

## تحلیل اقلیم‌شناسی مه در ایران بر پایه داده‌های مشاهداتی

بهاره طاهری اول‌شهری<sup>۱</sup>، عباس مفیدی<sup>۲\*</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۳</sup> و آذر زرین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸)

### چکیده

در این مطالعه اقلیم‌شناسی مه در ایران بررسی شد. برای این منظور از داده‌های ۷۳ ایستگاه هواشناسی همدیدی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) برای دو متغیر وضعیت هوای حاضر (کدهای معرفّ مه ۴۰ تا ۴۹) و دید افقی استفاده شد. ابتدا فراوانی وقوع مه در دو مقیاس ساعتی (۳ ساعته) و سالانه برای تمامی ایستگاه‌ها، بررسی شد. در ادامه، با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land مقادیر رطوبت‌نسبی و اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم محاسبه شد و توزیع جغرافیایی مه در کشور و در ایستگاه‌های منتخب مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس روند تغییرات وقوع مه در ایران بررسی شد. در نهایت، بر پایه دید افقی و تعریف چهار دسته اصلی، غلظت مه در دو مقیاس سالانه و ساعتی برای تمامی ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که، در تمامی مناطق جغرافیایی ایران، پدیده مه عمدتاً یک رخداد شبانه است که طی ساعات شب و ساعات‌های اولیه صبح بوقوع می‌پیوندد. فراوانی مه در طی شبانه روز، یک روند افزایشی را از کمینه ساعت ۱۲ تا بیشینه ساعت ۳ گرینویچ تجربه می‌کند. در این میان، ایستگاه‌های واقع در استان اردبیل و جنوب‌غربی دریای خزر، بالاترین تعداد مه را در مقیاس‌های ساعتی و سالانه تجربه می‌نمایند. فرودگاه اردبیل با میانگین سالانه ۱۲۰ روز در سال و بیشینه ساعتی ۵۷ رخداد در ساعت ۳ گرینویچ، مه‌آلودترین ایستگاه کشور محسوب می‌شود. بررسی غلظت مه نشان داد که، فراگیرترین و رایج‌ترین نوع مه در ایران مه رقیق است که در مناطق غربی و مناطق خشک داخلی کشور بر سایر انواع مه غلبه دارد. در مقابل، مه‌های خیلی غلیظ در جنوب‌غربی دریای خزر و استان اردبیل تمرکز یافته‌اند. روند تغییرات وقوع مه در ایران نشان داد که این پدیده در ۵۸٪ از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است. همچنین، تقریباً تمامی کلان‌شهرهای کشور از یک روند کاهشی در فراوانی وقوع مه برخوردارند که می‌توان آن را با تغییر الگوی شهرنشینی در طول سه دهه گذشته مرتبط دانست.

**کلمه‌های کلیدی:** ایران، روند تغییرات مه، غلظت مه، کاهش دید افقی، مه

## ۱ مقدمه

مه یکی از پدیده‌های رایج جوّی است که در مناطق مختلف جهان به وقوع می‌پیوندد. بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی، مه زمانی تشکیل می‌شود که بخار آب موجود در هوا به شکل قطرات بسیار کوچک آب، متراکم شوند و این قطرات معلق دید افقی را به زیر ۱۰۰۰ متر کاهش دهند (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۲۲). ماهیت فیزیکی مه و ابر یکسان است و در واقع مه، ابری است که سطح زمین را لمس می‌کند (پرز-دیز و همکاران، ۲۰۱۷). در برخی مناطق، مه زمانی تشکیل می‌شود که بین دو توده هوا اختلاف دما وجود داشته باشد و توده هوای سردتر در زیر توده هوای گرم محبوس شود و به‌طور ضمنی رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد یا نزدیک به آن باشد. در این صورت هرگونه اضافه شدن بخار آب به جوّ سبب تشکیل مه می‌شود. همچنین ممکن است مه در نتیجه عبور جریان هوای گرم از روی سطح نسبتاً سرد زمین تشکیل شود که نوع دیگری از انواع مه را تشکیل می‌دهد (آکرم و ناکس، ۲۰۰۷).

مه از ترکیب عوامل تأثیرگذار متنوعی شکل می‌گیرد که می‌توانند در خردمقیاس (همانند خواص شیمیایی و فیزیکی هسته‌های چگالش بخار آب فراوان در هوا، مهم‌ترین عامل در وقوع مه و پایداری آن است. خواص خردفیزیکی CCN، ویژگی‌های ترمودینامیکی جو، شرایط لایه مرزی، همگی در شکل‌گیری مه، پراکندگی آن و فراوانی رخداد آن نقش دارند (گلته و همکاران، ۲۰۰۷).

وقوع مه به‌عنوان یکی از پدیده‌های جوی، تأثیرات دوگانه‌ای بر فعالیت‌های انسانی دارد (گلته و همکاران، ۲۰۰۷). در نگاه مثبت، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مه پتانسیل قابل توجهی برای تأمین منابع آب شیرین جایگزین ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر فناوری، این پدیده همچنان به‌عنوان یک چالش جدی در صنعت هوانوردی مطرح است. همچنین کاهش

دید افقی ناشی از مه، تهدیدی جدی برای ایمنی حمل‌ونقل دریایی و جاده‌ای محسوب می‌شود، زیرا با ایجاد اختلال در این سیستم‌ها، ایمنی جانی و مالی افراد را به مخاطره می‌اندازد (کرافت و همکاران، ۱۹۹۷). با توجه به تأثیرات گسترده مه بر فعالیت‌های انسانی، سلامت عمومی و محیط زیست، این پدیده از دیرباز موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است. پیشینه مطالعات مه به دوران باستان بازمی‌گردد، به‌طوری که حتی در آثار ارسطو نیز اشاراتی غیرمستقیم به این پدیده یافت می‌شود (نیومن، ۱۹۸۹). در حوزه دریانوردی، مه همواره به‌عنوان یک مسئله حائز اهمیت مورد توجه دریانوردان و دریاسالاران قرار گرفته است. پلینی (۷۹-۲۳ میلادی)، مورخ و دریاسالار برجسته روم باستان، در اثر خود با عنوان «تاریخ طبیعی»، نتیجه پدیده مه را این‌گونه توصیف کرده است: «نزول مه از ارتفاعات کوهستانی یا فرود آن از آسمان و تجمع در دره‌ها، نشانه‌ای از فرارسیدن شرایط جوی مطلوب است» (جانسون، ۱۹۴۱). پژوهش در زمینه پدیده مه و تأثیرات آن بر زندگی بشر از ابتدای قرن بیستم مورد توجه محققان قرار گرفته است (تیلور، ۱۹۱۷؛ جورجیل، ۱۹۴۰). با این حال، محدودیت‌های تجهیزاتی و کمبود داده‌های مناسب برای سال‌های متمادی، دستیابی به تبیین علمی دقیق از چگونگی شکل‌گیری این پدیده جوی را با چالش مواجه ساخته بود. نقطه عطف مطالعات مه را می‌توان در پژوهش‌های ویلت (۱۹۲۸) جستجو کرد که با بررسی سازوکارهای فیزیکی و عوامل مؤثر در تشکیل مه، طبقه‌بندی جامعی از این پدیده ارائه نمود. این طبقه‌بندی بعدها مبنای پژوهش‌های گسترده‌تر در این حوزه قرار گرفت. در ادامه این مسیر، بایرز (۱۹۵۹) با تکیه بر یافته‌های ویلت، طبقه‌بندی یازده‌گانه‌ای از انواع مه ارائه کرد. در دهه‌های اخیر، پژوهشگرانی همچون میر و لالا (۱۹۸۶) و تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷) با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی، به تکمیل و توسعه طبقه‌بندی‌های پیشین پرداختند. به‌ویژه، تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷) در

فرآیندهای تکوین آن و تغییرات زمانی-مکانی این پدیده انجام شده‌اند. در این دسته از پژوهش‌ها، محققان از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای بهره گرفته‌اند. دسته دوم، تحقیقاتی را شامل می‌شود که بر پیش‌بینی و مدل‌سازی پدیده مه متمرکز شده‌اند. این مطالعات با هدف توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و شبیه‌سازی شرایط تشکیل و گسترش مه انجام گرفته‌اند. دسته سوم، پژوهش‌هایی هستند که به بررسی پیامدها و اثرات مه، به‌ویژه خسارات ناشی از آن در بخش حمل‌ونقل پرداخته‌اند. این گروه از مطالعات، طیف گسترده‌ای از محققان از رشته‌های مختلف را در بر می‌گیرد و محدود به متخصصان هواشناسی و اقلیم‌شناسی نمی‌شود.

مطالعات در زمینه اقلیم‌شناسی مه سابقه‌ای طولانی دارد که به بیش از شصت سال می‌رسد. پژوهشگران مختلفی به بررسی ویژگی‌های اقلیم‌شناسی این پدیده در نقاط مختلف جهان، به‌ویژه در آمریکای شمالی پرداخته‌اند. از جمله این محققان می‌توان به پیس (۱۹۶۹)، هاردویک (۱۹۷۳) و موراکا و همکاران (۲۰۰۱) اشاره کرد. در این راستا، مطالعات گسترده‌ای در مناطق مختلف جغرافیایی انجام شده است. لادوچی (۲۰۰۵) به بررسی این پدیده در لس‌آنجلس پرداخت، هانسیاک و وانگ (۲۰۰۵) مطالعاتی را در قطب شمال کانادا انجام دادند، فورتون و همکاران (۲۰۰۶) جنوب شرقی ایالات متحده را مورد مطالعه قرار دادند و آکیموتوی و کوساک (۲۰۱۵) این پدیده را در ژاپن بررسی کردند. این پژوهشگران جنبه‌های مختلفی از پدیده مه را مورد توجه قرار دادند که شامل چگونگی شکل‌گیری، تکوین و از بین رفتن مه، روندهای افزایشی و کاهش، و همچنین شدت و فراوانی وقوع آن می‌شود. این تحقیقات، درک عمیقی از پدیده‌های اقلیمی مه در مقیاس‌های مختلف جغرافیایی فراهم آورده است.

فناوری سنجش از دور تحولی عظیم در عرصه مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی ایجاد کرده است. این تحول به‌ویژه

تکمیل مطالعات میر و لالا (۱۹۸۶)، طبقه‌بندی نوینی را معرفی کردند که در آن انواع مه بر اساس سازوکارهای حاکم بر شکل‌گیری آن‌ها به پنج دسته اصلی تقسیم شده است. این طبقه‌بندی که امروزه مرجع بسیاری از پژوهش‌های علمی در این حوزه است، شامل مه بارشی، مه تابشی، مه فرارفتی، مه ناشی از کاهش ارتفاع پایه ابر (CBL) و مه تبخیر صبحگاهی می‌شود (میر و لالا، ۱۹۸۶؛ تاردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

فلات ایران سرزمینی نسبتاً مرتفع است که با کوه‌های بلند احاطه شده است. تنوع ویژگی‌های جغرافیایی در این سرزمین، تنوع اقلیمی را در پی داشته است. این ویژگی سبب گردیده تا پدیده‌های اقلیمی با مقیاس محلی در گستره جغرافیایی ایران از تنوع بالایی برخوردار گردند.

همانطور که پیشتر گفته شد، پدیده مه یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جوی تأثیرگذار بر صنایع مختلف به‌ویژه صنعت حمل‌ونقل می‌باشد. کوهستانی بودن ایران بخصوص در غرب و شمال و عبور جاده‌های بین شهری از گردنه‌ها باعث شده است تا بسیاری از این محورهای مواصلاتی با وقوع مه غلیظ در طول سال همراه باشند. برخی از این مناطق عبارتند از جاده چالوس، جاده هراز و گردنه گدوک در شمال ایران، گردنه اسدآباد- همدان و جاده میانه-زنجان در غرب کشور و گردنه حیران در حدفاصل استان‌های گیلان و اردبیل. مه همچنین می‌تواند پیامدهای زیان‌بار دیگری نیز داشته باشد. به‌طوری که بسته به ماهیت فیزیکی و شیمیایی و ترکیب قطرات مه به‌ویژه بر فراز مناطق شهری و صنعتی، این پدیده می‌تواند پیامدهای نامطلوب بر سلامت انسان از جمله بیماری‌های تنفسی و آسیب‌های پوستی و چشمی داشته باشد (کامپا و کاستاناس، ۲۰۰۸).

مطالعات انجام شده در زمینه پدیده مه را می‌توان در سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد. دسته اول، پژوهش‌هایی هستند که به بررسی جنبه‌های فیزیکی و دینامیکی مه می‌پردازند. این مطالعات با تمرکز بر سازوکارهای شکل‌گیری مه،

مدل‌های عددی بسیار دشوار است.

از آنجایی که وقوع مه در طول تاریخ برای حمل‌ونقل زمینی، دریایی و هوایی مشکلات بسیاری را به همراه داشته است. به همین دلیل، مطالعات متعددی در رابطه با پیامدهای وقوع مه بر حمل‌ونقل صورت گرفته است. در این بین می‌توان به مطالعات دی وایلرز و ون هیردن (۲۰۰۷)، استولاکی و همکاران (۲۰۰۹)، ون شالک و ایک و دایسون (۲۰۱۳)، اوزدمیر و همکاران (۲۰۱۶)، کویانکو و همکاران (۲۰۱۹) و آکسو (۲۰۱۹) اشاره نمود. این مطالعات با بررسی وقوع مه بر پایه داده‌های مختلف مشاهداتی، ایستگاهی، ماهواره‌ای، رادیوسوند و حتی مدل‌ها، سازوکارهای فیزیکی وقوع مه و اثرات آن را بررسی نموده و به کاهش هزینه‌های ناشی از دید کم برای شرکت‌های حمل‌ونقل به‌ویژه حمل‌ونقل هوایی کمک کردند.

اگرچه پدیده مه و وقوع آن که در سطح جهانی مورد توجه طیف گسترده‌ای از پژوهشگران بوده است، اما در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود، پدیده مه در ایران توسط صلاحی و محمدی (۱۳۹۰)، اریکان و همکاران (۱۳۹۲)، تاجبخش (۱۳۹۵)، تاجبخش و رهنما (۱۳۹۶)، تاجبخش و همکاران (۱۳۹۷)، پهلوان و همکاران (۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-الف) و پهلوان (۱۴۰۲) مطالعه شده است. این مطالعات عمدتاً ویژگی‌های آماری و یا همدیدی مه را در چند فرودگاه منتخب با استفاده از داده‌های ایستگاهی و یا سنجش از دور مورد بررسی قرار دادند. بدین ترتیب، سوابق تحقیق از محدود بودن مطالعات انجام شده در رابطه با پدیده مه و ویژگی‌ها و ساختار آن در ایران حکایت می‌کند. در واقع، هنوز در بسیاری از ایستگاه‌های کشور، وضعیت وقوع مه، مه‌گرفتگی و پیامدهای آن بر نشست و برخاست هواپیماها و نقش آن در لغو پروازها، ترافیک شهری و جاده‌ای بررسی کافی نشده و گزارش‌های علمی مناسبی در این رابطه وجود ندارد. بر این اساس، مطالعه حاضر درصدد آن است تا یک بررسی اقلیم‌شناسی از

در زمینه پایش و مطالعه پدیده مه از طریق داده‌های ماهواره‌ای نمود بارزی یافته است. مزایای منحصر به فرد تصاویر ماهواره‌ای از جمله دوره بازگشت کوتاه‌مدت، پوشش گسترده جغرافیایی و بهره‌مندی از طیف وسیعی از باندهای طیفی (از مرئی تا فروسرخ)، سبب افزایش چشمگیر کاربرد این داده‌ها در سال‌های اخیر شده است (کیم و همکاران، ۲۰۲۳). این گروه از مطالعات طیف گسترده‌ای را از منظر روش‌شناسی و داده در بر می‌گیرند که از شاخص‌ترین این تحقیقات می‌توان به مطالعات بشو و همکاران (۲۰۱۶)، کیم و هونگ (۲۰۱۹)، ریو و هونگ (۲۰۲۰)، یانگ و همکاران (۲۰۲۱)، سینگ و گوم (۲۰۲۲)، بی و همکاران (۲۰۲۳)، یانگ و همکاران (۲۰۲۳) و پائولی و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کرد. نتایج این مطالعات نشان داد که استفاده از روش‌های پیشرفته در بررسی وقوع مه هر چند نگرش عمیقی را در خصوص این پدیده جوئی ایجاد می‌نماید، اما به دلیل مشابه بودن ویژگی‌های طیفی پدیده مه با یخ، برف و ابرها، در عمل هنوز داده‌های ماهواره‌ای قادر نیستند به‌طور کامل سازوکار تشکیل مه را در مقیاس منطقه‌ای آشکار نمایند، لذا نتایج این مطالعات با خطاهای قابل توجهی همراه هستند.

