



Growth of urban aerosol particles due to moisture absorption and its effect on horizontal visibility

Mirshafiee, S. F.¹ | Aliakbari-Bidokhti, A. A.¹ | Gharaylou, M.¹

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: gharaylo@ut.ac.ir

(Received: 20 July 2025, Revised: 12 Oct 2025, Accepted: 1 Jan 2026, Published online: 30 May 2026)

Summary

The size, chemical composition, and concentration of aerosols significantly impact horizontal visibility. The horizontal visibility can decrease due to the scattering and absorption of visible light by the particles and gases existing in the atmosphere. Horizontal visibility is influenced not only by aerosols but also by meteorological conditions—particularly relative humidity—which can impact visibility both directly and indirectly. Increased relative humidity significantly increases hygroscopic particles, thereby increasing the scattering cross-section and consequently reducing horizontal visibility. In some cases, changes in horizontal visibility are primarily determined by the concentration of PM_{2.5}, meaning visibility can serve as an indicator of air quality. However, when relative humidity dominates changes in visibility, horizontal visibility may not be an accurate indicator of air quality. Overall, horizontal visibility is influenced by both human and natural factors. The concentration of suspended particles and relative humidity are key contributors to visibility changes, each with its own relative proportion. The relationship between PM_{2.5} concentration and horizontal visibility varies with relative humidity and requires further investigation. In order to examine factors such as the concentration levels of PM_{2.5} aerosols, and meteorological parameters including relative humidity, on the temporal changes in horizontal visibility in the metropolitan city of Tehran, which has distinct topography, daily average data from the Meteorological Organization's Mehrabad and Geophysics stations for variables like horizontal visibility, wind speed, relative humidity, temperature, and precipitation were collected. Also daily average pollutant data related to PM_{2.5} from Tehran's Air Quality Control Center over a 10-year period (2013–2023) for the Sharif University and Tarbiat Modares stations, were collected. Although the Mehrabad and Geophysics stations are geographically close and share similar meteorological conditions, the characteristics of air pollution and atmospheric visibility in the two areas may differ due to different emission properties and levels of urbanization.

The results showed that increased relative humidity intensifies the impact of PM_{2.5} on visibility reduction, and at humidity levels above 90%, horizontal visibility significantly decreases with increased PM_{2.5} concentration. Additionally, a nonlinear negative relationship was observed between horizontal visibility, PM_{2.5} concentration, and relative humidity. Wind speed and average temperature play a positive role in improving visibility. As relative humidity increases, especially for greater values than 20 percent, the Volume Growth Fraction (VGF) of fine aerosols rises. Furthermore, at lower PM concentrations, VGF shows greater significance and variability, highlighting the role of other factors in moisture absorption by PM_{2.5} aerosols. It should be emphasized that the particle size distribution, the optical properties, and the chemical composition of aerosols also affect horizontal visibility. Therefore, the impact of aerosols and meteorological conditions on atmospheric visibility is relatively complex. This subject could be explored in future studies using a comprehensive numerical air quality model along with precise meteorological and environmental observations.

Keywords: Tehran, Visibility, Volume Growth Fraction, Relative humidity, Aerosol concentration.

Cite this article: Mirshafiee, S. F., Aliakbari-Bidokhti, A. A., & Gharaylou, M. (2026). Growth of urban aerosol particles due to moisture absorption and its effect on horizontal visibility. *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(1), 89-106. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.398653.1007706>

E-mail: (1) fatemehmirshafiee@ut.ac.ir | bidokhti@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.398653.1007706>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

رشد ذرات هواویزهای جو شهری در اثر جذب رطوبت و اثر آن بر دید افقی

سیده فاطمه میرشافیعی^۱ | عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۱ | مریم قراییلو^۱✉

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: gharaylo@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۳/۹)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان رطوبت نسبی و غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ بر کاهش دید افقی در شهر تهران طی فصول سرد سال انجام شد. داده‌های روزانه مربوط به دید افقی، دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و بارش از ایستگاه‌های مهرآباد و ژئوفیزیک و داده‌های آلودگی هوا از ایستگاه‌های شریف و تربیت مدرس در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که در شرایط رطوبت نسبی بالا، به‌ویژه بالاتر از ۹۰ درصد، افزایش غلظت $PM_{2.5}$ موجب کاهش قابل توجه دید افقی می‌شود. رابطه‌ای منفی و غیرخطی میان دید افقی، رطوبت نسبی و غلظت ذرات مشاهده شد. در مقابل، افزایش دما و سرعت باد با بهبود دید افقی همراه بود. بررسی رشد حجمی نسبی ذرات نشان داد که در رطوبت‌های بالاتر از ۳۰ درصد، حجم ذرات ریز افزایش می‌یابد و این رشد در غلظت‌های پایین‌تر $PM_{2.5}$ محسوس‌تر است. همچنین مشخص شد که در روزهای بدون بارش، حتی در رطوبت‌های بالا، دید افقی همچنان تحت تأثیر غلظت ذرات قرار دارد. تحلیل‌های آماری نشان دادند که ضرایب همبستگی میان دید افقی و متغیرهای مورد بررسی ضعیف اما معنی‌دار هستند. بنابراین نتایج بیانگر آن است که کاهش دید افقی در تهران حاصل برهم‌کنش پیچیده میان شرایط هواشناسی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذرات معلق است.

واژه‌های کلیدی: تهران، دید افقی، رشد حجمی نسبی، رطوبت نسبی، غلظت هواویزها.

