

## بررسی شرایط هواشناسی کمینه دید افقی روزانه با استفاده از اطلاعات دستگاه RVR فرودگاه امام خمینی

جلال‌الدین حاتمی مهندس، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.  
سمانه ثابت قدم، استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.<sup>۱</sup>  
فرهنگ احمدی گیوی، دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

### چکیده

دید افقی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نوری جو از جنبه‌های متفاوت حائز اهمیت است. تعیین دقیق دید از عوامل تأثیرگذار در سلامتی پرواز هنگام فرود و برخاست هواپیما به‌شمار می‌رود. یک روش تعیین دید در امتداد باند فرودگاه‌ها، استفاده از دستگاه‌های ترنسمیسومتر و فورواردر اسکترومتر است که پخش و عبوردهی نور را اندازه‌گیری می‌کنند. در مقاله حاضر برای نخستین بار در کشور از داده‌های این دستگاه‌ها برای تعیین میزان دقیق دید در باند فرودگاه امام خمینی استفاده شده است تا شرایط رخداد کمینه دید در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ مطالعه شود. اطلاعات ایستگاه همدیدی و متار به‌عنوان اطلاعات تکمیلی در این دو سال نیز به‌کار رفته است. داده‌های مورد استفاده شامل محدوده دید، دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت، تندی و جهت باد است. با در نظر گرفتن شرایط حدی برای رخداد کمینه دید مشاهده می‌شود که بیشترین رخداد کمینه دید مربوط به فصل زمستان، اواخر پاییز و اوایل بهار است که می‌تواند به‌دلیل تأثیر فعالیت بیشتر سامانه‌های جوی و شرایط آب و هوایی متغیر در این ماه‌ها باشد. بررسی نوع پدیده‌های جوی در ایستگاه همدیدی فرودگاه امام در روزهای بحرانی نشان می‌دهد که عمدتاً گردوخاک، غبار، انواع مه و بارش پدیده‌های غالب هستند. بر اساس نتایج دو مطالعه موردی، افزایش رطوبت نسبی و تغییر جهت باد از عواملی هستند که در رخداد کمینه دید نقش موثری دارند.

واژه‌های کلیدی: دید در باند فرودگاه امام، پخش و عبوردهی نور، رخداد کمینه دید.

## مقدمه

دید افقی از مهم‌ترین خصوصیات نوری جو است که از جنبه‌های متفاوت از جمله ترافیک زمینی و هوایی حائز اهمیت است. محدوده دید به دورترین فاصله‌ای گفته می‌شود که ناظری با دید عادی و در شرایط جوی مناسب قادر به تشخیص است. قدیمی‌ترین و رایج‌ترین تعریف از قابلیت دید در هواشناسی، توانایی مشاهده دورترین فاصله از یک جسم سیاه است که در برابر افق آسمان قرار دارد (Horvath, ۱۹۸۱). در این راستا مفهوم دیگری به نام حد آستانه تضاد نیز استفاده می‌شود. منظور از آستانه تضاد وضعیت یا شرایطی است که تفاوت میان روشنایی آسمان و جسم به میزانی کاهش پیدا کند که بیننده به سختی قادر به مشاهده جسم باشد (Malm, ۱۹۹۹). محدوده دید در جو پاک بین ۱۴۵ تا ۲۲۵ کیلومتر، برای جو معمولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر و در مناطق آلوده این مقدار کمتر است (Wu et al., ۲۰۱۲).

تعیین دقیق محدوده دید، یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در سلامتی پرواز به‌ویژه در هنگام فرود و برخاست هواپیما به‌شمار می‌رود (Clark, et al. ۲۰۰۸, Sinkevich et al. ۲۰۰۱). براساس اطلاعات سازمان بین‌المللی هوانوردی (ایکائو)، بیشترین سوانح هوایی در نزدیکی فرودگاه‌ها و در شرایطی رخ می‌دهد که میدان دید کمتر از حداقل استانداردهای مورد نیاز برای پرواز می‌باشد و این آمار بین سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۸۹ حدود ۱۶۸۵ نفر (سالانه ۱۶۸ نفر) کشته را ثبت کرده است. طبق استانداردهای بین‌المللی، هنگامی که دید کمتر از حداقل مشخص شده برای باند باشد، فرود و برخاست هواپیما انجام نمی‌شود که این مسئله یکی از دلایل عمده تأخیر در زمان پرواز، بسته‌شدن فرودگاه‌ها و هدایت هواپیما به فرودگاه‌های دیگر است که از جنبه اقتصادی و زمانی برای شرکت‌های هواپیمایی بسیار هزینه‌بر است (ICAO, ۲۰۰۶). برای نمونه، رخداد مه در مدت سه روز در دسامبر ۲۰۰۶، باعث لغو نیمی از پروازها در لندن شد (Clark et al., ۲۰۰۸). سوانح هوایی زیادی نیز در طول تاریخ به دلیل کاهش دید افقی رخ داده است (Fultz and Ashley, ۲۰۱۶). علاوه بر سوانح هوایی، بر اساس بررسی‌های پیشین میزان تلفات ناشی از تصادفات جاده‌ای در هنگام رخداد مه در آمریکا، بیش از دو برابر تلفات ناشی از مجموع حوادث سیل، توفان و آذرخش طی سال‌های ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۱ بوده است (Rosenfeld, ۱۹۹۶).

کاهش دید یا خاموشی نور معمولاً به‌علت جذب و پراکنش نور توسط گازها و ذرات جوی رخ می‌دهد و کاهش شدت نور متناسب با طول مسافت طی شده توسط نور و شدت نور در آن نقطه است (Wu, et al., ۲۰۱۲, Baumer, et al. ۲۰۰۸). علاوه بر این، بسیاری از پدیده‌های جوی مانند مه، باران، برف، تگرگ و گرد و غبار می‌توانند بر کاهش میزان دید تاثیر داشته باشند (Mahowald et al. ۲۰۰۷, Wen and Yeh, ۲۰۱۰). ضریب خاموشی نشانگر کسری از نور است که در واحد طول تضعیف می‌شود و میزان جذب و پراکنش نور با ذرات و گازها مقدار این ضریب را مشخص می‌کند (Tsai, et al., ۲۰۰۷, Sabetghadam, et al. ۲۰۱۴). به‌طور معمول، شدت نور در حین عبور از جو و در طول مسیر خود تضعیف می‌شود؛ ولی شدت نور به‌علت ورود نورهای اضافه از محیط نیز دستخوش تغییر می‌شود (Jacobson, ۲۰۰۵). نور اضافه شده به مسیر نوری می‌تواند ناشی از پراکنش و بازتاب نور خورشید از سطوح و همچنین ناشی از مولکول‌های هوا و هواویزهای موجود در مسیر باشد (شکل ۱).