مطالعات زیادی از اواسط قرن بیستم تا به امروز در رابطه با پیش‌بینی مه با استفاده از مدل‌های مفهومی و عددی صورت گرفته است که در این بین می‌توان به مطالعات گنون (۱۹۸۷)، برگات و جدالیا (۱۹۹۴)، پاگوسکی و همکاران (۲۰۰۴)، ناکانیشی و نینو (۲۰۰۶)، ولده و همکاران (۲۰۱۰)، واگ و همکاران (۲۰۲۳) و پترکا و همکاران (۲۰۲۴) اشاره کرد. در بیشتر این مطالعات، پژوهشگران زمان آغاز و مدت تداوم مه را شبیه‌سازی نمودند. نتایج این مطالعات نشان داد که با توجه به وابستگی شدید وقوع مه به عوامل محلی، مدل‌های عددی نمی‌توانند مراحل اولیه و نهایی توسعه مه را با جزئیات نشان دهند. به همین دلیل پیش‌بینی وقوع مه و بررسی تکوین آن در

بیشتر ایستگاه‌های مورد استفاده در برگیرنده فرودگاه‌های فعال کشور می‌باشند. جهت مقایسه، نقشه فرودگاه‌های کشور همراه با نوع کاربری در کنار نقشه موقعیت جغرافیایی ۷۳ ایستگاه هواشناسی در شکل ۱ ارائه شده است. به طور کلی ۹۰ فرودگاه در ایران وجود دارد که از این تعداد ۳۷ فرودگاه بین‌المللی و مرز هوایی، ۳۴ فرودگاه داخلی و مابقی فرودگاه‌های در دست ساخت، پایگاه‌های نظامی و فرودگاه‌های خصوصی هستند (شکل ۱-ب). هر چند که این تحقیق اقلیم‌شناسی پدیده مه را مورد بررسی قرار می‌دهد، اما تأکید بر فرودگاه‌های کشور به این دلیل است که وقوع این پدیده بیش از همه صنعت هوانوردی را از خود متأثر ساخته و نقش مؤثری در نشست و برخاست هواپیماها داشته و هرگونه تغییر در این پدیده ارتباط مستقیمی با صنعت هوانوردی خواهد داشت.

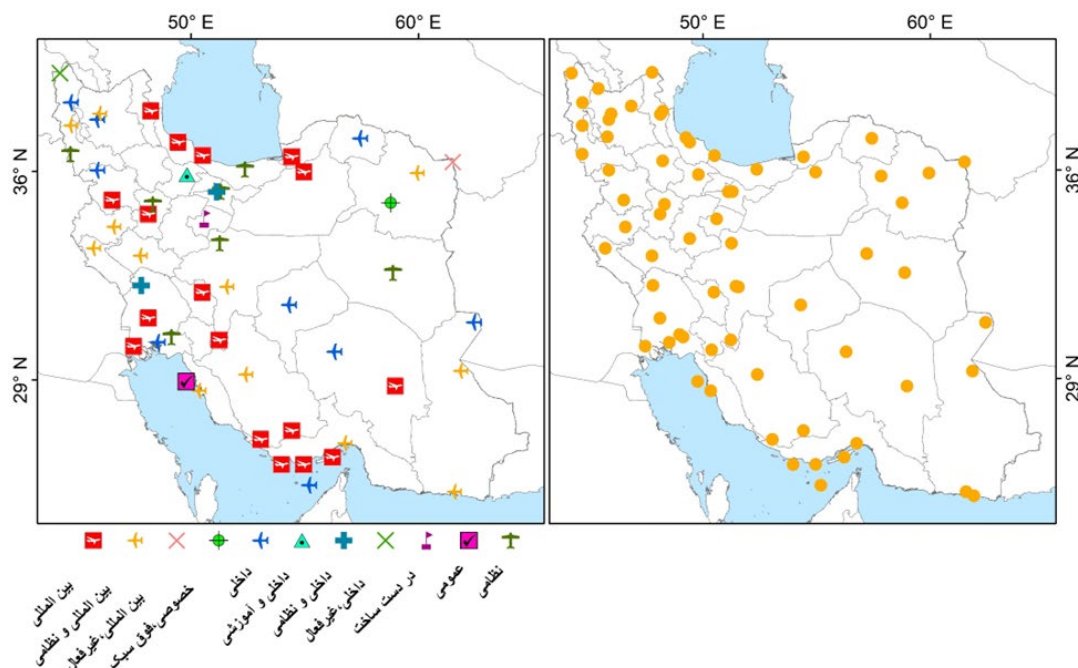
شرایط وقوع مه در ایران را با لحاظ نمودن تعداد قابل توجهی ایستگاه‌های هواشناسی و فرودگاهی به انجام رساند. نتایج این تحقیق می‌تواند ضمن آشکار نمودن وضعیت وقوع مه، در جهت شناخت این پدیده و برداشتن گام‌هایی در جهت کاهش حوادث ناشی از آن مؤثر واقع شود.

## ۲ داده‌ها و روش تحقیق

### ۱-۲ داده‌ها

#### ۱-۱-۲ داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی

در این پژوهش به منظور بررسی اقلیم‌شناسی پدیده مه در ایران، از داده‌های مشاهداتی ۷۳ ایستگاه هواشناسی همدیدی استفاده شده است (شکل ۱-الف).



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه. ب) موقعیت فرودگاه‌های کشور همراه با نوع کاربری آن‌ها.

۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) اخذ شد. در بررسی پدیده‌های جوی با استفاده از داده‌های ایستگاهی، می‌بایست به این حقیقت توجه نمود که تعداد نسبتاً محدود ایستگاه‌های

داده‌های مورد استفاده جهت بررسی پژوهش حاضر شامل دو متغیر وضعیت هوای حاضر (ww) و دید افقی (vv) است که از سازمان هواشناسی کشور برای یک دوره

زمین و اقیانوس ارائه می‌دهد. مجموعه داده ERA5، دارای ۱۳۷ تراز ترکیبی سیگما/فشار از سطح زمین تا ۱ پاسکال می‌باشد. مدل اولیه با تفکیک افقی ۳۱ کیلومتر اجرا شده است. داده‌ها به صورت ساعتی در دسترس هستند و شامل تحلیل و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت می‌باشند که دو بار در روز، از ساعت ۰۶ و ۱۸ به وقت جهانی اجرا می‌شوند.

مجموعه داده ERA5-Land نسخه‌ای با تفکیک افقی بالاتر (۹ کیلومتر) است. این نسخه از اعمال میدان‌های هواشناسی جوی با تفکیک پایین از مجموعه داده اصلی ERA5 به بخش سطح زمین HTESSEL (نسخه Cy45r1 از IFS) حاصل می‌شود (مونیز-ساباتر و همکاران، ۲۰۲۱). مجموعه داده ERA5-Land با تفکیک ساعتی از سال ۱۹۵۰ تاکنون برای مناطق خشکی در دسترس است. در این مطالعه، داده‌های دمای هوا (Ta) و دمای نقطه شبنم (Td) در ارتفاع ۲ متری برای دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) بر روی ایران برای ساعت‌های هشت‌گانه استاندارد به وقت گرینویچ (۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱) دانلود شده است. از آنجایی که این مجموعه داده (ERA5-Land) داده‌های رطوبت نسبی را در اختیار ندارد، در این تحقیق رطوبت نسبی (rh2m) با استفاده از دمای هوا (Ta) و دمای نقطه شبنم (Td) در ارتفاع دو متری با استفاده از فرمول فشار بخار آب اشباع رایت (۱۹۹۷) محاسبه شده است. این رابطه دو مؤلفه بیشینه فشار بخار آب و فشار بخار آب واقعی را ترکیب می‌کند و رطوبت نسبی را از کسر فشار بخار آب واقعی به بیشینه فشار بخار آب محاسبه می‌کند.

## ۲-۲ روش تحقیق

دید افقی فاصله‌ای است که یک شیء در آن فاصله، به وضوح قابل تشخیص است. دید افقی به جهت و زاویه دید و ارتفاع مشاهداتی بستگی دارد. از لحاظ هوانوردی دید افقی در تمام مراحل نشست و برخاست هواپیما و همچنین دید راننده در ترافیک‌های جاده‌ای اهمیت دارد. حضور ابر، مه، غبار و بارش بر دید افقی تأثیرگذار است.

هواشناسی کشور با دوره آماری بلندمدت، مطالعه اقلیم شناسی پدیده مه در گستره ایران زمین را تحت الشعاع خود قرار خواهد داد. به همین دلیل، برای بهره‌گیری از تعداد ایستگاه بیشتر، تمامی ایستگاه‌های هواشناسی کشور که برابر و بیشتر از ۳۰ سال داده داشته‌اند، در این بررسی استفاده شدند. بدین ترتیب، از داده‌های ۷۳ ایستگاه هواشناسی برای انجام مطالعه استفاده شد. این داده‌ها با فاصله زمانی سه ساعته برای ۸ ساعت در شبانه‌روز در ساعت استاندارد هواشناسی جهانی به وقت گرینویچ (۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱) که معادل آن به وقت محلی در کشور ساعات ۰۳:۳۰، ۰۶:۳۰، ۰۹:۳۰، ۱۲:۳۰، ۱۵:۳۰، ۱۸:۳۰ و ۲۱:۳۰ است، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که در بین متغیرهای اقلیمی و به‌طور کلی پدیده‌های جوی، پدیده مه نقش کلیدی در کاهش دید افقی دارد و اینکه اصولاً مه شرایط شکل‌گیری بسیار متفاوتی را در زمان‌ها و مکان‌های مختلف تجربه می‌کند، برای شناسایی روزهای مه‌آلود و جداسازی آن از سایر پدیده‌های کاهنده دید مانند گرد و خاک، توفان شن و غبار (Haze)، کُدهای هواشناسی مَعْرِف پدیده مه (کُدهای ۴۰ تا ۴۹) که نمایانگر روزهای همراه با مه می‌باشند برای هر ایستگاه به صورت جداگانه استخراج و مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲-۱-۲ مجموعه داده بازتحلیل ERA5-Land

مجموعه داده ERA5 نسل پنجم بازتحلیل مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت اروپایی (ECMWF) است. این بازتحلیل بر اساس سامانه پیش‌بینی یکپارچه (IFS) نسخه Cy41r2 بنا شده است. اندازه‌گیری‌های حاصل از سامانه‌های مختلف پایش (مانند داده‌های ماهواره‌ای، داده‌های ایستگاهی و غیره) با استفاده از طرحواره 4D-Var در مدل جوی ادغام می‌شوند (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰).

مجموعه داده ERA5 همچنین با جفت شدن بخش جوی IFS به مدل سطح زمین HTESSEL و مدل موج اقیانوس (WAM)، تحلیلی سازگار از نظر فیزیکی از سطح

در گام بعدی و در دسته بندی پدیده مه از نظر غلظت، کاهش دید افقی تا ۱۰۰۰ متر به عنوان مبنای اولیه تعیین غلظت مه، در نظر گرفته شد (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۲۲). بر این اساس و بر پایه دسته بندی ارائه شده توسط تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷) برای ۷۳ ایستگاه هواشناسی، غلظت مه مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ نحوه تعیین غلظت مه را بر پایه روش تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷) نشان می دهد. در این روش، پدیده مه بر اساس مقادیر دید افقی، به چهار گروه اصلی شامل: مه خیلی غلیظ، غلیظ، مه متوسط و مه رقیق تقسیم می گردد. بر اساس طبقه بندی ارائه شده در جدول ۱، نقشه های فراوانی بلندمدت (۲۰۲۰-۱۹۹۱) غلظت مه به تفکیک برای هریک از گروه های چهارگانه ترسیم شد.

لذا، در این تحقیق با بهره گیری از داده های هواشناسی ۳ ساعته، پدیده مه از سایر پدیده های هوای حاضر جدا شده است. در نهایت، نقشه های فراوانی وقوع مه به صورت میانگین بلندمدت، در دو مقیاس ساعتی و سالانه با بهره گیری از داده های تمامی ایستگاه ها ترسیم شد. شایان ذکر است که در ترسیم نقشه ها، برای دوره مطالعاتی ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) از نمایش میانگین فراوانی کمتر از ۱ رخداد در دوره ۳۰ ساله صرف نظر شد. این نکته قابل ذکر است که، تمامی رخدادها در محاسبات لحاظ شده اند، اما به جهت این که مقادیر کمتر از ۱ رخداد در ۳۰ سال از منظر اقلیمی از ارزش مطالعاتی چندانی برخوردار نیست، لذا مقادیر کمتر از این آستانه، صرفاً در نمایش داده ها حذف گردید.

جدول ۱. دسته بندی غلظت مه بر پایه دید افقی (تاردیف و راسموسن، ۲۰۰۷).

نوع یا غلظت مه	دید افقی (متر)	مقدار کاهش دید (متر)
مه خیلی غلیظ یا متراکم	۰-۲۵۰	مه هایی که دید افقی را به کمتر از ۲۵۰ متر کاهش می دهند.
مه غلیظ	۲۵۱-۵۰۰	مه هایی که دید افقی را به کمتر از ۵۰۰ متر و بیشتر از ۲۵۰ متر کاهش می دهند.
مه متوسط	۵۰۱-۷۵۰	مه هایی که دید افقی را به کمتر از ۷۵۰ متر و بیشتر از ۵۰۰ متر کاهش می دهند.
مه رقیق	۷۵۱-۱۰۰۰	مه هایی که دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر و بیشتر از ۷۵۰ متر کاهش می دهند.

۲-۳ بررسی روند تغییرات وقوع مه در ایران  
روند خطی فراوانی وقوع مه با استفاده از روش برآوردگر شیب سن (سن، ۱۹۶۸) محاسبه شد. همچنین، معنی داری روند با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، با استفاده از آزمون روند من-کندال تصحیح شده (MMK) مورد آزمون قرار گرفت. در تحقیقات اقلیمی، انتخاب سطح اطمینان ۹۵٪ به جای ۹۹٪، با توجه به ماهیت پیچیده و اغلب محدودیت های داده ای این حوزه، ریشه در چندین عامل دارد. اگرچه سطح اطمینان بالاتر (۹۹٪) قطعیت بیشتری ارائه می دهد، اما دستیابی به آن مستلزم حجم نمونه بزرگتر و منابع بیشتری است که همیشه در مطالعات اقلیمی، با توجه به مقیاس پدیده های مورد بررسی و دشواری گردآوری

همچنین، در محاسبه فراوانی سالانه، یک روز مه آلود، روزی است که حداقل در یکی از ساعت های هشتگانه آن، پدیده مه گزارش شده باشد. در این تحقیق پس از ارائه نقشه های فراوانی ۳ ساعته پدیده مه، به منظور ارزیابی نتایج و بررسی ارتباط بین فراوانی وقوع مه و ویژگی های اقلیمی، با استفاده از مقادیر رطوبت نسبی و مقادیر اختلاف بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم، نقشه های ۳ ساعته رطوبت نسبی، نمودارهای اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم و نقشه های فراوانی رطوبت نسبی با آستانه برابر و بیشتر از ۸۵٪ تهیه شد. برای تهیه نقشه ها از داده بازتحلیل ERA5-Land استفاده شد. نقشه ها و نمودارهای تولید شده در تحلیل مکانی وقوع پدیده مه در ایران به کار گرفته شد.

