تر از بقیه رخداد‌های مه است، به طوری که ۲۵٪ از رخداد‌های این نوع مه بیش از ۸ ساعت به طول انجامیده است. حرکت کند سامانه همدیدی وضع هوا برای انتقال هوای مرطوب دریا به سمت خشکی یکی از عوامل

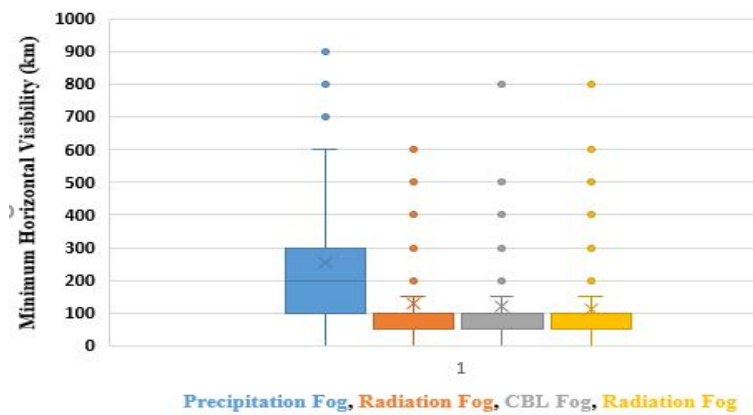
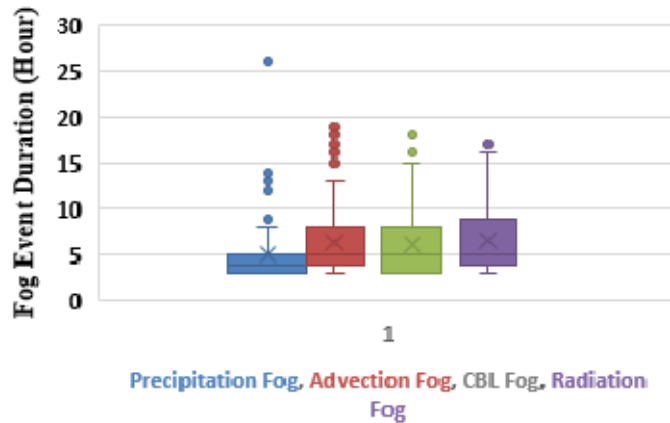
۳-۲- تراکم و مدت زمان رخداد مه

یکی از پارامترهای توصیف مه، شدت مه است که به صورت میزان کاهش دید و مدت زمان رخداد مه بیان می‌شود. توزیع مدت زمان رخداد‌های انواع مه در ایستگاه اردبیل طی دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ در شکل ۳-الف و تراکم آن‌ها در شکل ۳-ب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-الف مدت زمان رخداد مه بارشی در مقایسه با انواع دیگر مه کوتاهتر است به طوری که ۵۰ درصد رخداد‌ها ۳ ساعت و تنها ۲۵٪ از رخداد‌ها بیشتر از ۵ ساعت به طول انجامیده است. مه

به طوری که فقط ۲۵٪ از رخدادهای مه بارشی دارای دید کمتر از ۱۰۰ متر هستند و نیمی از آن دارای کمینه دید بیش از ۲۰۰ متر است. تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) نیز در مطالعه خود در ایالت نیویورک دریافتند که مه بارشی دارای غلظت کمتری نسبت به انواع دیگر مه است.

طولانی بودن مدت زمان رخداد مه فرارفتی است (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷). با توجه به شکل شکل ۳-ب، ۷۵٪ از رخدادهای مه فرارفتی، تابشی و CBL، دارای کمینه دید کمتر از ۱۰۰ متر بوده و در رده مه غلیظ قرار می گیرند. مه بارشی دارای غلظت کمتری به نسبت سه نوع مه دیگر است

الف



ب

شکل ۳-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 اردبیل دوره زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰