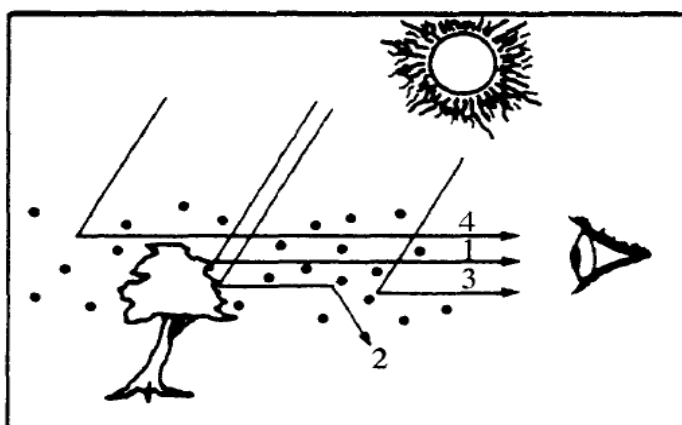
میزان دید در جو به روش‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود که متداول‌ترین آن، گزارش دیدبان‌های هواشناسی است. دیدبان در هر ایستگاه هواشناسی برای تعیین دید افقی نشانه‌های با فاصله مشخص از محل دیدبانی را در نظر می‌گیرد

و براساس این نشانه‌ها، دید را تعیین و در فواصل زمانی سه ساعت گزارش می‌کند (Jarraud, ۲۰۰۸). با توجه به فراوانی ایستگاه‌های همدیدی، در این روش توزیع گسترده‌ای از اطلاعات، به‌ویژه در مناطقی که دستگاه‌های اندازه‌گیری در دسترس نیستند، در اختیار قرار می‌گیرد. اگرچه در این روش وجود خطای انسانی در برآورد میدان دید امری طبیعی و غیرقابل اجتناب است، با این وجود از این روش در تحقیقات گسترده‌ای از گذشته تا کنون برای تعیین دید استفاده شده است (Sloane, ۱۹۸۴, Husar, et al., ۲۰۰۰, Tsai, et al., ۲۰۰۷, Sabetghadam, et al., ۲۰۱۲, Wu, et al., ۲۰۱۳, Lin, et al., ۲۰۱۴, Doyle and Dorling, ۲۰۰۲, Schichte, et al., ۲۰۰۱).

روش دیگر برای تعیین میزان دید، محاسبه دید توسط دستگاه‌هایی است که پخش و عبوردهی نور را اندازه‌گیری می‌کنند. در این روش از دستگاه‌هایی مانند ترنس‌میسومتر و فوروارد اسکترمتر استفاده شده و مقدار خاموشی و تضعیف نور که از سوی یک فرستنده به گیرنده ارسال می‌شود، محاسبه و براساس آن، مقدار دقیق دید در باند فرودگاه (RVR; Runway Visual Range) تعیین می‌گردد (Pak and Zanevetd, ۱۹۸۳). در این روش، تعیین دید نسبت به روش دیدبانی دقیق‌تر است، ولی بسیار هزینه‌بر و محدود به مکان خاص می‌باشد. تحقیقات متنوعی نیز با استفاده از داده‌های دستگاه RVR در برخی فرودگاه‌های دنیا انجام شده است. برای نمونه، در دو باند فرودگاه گاندی دهلی نو در هند، که روزانه نزدیک به ۷۰۰ پرواز در آن انجام می‌شود، ساعاتی که منجر به بسته شدن باندهای فرودگاه بر اثر پدیده مه غلیظ در فصل زمستان می‌شود بررسی شده است (Jenamani and Tyagi, ۲۰۱۱). نتایج نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۰۸، مجموع روزهای دید کم ناشی از مه غلیظ ۲۸ روز و مجموع ساعات آن ۱۸۱ ساعت بوده است. در باندهایی که به دستگاه‌های پیشرفته‌تری برای فرود پرواز مجهز است، به دلیل امکان گزارش دقیق مقادیر کمینه دید، این باندها ساعات کمتری بسته می‌شود. در پژوهشی دیگر در این زمینه، میزان دید در فرودگاه پیرسون تورنتوی کانادا در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ و نقش پارامترهای هواشناسی مؤثر در بهبود یا کاهش دید بررسی شده است (Boudala et al., ۲۰۱۲).

در پژوهش‌های محدود انجام شده در ایران در ارتباط با بررسی عوامل تاثیرگذار بر میزان دید عمدتاً از داده‌های دیدبانی استفاده شده است (مانند صلاحی و محمدی، ۱۳۹۰؛ ثابت قدم و همکاران، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۲؛ تاجبخش، ۱۳۹۵). تا آنجا که ما اطلاع داریم، تا کنون کار پژوهشی در زمینه مطالعه دید افقی با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در ایران انتشار نیافته است؛ از این‌رو امید است انجام پژوهش حاضر گامی در راستای تکمیل مطالعات پیشین در خصوص ارتباط شرایط هواشناسی و تاثیر آنها بر رخداد کمینه دید جوی در شهر تهران باشد. به دلیل حساسیت مسئله دید در فرودگاه‌ها، لزوم پژوهش در این زمینه از اهمیتی خاص برخوردار است. براساس گزارش سال‌نامه آماری سازمان هواپیمایی کشوری، فرودگاه امام خمینی با متوسط ۱۲۰ تا ۱۵۰ پرواز در روز، سومین فرودگاه مهم کشور است. خوشبختانه این فرودگاه مجهز به دستگاه‌های نامبرده برای سنجش دقیق میزان دید در راستای باند فرودگاه است. با توجه به روند روبه‌رشد تعداد پروازها و مسافرت‌های هوایی، ارتقاء سامانه امنیت و سلامت پروازها یکی از مهم‌ترین اهداف هوانوردی به‌شمار می‌آید. در این راستا، دید به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در آخرین مرحله پرواز که فرود می‌باشد، می‌تواند بر سلامت پروازها بسیار مؤثر باشد. در مقاله حاضر برای نخستین بار در کشور از داده‌های دستگاه RVR برای سنجش میزان دقیق دید و تعیین رخداد کمینه دید در بازه سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ استفاده شده است. - علت انتخاب اطلاعات این دو سال محدود برای بررسی شرایط دید، عدم وجود داده‌های دستگاه در دوره بلندمدت است. سپس شرایط کاهش دید در فصل‌ها و ماه‌هایی که احتمال رخداد پدیده‌های تاثیرگذار بر دید وجود دارد با تمرکز

بیشتر بررسی شده است.



شکل ۱ عوامل مختلف تاثیرگذار در میزان دید. اعداد شکل به ترتیب بیان گر (۱) پرتو نور رسیده از جسم به ناظر، (۲) پرتو پراکنده شده از مسیر نوری، (۳) پرتو نور اضافه شده به مسیر نوری و (۴) نور اضافه شده از افق پس زمینه هستند ( Seinfeld and Pandis, ۲۰۰۶).

### داده‌ها و روش کار

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های محدوده دید RVR، دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت، تندی و جهت باد است که با استفاده از سه دستگاه خودکار واقع در ابتدا، میانه و انتهای باند اندازه‌گیری می‌شوند. این داده‌ها به همراه اطلاعات ایستگاه همدیدی فرودگاه امام خمینی به عنوان اطلاعات تکمیلی در دو سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ برای انجام مطالعه استفاده شده‌اند.