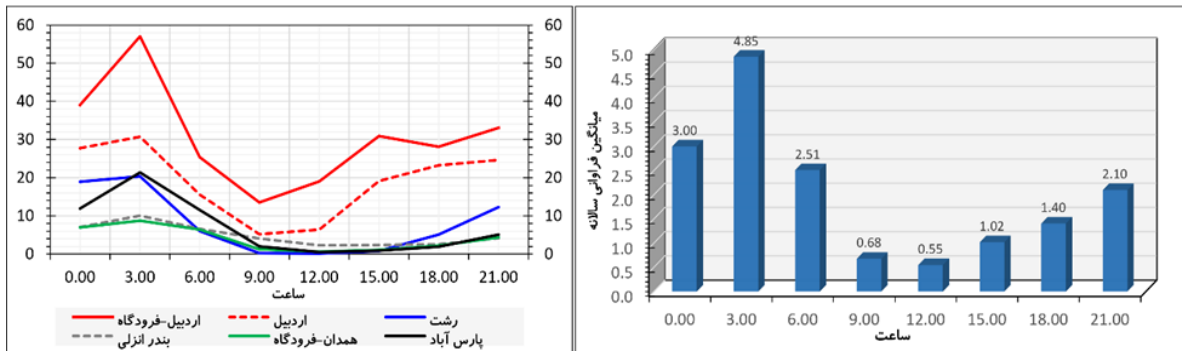
### ۳ نتایج و بحث

۳-۱ فراوانی وقوع مه در ساعات هشت گانه هواشناسی بررسی میانگین فراوانی وقوع مه در ساعات مختلف شبانه روز بیانگر آن است که، وقوع مه در ایران با چرخه شبانه روزی ارتباط مستقیمی دارد. بالاترین فراوانی وقوع مه در ایران در ساعت ۳ به وقت گرینویچ (۶:۳۰ صبح به وقت محلی) اتفاق می افتد. در این ساعت از روز میانگین فراوانی وقوع مه در متوسط پهنه‌ای کشور ۴/۸۵ روز در سال محاسبه شده است. این در حالی است که، ساعات‌های ۰۰، ۰۶ و ۲۱ گرینویچ، به ترتیب با میانگین فراوانی ۳، ۲/۵۱ و ۲/۱۰ روز در سال در رتبه‌های بعدی جای می‌گیرند. در مقابل، ساعات‌های ۱۲، ۰۹ و ۱۵ گرینویچ، به ترتیب کمترین تعداد مه‌گرفتنی را در سال تجربه می‌نمایند. شکل ۲-الف به خوبی تغییرات شبانه روزی مه در ایران را نشان می‌دهد. به‌طور کلی وقوع مه در ایران از یک الگوی سهمی (Parabolic pattern) معکوس پیروی می‌کند؛ به طوری که در ساعات ابتدایی و پایانی روز، فراوانی وقوع مه در ایران بیشینه است و در ساعات میانی روز وقوع مه در ایران به کمترین فراوانی خود می‌رسد. بدین ترتیب، میانگین فراوانی وقوع مه در ایران با در نظر گرفتن مقادیر متوسط برای ۷۳ ایستگاه، براساس دیدبانی انجام شده در ساعات-های ۰۰، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ به وقت گرینویچ، به ترتیب ۴/۸۵، ۲/۵۱، ۰/۶۸، ۰/۵۵، ۱/۰۲، ۱/۴۰ و ۲/۱۰ روز در هر سال به دست آمده است (شکل ۲-الف). در این میان، ۶ ایستگاه شامل فرودگاه اردبیل، اردبیل، پارس آباد، رشت، بندر انزلی و فرودگاه همدان بالاترین فراوانی وقوع مه در سطح کشور را به خود اختصاص داده‌اند. ۶ ایستگاه یادشده بیشینه فراوانی ۳ ساعته وقوع مه در شبانه روز را در ساعت ۳ گرینویچ، به ترتیب با تعداد ۵۷/۰۶، ۳۰/۷۷، ۲۱/۴۰، ۲۰/۳۳، ۱۰/۰۷ و ۸/۷۷ مه در سال تجربه نموده‌اند (شکل ۲-ب). فراوانی بالای وقوع مه در ساعات شب و ساعات اولیه صبح، حاکی از آن است که، بخش قابل توجهی از مه‌گرفتنی کشور نتیجه سرمایش شبانه است.

داده‌های جامع، امکان‌پذیر نیست. سطح ۰/۹۵، با ایجاد تعادل مناسب‌تر بین خطای نوع اول (رد فرضیه صفر صحیح) و خطای نوع دوم (عدم رد فرضیه صفر نادرست)، به عنوان یک استاندارد جهانی در اکثر تحقیقات علمی، از جمله مطالعات اقلیمی، پذیرفته شده و برای بسیاری از تصمیم‌گیری‌های عملی کافی تلقی می‌شود (دلسول و تپیت، ۲۰۲۲). علاوه بر این، سطح ۰/۹۹ می‌تواند بیش از حد محافظه کارانه باشد و به طور بالقوه منجر به نادیده گرفتن روندها و الگوهای مهم اقلیمی شود، در حالی که سطح ۰/۹۵ همچنان اطمینان قابل قبولی را برای تفسیر نتایج و اتخاذ سیاست‌های مناسب فراهم می‌کند (دلسول و تپیت، ۲۰۲۲). آزمون من-کنندال تصحیح شده (MMK) یک روش ناپارامتری برای شناسایی روندها در سری‌های زمانی است که به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های آزمون من-کنندال کلاسیک توسعه یافته است. این روش با در نظر گرفتن خودهمبستگی مرتبه اول در داده‌های سری زمانی، از برآورد نادرست و اغراق آمیز معنی‌داری روند جلوگیری می‌کند (حامد و راثو، ۱۹۹۸). در این روش، واریانس آماره آزمون Z با استفاده از ضریب خودهمبستگی تصحیح می‌شود که منجر به برآورد دقیق‌تر معنی‌داری روند می‌شود. این تصحیح به‌ویژه در مطالعات آب‌شناختی و اقلیمی که داده‌ها معمولاً دارای خودهمبستگی قابل توجهی هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد و نتایج قابل اعتمادتری را نسبت به روش سنتی ارائه می‌دهد (هو و همکاران، ۲۰۲۰). آزمون من-کنندال تصحیح شده کمتر تحت تأثیر داده‌های پرت یا دورافتاده (Outlier) قرار می‌گیرد (حامد و راثو، ۱۹۹۸). آماره Z در آزمون MMK برای روند کاهش/افزایشی استفاده می‌شود. مقدار Z بر حسب P-Value بررسی می‌شود و در جایی که P-Value کمتر (معنی‌دارتر) از  $\alpha$  باشد ( $\alpha=0/05$ )، روند به‌عنوان معنی‌دار طبقه‌بندی می‌شود. از آنجایی که، کلیه محاسبات آماری در بسته آماری R انجام شد، بنابراین، از ارائه روابط صرف‌نظر گردید.

مه اغلب با افزایش دمای ناشی از تابش خورشید در طول روز از بین می رود، زیرا خورشید زمین را گرم می کند و باعث تبخیر قطرات مه می شود که این قاعده کلی را می توان در فراوانی های کمتر وقوع مه برای ساعات ۹ تا ۱۵ گرینویچ (۱۲:۳۰ تا ۱۸:۳۰ به وقت محلی) مشاهده نمود (شکل ۲-الف). شایان ذکر است که، در برخی مناطق مه می تواند آنقدر غلیظ باشد، که مانع از رسیدن مؤثر نور خورشید به سطح زمین شده و این امر باعث افزایش دوام مه در ساعت روز خواهد شد. به نظر می رسد این ویژگی در ایستگاه فرودگاه اردبیل، در مقادیر بالای وقوع مه در تمام ساعات شبانه روز دخالت داشته است (شکل ۲-ب).

سرمايشی که درست پس از غروب خورشید آغاز می شود و در سراسر شب از طریق خروج بیشتر انرژی سطح زمین به واسطه تداوم تابش زمین تاب ادامه می یابد و در نهایت قبل از طلوع خورشید بالاترین مقادیر سرمايش حاصل می شود. در توضیح این ویژگی از وقوع مه در ایران می توان گفت که انواع مختلفی از مه وجود دارد که بسته به شرایط اقلیمی امکان تشکیل آنها فراهم می شود. اما یکی از انواع بسیار رایج مه که معمولاً در ساعات شب و ساعات اولیه صبح مشاهده می شود، مه تابشی است. این نوع مه زمانی اتفاق می افتد که هوای مجاور سطح زمین در شب خنک می شود و به دمای نقطه شبنم می رسد.



بررسی توزیع مکانی فراوانی وقوع مه در ساعات

به عبارتی، در شب های طولانی زمستانی مناطق جنب

شکل ۲. میانگین ۳ ساعته فراوانی وقوع مه در دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱). (الف) فراوانی میانگین گیری شده برای ۷۳ ایستگاه هواشناسی کشور. (ب) فراوانی ۳ ساعته برای ۶ ایستگاه با بالاترین نرخ وقوع مه در کشور (واحد: تعداد مه به ازای روز در سال).

مختلف شبانه روز، بیانگر آن است که، تعداد قابل توجهی از ایستگاه های کشور، فراوانی بالای وقوع مه را تقریباً در تمام ساعات شب (از ساعت ۱۸ تا ۶ گرینویچ) تجربه می کنند (شکل ۳). ارزیابی کلی از نقشه های ۳ ساعته وقوع مه، مبین آن است که ایستگاه های واقع در سواحل جنوبی دریای خزر، سواحل خلیج فارس، ارتفاعات آذربایجان و مناطق مرتفع زاگرس بالاترین فراوانی وقوع مه را در سطح کشور دارا می باشند. در این میان، یک نوار نسبتاً باریک در امتداد سواحل جنوب غربی دریای خزر از محدوده رشت-انزلی تا پارس آباد مغان را می توان محور اصلی وقوع مه در کشور نامید. در محدوده یادشده، در تمامی ساعات شبانه روز

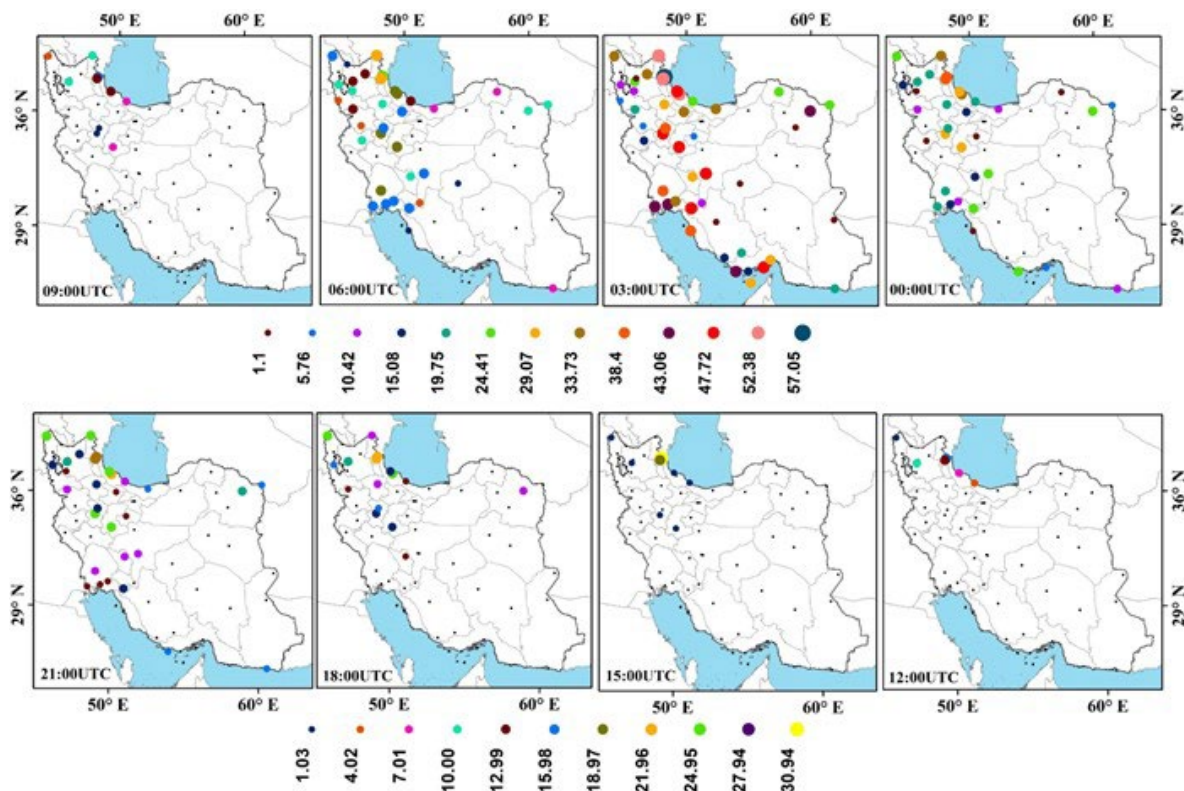
حاره، به واسطه تسلط تابش زمین تاب و خروج مقادیر قابل توجهی از انرژی به جو، سطح زمین و هوای مجاور آن به تدریج تا ساعات اولیه صبح سردتر شده که این امر در رسیدن دمای هوا به نقطه شبنم و شکل گیری فرایند میعان در مجاورت سطح زمین، نقش اصلی را بازی می کند. در زمان وقوع این پدیده، قطرات ریز آب در هوا تشکیل می شود و لایه ای از مه را ایجاد می کند که همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود در ساعات اولیه صبح به ویژه ساعت ۳ گرینویچ (۶:۳۰ به وقت محلی) بیشینه فراوانی وقوع مه در کشور را شاهد هستیم.

شاهد وقوع مه با فراوانی بالا هستیم. بیشینه فراوانی وقوع مه با کمی فاصله از دریا، بر جانب غربی کوه‌های تالش در دشت اردبیل مشاهده می‌شود. جایی که فرودگاه اردبیل به عنوان مه‌آلودترین ایستگاه کشور در یک دشت نسبتاً هموار و مرتفع بین رشته کوه‌های تالش در شرق و توده کوهستانی سبلان در غرب جای گرفته است. در این ایستگاه میانگین بیشینه فراوانی شبانه‌روزی وقوع مه در ساعت ۳ گرینویچ (۶:۳۰ به وقت محلی) به ۵۷/۰۶ رخداد و کمینه آن در ساعت ۹ گرینویچ به ۱۳/۵۳ رخداد در سال بالغ می‌گردد. اگرچه بر اساس گزارشات میدانی مسافران در گذر از مسیرهای کوهستانی البرز و برخی از مناطق کوهستانی مرتفع ایران، از جمله‌گردنه حیران در کوه‌های تالش، تعداد رخداد مه در این مناطق بسیار بالاست، اما بنابر یافته‌های این تحقیق، فرودگاه اردبیل بالاترین فراوانی وقوع مه ثبت شده در کشور را از آن خود نموده است.

کمی پایین‌تر از فرودگاه اردبیل، ایستگاه واقع در شهر اردبیل، دومین ایستگاه مه‌آلود کشور محسوب می‌شود. بیشینه و کمینه فراوانی وقوع مه در ایستگاه اردبیل با الگوی مشابه فرودگاه این شهر، برای ساعت‌های ۳ و ۹ گرینویچ به ترتیب ۳۰/۷۷ و ۵/۲۰ رخداد در سال ثبت شده است. می‌توان گفت، فراوانی وقوع مه در تمامی ساعات شبانه‌روز در دو ایستگاه یادشده از سایر ایستگاه‌های کشور بیشتر است. در این دو ایستگاه، حتی در ساعت میانی روز، که تقریباً وقوع مه در تمامی پهنه‌های جغرافیایی ایران به صفر می‌رسد، کماکان تعداد قابل توجهی مه بوقوع می‌پیوندد (شکل‌های ۲ و ۳ را مقایسه کنید). در تحلیل فراوانی بالای پدیده مه در اردبیل، از یک سو می‌توان به دماهای بسیار پایین و از سوی دیگر، به رطوبت نسبی بسیار بالای این منطقه در طول سال اشاره نمود (شهبازی شیران، ۱۳۷۲؛ طاوسی و دل‌آرا، ۱۳۸۹). بر اساس تحقیقات انجام شده، میانگین دمای سالانه ایستگاه فرودگاه اردبیل کمتر از  $9^{\circ}\text{C}$  بوده، درحالی‌که، میانگین سالانه رطوبت نسبی از ۷۲٪

فراتر است. مضاف‌براین، این منطقه برای یک دوره بسیار طولانی در دوره سرد سال (حدود ۵ ماه)، میانگین دمای کمینه کمتر از  $0^{\circ}\text{C}$  را تجربه می‌کند (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل، ۱۴۰۱). ترکیب دمای پایین و رطوبت نسبی بالا، پتانسیل تراکم رطوبت و تشکیل مه را در سرتاسر سال و در تمام ساعات شبانه‌روز بسیار بالا برده است. بدین ترتیب، برخلاف ایستگاه‌های سواحل جنوبی دریای خزر (رشت، انزلی و ...) که علی‌رغم رطوبت نسبی بالا، دماهای پایینی را در طول سال و در شبانه‌روز تجربه نمی‌کنند، ایستگاه‌های واقع در دشت میانکوهی اردبیل، به واسطه ترکیب دماهای بسیار پایین و رطوبت نسبی بالا، شرایط مطلوب‌تر و پتانسیل بسیار بالاتری را برای وقوع مه در طول سال و در طول شبانه‌روز از خود به نمایش می‌گذارند (پهلوان و همکاران، ۱۴۰۱-الف).

به غیر از دو ایستگاه اردبیل و سواحل شمالی کشور، ایستگاه‌های واقع در غرب کشور به‌طور متوسط از فراوانی وقوع مه کمتری برخوردارند و وقوع مه در این منطقه بیشتر در ساعات شب و ساعات اولیه روز (ساعات ۰۳ و ۰۶ گرینویچ) به‌وقوع می‌پیوندد. این الگو در خصوص ایستگاه‌های مرکزی کشور نیز صادق است. در ایستگاه‌های واقع در مرکز کشور در ساعات میانی تا پایانی روز، یعنی از ساعت ۹ تا ۱۸ گرینویچ، تقریباً هیچ گزارشی در رابطه با وقوع مه وجود ندارد. در بقیه ساعات روز نیز فراوانی وقوع مه در ایستگاه‌های واقع در مرکز، در مقایسه با سایر مناطق کشور، میانگین بسیار پایینی را نشان می‌دهد (شکل ۳). می‌توان گفت که هرچه از سواحل شمالی و جنوبی فاصله می‌گیریم و به مرکز ایران نزدیکتر می‌شویم به همان نسبت از تعداد روزهای مه‌آلود به دلیل کمبود منابع رطوبتی، رطوبت نسبی پایین و خشکی خاک کاسته می‌شود. در رابطه با شرق و شمال شرق کشور، وقوع مه عمدتاً فراوانی کمتر از یک روز در سال را نشان می‌دهد.