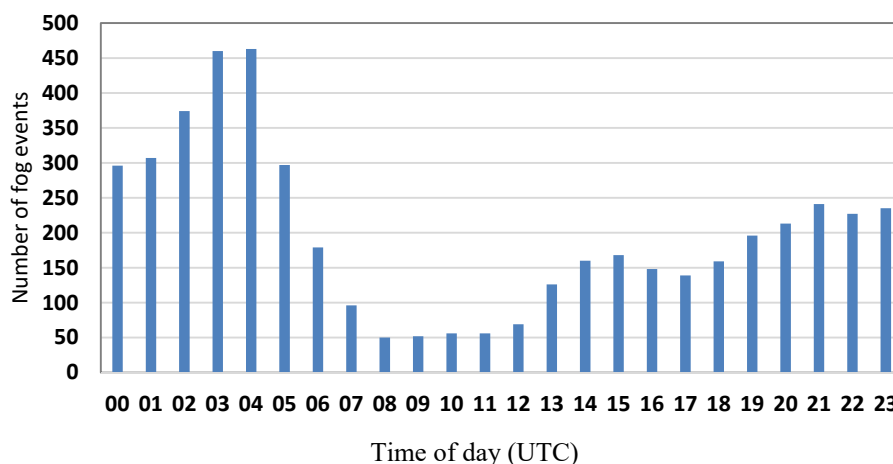
۳-۳- تنوع فصلی و روزانه مه

سرمایش تابشی در ساعات قبل از طلوع آفتاب باشد که به بیشترین حد خود می رسد (هوچ و همکاران، ۲۰۱۱، سیپلو و همکاران، ۲۰۱۹، زوزوآ و همکاران، ۲۰۲۱، ورسند و همکاران، ۲۰۱۷). زیرا کاهش دمای شدید باعث افزایش رطوبت نسبی تا ۱۰۰ درصد و تشکیل مه می شود. سیپلو و همکاران (۲۰۱۹) نیز در بررسی اقلیمی رخداد مه در کشور

ویژگی انواع مه با بررسی توزیع های زمانی مه بیشتر شناخته می شود. تعداد رخداد مه ثبت شده در ساعات مختلف شبانه روز در طول دوره آماری در ایستگاه اردبیل در شکل ۴ آمده است. با توجه به شکل، بیشترین گزارش رخداد مه در ساعات ۳ و ۴ گرینویچ بوده است. دلیل این امر می تواند

ظهر علت اصلی کاهش تعداد گزارشات مه در این ساعات است (سیپلو و همکاران، ۲۰۱۹). تعداد گزارشات مه از ساعت ۰۰ تا ۵ گریجویچ نسبتاً بیشتر است که با نتایج سیپلو و همکاران (۲۰۱۹) و تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) همخوانی دارد. تعداد زیاد گزارش مه در ساعات قبل از ۵ گریجویچ نشان دهنده این است که نوع غالب مه در این ایستگاه از نوع تابشی است (سیپلو و همکاران، ۲۰۱۹).

مجارستان، دریافتند که بیشترین بسامد رخداد مه قبل از طلوع آفتاب است. با طلوع خورشید و افزایش دمای هوا، مه تابشی که در اثر سرمایش تابشی تشکیل شد بود از بین می رود و فراوانی رخداد مه در بعد از ساعت ۵ گریجویچ به سرعت کاهش می یابد. تعداد کمتر رخدادهای مه پس از طلوع خورشید ناشی از انواع دیگر مه است (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷؛ هافلین و همکاران، ۲۰۱۰). هم چنین افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی در ساعات ظهر و بعد از



شکل ۴. تعداد رخداد مه ثبت شده در ساعات مختلف شبانه روز در طول دوره آماری در ایستگاه اردبیل

به نسبت دمای هوا در خشکی، شرایط برای ایجاد مه فرارفتی فراهم است (روچ، ۱۹۹۵؛ چو و همکاران، ۲۰۰۰؛ تیلور، ۱۹۷۷؛ کلین و هارتمن، ۱۹۹۳). در پاییز در طول روز، تابش خورشید باعث گرم شدن خشکی شده و اختلاف دمای بین خشکی و دریا باعث فرارفت مه دریایی از طریق ایجاد چرخه نسیم دریا می شود (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷). از طرفی گرمای ناشی از تابش نور خورشید باعث از بین رفتن مه در روی خشکی می شود. در نتیجه یک لایه مه دریایی در مجاورت ساحل باقی می ماند. به نظر می رسد که در طول شب با کاهش تابش خورشیدی و کاهش دما، یک لایه پایدار و تقریباً بدون تلاطم در روی خشکی ایجاد می شود و در نتیجه اختلاط تلاطمی نیز کاهش می یابد. بنابراین لایه مه دریایی تحت تأثیر شاخه برگشت نسیم دریا، یا شرایط همدیدی به