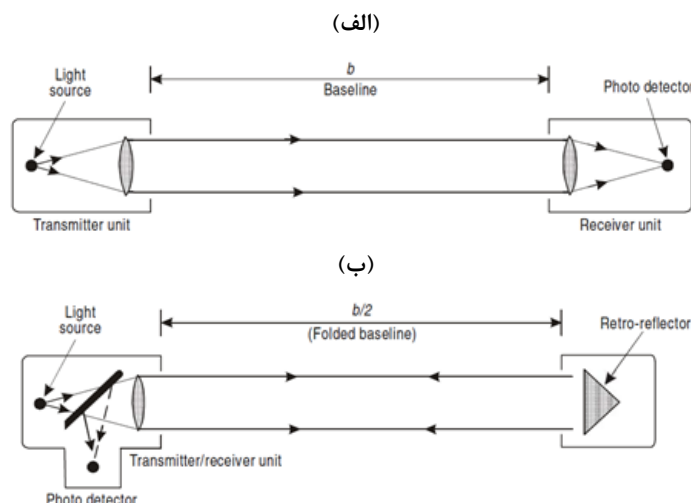
دید در امتداد باند یا دید RVR، برابر بیشینه فاصله‌ای است که معمولاً به طور افقی در راستای خط وسط باند، چراغ‌های باند و علائم روی سطح باند قابل تشخیص باشد. این دید عمدتاً توسط دستگاهی با همین نام (دستگاه RVR) اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه سنجش دید RVR برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ از سوی سازمان هواپیمایی جهانی (ایکائو) برای استفاده در فرودگاه‌ها معرفی شد. اساس کار دستگاه بر پایه اندازه‌گیری انتقال پرتو، اثر جذب و مقدار پراکنش آن است. این دستگاه از سه بخش متفاوت شامل ترنس‌میسومتر (Transmissometer)، فوروارد اسکترمتر (scattermeter Forward) و حسگر سنجش نور پس‌زمینه (Background light sensor) تشکیل شده است. ترنس‌میسومتر دستگاهی است که فاصله مستقیم انتقال پرتو نور بین دو نقطه را محاسبه می‌کند. این دستگاه مقدار عبوردهی نور از جو را با توجه به ضریب خاموشی جو تعیین کرده و فرایندهای جذب و پخش نور را در محاسبات در نظر می‌گیرد. محدوده دقت اندازه‌گیری کمینه ۵۰ متر و بیشینه ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متر است. در شکل ۲ نحوه کارکرد دو نوع متفاوت از دستگاه ترنس‌میسومتر نشان داده شده است. شکل ۲-الف نوعی از دستگاه که فرستنده و گیرنده به صورت جداگانه و روبروی هم قرار دارند و شکل ۲-ب نوع دیگری از دستگاه که فرستنده و گیرنده با هم روی یک پایه قرار داشته و بر روی پایه مقابل یک منشور وجود دارد که پرتو نور تابیده شده توسط فرستنده را به گیرنده باز می‌تاباند، نشان می‌دهند. مسافت طی شده در روش دوم دو برابر روش اول است.

دستگاه فوروارد اسکترمتر یا نفلومتر، وسیله‌ای برای به دست آوردن ضریب خاموشی جو با اندازه‌گیری شار پراکنش نور توسط ذرات موجود در جو است که اثر پخش را محاسبه می‌کند. حسگر سنجش نور پس‌زمینه نیز مقدار روشنایی

پس زمینه را اندازه‌گیری می‌کند، به‌گونه‌ای که نور خورشید و چراغ‌های باند نباید به‌طور مستقیم روی آن تاثیر بگذارد. بدین علت آن را با یک زاویه نسبت به افق نصب می‌کنند.

اطلاعات دستگاه‌های ترنسیمیومتر و فوروارد اسکترمتر مستقر در باند فرودگاه امام‌خیمینی به فواصل زمانی یک دقیقه، ۱۰ دقیقه و ۲۴ ساعت ثبت می‌شود. در طول دو سال مورد مطالعه بیش از یک میلیون و پنجاه هزار دقیقه اطلاعات ثبت و به کار رفته‌است. با در نظر گرفتن شرایط حدی برای رخداد کمینه دید، در مطالعه حاضر از سری داده‌های یک دقیقه‌ای استفاده شده و بسامد رخداد کمینه دید در ماه‌ها و فصل‌های مختلف تعیین شده است. انتخاب روزهای با کمینه دید در این مطالعه براساس سه شرط حدی بدین صورت است که: (۱) میزان دید به کمتر از ۱۵۰۰ متر رسیده باشد، (۲) دید کمتر از ۱۵۰۰ متر در دوره حداقل ۱۰ دقیقه‌ای استمرار داشته باشد و (۳) دید کمتر از ۱۵۰۰ متر حداقل در دو دستگاه از سه دستگاه مورد بررسی، به ثبت رسیده باشد. این شرایط حدی به‌صورت تجربی و بر مبنای محدوده دقت اندازه‌گیری دستگاه تعیین شده است.

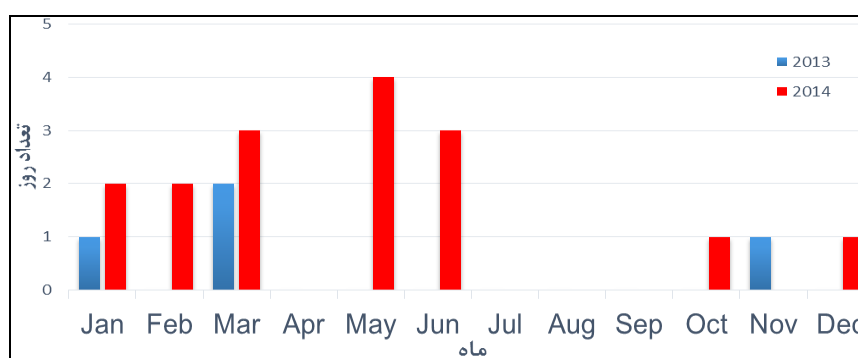
پس از انتخاب روزهای با شرایط حدی، پارامترهای هواشناختی که بیشترین سهم در کاهش میزان دید داشته‌اند، مطالعه شده است. با در نظر گرفتن شرایط حدی برای رخداد کمینه دید در سری داده‌های یک دقیقه‌ای، بسامد رخداد کمینه دید برای موارد انتخاب شده، در ماه‌ها و فصل‌های مختلف سال تعیین و پدیده‌های هواشناختی نیز که دارای بیشترین سهم در کاهش میزان دید بودند، شناسایی گردید. با مشخص شدن عوامل تاثیرگذار بر کاهش دید افقی و دسته‌بندی پدیده‌های هواشناسی مربوطه، تحلیلی از شرایط و عوامل موثر برای دو نمونه موردی از کاهش دید انجام شد. پارامترهایی که برای نمونه‌های موردی کاهش دید مطالعه شده‌اند شامل دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، جهت و تندی باد و فشار هستند.



شکل ۲. نحوه کارکرد دو نوع دستگاه ترنسیمیومتر. (الف) در شرایطی که فرستنده و گیرنده به‌صورت جداگانه و روبروی هم قرار دارند و (ب) فرستنده و گیرنده با هم روی یک پایه قرار داشته و بر روی پایه مقابل یک منشور وجود دارد که پرتو نور تابیده شده توسط فرستنده را به گیرنده باز می‌تاباند (ICAO, ۲۰۰۶).

### شرح و تفسیر نتایج

با در نظر گرفتن شرایط انتخاب موارد کمینه رخداد دید که در بخش قبل به آن اشاره شد، روزهای دارای مقادیر حدی دید در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ تعیین و نتایج مقایسه ماهانه رخداد این روزها برحسب تعداد روز در هریک از دو سال در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مجموع روزهای با شرایط کمینه دید در سال ۲۰۱۴ بیش از سال ۲۰۱۳ است؛ به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۱۳ چهار روز و در سال ۲۰۱۴ شانزده روز با شرایط کمینه میزان دید، رخ داده است. در سال‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر، بیشترین تعداد روزهای بحرانی با دید کم مربوط به فصل زمستان، اواخر پاییز و اوایل بهار است که می‌تواند به دلیل تاثیر فعالیت بیشتر سامانه‌های جوی و شرایط آب و هوایی متغیر در این ماه‌ها باشد.



شکل ۳ مقایسه ماهانه رخداد با شرایط کمینه دید ۱۵۰۰ متر و تعداد روزها در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴.