شکل ۳. میانگین ۳ ساعته فراوانی وقوع مه در دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) برای تعداد ۷۳ ایستگاه هواشناسی کشور در ساعات دیدبانی هشت‌گانه. دایره‌های کوچک مشکی نمایانگر فراوانی کمتر از ۱ رخداد هستند (واحد: تعداد مه به ازای روز در سال).

برای فراهم نمودن درک مناسبی از توزیع زمانی و مکانی وقوع مه در کشور، با بهره‌گیری از دمای هوا و دمای نقطه شبنم در ارتفاع ۲ متری، مقادیر میانگین رطوبت نسبی برای دوره اقلیمی مشابه (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، محاسبه شد و در قالب نقشه و نمودار ارائه گردید. ارائه نقشه‌های رطوبت‌نسبی در ترکیب با اختلاف دمای هوا و دمای نقطه‌شبنم، کمک شایان توجهی به تبیین نحوه وقوع مه و توزیع مکانی و زمانی آن در کشور می‌نماید. شکل ۴ درصد میانگین سالانه رطوبت نسبی را به تفکیک برای ساعت‌های مختلف شبانه روز نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تقریباً به استثنای نوار شمالی کشور، سایر مناطق در ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ گرینویچ بسیار خشک بوده و از رطوبت نسبی کمتر از ۳۰٪ تا ۳۵٪ برخوردارند. در این میان، تنها بخش‌های کوچکی از زاگرس مرتفع و شمال‌غرب ایران، میانگین رطوبت‌نسبی بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ را تجربه

در این منطقه، در برخی ایستگاه‌ها مانند مشهد، سرخس و زاهدان، پدیده مه از ساعات ابتدایی شب یعنی ساعت ۱۸ گرینویچ (ساعت ۲۱:۳۰ به وقت محلی) آغاز شده و تا ساعات ابتدایی صبح ادامه دارد. این مناطق نیز تقریباً در طول روز پدیده مه را تجربه نمی‌کنند.

در ایستگاه‌های واقع در جنوب کشور، در نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان، بیشترین فراوانی وقوع مه در ابتدای روز (ساعت ۰۳ گرینویچ) مشاهده می‌شود. در این میان، در محدوده استان خوزستان، وقوع مه از فراوانی و تداوم بالاتری برخوردار بوده، به طوری که در تمامی ساعات شب و صبح، در بازه زمانی ساعت ۲۱ تا ۰۶ گرینویچ (۱۲:۳۰ شب تا ۹:۳۰ صبح به وقت محلی) شاهد وقوع قابل توجه پدیده مه در این منطقه هستیم. این منطقه در ساعات میانی روز به دلیل دمای بسیار بالا و رطوبت نسبی پایین پدیده مه را تجربه نمی‌کند (شکل ۳).

شمال غرب کشور، اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم به کمتر از  $3^{\circ}\text{C}$  می‌رسد (محدوده هاشورزده در ساعت‌های ۱۸، ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گرینویچ). این مسئله به خوبی افزایش وقوع مه در سواحل جنوبی دریای خزر و ایستگاه فرودگاه و شهر اردبیل را توضیح می‌دهد. همچنین، با در نظر گرفتن مقادیر بالای رطوبت نسبی و اختلافات دمایی کم، بخشی از نوار باریک رود ارس در شمال غرب کشور نیز از پتانسیل بالایی برای وقوع مه برخوردار است که در مطالعه حاضر به جهت نبود داده‌های ایستگاهی مقدار آن قابل ارزیابی نمی‌باشد.

برای ارزیابی دقیق‌تر ایستگاه‌های دارای نرخ بالای وقوع مه در سطح کشور (فرودگاه اردبیل، اردبیل، انزلی، رشت، پارس آباد و فرودگاه همدان)، منحنی‌های سه ساعته رطوبت نسبی و اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم برای نقطه شبکه‌های متناظر ایستگاه‌های یادشده، تهیه شد. بر اساس شکل ۵-الف، الگوی تغییرات رطوبت نسبی به خوبی تغییرات فراوانی وقوع مه در ۶ ایستگاه مورد مطالعه را تبیین می‌نماید. در اینجا نیز یک الگوی سهمی معکوس، مشابه آن‌چه در شکل ۲ برای فراوانی وقوع مه مشاهده شد، برای تغییرات شبانه روزی رطوبت نسبی در طول سال مشاهده می‌شود. تغییرات شبانه روزی رطوبت نسبی و اختلافات دمایی همراه با آن در ایستگاه فرودگاه همدان، به جهت خشکی بیشتر هوا، بسیار بیشتر و برجسته‌تر است. همین امر موجب شده تا منحنی ایستگاه فرودگاه همدان از سایر ایستگاه‌ها فاصله گرفته و الگوی سهمی آن نیز نسبت به سایر ایستگاه‌ها از برجستگی بیشتری برخوردار باشد. در مقابل، ایستگاه‌های واقع در سواحل جنوبی دریای خزر و بدنبال آن ایستگاه فرودگاه و شهر اردبیل (ایستگاه شهر اردبیل نشان داده نشده است)، به علت رطوبت نسبی بالا در طول شبانه روز، از الگوی سهمی تعدیل یافته‌ای برخوردارند (شکل ۵-الف). یافته‌ها حاکی از آن است که دو ایستگاه بندر انزلی و رشت، بالاترین مقادیر و کمترین تغییرات ساعتی رطوبت نسبی را در طول شبانه روز تجربه

می‌کنند. در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ گرینویچ که مقارن با ۹:۳۰ و ۱۸:۳۰ به وقت محلی است، الگوی مکانی توزیع رطوبت بیشتر شبیه ساعت‌های ۰۹ و ۱۲ گرینویچ می‌باشد، با این تفاوت که بخش‌های گسترده‌تری از زاگرس، شمال غرب و شمال شرق کشور از رطوبت نسبی ۴۰٪ تا ۶۰٪ برخوردارند. سوی آن، در نوار ساحلی جنوب کشور نیز رطوبت نسبی افزایش یافته است. تا جایی که در چابهار، میانگین رطوبت نسبی در ساعت ۱۵ گرینویچ به ۷۰٪ بالغ گردیده است.

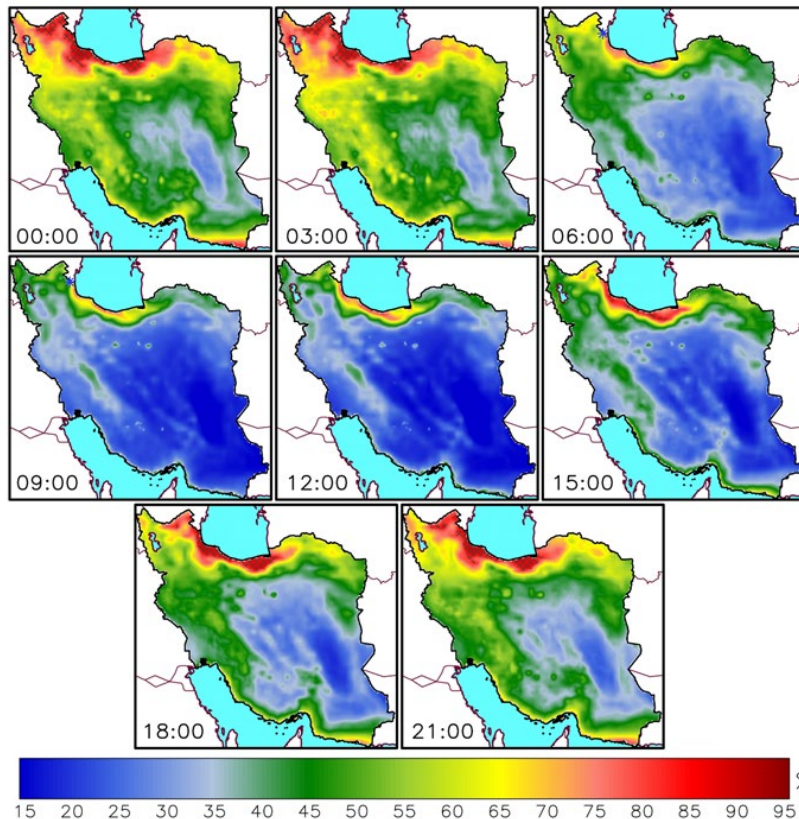
در مقابل، میانگین رطوبت نسبی در تمامی ساعات روز، در نوار ساحلی جنوب دریای خزر، از شرق گرگان تا آستارا، بالاتر از ۷۰٪ است (مناطق زرد رنگ) و در مناطقی به ۸۰٪ نیز می‌رسد. این ویژگی، در ساعت‌های ۰۶ و ۱۵ گرینویچ، شامل، دشت مغان و نوار باریکی از رودخانه ارس در مرز ایران و آذربایجان نیز می‌شود. در تمامی ساعت‌های فوق، فرودگاه و شهر اردبیل نیز به جهت مجاورت با آستارا و دریای خزر از منابع رطوبتی سواحل جنوبی دریای خزر بهره‌مند شده و مقادیر میانگین رطوبت نسبی بالا را تجربه می‌کنند.

در طول شب و ساعات اولیه صبح (ساعت‌های ۱۸، ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گرینویچ)، شاهد افزایش محسوس مقادیر میانگین رطوبت نسبی در سطح کشور می‌باشیم. در این زمان از شبانه روز، به استثنای مناطق بسیار خشک واقع در مرکز و شرق کشور (به‌ویژه بیابان لوت)، که از رطوبت نسبی کمتر از ۳۰٪ تا ۳۵٪ برخوردارند، سایر مناطق کشور دارای رطوبت نسبی بالای ۵۰٪ هستند. این مقدار برای ساعت‌های ۰۰ و ۰۳ گرینویچ به بالای ۶۰٪ می‌رسد. در واقع، مقایسه تطبیقی مقادیر رطوبت نسبی برای ساعات شب در شکل ۴ و فراوانی وقوع مه در شکل ۳ به وضوح دلیل فراوانی بالای وقوع مه در نوار ساحلی جنوب دریای خزر و مناطق کوهستانی شمال غرب کشور را بیان می‌کند. باتوجه به شکل ۴، در ساعات شب و ساعت‌های اولیه صبح، با کاهش دمای هوا در سواحل جنوبی دریای خزر و بخش‌هایی از

می کنند.

برای مقایسه، تغییرات شبانه روزی میانگین اختلاف دما، بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم در شکل ۵-ب نشان داده شده است. از آنجایی که، به جز تغییرات مقدار رطوبت، ارتباط مستقیمی بین رطوبت نسبی و دمای هوا وجود دارد و کاهش دمای هوا و رسیدن آن به دمای نقطه شبنم، ضمن افزایش رطوبت نسبی می تواند پتانسیل مه گرفتگی را در محیط افزایش دهد. بنابراین، در این بررسی، علاوه بر مطالعه رطوبت نسبی، بررسی تغییرات میانگین اختلاف دما، بین دمای هوا و دمای نقطه شبنم می تواند راهگشا باشد. باتوجه به شکل ۵-ب، در ایستگاه های مورد مطالعه، انطباق قابل توجهی بین تغییرات شبانه روزی مقادیر اختلاف دما و تغییرات رطوبت نسبی وجود دارد.

ایستگاه فرودگاه اردبیل نیز در ساعات شب و ساعات اولیه صبح (ساعات ۱۸، ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گرینویچ)، با میانگین رطوبت نسبی بالای ۸۵٪ بسیار شبیه ایستگاه های سواحل خزر است. این در حالی است که، در ساعات روز (ساعات ۰۶، ۰۹ و ۱۲ گرینویچ) منحنی این ایستگاه از دو ایستگاه بندر انزلی و رشت کمی فاصله گرفته و میانگین رطوبت نسبی کمتری (حدود ۶۰٪ تا ۷۰٪) را تجربه می کند. با این وجود، شباهت زیاد منحنی های رطوبت نسبی و اختلاف دمای ایستگاه فرودگاه اردبیل و دو ایستگاه واقع در سواحل جنوبی دریای خزر، به خوبی مبین نقش رطوبتی دریای خزر در تامین منابع رطوبت ایستگاه فرودگاه اردبیل می باشد. این ویژگی در نقشه های رطوبت نسبی نیز به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۴).



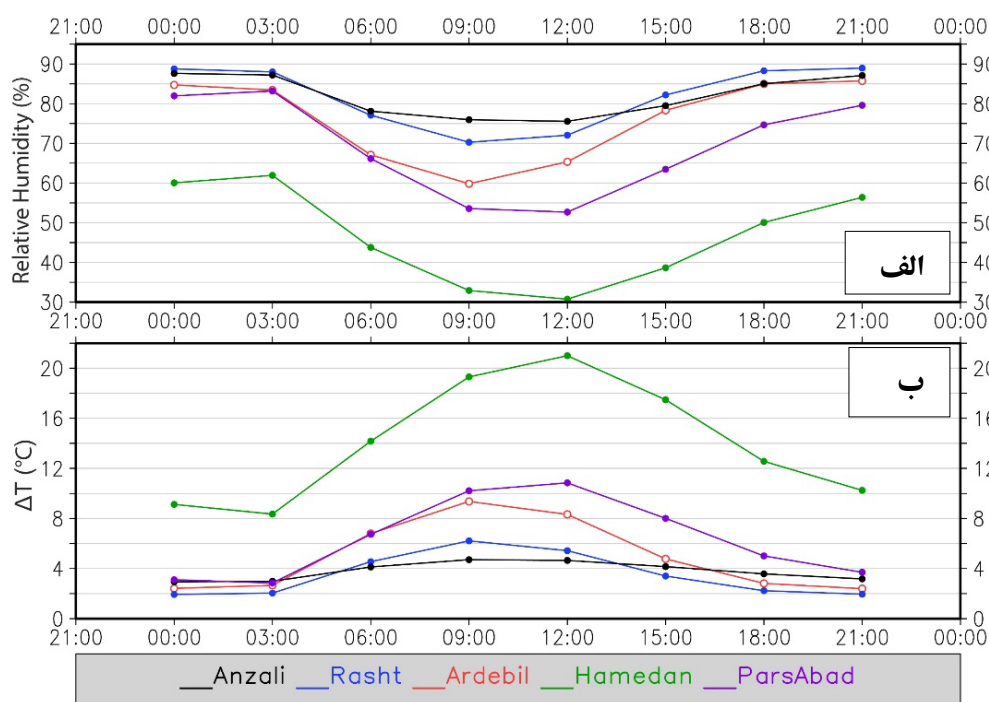
شکل ۴. مقادیر میانگین رطوبت نسبی (واحد: درصد) برای دوره اقلیمی ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) با استفاده از داده بازتحلیل ERA5-Land. برای ساعات هشت گانه. در شکل ها، مقادیر اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم  $\leq 3^{\circ}\text{C}$  با هاشور مشخص شده است.

در این میان، سه ایستگاه بندر انزلی، رشت و فرودگاه اردبیل در طول شب و ساعات اولیه صبح (۱۸، ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گرینویچ)، اختلاف دمایی کمتر از  $3^{\circ}\text{C}$  را تجربه می‌کنند. از بین سه ایستگاه یادشده، ایستگاه فرودگاه اردبیل به وضوح کاهش قابل توجه دمای شبانه را در قیاس با ساعات روز تجربه می‌کند. این ویژگی می‌تواند فراوانی بالای وقوع مه در این ایستگاه را توضیح دهد.

علاوه بر شرایط میانگین رطوبت نسبی و اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم، بررسی جغرافیایی فراوانی وقوع مقادیر بالای رطوبت نسبی نیز می‌تواند حقایق دیگری از نحوه وقوع مه در ایران را آشکار نماید. بر این اساس، شکل ۶ فراوانی وقوع رطوبت نسبی برابر و بالاتر از ۸۵٪ را در ساعات مختلف شبانه روز برای دوره ۳۰ ساله (۳۶۰ ماه) نشان می‌دهد.

مقایسه منحنی‌های دو نمودار، بیانگر آن است که، یک رابطه معکوس بین منحنی‌های اختلاف دما و رطوبت نسبی برای تمامی ایستگاه‌ها وجود دارد. بدین ترتیب که، در تمامی ایستگاه‌ها با کاهش اختلاف دما در ساعات مختلف شبانه روز، شاهد افزایش مقادیر رطوبت نسبی در آنها خواهیم بود.