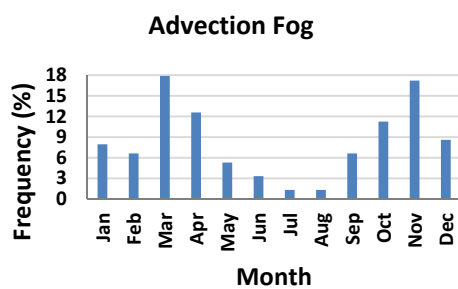
بسامد مه در ماه های مختلف سال برای هر نوع مه در شکل ۵ آمده است. توزیع زمانی مه تابشی (شکل ۵-الف) نشان می دهد که رخدادها اغلب در فصل پاییز و اوایل زمستان (سپتامبر تا دسامبر) رخ می دهد. تعدادی از پدیده های مه نیز در زمستان و اوایل بهار (ژانویه تا مارس) رخ می دهد. کمینه بسامد در ماه های آوریل تا اوت دیده می شود.

بسامد ماهانه مه فرارفتی شکل ۵-ب، دارای دو بیشینه یکی در اوایل بهار (ماه مارس) و دیگری در اواخر پاییز (ماه نوامبر) است. پس از ماه نوامبر بسامد رخداد مه فرارفتی کاهش می یابد (ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه). مقدار کمینه مه فرارفتی نیز در اواخر بهار تا اواخر تابستان دیده می شود (ژوئن تا اوت). مطالعات پیشین نشان داده است که در اوایل فصل بهار با افزایش دمای هوا در خشکی و کمتر بودن دمای آب دریا

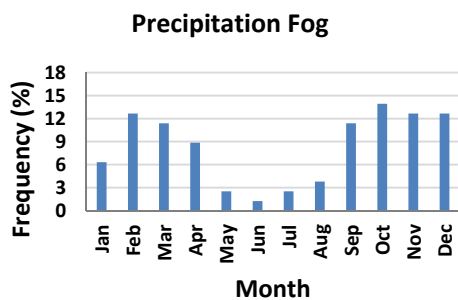
مرزی مهم‌ترین فرآیندی است که باعث ایجاد مه در فصل بهار می‌شود، در حالی که رخدادهای فصل زمستان می‌تواند به سامانه‌های جوی بزرگ مقیاس مرتبط باشد.

بسامد ماهانه مه بارشی در شکل ۵- د نشان داده شده است. بیشینه رخدادها در فصل پاییز و اوایل زمستان (سپتامبر تا دسامبر) و هم‌چنین اواخر زمستان و اوایل بهار (فوریه تا آوریل) دیده می‌شود. کمینه رخدادهای مه بارشی نیز در اواخر بهار و تابستان (می تا اوت) مشاهده می‌شود. از آنجا که مه بارشی به عوامل بزرگ مقیاس بستگی دارد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)، بیشینه رخداد این نوع مه در پاییز و زمستان دیده می‌شود.

ب



د



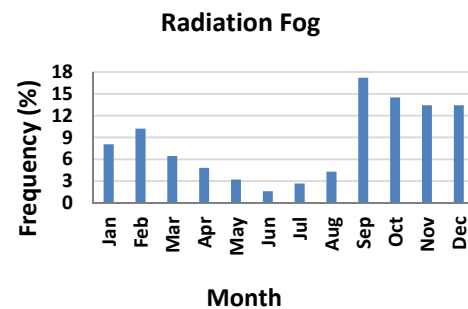
شکل ۵. بسامد مه در ماه‌های مختلف سال برای الف) مه تابشی، ب) مه فرارفتی، ج) مه CBL و د) مه بارشی.