با بررسی پدیده‌های کاهنده دید RVR در دو سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ مشاهده می‌شود که از مجموع بیست روز از این دوره که دید مقادیر ۱۵۰۰ متر و کمتر داشته است، در ۹ روز، پدیده توفان همراه با باد شدید رخ داده و همچنین کاهش میزان دید ۱۰ روز ناشی از پدیده غبار بوده است. پدیده‌های بارش برف، بارش باران و رگبارهای کوتاه‌مدت شدید در ۷ روز منجر به کاهش میزان دید شده‌اند. در نهایت، ۳ روز نیز مربوط به پدیده مه بوده که نقش مهمی در کاهش میزان دید داشته است. با بررسی روزانه موارد کاهش دید RVR به میزان ۱۵۰۰ متر و کمتر، ملاحظه می‌شود که پدیده توفان تندی در ۴ مورد در ماه مه، ۲ مورد در ماه ژوئن و ۱ مورد در ماه‌های مارس، اکتبر و ژانویه رخ داده است که شدیدترین آن در ماه ژوئن مربوط به توفان سهمگین ۱۲ خرداد سال ۱۳۹۳ در تهران است. پدیده مه از دیگر عوامل کاهش دید RVR است که ۳ روز را به خود اختصاص داده است. مدت زمان ماندگاری این پدیده معمولاً بیشتر از سایر پدیده‌ها بوده و در هر یک از ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر یک مورد پدیده مه ثبت شده است. به‌طور کلی فصل زمستان، اواخر پاییز و اوایل بهار زمان مناسبی برای تشکیل مه هستند.

مقایسه میانگین پارامترهای هواشناختی در پدیده‌های منجر به کاهش دید RVR که در جدول ۱ ارائه شده است، حاکی از آن است که در دوره دو ساله مورد مطالعه، کمترین مقدار میانگین دید RVR مربوط به پدیده مه با مقدار ۵۱۳ متر است. سپس پدیده‌های غبار، توفان شن و بارش به ترتیب با مقادیر میانگین کمینه دید ۱۰۱۰، ۱۱۸۴ و ۱۲۲۰ متر قرار دارند که دارای بیشترین تاثیر در کاهش دید بوده‌اند. به نظر می‌رسد، مقدار میانگین رطوبت نسبی بالا در پدیده مه به میزان ۸۸ درصد که همراه با کاهش نسبت دما به دمای نقطه شبنم و همچنین کمترین مقدار تندی باد در حدود ۲/۶۹ نات است، بیشترین نقش در کاهش میزان دید در دوره مورد مطالعه داشته‌اند. با وجود اینکه تعداد

رخداد مه در مقایسه با پدیده‌هایی مانند توفان و بارش کمتر است، اما بیشترین تأثیر را بر کاهش میزان دید RVR دارد. از این‌رو در ادامه در دو مطالعه موردی نقش توفان و مه در رخداد کمینه دید با دقت بیشتر بررسی می‌شود.

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار دو سائۀ کمیت‌های هواشناختی در پدیده‌های کاهنده دید RVR.

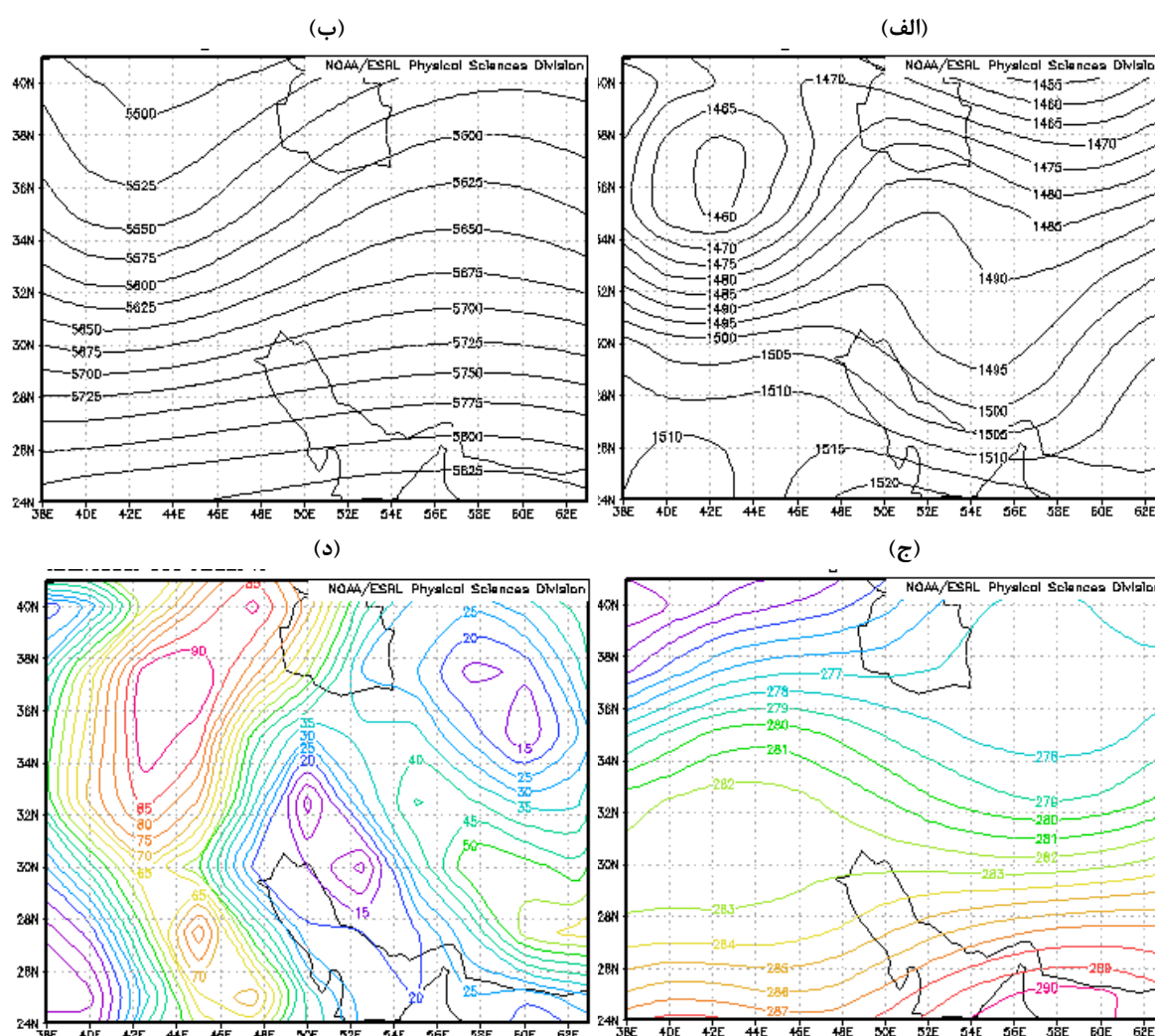
| پدیده              | تعداد روز | دید RVR (متر) |         | فشار (هکتوپاسکال) |         | دمای نقطه شبنم (درجه سانتی-گراد) |         | رطوبت (درصد) |         | دما (درجه سانتی-گراد) |         | تندی باد (نات) |         |
|--------------------|-----------|---------------|---------|-------------------|---------|----------------------------------|---------|--------------|---------|-----------------------|---------|----------------|---------|
|                    |           | انحراف معیار  | میانگین | انحراف معیار      | میانگین | انحراف معیار                     | میانگین | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار          | میانگین | انحراف معیار   | میانگین |
| توفان <sup>۱</sup> | ۹         | ۱۱۸۴          | ۲۳۵     | ۱۰۱۴٫۵            | ۳٫۶     | ۲٫۲                              | ۸٫۱     | ۱۵           | ۳۰      | ۹٫۵                   | ۲۲      | ۲۲٫۸           | ۹٫۷     |
| بارش <sup>۲</sup>  | ۷         | ۱۲۲۰          | ۱۷۹     | ۱۰۱۸٫۹            | ۶٫۵     | ۰                                | ۵٫۶     | ۵٫۹          | ۸۶      | ۶٫۵                   | ۲       | ۹٫۹            | ۷٫۱     |
| مه <sup>۳</sup>    | ۳         | ۵۱۳           | ۷۳      | ۱۰۲۲٫۶            | ۷٫۵     | -۳                               | -۰٫۳    | ۱٫۵          | ۸۸      | -۰٫۱                  | -۱٫۸    | ۷٫۲            | ۱٫۸     |
| بار <sup>۴</sup>   | ۱         | ۱۰۱۰          | -       | ۱۰۱۵              | -       | ۱۱٫۸                             | -       | ۷۳           | -       | -                     | ۱۶٫۶    | ۴٫۹            | -       |