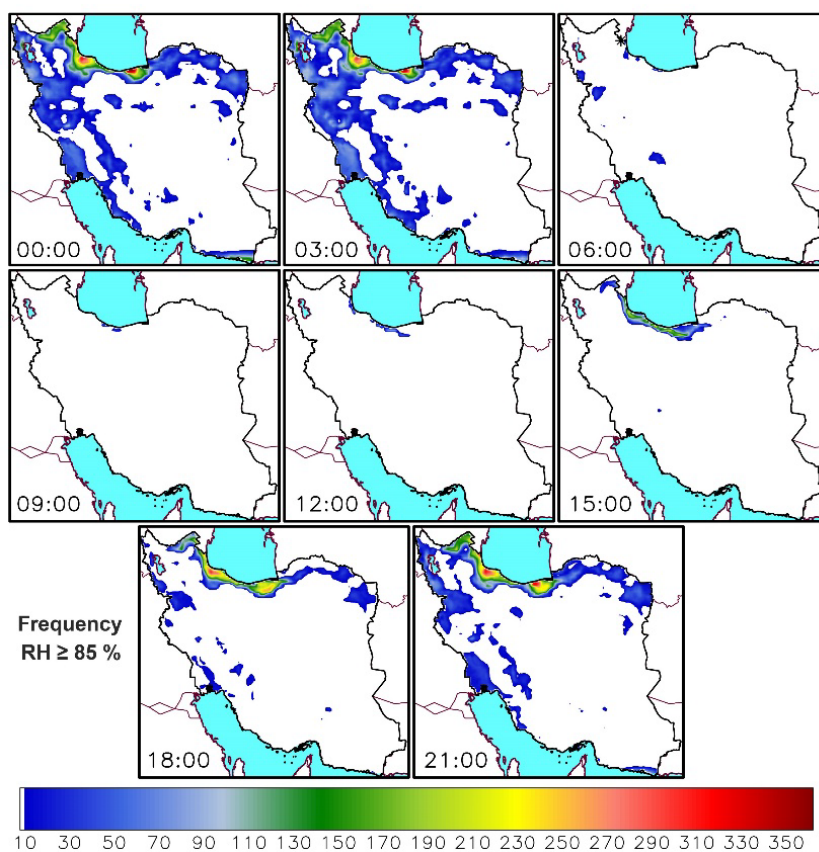
به همین علت، در دو نمودار مربوط به رطوبت نسبی و اختلاف دما، الگوی معکوسی از شکل سهمی مشاهده می‌شود. در مجموع، در تمامی ایستگاه‌ها کمترین اختلافات دمایی با بالاترین مقادیر رطوبت نسبی در ساعات شب و ساعات اولیه صبح دیده می‌شود. در مقابل، بیشترین اختلافات دمایی با پایین‌ترین مقادیر رطوبت نسبی در ساعت‌های ۹ و ۱۲ گرینویچ و به طور کلی در ساعات روز مشاهده می‌شود.



شکل ۵. وضعیت رطوبت نسبی و اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم برای نقطه شبکه‌های متناظر با ۵ ایستگاه با بالاترین نرخ وقوع مه در کشور در دوره اقلیمی ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱). در شکل از نشان دادن وضعیت ایستگاه همدید اردبیل به جهت نزدیکی با ایستگاه فرودگاه اردبیل صرف نظر شد. (الف) میانگین ۳ ساعته رطوبت نسبی (واحد: درصد). (ب) میانگین ۳ ساعته اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم (واحد: درجه سلسیوس).

در مجموع، نوار باریک سواحل جنوبی دریای خزر، همراه با بخشی از شمال استان اردبیل در مجاورت آستارا (ایستگاه‌های فرودگاه اردبیل و شهر اردبیل)، دشت مغان و نوار باریکی در مرز ایران و آذربایجان در امتداد رودخانه ارس، بالاترین فراوانی رطوبت نسبی ۸۵٪ و بیشتر در سطح را تجربه می‌کنند. مقایسه دو شکل ۶ و ۳ نشان‌دهنده آن است که در مقیاس زمانی ۳ ساعته، مناطق دارای بالاترین فراوانی مه گرفتگی در کشور با مناطق بیشینه فراوانی رطوبت نسبی بالا انطباق دارد. در مقابل، فراوانی بسیار کم مه گرفتگی در بخش‌های وسیعی از مرکز، شرق، جنوب شرق و جنوب کشور با نبود فراوانی رطوبت نسبی بالا در تمامی ساعات شبانه روز توضیح داده می‌شود.

با توجه به ارتباط مستقیم مه گرفتگی با مقادیر بالای رطوبت نسبی، این شکل می‌تواند از نظر پراکنش جغرافیایی معرف مناسبی برای مه گرفتگی در ساعات مختلف شبانه روز در سطح کشور محسوب شود. با در نظر گرفتن شکل، بالاترین مقادیر فراوانی رطوبت نسبی در سواحل جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. جایی که فراوانی ماهانه رطوبت نسبی بالا، در ساعت‌های ۲۱، ۰۰ و ۰۳ گرینویچ، در محدوده‌هایی چون دشت‌ناز ساری و جلگه گیلان به ۳۵۰ ماه از ۳۶۰ ماه مورد بررسی بالغ می‌گردد. اگرچه از محدوده ساری ایستگاهی در دسترس نیست، اما مقادیر بالای مه گرفتگی در دو ایستگاه رشت و بندر انزلی تطابق بالایی با این نتیجه دارد.



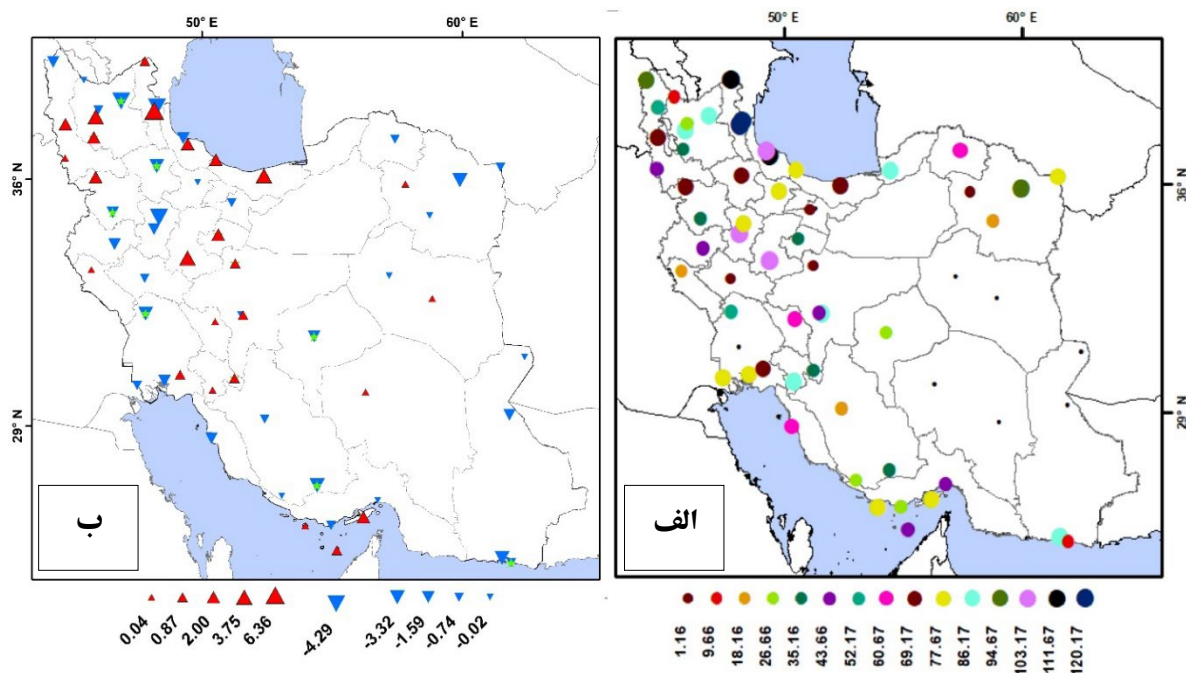
شکل ۶. فراوانی رطوبت نسبی برابر و بیشتر از ۸۵٪ با استفاده از داده‌های میانگین ماهانه ERA5-Land (۳۶۰ ماه) برای دوره اقلیمی ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، برای ساعات هشت‌گانه.

سواحل، مقادیر بالای رطوبت و در مناطق مرتفع کوهستانی، کاهش محسوس و قابل توجه دمای هوا در ساعات شب و ساعات اولیه صبح، مؤلفه‌های اصلی و تعیین کننده برای افزایش پتانسیل وقوع مه در این مناطق باشند. این ویژگی به خوبی از مقایسه منحنی‌های اختلاف دما و رطوبت نسبی بین دو ایستگاه ساحلی بندر انزلی و رشت و ایستگاه همدان به عنوان نماینده‌ای از مناطق مرتفع و کوهستانی قابل تشخیص است. در حالی که در دو ایستگاه بندر انزلی و رشت، بالا بودن رطوبت نسبی در تمامی ساعات شبانه روز میانگین اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم را در محدوده  $2^{\circ}\text{C}$  تا  $4^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته است، در مقابل، در ایستگاه همدان، کاهش محسوس دمای هوا در ساعات شب و ساعات اولیه صبح (۲۱، ۰۰ و ۰۳ گریونیچ)، ضمن کاهش میانگین اختلاف دما از  $21^{\circ}\text{C}$  به مقداری بین  $8^{\circ}\text{C}$  تا  $10^{\circ}\text{C}$ ، سبب افزایش مقادیر میانگین رطوبت نسبی از مقدار ۳۰٪ به ۶۰٪ شده است (شکل ۵). این ویژگی در کشورهای با خصوصیات جغرافیایی مشابه (دارای نواحی کوهستانی و ساحلی) نیز گزارش شده است (هونووا و همکاران، ۲۰۲۱). این نتیجه نقش ویژگی‌های جغرافیایی و تفاوت‌های مکانی در ایجاد انواع مه و سازوکارهای متفاوت شکل‌گیری آن را نشان می‌دهد. در این رابطه، مناطق مرتفع کوهستانی در غرب کشور با فراهم نمودن امکان صعود کوهساری هوای مرطوب و متعاقب آن کاهش دما، سبب افزایش فراوانی وقوع مه در ارتفاعات واقع در غرب کشور می‌شوند (زینالی و همکاران، ۱۳۹۷). در مقابل، در پایین دست مناطق مرتفع کوهستانی، در دره‌ها و سرزمین‌های محبوس بین کوه‌ها، هوای سرد به دام افتاده در دره‌ها و کاهش محسوس دما در ساعات شب و ساعات اولیه صبح، امکان اشباع هوا و متعاقب آن تشکیل مه تابشی را فراهم می‌نماید. پوشش گیاهی، خاک و مناطق شهری نیز می‌توانند بر جریان گرما و رطوبت بین سطح زمین و هوا تأثیر بگذارند و بر تشکیل، تکوین و انتقال پدیده مه تأثیر بگذارند (مددی، ۱۳۹۱).

علاوه بر این، شکل ۶ به وضوح بیانگر شبانه بودن مه‌گرفتنی در سراسر کشور است. چرا که، در ساعات‌های ۶، ۹ و ۱۲ گریونیچ، تقریباً در هیچ کجای ایران رطوبت نسبی بالاتر از ۸۵٪ مشاهده نشده و در ساعت ۱۵ گریونیچ نیز تنها باریکه‌ای از سواحل خزری و استان اردبیل دارای فراوانی رطوبت نسبی بالاست.

### ۲-۳ فراوانی وقوع سالانه مه و روند تغییرات آن در ایران

شکل ۷-الف فراوانی بلندمدت سالانه وقوع مه را در طی سه دهه اخیر (۲۰۲۰-۱۹۹۱) برای ۷۳ ایستگاه هواشناسی کشور نشان می‌دهد. بیشینه وقوع مه در نواحی شمال و شمال غرب ایران است. دو ایستگاه واقع در اردبیل با میانگین فراوانی ۱۲۰/۱۷ رخداد مه در سال بیشترین و دو ایستگاه رشت و پارس آباد با ۱۱۱/۶۷ و بندرانزلی با میانگین ۱۰۳/۱۷ رخداد در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در واقع، همان طور که در بررسی فراوانی‌های ساعتی آشکار شد، می‌توان شمال و شمال غرب ایران را مه‌آلودترین مناطق کشور معرفی کرد که این مناطق همگی بالاتر از مدار ۳۶ درجه شمالی قرار گرفته‌اند. در مناطق شرق-شمال شرق کشور ایستگاه مشهد با فراوانی ۹۴/۶۷ رخداد در سال، جزء ایستگاه‌های با فراوانی وقوع مه بالا به‌شمار می‌آید. با توجه به شکل ۷-الف، کمینه وقوع مه در استان‌های کرمان، خراسان جنوبی و محدوده سیستان جای گرفته‌اند. دایره‌های مشکی کوچک در مناطق یادشده، معرف اقلیم خشک و بیابانی همراه با رطوبت نسبی پایین و منابع رطوبتی محدود هستند که پتانسیل بسیار پایینی را برای وقوع پدیده مه دارند. میانگین فراوانی وقوع مه در مناطق یادشده، به کمتر از ۱ رخداد در سال می‌رسد (شکل ۷-الف). با توجه به توزیع مکانی وقوع مه، به‌طور کلی ایستگاه‌های واقع در امتداد سواحل شمالی و جنوبی و تمامی ایستگاه‌های واقع در نیمه غربی کشور که در مناطق مرتفع کوهستانی واقع شده‌اند، از فراوانی بالای وقوع مه برخوردارند. به نظر می‌رسد در



شکل ۷. الف) میانگین سالانه فراوانی وقوع مه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های همدیدی کشور (واحد: فراوانی مه/روز در سال). دایره‌های کوچک مشکی نمایانگر فراوانی‌های کمتر از ۱ رخداد می‌باشند. ب) روند تغییرات وقوع مه طی سه دهه اخیر. ایستگاه‌هایی که با علامت اضافی ستاره مشخص شده‌اند دارای تغییرات روند معنی‌دار افزایشی/کاهشی در سطح اطمینان ۹۵٪ هستند. (واحد: تعداد مه/دهه).

نشان می‌دهد که این پدیده تنها در ۱۵٪ از ایستگاه‌ها در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. در مقابل، ۴۲٪ از ایستگاه‌ها وقوع مه در آن‌ها دارای روند افزایشی است که از این تعداد ایستگاه که روند افزایشی را نشان داده‌اند وقوع مه در ۱۵٪ از آنها در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. بررسی پراکنش مکانی روند افزایشی/کاهشی مه در ایران نشان می‌دهد که این پدیده در سواحل شمالی کشور (به غیر از ایستگاه انزلی) دارای روند افزایشی است. به استثنای سواحل جنوبی دریای خزر، برای سایر مناطق کشور نمی‌توان به نتیجه واحدی دست یافت؛ بدین ترتیب که در اکثر مناطق کشور روندهای افزایشی و کاهشی به‌طور توأمان و در مجاورت هم قابل مشاهده هستند. همین امر امکان دستیابی به نتیجه واحد و جمع‌بندی کلی در رابطه با تغییرات روند وقوع پدیده مه در ایران را مشکل ساخته است. پیچیده‌ترین الگوی مکانی از

لذا، بررسی تنوع جغرافیایی پدیده مه در مناطق مختلف کشور نشان می‌دهد که مه پدیده پیچیده‌ای است که به عوامل زیادی مانند مقدار رطوبت، دما، باد، پایداری و شرایط همدیدی وابسته است.

اما آنچه که از بررسی الگوی پراکنش جغرافیایی و وردایی‌های ساعتی و سالانه وقوع مه در ایران آشکار گردیده است، نقش برجسته ویژگی‌های جغرافیایی این سرزمین در تنوع‌بخشی به تشکیل انواع مه در گستره جغرافیایی ایران است.

بررسی روند تغییرات وقوع مه در مقیاس سالانه در ایران نشان می‌دهد که این پدیده اقلیمی در سه دهه گذشته (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در ۵۸٪ از ایستگاه‌های مورد بررسی دارای روند کاهشی بوده است (شکل ۷-ب). بررسی معنی‌داری روند ایستگاه‌هایی که وقوع مه در آن‌ها کاهش داشته است

تغییرات روند وقوع مه را می‌توان در شمال‌غربی ایران مشاهده کرد؛ جایی که می‌توان به شکل توأمان، بیشترین تعداد ایستگاه‌های دارای روند تغییرات کاهشی / افزایشی معنی‌دار را در مجاورت هم مشاهده نمود (شکل ۷-ب).