به مطالعات پیشین، آلودگی هوا و وجود ذرات آلاینده در جو می‌تواند باعث افزایش مه شود (چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ موهان و پیرا، ۲۰۰۹). وجود شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل در فاصله ۵ کیلومتری فرودگاه اردبیل می‌تواند باعث افزایش رخدادهای مه در ایستگاه فرودگاه اردبیل شود. از طرفی روند

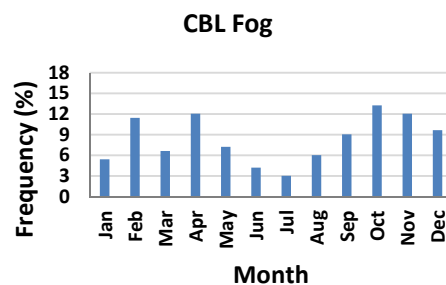
اجبار به سوی خشکی منتقل می‌شود و سپس با شرایط گفته شده و ایجاد لایه خنک در روی خشکی گسترش می‌یابد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

توزیع ماهانه مه CBL شکل ۵-ج، دارای تغییرپذیری کمتری نسبت به انواع دیگر مه است. این رفتار مه CBL با نتایج تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) همخوانی دارد. اگر چه ۳ بیشینه در بسامد ماهانه در ماه‌های فوریه، آوریل و اکتبر تا نوامبر دیده می‌شود. کمینه بسامد ماهانه نیز در ماه‌های ژانویه و ژوئیه رخ داده است. تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) بر اساس تغییرات ماهانه انواع مه بیان کرده‌اند که با توجه به شباهت های میان دو مه بارشی و CBL، به نظر می‌رسد سرمایه‌های لایه

الف



ج



۳-۴- تغییرات سالانه رخداد مه

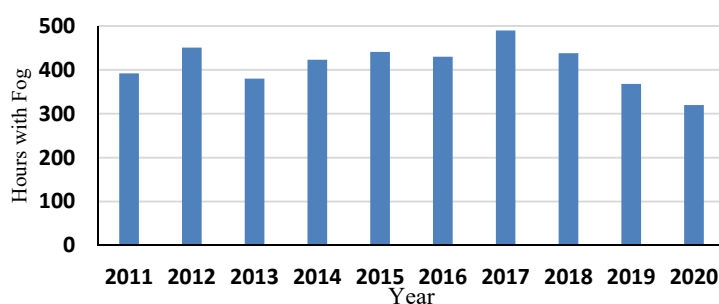
تغییرات فراوانی ساعت‌های همراه با مه در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سال‌های مورد مطالعه روند مشخصی در تعداد ساعات همراه با مه دیده نمی‌شود، به جز سه سال آخر که روند کاهشی داشته است (شکل ۶). با توجه

مه غلیظ در همه ماه‌ها به جز ژانویه، فوریه و مارس بیشتر از تعداد رخدادهای مه هست. شکل ۸ توزیع فراوانی کمینه دید افقی در طول رخدادهای مه در ایستگاه اردبیل را در طول دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ اغلب رخدادهای مه دارای دید کمینه ۱۰۰ متر و سپس ۵۰ متر هستند. این قضیه اهمیت پدیده مه در این فرودگاه را از نظر ترافیک هوایی نشان می‌دهد، زیرا مه غلیظ نشست و برخاست هواپیما را دچار مشکل می‌کند.

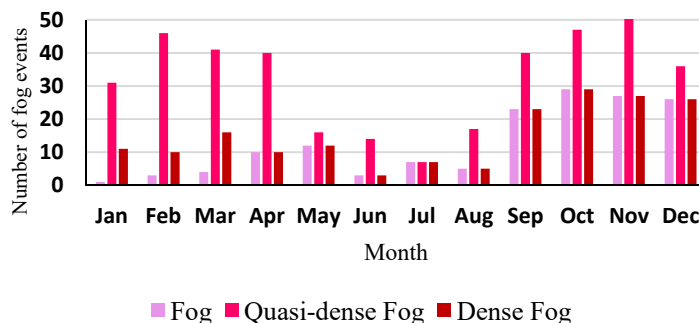
کاهش تعداد ساعات همراه با مه از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ را می‌توان ناشی از تعطیلی برخی از واحدهای تولیدی در این شهرک صنعتی دانست.