برای بررسی حساسیت عوامل کاهنده دید به انتخاب مقدار حدی، شرایط رخداد کمینه براساس بیشینه دقت اندازه‌گیری دستگاه، به ۲۰۰۰ متر افزایش داده شد. با افزایش مقدار حدی دید از ۱۵۰۰ به ۲۰۰۰ متر، مجموع روزهای با دید کم از ۲۰ روز به ۲۴ روز افزایش می‌یابد. در ده روز از روزهای با دید کم پدیده توفان همراه با باد شدید، در ۱ روز پدیده غبار، در ۹ روز بارش و در ۴ روز پدیده مه رخ داده است. در خصوص پدیده‌های غبار و بارش، از لحاظ آماری نسبت به شرایط حدی ۱۵۰۰ متر تفاوتی دیده نمی‌شود. حدود ۱۶ درصد کاهش دید در این مورد مربوط به پدیده مه است که در فصل زمستان و اواخر پاییز اتفاق افتاده است.

#### • کاهش دید ناشی از رخداد مه

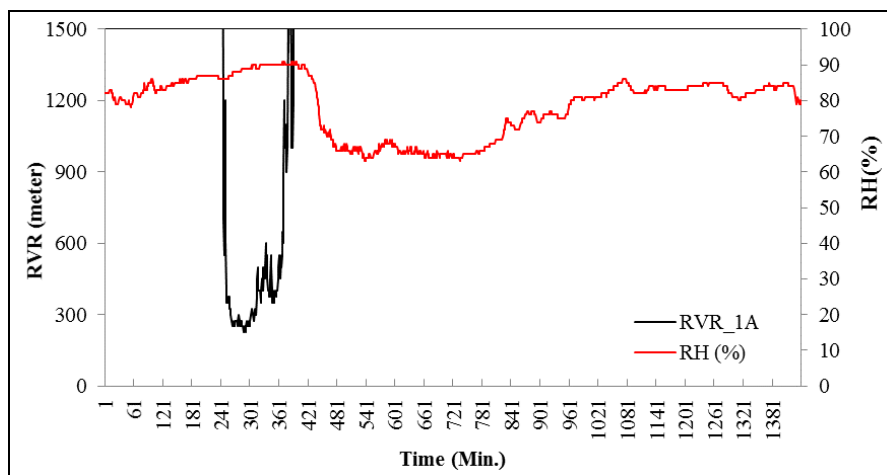
بررسی داده‌های RVR فرودگاه امام خمینی بیانگر آن است که در روز ۲۳ دسامبر ۲۰۱۴ پدیده مه منجر به کاهش دید با مقادیر کمتر از ۱۵۰۰ متر شده و بازۀ زمانی کاهش دید بین UTC ۰۴:۰۵ تا UTC ۰۶:۲۹ است. در مطالعه همدیدی پدیده‌ها و سامانه‌های مستقر در منطقه از نقشه‌های سطوح مختلف هم‌فشاری در ساعت‌های متفاوت استفاده شده است که اینجا برای رعایت اختصار فقط به ارائه نقشه‌های میانگین ساعت ۰۰:۰۰ تا UTC ۰۶:۰۰ ارتفاع ژئوپتانسیلی سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، توزیع رطوبت نسبی و دما در نزدیک سطح زمین اکتفا می‌شود (شکل-های ۴-الف تا ۴-د). در روز ۲۳ دسامبر ۲۰۱۴، کشور تحت تأثیر یک مرکز پرفشار است. نقشه‌های سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال زبانه‌های پرارتفاع مربوط به این سامانه در نواحی مورد مطالعه را به وضوح نشان می‌دهد. جو آرام ناشی از استقرار الگوی پرفشار سطحی و الگوی پرارتفاع در سطوح بالای وردسپهر، همراه با نشست هوای سرد و فرارفت رطوبت از غرب به سمت منطقه مورد مطالعه در رخداد پدیده مه موثر بوده‌اند.

با توجه به بازه زمانی کوتاه رخداد کاهش دید، جزئیات بیشتر تغییرات رطوبت نسبی، دما، تندى و جهت باد در سرى-هاى زمانى با فواصل زمانى یک دقیقه بررسى شده است. تغییرات یک دقیقه‌ای میزان دید RVR و رطوبت نسبی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل، زمانى که دید کاهش یافته است، رطوبت نسبی بیش از ۸۵ درصد بوده و به مرور زمان با افزایش میزان دید، رطوبت کاهش نشان می‌دهد. در این زمان، تفاوت دما و دمای نقطه شبنم به مقدار حدود ۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، ضمن آنکه هر دو دما منفی هستند. با طلوع آفتاب و در ساعات اولیه صبح، هر دو دما افزایش می‌یابد و اختلاف بین آنها بیشتر می‌شود که با افزایش دید RVR همراه است. تغییرات میزان دید با جهت وزش باد و تندى آن در شکل ۶ ارائه شده است. در هنگام کاهش دید، تندى باد از ۸ نات به ۲ نات کاهش یافته (شکل ۶-ب) و جهت باد نیز ابتدا از شمال‌غربى به‌صورت پادساعتگرد به سمت شرق تغییر مسیر داده و دوباره شمال‌غربى می‌شود (شکل ۶-الف). با افزایش دید RVR، کاهش فشار در حدود ۴ هکتوپاسکال در ۶ ساعت رخ می‌دهد.

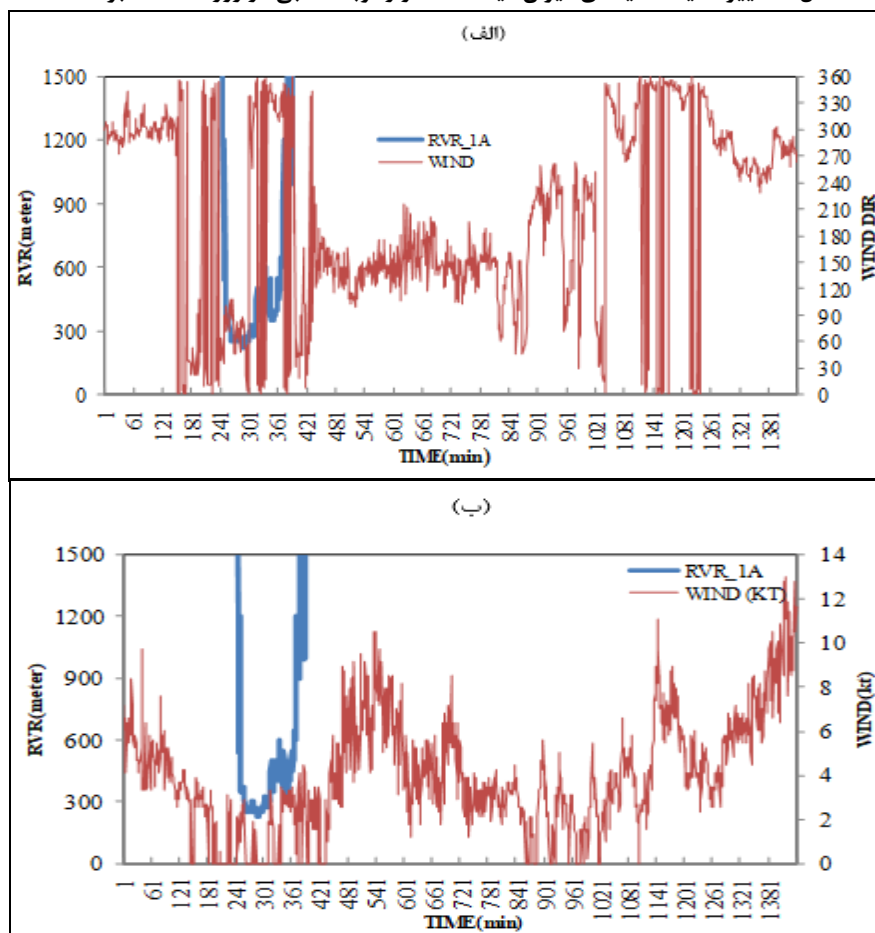


شکل ۴. نقشه‌های همدیدی ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطوح (الف) ۸۵۰ و (ب) ۵۰۰ هکتوپاسکال، (ج) دما و (د) رطوبت نسبی (برحسب درصد) برای میانگین ساعت UTC ۰۶۰۰ تا ۰۰ روز ۲۳ دسامبر ۲۰۱۴.