بررسی دقیق‌تر تغییرات روند وقوع مه در ایستگاه‌های کشور نتیجه‌جالبی را نشان می‌دهد. بدین ترتیب که تقریباً در تمامی کلان‌شهرها و شهرهای بزرگ ایران، مانند تهران، مشهد، تبریز، شیراز، اهواز، زاهدان، همدان، آبادان، کرمانشاه، خرم‌آباد، قزوین، زنجان، سنندج و یزد، فراوانی وقوع مه یک روند کاهشی را در طول سه دهه گذشته تجربه نموده است. این پدیده می‌تواند به دلیل اثرات شهرنشینی مانند اثر جزیره گرمایی شهری، افزایش انتشار هواپیزها و کاهش رطوبت خاک در ایستگاه‌های واقع در محدوده شهری باشد. این نتیجه در سایر مناطق جهان، از جمله در کره جنوبی نیز گزارش شده است (بلورید و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین روند کاهشی وقوع مه در نتیجه فعالیت‌های شهرنشینی و به‌طور کلی واداشت‌های انسان‌زاد، توسط مطالعات مختلفی همانند اودون-آیو و آلاگبه (۲۰۲۲) و لاکرا و آویشک (۲۰۲۲) مورد تأیید قرار گرفته است. روند کاهشی فراوانی وقوع مه در غرب و جنوب‌غرب ایران (شکل ۷-ب)، علاوه بر افزایش جمعیت و اثرات ناشی از آن در ایستگاه‌های واقع در محدوده شهری، می‌تواند ناشی از افزایش دمای متوسط شبانه سطح زمین (سرهان و همکاران، ۲۰۲۴)، کاهش بارش برف و پوشش برفی (احمدی و همکاران، ۲۰۲۲)، همچنین نتیجه مقادیر بالای هواپیز و گردوخاک حمل شده به منطقه توسط جریانات مقیاس منطقه‌ای در سال‌های اخیر باشد (داداشی رودباری و احمدی، ۲۰۲۱). در خصوص روند افزایشی مه نیز لاکرا و آویشک (۲۰۲۲) نشان دادند که در برخی مناطق به دلیل پیامدهای تغییر اقلیم، مانند افزایش دمای سطح دریا، تغییر الگوی بارش و افزایش رخدادهای فرین اقلیمی افزایش یافته‌اند. بررسی روند افزایشی وقوع مه در سواحل

شمالی کشور (شکل ۷-ب) می‌تواند هم‌راستا با یافته‌های لاکرا و آویشک (۲۰۲۲)، نتیجه تغییر الگوی بارش و افزایش رخدادهای فرین اقلیمی باشد. در این خصوص، زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۲) با بررسی رخدادهای فرین بارشی ایران نشان دادند که فرین‌های بارشی در سواحل جنوبی دریای خزر در چهار دهه اخیر از روند تغییرات افزایشی برخوردار بوده است. این روند برای بیشتر شاخص‌های فرین در سطح اعتماد ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. در کنار مطالعه روند تغییرات، بررسی وردایی سال به سال فراوانی وقوع مه در پهنه جغرافیایی ایران نیز می‌تواند ویژگی‌های دیگری از این پدیده را آشکار نماید. شکل ۸ با محاسبه مقادیر استاندارد شده، بی‌هنجاری‌های سال به سال وقوع مه را برای تعداد ۷۳ ایستگاه هواشناسی در مقایسه با میانگین دوره ۳۰ ساله نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در ۱۸ سال از دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه، فراوانی وقوع مه در ایران کمتر از میانگین بوده است. علاوه بر این، طولانی‌ترین دوره وقوع مه با بی‌هنجاری‌های منفی مربوط به یک دوره ۱۰ ساله در حدفاصل سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۳ می‌باشد. در این‌میان، سال ۱۹۹۷ با نمره استاندارد  $-1/4$ ، بیشترین بی‌هنجاری منفی در وقوع مه در کل دوره را تجربه نموده است. در مقابل، ۳ سال پایانی دوره مورد مطالعه، یعنی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ به ترتیب با مقادیر نمره استاندارد  $2/1$ ،  $3/3$  و  $1/6$ ، بالاترین مقادیر فراوانی سالانه وقوع مه در کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

### ۳-۳ طبقه‌بندی غلظت مه بر پایه دید افقی

یکی از جنبه‌های بسیار مهم وقوع مه که از نظر حمل و نقل دریایی، جاده‌ای و هوایی و به‌طور کلی، از جهت اقتصادی و امنیت بسیار حائز اهمیت است، مقدار غلظت پدیده مه می‌باشد. بررسی اقلیم‌شناسی مه بدون ارزیابی وضعیت غلظت این پدیده ناکافی و ناقص خواهد بود. بر این اساس، غلظت مه در ایران با پیروی از طبقه‌بندی ارائه شده توسط

دما (شکل ۵-ب)، افزایش مقادیر رطوبت با منشا دریای خزر در لایه مرزی، نقش اصلی را در اشباع هوا و ایجاد مه خیلی غلیظ ایفاء نماید.

در طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷)، تمامی مه‌هایی که در محدوده دید افقی ۲۵۰ تا ۵۰۰ متر جای می‌گیرند، مه غلیظ خوانده می‌شوند. بیشینه فراوانی این طبقه از مه ۳/۵ روز در سال محاسبه شده است که مجدد ایستگاه اردبیل بیشینه را به خود اختصاص داده است. پس از اردبیل، بیشترین وقوع مه غلیظ در ایستگاه رامسر با نزدیک به ۲/۵ روز در سال (۲/۴۷ روز)، پارس‌آباد ۲ روز و ایستگاه‌های بندانزلی و اراک ۱/۵ روز در سال ثبت گردیده است.

این نوع مه علاوه بر ایستگاه‌های نواحی جنوبی دریای خزر و غرب کشور، ایستگاه‌هایی در شرق کشور از جمله مشهد، زابل و چابهار را نیز در بر می‌گیرد. در مقام مقایسه بین فراوانی مه‌های غلیظ و خیلی غلیظ در ایران، مه‌های خیلی غلیظ بیش از دو برابر مه‌های غلیظ می‌باشند. ایستگاه‌های این طبقه به‌طور معمول در طول سال با میانگین فراوانی پایین، مه‌های رقیق (دید افقی ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ متر) را نیز تجربه می‌کنند. بدین ترتیب، ایستگاه‌های این طبقه در دسته‌بندی دوم و چهارم جای می‌گیرند و مه‌هایی با غلظت زیاد و متوسط (دسته اول و سوم) را شامل نمی‌شوند.

در رابطه با طبقه سوم یا مه‌های با غلظت متوسط (دید افقی ۵۰۱ تا ۷۵۰ متر)، تنها ایستگاه بندر انزلی در این طبقه جای می‌گیرد. این بدان معناست که هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه، به‌غیر از بندر انزلی، مه‌های با غلظت متوسط را تجربه نمی‌کنند. در واقع، در میان ۴ طبقه غلظت تعریف شده برای مه، طبقه متوسط کمترین امکان وقوع مه در ایران را به خود اختصاص داده است. در مقابل، فراوانی وقوع مه در طبقه چهارم یا طبقه مه رقیق (دید افقی ۷۵۱ تا ۱۰۰۰ متر)، به بالاترین فراوانی در میان ۴ طبقه می‌رسد. علاوه بر این، فراوانی وقوع مه رقیق از بیشترین پراکنش جغرافیایی در

تاردیف و راسموسن (۲۰۰۷) بر پایه دید افقی برای ۷۳ ایستگاه هواشناسی کشور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اولیه بررسی‌ها حاکی از آن است که، هر چهار گروه مه، یعنی مه خیلی غلیظ یا متراکم، مه غلیظ، مه متوسط و مه رقیق در ایران قابل مشاهده هستند. در این میان، همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، مه خیلی غلیظ یا متراکم (دید افقی ۰ تا ۲۵۰ متر) بیشتر در ایستگاه‌های واقع در سواحل دریای خزر و شمال غرب و غرب کشور مشاهده می‌شود.

بیشینه فراوانی سالانه وقوع مه‌های خیلی غلیظ در ایران به بیش از ۸ روز در سال می‌رسد. این بیشینه مربوط به دو ایستگاه واقع در دشت اردبیل است. این بدان معناست که منطقه اردبیل در طول سال به دفعات مه‌هایی را تجربه می‌کند که دید افقی را به کمتر از ۲۵۰ متر کاهش می‌دهند.

بدین ترتیب، بیشینه کاهش دید را با بالاترین مقدار فراوانی در دو ایستگاه اردبیل شاهد هستیم. نتیجه‌ای که پیشتر در خصوص فراوانی وقوع مه ساعتی و سالانه در شکل‌های ۲ تا ۷ مشاهده شده است. در کنار ایستگاه‌های اردبیل، ایستگاه‌های واقع در منتهی‌الیه جنوب‌غربی دریای خزر، مناطق مرتفع آذربایجان، ارتفاعات زاگرس و دشت خوزستان نیز مه‌های خیلی غلیظ را تجربه می‌کنند. به نظر می‌رسد در ایستگاه‌های اردبیل کاهش بسیار محسوس و چشمگیر دما در ساعات شب و تداوم آن، که در بخش قابل توجهی از سال به زیر صفر درجه سلسیوس نیز می‌رسد (طاوسی و دل‌آرا، ۱۳۸۹؛ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل، ۱۴۰۱)، نقش اصلی را در پیدایش مه‌های خیلی غلیظ بازی نماید. این درحالی است که، به نظر می‌رسد در سواحل جنوب غربی دریای خزر، با در نظر گرفتن نوسانات شبانه روزی کم دما (شکل ۵-ب)، افزایش مقادیر رطوبت با منشا دریای خزر در لایه مرزی، نقش اصلی را در اشباع هوا و ایجاد مه خیلی غلیظ ایفاء نماید.

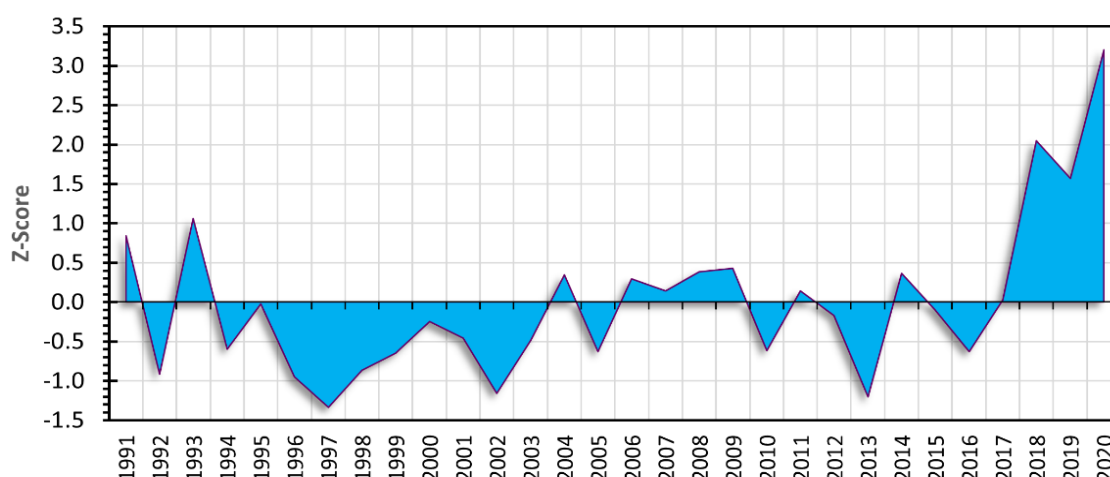
این درحالی است که، به نظر می‌رسد در سواحل جنوب غربی دریای خزر، با در نظر گرفتن نوسانات شبانه روزی کم

فرارفت نیاز دارد (خوری و همکاران، ۲۰۲۳). در مناطق خشک ایران، رطوبت کافی در هوا برای ایجاد مه وجود ندارد (شکل ۶)، یا سازوکارهای خنک کننده به اندازه کافی قوی نیستند که دما را تا دمای نقطه شبنم کاهش دهند. بنابراین، مه‌هایی از نوع مه غلیظ و خیلی غلیظ و حتی مه متوسط در مناطق خشک و نیمه خشک داخلی و شرقی ایران بسیار نادر است یا وجود ندارد، مگر آن که، یک منبع آب در نزدیکی ایستگاه و یا شرایط اقلیمی خاصی وجود داشته باشد که باعث ایجاد مه شود (شکل ۹).

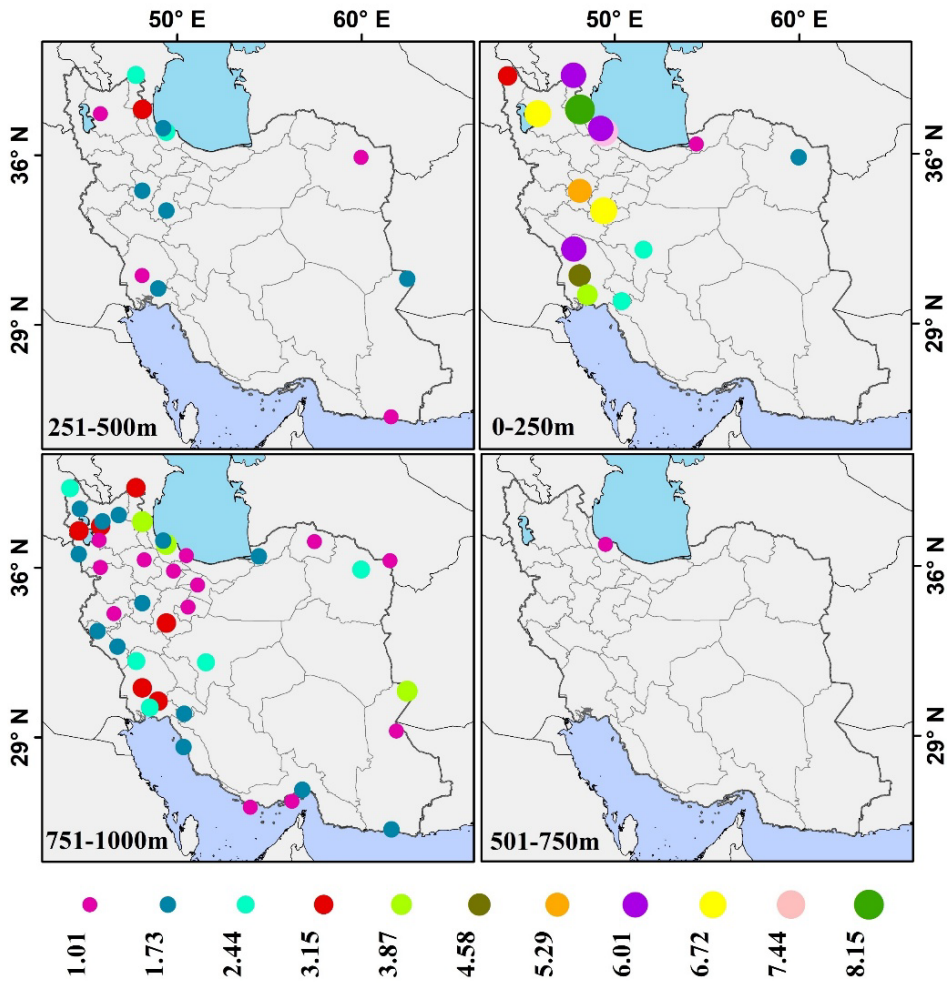
برای ارائه برخی جزئیات، فراوانی متوسط ۳ ساعته غلظت مه برای ۴ طبقه تعریف شده به تفکیک برای ایران (میانگین ۷۳ ایستگاه هواشناسی) و برای فرودگاه اردبیل به عنوان ایستگاه دارای بالاترین فراوانی وقوع مه، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل های ۱۰-الف و ۱۰-ب به وضوح قابل مشاهده است، بالاترین فراوانی سالانه غلظت مه برای تمامی طبقات تعریف شده، در ساعات شب و ابتدای صبح به وقوع می پیوندد. در این میان، فراوانی شبانه روزی غلظت مه در ۴ طبقه در پهنه ایران، بیشینه خود را در ساعت ۰۳ گرینویچ و کمینه خود را در بازه زمانی ۰۹ تا ۱۲ گرینویچ تجربه می نماید.

سطح کشور نیز برخوردار است. بدین ترتیب، ایستگاه‌های هواشناسی کشور در میان ۴ طبقه غلظت تعریف شده برای مه، بیش از همه مه رقیق را تجربه می کنند (شکل ۹). از جمله نواحی واقع در سواحل دریای عمان و خلیج فارس و بخش‌هایی از شرق و مرکز ایران مانند زابل، زاهدان، بندرعباس، قشم، کیش، اصفهان، قم و اراک که در طول سال تنها مه‌های رقیق را تجربه می کنند. کاهش دید افقی در ایستگاه‌های یادشده، به ندرت به کمتر از ۷۵۰ متر می رسد. بیشینه فراوانی مه رقیق با ۴ روز در سال در ایستگاه‌های رشت و اردبیل مشاهده می شود.