۳-۵- غلظت مه

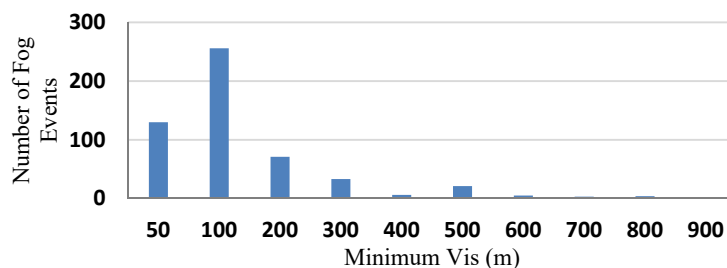
شکل ۷ فراوانی رخداد انواع مه از نظر غلظت در ماه‌های مختلف سال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در همه ماه‌ها به جز ماه اوت، تعداد رخدادهای مه شبه غلیظ در فرودگاه اردبیل بیشتر از مه و مه غلیظ است. هم‌چنین تعداد رخدادهای



شکل ۶. توزیع سالانه فراوانی ساعات همراه با مه در ایستگاه اردبیل در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰



شکل ۷. فراوانی رخداد انواع مه از نظر غلظت در ماه‌های مختلف سال



شکل ۸. توزیع فراوانی کمینه دید افقی در طول رخدادهای مه در ایستگاه اردبیل

۴ نتیجه گیری

هدف مطالعه کنونی بررسی وضعیت اقلیمی رخدادهای مه و خصوصیات آن در فرودگاه اردبیل بوده است. برای این منظور از داده‌های دیدبانی متار این فرودگاه استفاده شد و همه رخدادهای مه در طول مدت مطالعه (از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) تفکیک شدند. سپس طبق الگوریتم تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) نوع رخدادهای مه مشخص شد. نتایج نشان داد که از بیشترین فراوانی رخدادهای مه مربوط به تابشی با فراوانی ۳۰/۸۴٪ از کل رخدادهای مه است. نادرترین نوع مه نیز مه بارشی با فراوانی ۱۳٪ کل رخدادهای مه است. از نظر مدت زمان رخدادهای مه، با توجه به اینکه مه تابشی معمولاً در شب ایجاد می‌شود و معمولاً پس از طلوع آفتاب از بین می‌رود، این نوع مه طولانی‌ترین زمان رخدادهای مه را داشته است. همچنین مدت زمان رخدادهای مه بارشی کوتاهتر از انواع دیگر مه است. طول مدت رخدادهای مه فرارفتی که ناشی از انتقال هوای مرطوب دریای خزر به منطقه مورد مطالعه بوده است نیز بیشتر از مه بارشی بوده است که می‌تواند ناشی از حرکت کند سامانه همدیدی وضع هوا برای انتقال هوای مرطوب دریا به سمت خشکی باشد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷). ۷۵٪ از رخدادهای فرارفتی، تابشی و CBL دارای کمینه دید کمتر از ۱۰۰ متر بودند. مه بارشی نیز کم‌ترین غلظت را از نظر کمینه دید افقی داشت.

بیشترین گزارش رخدادهای مه در طول سال‌های مورد مطالعه در ساعات ۳ و ۴ گرینویچ بود. دلیل این امر می‌تواند سرمایش تابشی در ساعات قبل از طلوع آفتاب باشد که به بیشترین حد خود می‌رسد (هوچ و همکاران، ۲۰۱۱، سیپلو و همکاران، ۲۰۱۹، زوزوآ و همکاران، ۲۰۲۱، ورستد و همکاران، ۲۰۱۷). این نتیجه با نتایج مطالعه سیپلو و همکاران (۲۰۱۹) و تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) همخوانی دارد.