نتایج مطالعه موردی نقش پدیده مه در کاهش دید RVR نشان می‌دهد که وجود رطوبت بیش از ۸۵ درصد، پایین بودن دما و دمای نقطه شبنم و نزدیک بودن این دو دما به یکدیگر، وزش باد ملایم و تغییر جهت آن در لحظه دید کم، که می‌تواند منجر به فرارفت رطوبت از سمت غرب به سمت منطقه باشد، شرایط مناسب برای تشکیل مه و در نتیجه کاهش دید را ایجاد کرده است.



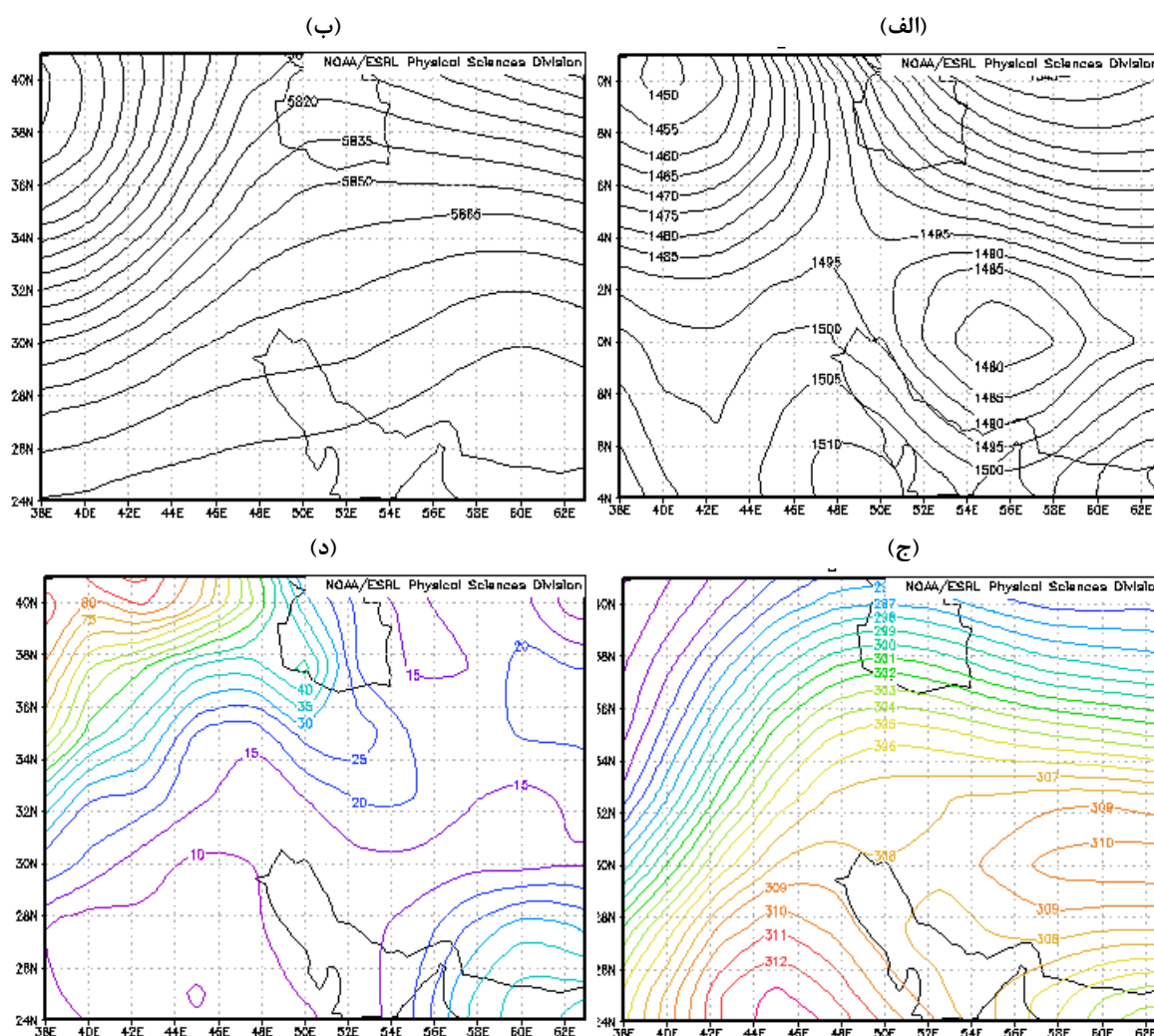
شکل ۵ تغییرات یک دقیقه‌ای میزان دید RVR و رطوبت نسبی در روز ۲۳ دسامبر ۲۰۱۴.



شکل ۶. تغییرات یک دقیقه‌ای (الف) دید RVR و جهت باد، (ب) دید RVR و تندی باد در روز ۲۳ دسامبر ۲۰۱۴.

### • کاهش دید ناشی از پدیده توفان

کاهش دید RVR به میزان کمتر از ۱۵۰۰ متر در بازه زمانی ۱۲:۱۶ UTC تا ۲۳:۵۹ UTC در روز دوم ژوئن ۲۰۱۴ مشاهده شده است. در این مورد نیز مانند شکل ۴ نقشه‌های سطوح مختلف هم‌فشاری در ساعت‌های متفاوت تهیه شده ولی فقط نقشه‌های مربوط به میانگین ساعت ۱۲ تا ۱۸ UTC روز دوم ژوئن ارائه شده است (شکل ۷). در این روز تاثیر دو مرکز کم‌ارتفاع، که با کم‌فشار سطحی همراه هستند، یکی در شمال دریای سیاه و دیگری در جنوب خلیج فارس مشاهده می‌شود. هم‌چنین زبانه‌های یک سامانه پرا ارتفاع در نقشه ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷-ب) در جنوب غرب کشور به چشم می‌خورد که ایران را متاثر ساخته است. گرمایش سطحی در مناطق مرکزی و غربی ایران به همراه رطوبت کافی می‌تواند از عوامل رخداد پدیده توفان تندری باشند که دلیل اصلی کاهش دید در این روز است.