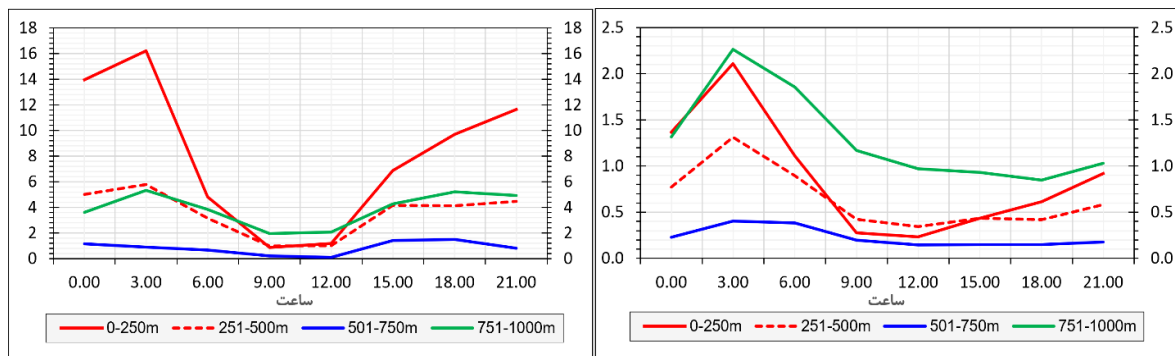
بررسی‌ها حاکی از آن است که بیش از نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه (۵۴/۷۹ درصد) به طور میانگین حداقل یک روز در سال مه رقیق را تجربه می کنند. یافته‌ها همچنین مبین آن است که از نظر اقلیمی، مناطق خشک و نیمه خشک داخلی و مناطق واقع در شرق، شمال شرق، جنوب شرق و جنوب ایران، مه‌های طبقه غلیظ و خیلی غلیظ را تجربه نمی کنند. همان‌طور که بحث شد مه نوعی ابر است که وقتی دمای هوا به زیر دمای نقطه شبنم می رسد و هوا از بخار آب اشباع می شود، در نزدیکی سطح زمین شکل می گیرد. مه به منبع رطوبتی مانند دریا، دریاچه یا رودخانه و سازوکاری برای خنک کردن هوا مانند تابش یا



شکل ۸. مقادیر نمرات استاندارد فراوانی سال به سال وقوع مه در ایران با میانگین‌گیری از وقوع سالانه مه در ۷۳ ایستگاه هواشناسی کشور برای دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰).



شکل ۹. میانگین فراوانی غلظت مه بر پایه دید افقی طی سه دهه اخیر (۲۰۲۰-۱۹۹۱). نقشه‌ها به ترتیب نشان‌دهنده، مه خیلی غلیظ یا متراکم (دید افقی ۰ تا ۲۵۰ متر)، مه غلیظ (دید افقی ۲۵۱-۵۰۰ متر)، مه متوسط (دید افقی ۵۰۱ تا ۷۵۰ متر) و مه رقیق (دید افقی ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ متر) هستند. دایره‌های کوچک مشکی نمایانگر فراوانی‌های کمتر از ۱ رخداد می‌باشد (واحد: تعداد مه/روز).



شکل ۱۰. میانگین فراوانی ۳ ساعته غلظت مه بر پایه دید افقی به تفکیک برای ۴ طبقه غلظت. (الف) میانگین ۳ ساعته برای ۷۳ ایستگاه هواشناسی. (ب) میانگین ۳ ساعته برای ایستگاه فرودگاه اردبیل (واحد: تعداد مه/روز).

شبانه است که طی ساعات شب و ساعات‌های اولیه صبح بوقوع می‌پیوندد. اگرچه در بررسی سوابق، مطالعات گذشته عمدتاً برای یک ایستگاه بوده‌اند و مطالعه جامعی که اقلیم‌شناسی مه را در ایران بررسی نموده باشد، یافت نشد؛ با این وجود، نتایج پژوهش حاضر، یافته‌های پهلوان و همکاران (۱۴۰۱-الف) و پهلوان (۱۴۰۲) را به ترتیب در رابطه با شبانه بودن پدیده مه در ایستگاه اردبیل (بیشینه فراوانی در ساعات ۳ و ۴ گرینویچ) و رشت (بیشینه ساعت ۰۰ گرینویچ)، همچنین، یافته‌های تاجبخش (۱۳۹۵) و پهلوان و همکاران (۱۴۰۱-ب) را در رابطه با ایستگاه مشهد (بیشینه در ساعات ۲۱ تا ۰۳ گرینویچ) مورد تأیید قرار می‌دهد.

✓ نتایج بیانگر آن است که در مقیاس اقلیمی، به استثنای نوار باریک سواحل جنوبی دریای خزر، در سایر مناطق کشور، به جهت مقادیر پایین‌تر رطوبت نسبی و یا مقادیر ناکافی رطوبت، اشباع هوا و پیدایش مه عمدتاً ناشی از کاهش محسوس دما در ساعات شب و ساعات اولیه صبح می‌باشد.

✓ بر اساس داده‌های ایستگاهی، فرودگاه اردبیل مه‌آلودترین ایستگاه کشور محسوب می‌گردد. این ایستگاه با فراوانی ساعتی حدود ۵۸ رخداد در سال برای ساعت ۰۳ گرینویچ (۶:۳۰ به وقت محلی) و میانگین فراوانی سالانه بیش از ۱۲۰ روز، با فاصله زیاد از سایر ایستگاه‌ها، رکورددار مه‌گرفتنی در کشور است. یافته‌ها مبین آن است که از نظر غلظت، مه خیلی غلیظ سهم اصلی را در مه‌گرفتنی فرودگاه اردبیل به خود اختصاص داده که کاهش دید افقی به کمتر از ۲۵۰ متر را به دنبال دارد. همچنین یافته‌ها نشان داد که در این ایستگاه بیش از آن که افزایش رطوبت در مه‌گرفتنی مؤثر باشد، کاهش محسوس دما نقش اصلی را بازی می‌کند.

✓ بررسی پراکنش جغرافیایی وقوع مه در ایران حاکی از آن است که، مه‌آلودترین مناطق کشور در امتداد

مقادیر میانگین محاسبه شده برای ۷۳ ایستگاه از برتری مه رقیق (دید افقی ۷۵۱ تا ۱۰۰۰ متر) بر سایر طبقات غلظت مه برای پهنه ایران حکایت دارد (شکل ۱۰-الف). این در حالی است که در فرودگاه اردبیل میانگین فراوانی مه خیلی غلیظ (دید افقی ۰ تا ۲۵۰ متر) در مقایسه با سایر طبقات، به شکلی محسوس و بافاصله، از فراوانی بیشتری برخوردار است. فراوانی بالای مه خیلی غلیظ در ساعات شب و کاهش آن در ساعات میانه روز، شکلی سهمی به نمودار ساعتی مه خیلی غلیظ در اردبیل بخشیده است (شکل ۱۰-ب). مقایسه دو نمودار فوق با نتایج بخش پیشین (شکل ۹)، حاکی از آن است که برتری مه رقیق در پهنه ایران بر مه خیلی غلیظ (شکل ۱۰-الف)، ناشی از تعداد بالای ایستگاه‌های واقع در مناطق داخلی ایران و به‌طور کلی تعداد قابل توجه ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با رطوبت نسبی کمتر و دماهای بالاتر از ایستگاه اردبیل در محاسبه میانگین پهنه‌ای ایران است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش اقلیم‌شناسی مه در ایران و تغییرات روند فراوانی آن برای یک دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های تحقیق از برخی نتایج جالب توجه حکایت دارد. مهم‌ترین نتایج پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

✓ یافته‌ها نشان داد که، بیشترین فراوانی وقوع مه در ایران در ساعات اولیه صبح (ساعت ۰۳ به وقت گرینویچ) بوقوع می‌پیوندد. به‌طوری که میانگین متوسط پهنه‌ای وقوع مه در این ساعت در ایران ۴/۸۵ روز در سال به‌دست آمده است. پس از آن با طلوع خورشید و گرم شدن هوا، پتانسیل وقوع مه در ایران به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که در ساعات میانی روز مقدار آن به کمتر از ۰/۵۵ روز می‌رسد. بدین ترتیب، نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که، تقریباً در تمامی مناطق جغرافیایی کشور، پدیده مه یک رخداد

و کاهش رطوبت خاک، نقش مهمی را در فقدان وقوع مه بازی می‌کنند. در واقع، در این مناطق فقدان رطوبت خاک می‌تواند فقدان مه را توضیح دهد. در همین راستا اسمیت و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که مه به رسانایی گرمایی خاک (Thermal Conductivity of Soil) بسیار حساس است و باعث می‌شود حتی زمان شروع مه تا پنج ساعت جابجا شود. ✓ بررسی روند تغییرات وقوع مه در ایران نشان داد که این پدیده در ۵۸٪ از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است. بررسی روند تغییرات وقوع مه در سایر مناطق جهان از جمله، آسیا، اروپا، آمریکای شمالی و آمریکای جنوبی حاکی از روند کلی مشابهی (روند کاهشی) در مناطق یادشده می‌باشد (ون اولدنبرگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ کلم‌ولین، ۲۰۱۶). در مقیاس‌های کوچکتر نیز روند کاهشی وقوع مه در کشورهایمانند کره جنوبی (بلورید و همکاران، ۲۰۱۵)، جنوب شرق ایالات متحده آمریکا (فورتون و همکاران، ۲۰۰۶) و کالیفرنیا (جانستون و داوسون، ۲۰۱۰) گزارش گردیده است. در برخی مطالعات، همانند اودون-آیو و آلاگبه (۲۰۲۲) و لاکرا و آویشک (۲۰۲۲) روند کاهشی وقوع مه، نتیجه فعالیت‌های شهرنشینی و عوامل انسان‌زاد دانسته شده است. بررسی روند تغییرات وقوع مه در ایستگاه‌های ایران نتیجه جالب توجهی را نشان داده است. بدین ترتیب که، وقوع این پدیده در کلان-شهرهای مهم ایران یعنی تهران، مشهد، تبریز، شیراز و اهواز و بسیاری دیگر از شهرهای بزرگ، طی ۳۰ سال گذشته از یک روند کاهشی برخوردار بوده است. در توضیح این پدیده می‌توان اذعان داشت که شهرنشینی و پدیده جزیره گرمایی شهری با تغییر دمای محلی، وقوع مه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از ویژگی‌های بارز تقریباً تمام شهرهای بزرگ و محیط‌های شهری، افزایش دما است که باعث کاهش رطوبت نسبی می‌شود که شرایط را برای تشکیل مه نامطلوب می‌سازد. با این وجود، تغییرات مه در مناطقی همچون سواحل جنوبی دریای خزر و شمال غرب ایران از

یک نوار نسبتاً باریک از جنوب غربی دریای خزر تا دشت مغان در استان اردبیل کشیده شده‌اند. کانون اصلی مه در ایران استان اردبیل است که بالاترین فراوانی وقوع مه را تقریباً در تمامی ساعات شبانه‌روز نشان داده است. بررسی پراکنش جغرافیایی مه، چه برای ساعات مختلف شبانه‌روز چه برای میانگین سالانه، نشان داد که این پدیده به شدت از عوامل جغرافیایی و تنوع اقلیمی در ایران متأثر گردیده است. بر این اساس، در سواحل خزری، مقادیر بالای رطوبت و در مناطق مرتفع کوهستانی، کاهش محسوس و قابل توجه دمای هوا، مؤلفه‌های اصلی و تعیین‌کننده برای افزایش پتانسیل وقوع مه در این مناطق هستند. این تفاوت به خوبی از مقایسه منحنی‌های اختلاف دما و رطوبت نسبی برای مناطق یادشده قابل تشخیص است. بدین ترتیب، در کنار انتقال محلی رطوبت دریای خزر و سازوکارهای محلی در مجاورت دریای خزر که سبب شکل‌گیری کانون اصلی مه‌گرفتگی کشور در محدوده جنوب غربی دریای خزر و استان اردبیل گردیده است، مه‌گرفتگی در مناطق مرتفع آذربایجان و نیمه شمالی رشته کوه زاگرس را می‌توان ناشی از نقش غالب ارتفاع و کاهش محسوس و قابل توجه دما دانست. در رابطه با اثر ارتفاعات، هونووا و همکاران (۲۰۲۱)، ضمن مطالعه نقش خصوصیات فیزیکی سطح زمین در وقوع مه در رومانی، به نتایج مشابهی به ویژه برای مناطق مرتفع واقع در شمال غرب این کشور، دست یافتند. ✓ نتایج پژوهش حاضر به روشنی نشان داد که در مناطق خشک داخلی و شرقی ایران، چه در مقیاس سالانه و چه در مقیاس ساعتی تشکیل مه بسیار محدود بوده و در عین حال، در ساعات میانی روز تقریباً به صفر می‌رسد. در این خصوص، یافته‌ها همچنین حاکی از آن است که در این مناطق در صورت تشکیل مه، از نظر غلظت، مه‌های تشکیل‌شده، تنها از نوع مه رقیق با کاهش دید افقی به مقدار ۷۵۱ تا ۱۰۰۰ متر خواهند بود. بی‌شک در مناطق خشک و نیمه خشک داخلی و شرقی ایران، کمبود رطوبت هوا

در برخی از مناطق کشور، از جمله، امتداد رود ارس در مرز ایران و آذربایجان، نوار مرزی ایران و ترکیه از ماکو تا پیرانشهر و منتهی‌الیه جنوب‌شرق کشور (شرق چابهار)، امکان ارائه یک تصویر قابل قبول از فراوانی وقوع مه در مناطق یادشده فراهم نگردیده است. بنابراین، این ضرورت وجود دارد تا در مطالعات آتی ضمن بهره‌گیری از مجموعه داده‌هایی با پوشش مکانی و دوره زمانی مطلوب، تحلیل‌های مکانی دقیق‌تری از وقوع مه در ایران ارائه گردد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران ناشناس که با پیشنهادات و یادداشت‌های مؤثر و ارزشمند خود سبب بهبود محتوی مقاله شده‌اند، قدردانی می‌نمایند.

### منابع

- ارکیان، فروزان؛ صابری، تاتیس؛ اردکانی، حسین؛ زمانیان، محمدتقی. (۱۳۹۲). بررسی آماری و همدیدی وقوع رویداد مه در فرودگاه بین‌المللی رشت. مجله پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، ۸(۱)، ۷۸-۹۱.
- پهلوان، راضیه. (۱۴۰۲)، مطالعه اقلیمی رخداد مه در فرودگاه رشت، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، (۵۳) ۱۴، ۲۱۵-۲۲۴.
- پهلوان، راضیه؛ مرادی، محمد؛ تاجبخش، سحر؛ آزادی، مجید؛ رهنما، مهدی. (۱۴۰۰). حساسیت‌سنجی عددی دو رخداد مه در فرودگاه اردبیل به طرحواره‌های لایه مرزی سیاره‌ای با استفاده از مدل WRF. نیوار (۴۵) ۱۱۴ و ۱۱۵، ۷۰-۸۳.
- پهلوان، راضیه؛ مرادی، محمد؛ تاجبخش، سحر؛ آزادی، مجید؛ رهنما، مهدی. (۱۴۰۱-الف). مطالعه وضعیت اقلیمی مه در فرودگاه اردبیل در دوره آماری ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰. نیوار (۴۶) ۱۱۶ و ۱۱۷، ۱-۱۲.

یک روند افزایشی برخوردار است. روند افزایشی مه نیز می‌تواند در نتیجه افزایش دمای سطح‌دریا، تغییر الگوی بارش و افزایش رخدادهای فرین اقلیمی باشد (لاکرا و آویشک، ۲۰۲۲). تحت تأثیر پدیده گرمایش جهانی، فرین‌های اقلیمی در بیش‌تر مناطق ایران از جمله سواحل جنوبی دریای خزر دارای روند افزایشی بوده‌اند (زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۲) که می‌تواند سبب تغییر در فراوانی وقوع مه در کشور باشد.

✓ بررسی غلظت مه بیانگر آن است که هر چهار گروه مه در ایران به‌وقوع می‌پیوندند. با این وجود، فراوانی وقوع مه با غلظت متوسط (دید افقی ۵۰۱ تا ۷۵۰ متر) در ایران بسیار نادر بوده و تنها محدود به جنوب غربی دریای خزر و ایستگاه انزلی است. کانون اصلی وقوع مه در کشور یعنی سواحل جنوب‌غربی دریای خزر، استان اردبیل و شمال غرب ایران عمدتاً مه خیلی غلیظ را تجربه می‌کنند. این در حالی است که از نظر غلظت مه در پهنه جغرافیایی ایران، بالاترین فراوانی وقوع مربوط به مه رقیق می‌باشد. این نوع مه در بیشتر مناطق جغرافیایی کشور از جمله مناطق غربی و مناطق خشک داخلی و شرقی غلبه دارد.

✓ بررسی‌ها نشان داد که در پهنه جغرافیایی ایران، تمامی انواع مه از نظر غلظت، از جمله مه غلیظ و مه رقیق، بیشینه فراوانی شبانه‌روزی خود را در ساعات اولیه صبح، به‌ویژه ساعت ۰۳ گریجوی (۰۳:۳۰ به وقت محلی) تجربه می‌کنند.