توزیع ماهانه مه تابشی نشان داد که رخدادهای اغلب در فصل پاییز و اوایل زمستان (سپتامبر تا دسامبر) رخ می‌دهد. بسامد ماهانه مه فرارفتی دارای دو بیشینه یکی در اوایل بهار (ماه مارس) و دیگری در اواخر پاییز (ماه نوامبر) بود. مطالعات

پیشین نشان داده است که در اوایل فصل بهار با افزایش دمای هوا در خشکی و کمتر بودن دمای آب دریا به نسبت دمای هوا در خشکی، شرایط برای ایجاد مه فرارفتی فراهم است (روچ، ۱۹۹۵؛ چو و همکاران، ۲۰۰۰؛ تیلور، ۱۹۷۷؛ کلین و هارتمن، ۱۹۹۳). توزیع ماهانه مه CBL دارای تغییرپذیری کمتری نسبت به انواع دیگر مه بود. این رفتار مه CBL با نتایج تردیف و راسموسن (۲۰۰۷) همخوانی دارد. بسامد ماهانه مه بارشی دارای دو بیشینه در فصل پاییز و اوایل زمستان (سپتامبر تا دسامبر) و همچنین اواخر زمستان و اوایل بهار (فوریه تا آوریل) بود. از آنجا که مه بارشی به عوامل بزرگ مقیاس بستگی دارد (تردیف و راسموسن، ۲۰۰۷)، بیشینه رخدادهای این نوع مه در پاییز و زمستان دیده شد. از نظر تغییرات سالانه رخدادهای مه، روند مشخصی در تعداد ساعات مه در طول سال‌های مورد مطالعه (به جز سه سال آخر که روند کاهشی داشت) دیده نشد. با توجه به مطالعات پیشین که بیانگر افزایش رخدادهای مه با وجود آلودگی هوا و وجود ذرات آلاینده در جو بود (چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ موهان و پیرا، ۲۰۰۹)، وجود شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل در فاصله ۵ کیلومتری فرودگاه اردبیل می‌تواند باعث افزایش رخدادهای مه در ایستگاه فرودگاه اردبیل شود. از طرفی روند کاهشی تعداد ساعات همراه با مه از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ را می‌توان ناشی از تعطیلی برخی از واحدهای تولیدی در این شهرک صنعتی دانست. از نظر غلظت مه نیز، اغلب رخدادهای مه دارای دید کمینه ۱۰۰ متر و سپس ۵۰ متر بودند.

۵ قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار قرار دادن داده‌های متار ایستگاه فرودگاه اردبیل صمیمانه تشکر می‌نمایند.

۶ منابع

جهانگیری، ح.، عسگری، ا.، ۱۳۹۶، بررسی پدیده مه اردبیل با استفاده از داده‌های آماری، هفتمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، <https://civilica.com/doc/807879>