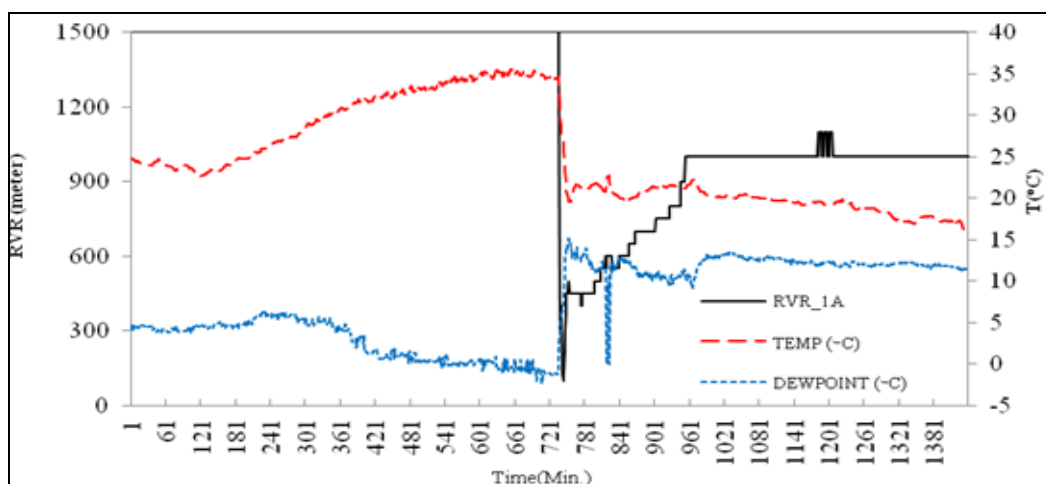


شکل ۷. مانند شکل ۴ ولی برای میانگین ساعت ۱۲ تا ۱۸ UTC روز ۲ ژوئن ۲۰۱۴.

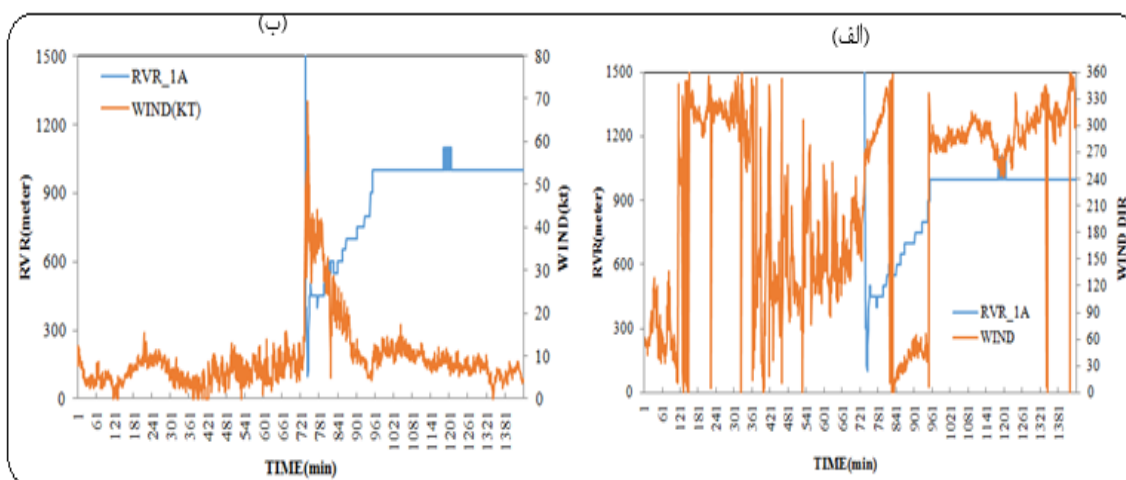
در شکل ۸ تغییرات یک دقیقه‌ای میزان دید RVR همراه با دما و دمای نقطه شبنم نشان داده شده است. با توجه به شکل، در زمان کاهش دید، اختلاف این دو دما از ۳۵ درجه به ۵ درجه کاهش یافته و هر دو دما مقدار مثبت دارند. این روند تا پایان روز دیده می‌شود. در زمانی که دید کاهش می‌یابد، رطوبت هوا از ۱۰ درصد به طور ناگهانی به ۷۵ درصد رسیده است، که به نظر می‌رسد ناشی از شکل‌گیری سامانه همرفتی، ایجاد ابرناکی و رخداد توفان تندری در

منطقه است.

چگونگی تغییرات میزان دید با جهت و تندی وزش باد در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل، قبل از کاهش دید، جهت باد جنوب سو بوده و در هنگام کاهش دید، با چرخش ساعتگرد به صورت شمال سو درآمده است (شکل ۹-الف). روند تغییر جهت باد در طول روز ادامه داشته و در نهایت باد غالب شمال شرقی می شود. قبل از زمان کاهش دید، سرعت باد در حدود ۱۰ نات است و در زمان کاهش دید، با افزایش ناگهانی و لحظه ای به ۷۰ نات نیز می رسد (شکل ۹-ب). تا پایان روز می توان روند کاهش سرعت تا ۵ نات را مشاهده کرد. تغییرات یک دقیقه ای فشار در طول این روز نیز نشانگر آن است که قبل از کاهش دید، یک روند کاهش شدید فشار ۵/۵ هکتوپاسکالی در مدت ۶ ساعت اتفاق افتاده است. هم زمان با کاهش شدید دید، افزایش ناگهانی فشار هوا در حدود ۶ هکتوپاسکال در یک زمان بسیار کوتاه مشاهده می شود که این نوسانات شدید فشار هوا از نشانه های وقوع توفان شدید است. براساس مطالب ذکر شده در خصوص ویژگی های این توفان می توان گفت که افزایش ناگهانی سرعت باد، افزایش رطوبت و کاهش شدید دما در بازه زمانی کوتاه، همراه با نوسانات شدید فشار، از جمله پارامترهای هواشناسی تاثیرگذار بر میزان دید هستند. لازم به ذکر است که در این مورد، داده های متار میزان دید افقی در برخی ساعات را برابر صفر گزارش داده اند.



شکل ۸ تغییرات یک دقیقه ای میزان دید RVR و دما و دمای نقطه شبنم در روز ۲ ژوئن ۲۰۱۴.



شکل ۹ تغییرات یک دقیقه ای (الف) دید RVR و جهت باد، (ب) دید RVR و تندی باد در روز ۲ ژوئن ۲۰۱۴.

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برای نخستین بار در کشور از داده‌های دو دستگاه ترنسمیسومتر و فورواردر اسکترمتر برای تعیین میزان دقیق دید استفاده شده است تا شرایط رخداد کمینه دید در باند فرودگاه امام خمینی در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ مطالعه شود. انتخاب روزهای با کمینه دید در این مطالعه براساس سه شرط حدی انجام شده و پارامترهایی که برای نمونه‌های موردی کاهش دید بررسی شده‌اند، شامل تغییرات یک دقیقه‌ای دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، جهت و تندی باد و فشار هستند.

نتایج مطالعه روزهای با شرایط کمینه دید در فرودگاه امام خمینی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۳ چهار روز و در سال ۲۰۱۴ شانزده روز با شرایط کمینه میزان دید رخ داده است. با مقایسه روزهای بحرانی، مشاهده می‌شود که بیشترین روزهای با دید کم مربوط به فصل زمستان، اواخر پاییز و اوایل بهار است که می‌تواند به دلیل تاثیر فعالیت بیشتر سامانه‌های جوی و شرایط آب و هوایی متغیر در این ماه‌ها باشد. معمولاً در فصل تابستان و اوایل پاییز به علت ضعیف بودن سامانه‌های جوی و بسامد کمتر رخداد آنها، بحران دید کم در فرودگاه دیده نمی‌شود. بررسی پدیده‌های منجر به کاهش دید RVR در دوره مورد مطالعه نشانگر آن است که در مجموع بیست روز با دید کمتر از ۱۵۰۰ متر، پدیده‌های توفان، بارش، مه و غبار به ترتیب بیشترین پدیده‌های منجر به کاهش دید هستند. از میان این پدیده‌ها، کمترین مقدار میانگین دو سالانه دید RVR با مقدار ۵۱۳ متر مربوط به رخداد مه است. نتایج بررسی دو نمونه موردی نشان می‌دهد که پدیده‌های منجر به کاهش دید با توجه به ماهیت تشکیل‌شان و از نظر پارامترهای هواشناختی تاثیرگذار متفاوت هستند. در پدیده مه، افزایش میزان رطوبت نسبی، ضعیف بودن تندی باد و کم بودن نسبت دما به دمای نقطه شبنم که منجر به اشباع هوا می‌شود، در کاهش میزان دید نقش اساسی دارند؛ حال آن‌که در رخداد توفان، تندی باد شدید و وجود سامانه کم فشار در منطقه حائز اهمیت است. همچنین هنگام رخداد پدیده توفان، افزایش رطوبت نسبی و کاهش شدید دما در بازه زمانی کوتاه، همراه با نوسانات شدید فشار، از جمله پارامترهای هواشناسی تاثیرگذار بر میزان دید هستند.