✓ بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و محاسبه و تعیین مناطق با رطوبت نسبی بالا در کشور و مقایسه آن با فراوانی وقوع مه برای ساعات مختلف شبانه روز مبتنی بر داده‌های ایستگاهی، انطباق بسیار خوبی را بین مناطق با فراوانی بالای مه و مناطق با فراوانی رطوبت نسبی بالا نشان می‌دهد. با این وجود، به کارگیری داده‌های باز تحلیل با تفکیک افقی بالا حکایت از آن دارد که در مطالعه حاضر به جهت نبودن یا فاصله زیاد ایستگاه‌های هواشناسی

- تخصصی برنامه ریزی فضایی، ۱ (۴)، ۸۹-۱۱۰
- Ackerman, S., Knox, J. (2007). *Meteorology: Understanding the Atmosphere*. 2<sup>nd</sup> ed. Thomson Brooks, 502 p.
- Ahmadi, H., Rostami, N., Dadashi-Roudbari, A. (2022). The impact of climate change on snowfall in Iran Basins using the satellite-derived snow products and CMIP6 bias-corrected model. *Theoretical Applied Climatology*, 151:603-618.
- Akimoto, Y., and Kusaka, H. (2015). A climatological study of fog in Japan based on event data. *Atmospheric Research*, 151, 200-211.
- Aksu, H. (2019). Event-Based Fog Characteristics of ÇARŞAMBA Airport. *Applied Sciences and Engineering*, 20(4), 515 - 523.
- Belorid, M., Lee, C. B., Kim, J. C., & Cheon, T. H. (2015). Distribution and long-term trends in various fog types over South Korea. *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 699-710.
- Bergot, T., Guedalia, D. (1994). Numerical forecasting of radiation fog. part I: numerical model and sensitivity tests. *Monthly Weather Review*, 122, 1218-1230.
- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Mutata, H., Ohno, T., Okuyama, A., Oyama, R., Sasaki, Y., Shimazu, Y., Shimoji, K., Sumida, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H., Tsuchiyama, H., Uesawa, D., Yokota, H., & Yoshida, R. (2016). An Introduction to Himawari-8/9 Japan's New Generation Geostationary Meteorological Satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(2), 151-183.
- Byers, H. R. (1959). *General Meteorology*. McGraw-Hill Book Company Inc, New York, 540 p.
- Croft, P.J., R. Pfost, R.L., Medlin, J.M., & Johnson, G.A. (1997). Fog forecasting for the southern region: A conceptual model approach. *Weather and forecasting*, 12(3), 545-556.
- Dadashi-Roudbari, A., & Ahmadi, M. (2021). An assessment of change point and trend of diurnal variation of dust storms in Iran: پهلوان، راضیه؛ مرادی، محمد؛ تاجبخش، سحر؛ آزادی، مجید؛ رهنما، مهدی. (۱۴۰۱-ب). بررسی اقلیمی مه در فرودگاه مشهد. ۱۳ (۵۲)، ۶۴-۵۵.
- زینالی، بتول؛ خلیلی آذر، سیما؛ عینی، سعیده. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی مخاطرات جوی منطقه‌ی شمال‌غرب ایران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۵۳) ۱۹، ۱۷۷-۱۹۳.
- تاجبخش، سحر. (۱۳۹۵). مطالعه آماری و شناسایی نوع مه به کمک یک الگوریتم در مهم‌ترین فرودگاه‌های کشور، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۷ (۲۷ و ۲۸)، ۴۳-۵۶.
- تاجبخش، سحر؛ رهنما، مهدی. (۱۳۹۶). پایش و تحلیل رخداد مه به کمک داده‌های زمینی و سنجش از دور. مجله علمی و ترویجی نیوار، ۱۰ و ۱۰۱، ۳۵-۴۴.
- تاجبخش، سحر؛ مرادی، محمد؛ رشیدزاد، مهدی؛ محمدپور پنجاه، محمدرضا. (۱۳۹۷). پیش‌بینی رخداد مه به کمک برخی روش‌های تجربی (فرودگاه‌های تهران و مشهد). فیزیک زمین و فضا، ۴۴ (۲)، ۳۷۹-۳۹۵.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل، (۱۴۰۱). طرح آمایش استان اردبیل-تحلیل وضعیت اقلیمی. شماره گزارش: 502213AR002300301RE1019710، ۱۹، ۷۴ صفحه.
- شهبازی شیران، حبیب. (۱۳۷۲). جغرافیای اردبیل، جلد اول. انتشارات آرتا، اردبیل، ص ۳۴.
- صلاحی، برومند؛ محمدی، سیاوش. (۱۳۹۰). تحلیل همدید و آماری مه‌های فرودگاه اردبیل و ارائه‌ی ساعات مناسب پروازی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۷، ۶۹-۹۲.
- طاوسی، تقی؛ دل آرا، قدیر. (۱۳۸۹). پهنه بندی آب و هوایی استان اردبیل. نیوار، ۷۱-۷۰، ۵۲-۴۷.
- مددی، محسن. (۱۳۹۱). مدیریت بحران برف و یخبندان در مناطق و شهرهای کوهستانی و برف‌گیر. مجله علمی

- a multi-instrumental approach from in situ, multi-satellite, and reanalysis dust product. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1523-1544.
- DelSole T., & Tippet M. (2022). *Confidence Intervals*. In: Statistical Methods for Climate Scientists. Cambridge University Press, 52-68.
- De Villiers, M.P., & van Heerden, J. (2007). Fog at Abu Dhabi International Airport. *Weather*, 62 (8),209-2014.
- Forthun, G. M., Johnson, M. B., Schmitz, W. G., Blume, J., & Caldwell, R. J. (2006). Trends in fog frequency and duration in the southeast United States. *Physical Geography*, 27(3), 206-222.
- Franca, G.B., Do Carmo, L.F.R., De Almeida, M.V., & Albuquerque Neto, F.L. (2018). Fog at the Guarulhos International Airport from 1951 to 2015. *Pure And Applied Geophysics*, 176, 2191-220.
- Genon, L.M. (1987). Numerical Simulation of a Fog Event with a One-Dimensional Boundary Layer Model. *Monthly Weather Review*, 115, 592-607.
- Georgil, J. J. (1940), Fog: its causes and forecasting with special reference to eastern and southern United States (I). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 21, 135-148.
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S.C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Müller, M.D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., & Jacobs, W. (2007). Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 1121-1159.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Hanesiak, J.M., Wang, X.L. (2005). Adverse-weather trends in the Canadian Arctic. *Journal of Climate*, 18, 3140-3156.
- Hardwick, W.C. (1973). Monthly Fog Frequency in the continental United States. *Monthly Weather Review*, 101, 763-766.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., & Muñoz-Sabater, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hu, Z., Liu, S., Zhong, G., Lin, H., & Zhou, Z. (2020). Modified Mann-Kendall trend test for hydrological time series under the scaling hypothesis and its application. *Hydrological Sciences Journal*, 65(14), 2419-2438.
- Hůnová, I., Brabec, M., Malý, M., Dumitrescu, A., Geletič, A. (2021). Terrain and its effects on fog occurrence. *Science of the Total Environment*, 768, 144359.
- Johnson, R. P. (1941). Pliny, Natural History. With an English Translation in Ten Volumes. Volume III, Libri VIII-XI.
- Johnstone, J. A., & Dawson, T. E. (2010). Climatic context and ecological implications of summer fog decline in the coast redwood region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(10), 4533-4538.
- Kampa, M., Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151, 362-367.
- Khoury, D., Millet, M., Jabali, Y., & Delhomme, O. (2023). Fog Water: A General Review of its Physical and Chemical Aspects. *Environment*, 10(12) 224, 1-33.
- Kim, Y., Hong, S. (2019). Deep Learning-Generated Nighttime Reflectance and Daytime Radiance of the Midwave Infrared Band of a Geostationary Satellite. *Remote Sensing*, 11(22), 2713, 1-14.
- Kim, Y., Ryu, H.S., Hong, S. (2023). Data-to-data translation-based nowcasting of specific sea fog using geostationary weather satellite observation. *Atmospheric Research*, 290 (94), 106792.
- Klemm, O., & Lin, N. (2016). What causes observed fog trends: air quality or climate change? *Aerosol and Air Quality Research*, 16(5), 1131-1142.
- Koyuncu, R., Deniz, A., Ozdemir, E.T. (2019). Ankara Esenboga International Airport (Turkey) fog analysis and synoptical investigation of the fog event dated 17-19 December 2019. *International*

- Journal of Climatology*, 42(16), 8368-8389.
- LaDochy, S. (2005). The disappearance of dense fog in Los Angeles: Another urban impact? *Physical Geography*, 26, 177-191.
- Lakra, k., Avishek, k. (2022). A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Scienze Fisiche e Naturali*, 33 (2), 319-353.
- Meyer, M.B., & LALA, G.G. (1986). FOG-82: A cooperative field study of radiation fog. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65, 825-832.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., & Martens, B. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383.
- Muraca, G., Maviver, D.C., Auld, H., & Urquzio, N. (2001). The climatology of fog in Canada. Atmospheric Sciences. The climatology of fog in Canada, Proceeding of 2<sup>nd</sup> International Conference of Fog and Fog Collection, St. John's, Newfoundland, 15-20 July, 2001.
- Nakanishi, M., Niino, H. (2006). An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary Layer Meteorology*, 119, 397-407.
- Neumann, J. (1989), Forecasts of fine weather in the literature of classical antiquity, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70, 46-48.
- Odun-Ayo, I., & Alagbe, O. (2022). *Fog computing technology: a review of current trends*. The United Nations and Sustainable Development Goals, 261-275.
- Ozdemir, E.T., Deniz, A., Sezen, İ., Menteş, S., Yavuz, V. (2016). Fog Analysis at Istanbul Ataturk International Airport. *Weather*, 71(11), 279-284.
- Pagowski, M., Gultepe, H., King, P. (2004). Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 3-16
- Pauli, E., Cermak, J., Andersen, H., & Schütz, M. (2024). *A satellite-based analysis of fog and low stratus life cycle processes in the Po valley, Italy* (No. EGU24-15582). Copernicus Meetings.
- Peace, R.L. Jr. (1969). Heavy-fog regions in the conterminous United States. *Monthly Weather Review*, 97, 116-123.
- Perez-Díaz, J. L., Ivanov, O., Peshev, Z., Álvarez-Valenzuela, M. A., Valiente-Blanco, A., Evgenieva, T., Dreischuh, T., Gueorguiev, O., Todorov, P.V., & Aseashta, A. (2017). Fogs: Physical Basis, Characteristic Properties, and Impacts on the Environment and Human Health. *Water*, 9(10). 807.
- Peterka, A., Thompson, G., & Geresdi, I. (2024). Numerical prediction of fog: A novel parameterization for droplet Ryu, H., Hong, S. (2020). Sea Fog Detection Based on Normalized Difference Snow Index Using Advanced Himawari Imager Observations. *Remote Sensing*, 12(9), 1-17.
- Sarhan, E., Mofidi, A., Dadashi-Roudbari, A., Zarrin, A., & Minaei, M. (2024). Climatology of cold spots and LST minimums in Iran using high-resolution satellite data. *Theoretical Applied Climatology*, 155, 1395-1413.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Singh, M. K., & Gautam, R. (2022). Developing a long-term high-resolution winter fog climatology over South Asia using satellite observations from 2002 to 2020. *Remote Sensing of Environment*, 279, 113128.
- Smith, D. K., Renfrew, I. A., Dorling, S. R., Price, J. D., & Boutle, I. A. (2021). Sub-km scale numerical weather prediction model simulations of radiation fog. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 746-763.

- Stolaki, S.N., Kazadzis, S. A., Foris, D.V., & Karacostas, TH.S. (2009). Fog characteristics at the airport of Thessaloniki, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1541-1549.
- Tardif, R., Rasmussen, R.M. (2007). Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (8), 1141-1168.
- Taylor, G. I. (1917), The formation of fog and mist. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 43(183), 241-268.
- Van Oldenborgh, G. J., Yiou, P., & Vautard, R. (2010). On the roles of circulation and aerosols in the decline of mist and dense fog in Europe over the last 30 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(10), 4597-4609.
- Van Schalkwayk, L., Dyson, L.L. (2013). Climatological characteristics of fog at Cape Town International Airport. *Weather Forecasting*, 28(3), 631-646.
- Velde, I.R. van der, G.J. Steeneveld, B.G.J. Wichers Schreur, A.A.M. Holtslag. (2010). Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions. *Monthly Weather Review*, 138(11), 4237-4253.
- Wagh, S., Kulkarni, R., Lonkar, P., Parde, A. N., Dhangar, N. G., Govardhan, G., Sajjan, V., Debnath, S., Gultepe, I., Rajeevan, M. & Ghude, S.D. (2023). Development of visibility equation based on fog microphysical observations and its verification using the WRF model, *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 195-211.
- Willett, H.C. (1928). Fog and haze: their causes, distribution, and forecasting. *Monthly Weather Review*, 56 (11), 435-468.
- World Meteorological Organization. (2022). *Fog Report*, Available online: <https://cloudatlas.wmo.int/en/fog.html>
- Wright Jr, J. M. (1997). Federal Meteorological Handbook no. 3: Rawinsonde and Pibal observations. Office of the Federal Coordinator for Meteorology.
- Yang, J.H., Yoo, J.M., Choi, Y.S. (2021). Advanced Dual-Satellite Method for Detection of Low Stratus and Fog near Japan at Dawn from FY-4A and Himawari-8. *Remote Sensing*, 13(5), 1-22.
- Yang, Z., Wu, M., Xu, M., Zhu, X., Zhang, C., & Zhang, B. (2023). MoANet: A Motion Attention Network for Sea Fog Detection in Time Series Meteorological Satellite Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Yi, L., Li, M., Liu, SH., Shi, X., Li, K.F., & Bendix, J. (2023). Detection of dawn sea fog/low stratus using geostationary satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 294(3). 766-771
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Spatiotemporal variability, trend, and change-point of precipitation extremes and their contribution to the total precipitation in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), 2923-2944.

## Climatology of fog in Iran based on observational data

Bahareh Taheri Aval Shahri<sup>1</sup>, Abbas Mofidi<sup>2\*</sup>, Abbasali Dadashi-Roudbari<sup>3</sup> and Azar Zarrin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Climatology, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

(Received: 28 September 2024, Accepted: 27 January 2025)

### Summary

This study investigated the climatology of fog in Iran. For this purpose, data from 73 synoptic meteorological stations over a 30-year period (1991-2020) were utilized for two variables: current weather conditions (fog identifier codes 40-49) and horizontal visibility. Initially, the frequency of fog occurrence was examined at both hourly (3-hourly) and annual scales for all stations. To investigate the spatial and temporal patterns of fog in Iran, relative humidity and the temperature difference between air temperature and dew point temperature were calculated using ERA5-Land reanalysis data. The geographical distribution of fog was assessed, and temporal trends in fog occurrence were examined. Two statistical measures, Sen's-slope and modified Man-Kendall, were used for this purpose. Furthermore, fog density was categorized into four main classes based on horizontal visibility and analyzed on both annual and hourly scales for all stations. Findings indicated that fog formation in all geographical regions of Iran is primarily a nocturnal phenomenon, occurring predominantly during nighttime hours and the early morning. The frequency of fog exhibited a diurnal trend, with a minimum at approximately 12:00 UTC and a maximum at approximately 03:00 UTC. Among the studied stations, those located in Ardabil Province and the southwestern region of the Caspian Sea (including Ardabil Airport, Ardabil, ParsAbad Moghan, Rasht, and Anzali) experienced the highest fog frequencies on both hourly and annual scales. The investigation into the spatial distribution of fog occurrence in Iran reveals that the foggiest regions of the country are located along a relatively narrow strip, extending from the southwest of the Caspian Sea to Dasht-e-Moghan in Ardabil Province. The main place of fog occurrence in Iran is Ardabil province, which has shown the highest frequency of fog occurrence in almost all hours of the day and night. Ardabil Airport, with an annual average of 120 foggy days and a peak of 57 occurrences at 03:00 UTC, was identified as the foggiest station in the country. In contrast, the results clearly showed that in the dry interior and eastern regions of Iran, both on an annual scale and on an hourly scale, fog formation is very limited and almost reaches zero in the middle hours of the day. Examining the concentration of fog shows that all four main categories of fog occur in Iran. Nevertheless, the occurrence of fog with moderate concentration is infrequent and is only limited to the southwest of the Caspian Sea and the Anzali station. The results also indicated that the most prevalent type of fog in Iran is thin fog, which prevails in the western regions and a significant portion of the country's interior. On the other hand, very dense fogs occur mostly in the southwest of the Caspian Sea and Ardabil province. A trend analysis of fog occurrence in Iran revealed that this phenomenon has a decreasing trend at 58% of the stations. Additionally, almost all major cities nationwide have experienced a decreasing trend in fog occurrences, which can be attributed to the shift in urbanization patterns over the past three decades. The results also indicated that the diversity of geographical and climatic features of Iran plays a key role in the spatial distribution of fog occurrence and its concentration.

**Keywords:** Fog, fog concentration, horizontal visibility, Iran, trend analysis of fog

---

\*Corresponding author:

abbasmofidi@um.ac.ir