- 50, 2473-2489, DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-083.1>.
- Kui, Chen., Yan, Yin., and Zhenhua, Hu., 2011, Influence Of Air Pollutants On Fog Formation In Urban Environment Of Nanjing, China. *International Conference on Advances in Engineering*, 654-657
- LaDochy, S., 2005, The disappearance of dense fog in Los Angeles: another urban impact? *Physical Geography*, 26 (3), 177-191.
- Lange, CA., Matschullat, J., Zimmermann, F., Sterzik, G., Wienhaus, O., 2003, Fog frequency and chemical composition of fog water—a relevant contribution to atmospheric deposition in the Eastern Erzgebirg, Germany. *Atmospheric Environment*, 37, 3731-3739.
- Lin, C. Y., Zhang, Z. F., Pu, Z. X., et al., 2017, Numerical simulations of an advection fog event over Shanghai Pudong International Airport with the WRF model. *Journal of Meteorological Research*, 31(5), 874-889.
- Met Office., 2005, The Great Smog of 1952. <http://www.metoffice.gov.uk/education/teens/case-studies/great-smog> Accessed 23 March 2013
- Mohan, M., Payra, S., 2009, Influence of aerosol spectrum and air pollutants on fog formation in urban environment of megacity Delhi, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 151(1-4), 265-77. doi: 10.1007/s10661-008-0268-8.
- National Oceanic and Atmospheric Administration., 1995, Surface weather observations and reports. Federal Meteorological Handbook No. 1.
- O'Brien, TA., Sloan, LC., Chuang, PY., Faloona, IC., and Johnstone, JA., 2012, Multidecadal simulation of coastal fog with regional climate model. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-012-1486-x
- Peace, R.L. Jr., 1969, Heavy-Fog Regions In The Conterminous United States. *Monthly Weather Review*, 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)
- Roman-Cascón, C., Yagüe, C., Steeneveld, G. J., Morales, G., Arrillaga, J.A., Sastre, M. and Maqueda, G., 2019, Radiation and cloud-base lowering fog events: Observational analysis and evaluation of WRF and HARMONIE. *Atmospheric Research*, 229, 190-207.
- Sachweh, M., and Koepke, P., 1997, Fog dynamics in an urbanized area. *Theoretical and Applied Climatology*, 58, 87-93.
- Shi, C., Roth, M., Zhang, H., B and Li, Z., 2008, Impacts of urbanization on longterm fog variation in Anhui Province, China. *Atmospheric Environment*, 42, 8484-8492.
- صلاحی، ب.، محمدی، س.، ۱۳۹۰، تحلیل هم‌دید و آماری مه‌های فرودگاه اردبیل و ارائه‌ی ساعات مناسب پروازی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۷، ۹۲-۶۹.
- Ahrens, C. D., and Henson, R., 2018, *Meteorology today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 12th Edition. Cengage Learning.
- Akimoto, Y., and Kusaka, H., 2014, A climatological study of fog in Japan based on event data. *Atmospheric Research*, 003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres>.
- Bendix, J., 2002, A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas. *Atmospheric Research*, 64, 3-18.
- Błas, M., Sobik, M., Quiel, F., and Netzel, P., 2002, Temporal and spatial variations of fog in the Western Sudety Mts., Poland. *Atmospheric Research*, 64, 19-28
- Cséplő, A., Sarkadi, N., Horváth, Á., Schmeller, G., and 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>.
- Cereceda, P., Osses, P., Larrain, H., Farias, M., Lagos, M., Pinto, R., and Schemenauer, RS., 2002, Advective, orographic and radiation fog in the Tarapaca Region Chile. *Atmospheric Research*, 64, 261-271.
- Chen, K., Yin, Y., and Hu, Z., 2011, Influence of Air Pollutants On Fog Formation in Urban Environment of Nanjing, China, *Procedia Engineering*, 24, 654-657.
- Garcia-Garcia, F., and Zarraluqui, V., 2008, A fog climatology for Mexico. *Erde*, 139, 45-60.
- Gultepe, I., Milbrandt, J. A., and Zhou, B., 2017, Marine fog: A review on microphysics and visibility prediction (Chap. 7). In D. Koracin and C. E. Dorman (Eds.), *Marine fog: Challenges and advancements in observations, modeling and forecasting*. New York: Springer.
- 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., and Zhang, X. (2010, PARISFOG: shedding new light on fog physical processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 767-783, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2671.1>.
- Hardwick, W.C., 1973, Monthly fog frequency in the continental United States. *Monthly Weather Review*, 101 (10), 763-766.
- Hoch, SW., Whiteman, DC., and 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*,

- Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10811–10835, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10811-2017>.
- Witiw, MR., and LaDochy, S., 2008, Trends in fog frequencies in the Los Angeles Basin. *Atmospheric Research*, 87, 293–300.
- WMO., 2011, Manual on codes, international codes. Technical Report, World Meteorological Organization, Geneva Switzerland.
- Yoshino, M., 1975, Climate in a Small Area: An introduction to Local Meteorology. University of Tokyo Press, Tokyo pp. 549.
- Zouzoua, M., Lohou, F., Assamoi, P., Lothon, M., Yoboue, V., Dione, C., Kalthoff, N., Adler, B., Babić, K., Pedruzo-Bagazgoitia, X., and 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>
- Singh, A., Dey, S., 2012, Influence of aerosol composition on visibility in megacity Delhi. *Atmospheric Environment*, 62, 367–373.
- Syed, FS., Kornich, H., and Tjernstrom, M., 2012, On the fog variability over South Asia. *Climate Dynamics*, 39, 2993–3005.
- Tardif, R., and Rasmussen, R.M., 2007, Event-based climatology and typology of fog in the NewYork City region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (8), 1141–1168.
- Tsai, YI., Kuo, SC., Lee, WJ., Chen, CL., and Chen, PT., 2007, Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized and two rural areas of Taiwan. *Science of the Total Environment*, 382, 324–341.
- Wærsted, E. G., Haeffelin, M., Dupont, J.-C., Delanoë, J., and Dubuisson, P., 2017, Radiation in fog: quantification of the impact on fog liquid water based on ground-based remote sensing,