## منابع

- تاجبخش، سحر. ۱۳۹۵. مطالعه‌ی آماری و شناسایی نوع مه به کمک یک الگوریتم در مهم‌ترین فرودگاه‌های کشور. پژوهش‌های اقلیم شناسی، (۲۷): ۴۳-۵۶.
- ثابت‌قدم، سمانه؛ فرهنگ احمدی گیوی، یحی گلستانی و عباسعلی علی‌اکبری بیدختی. ۱۳۹۲. ارتباط آلاینده‌های شهری با دید افقی منطقه تهران در سال ۲۰۰۸. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۴): ۱۰۹-۱۲۲.
- ثابت‌قدم، سمانه؛ مسعود خوش‌سیما و فرهنگ احمدی گیوی. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات ضریب خاموشی جو بر مبنای دید افقی در چهار فرودگاه پرتردد کشور. فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۲): ۴۵۹-۴۶۷.
- صلاحی، برومند و سیاوش محمدی. ۱۳۹۰. تحلیل هم‌دید و آماری مه‌های فرودگاه اردبیل و ارائه‌ی ساعات مناسب پروازی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۳(۷۷): ۶۹-۹۲.
- Baumer, D., Vogel, B., Versick, S., Rinke, R., Mohler, O., and Schnaiter, M., ۲۰۰۸. Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany. *Atmos. Environ.*, ۴۲, ۹۸۹-۹۹۸.
- Boudala, F., Isaac, G., Crawford, R., and Reid, J., ۲۰۱۲. Parameterization of Runway Visual Range as a Function of Visibility: Implications for Numerical Weather Prediction Models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, ۲۹, ۱۷۷-۱۹۱.
- Clark, P.A., Harcourt, S.A., Macpherson, B., Mathison, C.T., Cusack, S., and Naylor, M., ۲۰۰۸.

- Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I: Model formulation and variational assimilation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, ۱۳۴, ۱۸۰۱-۱۸۱۶.
- Doyle, M., Dorling, S., ۲۰۰۲: Visibility trends in the UK ۱۹۵۰-۱۹۹۷. *Atmospheric Environment* ۳۶, ۳۱۶۱-۳۱۷۲
- Fultz, A., Ashley, W., ۲۰۱۶. Fatal weather-related general aviation accidents in the United States. *Physical Geography*. ۳۷, ۲۹۱-۳۱۲.
- Horvath, H., ۱۹۸۱. Atmospheric visibility. *Atmos. Environ.*, ۱۵, ۱۷۸۵-۱۷۹۶.
- Husar, R., Husar, J., and Martin, L., ۲۰۰۰. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. *Atmos. Environ.*, ۳۴, ۵۰۶۷-۵۰۷۸.
- ICAO., ۲۰۰۶. *Manual on Automatic Meteorological Observing Systems at Aerodrome*, Doc ۹۸۳۷ AN/۴۵۴, ۱<sup>st</sup> edition, Montréal, Canada.
- Jacobson, M., ۲۰۰۵. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press, Second Edition, ۸۱۲ pp.
- Jarraud, M., ۲۰۰۸. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. ۸)*. World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland, ۶۸۱ pp.
- Jenamani, R., and Tyagi, A., ۲۰۱۱. Monitoring fog at IGI Airport and analysis of its runway-wise spatio-temporal variations using Meso-RVR network. *Current Science*, ۱۰۰, ۴۹۱-۵۰۱.
- Koschmieder, H., ۱۹۲۴. Theorie der horizontalen Sichtweite. *Beitr. Freien Atmos.*, ۱۲, ۱۷۱-۱۸۱.
- Lin, J., van Donkelaar, A., Xin, J., Che, H., and Wang, Y., ۲۰۱۴. Clear-sky aerosol optical depth over East China estimated from visibility measurements and chemical transport modeling. *Atmos. Environ.*, ۹۵, ۲۵۸-۲۶۷.
- Mahowald, N., Ballantine, J., Feddema, J., and Ramankutty, N., ۲۰۰۷. Global trends in visibility: implications for dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, ۷, ۳۳۰۹-۳۳۳۹.
- Malm, W. C., ۱۹۹۹. *Introduction to visibility*. Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIRA), Ft. Collins, Colorado, ۷۹ pp.
- Pak, H. and Zanevetd, J., ۱۹۸۳. Temporal variations of beam attenuation coefficient on the continental rise off Nova Scotia. *J. Geophys. Res.*, ۸۸, ۴۴۲۷-۴۴۳۲.
- Rosenfeld, J., ۱۹۹۶. Cars vs. the weather. A century of progress. *Weatherwise*, ۴۹, ۱۴-۲۳.
- Sabetghadam, S., Ahmadi-Givi, F., Golestani, Y., ۲۰۱۲. Visibility trends in Tehran during ۱۹۵۸-۲۰۰۸. *Atmos. Environ.*, ۶۲, ۵۱۲-۵۲۰.
- Sabetghadam, S., and Ahmadi-Givi, F., ۲۰۱۴. Relationship of extinction coefficient, air pollution, and meteorological parameters in an urban area during ۲۰۰۷ to ۲۰۰۹. *Environmental Science and Pollution Research*, ۲۱(۱), ۵۳۸-۵۴۷.
- Schichte, B.A., Husar, R.B., Falke, S., and Wilson, W., ۲۰۰۱. Haze trends over the United States, ۱۹۸۰-۱۹۹۵. *Atmos. Environ.*, ۳۵, ۵۲۰۵-۵۲۱۰.
- Seinfeld, H. and Pandis, N., ۲۰۰۶. *Atmospheric chemistry and physics—from air pollution to climate change*. Second edition, John Wiley & Sons, ۱۲۰۳ pp.
- Sinkevich, A., Kimm, J.Y., Suh, A.S., and Chung, H.S. ۲۰۰۱. Losses in the Korean economy due to lack of routine cloud seeding. *J. Korean meteor. Soc.*, ۳۷, ۲۸۳-۲۹۴.
- Sloane, C. S., ۱۹۸۴. Meteorologically adjusted air quality trends: visibility. *Atmos. Environ.*, ۱۸, ۱۲۱۷-۱۲۲۹.
- Tsai, Y., Kuo, S., Lee, W., Chen, C., and Chen, P., ۲۰۰۷. Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two rural areas of Taiwan. *Sci. Total Environ.*, ۳۸۲, ۳۲۴-۳۴۱.
- Wen, C., and Yeh, H., ۲۰۱۰. Comparative influences of airborne pollutant and meteorological parameters on atmospheric visibility and turbidity. *Atmos. Research*, ۹۶, ۴۹۶-۵۰۹.
- Wu, J., Fu, C., Zhang, L., and Tang, J., ۲۰۱۲. Trends of visibility on sunny days in China in the recent ۵۰ years. *Atmos. Environ.*, ۵۵, ۳۳۹-۳۴۶.
- Wu, J., Zhang, X., Hu, J., and Zhai, D., ۲۰۱۳. Probability of different visibility grades in China over a ۵۰-year period. *Meteorol. Atmos. Phys.*, ۱۲۲, ۱۱۵-۱۲۳.