۱. مقدمه

به ذرات معلق در جو با قطر کمتر از ۲/۵ و ۱۰ میکرومتر به ترتیب $PM_{2.5}$ و PM_{10} گفته می‌شود که ممکن است رفتاری مانند گازها داشته باشند (پرکینز، ۱۹۷۴). ارتباط قوی بین حضور $PM_{2.5}$ و PM_{10} و دید افقی وجود دارد، تا حدی که کاهش هدفمند PM_{10} منجر به افزایش دید جوی می‌شود (تسای و همکاران، ۲۰۰۳). این ذرات به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده‌های تأثیرگذار بر وضعیت هوای کلان‌شهرها شناخته می‌شوند. این امر نگرانی ویژه‌ای را به‌همراه دارد؛ چرا که غلظت بالای هواویزها با افزایش شیوع بیماری‌ها و نرخ مرگ‌ومیر ارتباط دارد و بسیاری از کلان‌شهرها در کشورهای در حال توسعه، در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته، از توان و زیرساخت‌های محدودتری برای ارائه مراقبت‌های بهداشتی در مواجهه با این پیامدهای سلامت‌محور برخوردار هستند. به‌طور ویژه،

هواویزهای جوی از ذرات جامد و مایع معلق در جو تشکیل شده‌اند که برحسب چشمه‌های تولید، فرایند تشکیل و ابعادشان دسته‌بندی می‌شوند. معمولاً ابعاد هواویزها بین چند نانومتر تا ده میکرومتر متغیر است (سینفیلد و پاندریس، ۲۰۱۶). هواویزها به‌طور قابل توجهی دید را کاهش می‌دهند و بر سلامت انسان تأثیر منفی می‌گذارند و با جذب و بازتاب تابش خورشیدی و زمینی به‌طور مستقیم و تغییر خواص فیزیکی و تابشی ابرها به‌طور غیرمستقیم بر وضع هوا تأثیر می‌گذارند (ژانگ، ۲۰۱۰؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۶؛ عزیزاده چوبری و قراییلو، ۲۰۱۷). هواویزها از چشمه‌های طبیعی از جمله فعالیت‌های آتشفشانی، توفان گردو خاک، نمک دریا و از منابع انسانی از جمله احتراق سوخت‌های فسیلی، سوزاندن زیست توده و فعالیت‌های صنعتی گسیل می‌شوند (دیوید و همکاران، ۲۰۱۸).

استناد: میرشافیعی، سیده فاطمه؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی و قراییلو، مریم (۱۴۰۵). رشد ذرات هواویزهای جو شهری در اثر جذب رطوبت و اثر آن بر دید افقی. مجله فیزیک زمین

و فضا، ۵۲(۱)، ۸۹-۱۰۶. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.398653.1007706>

رایانامه: (۱) fatemehmirshafiee@ut.ac.ir | bidokhti@ut.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.398653.1007706>

هوا با غلظت بالای PM2.5 در حال تبدیل شدن به یک مشکل زیست‌محیطی جدی در شهرها است (لئونگ و همکاران، ۲۰۱۸).

جذب آب توسط ذرات جو از جمله PM2.5، PM10 و سایر ذرات آلی و معدنی موجود در جو بر اندازه، طول عمر و خواص نوری و شیمیایی آنها تأثیر می‌گذارد. این فرایند می‌تواند بر برهم‌کنش آنها با آب و هوا، رسوب آنها در داخل دستگاه تنفسی مرطوب و اثرات مربوط به سلامت (لوندال و همکاران، ۲۰۰۸)، تأثیرات روی دید افقی (مالم و دی، ۲۰۰۱؛ سکویرا و لای، ۱۹۹۸) اثرگذار باشد و می‌تواند طول عمر و جابه‌جایی آنها را به دلیل تغییر میزان رسوب تغییر دهد (کریدن وایز و همکاران، ۲۰۰۱؛ اسپیچتینگر و چیزو، ۲۰۰۸).

ذرات هواویز تنها عامل تعیین‌کننده دید افقی در جو نیستند. عوامل هواشناسی به‌ویژه رطوبت نسبی (RH) نیز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در کاهش دید افقی تأثیر می‌گذارند. بخار آب موجود در هوا می‌تواند مستقیماً با خاموشی نور باعث کاهش دید افقی شود. افزایش RH، به‌طور قابل‌توجهی اندازه ذرات نم‌گیر را بزرگ می‌کند؛ بنابراین سطح مقطع پراکندگی را افزایش یافته و در نتیجه دید افقی را نیز کاهش می‌دهد (مالم و دی، ۲۰۰۱). رخدادهای دید کم ناشی از میزان بالای PM2.5 معمولاً با شرایط آب‌وهوایی با RH بالا همراه هستند (پندرگراس و همکاران، ۲۰۱۹). در برخی موارد، تغییرات در دید افقی عمدتاً توسط غلظت PM2.5 و PM10 تعیین می‌شود. غلظت بالای ذرات ریز علت اصلی اختلال در دید است، عمدتاً به این دلیل که ذرات ریز نور مرئی را به‌طور مؤثرتری در مقایسه با ذرات درشت پراکنده می‌کنند (دنگ و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین دید افقی می‌تواند به‌خوبی سطح کیفیت هوا را نشان دهد. در مقابل، در مواردی که RH بر تغییرات دید غالب است، دید افقی ممکن است نماینده خوبی برای کیفیت هوا نباشد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). رابطه بین غلظت PM2.5، PM10 و دید افقی با توجه به RH متفاوت است و نیاز به بررسی دارد

بر اساس گزارش مؤسسه اثرات سلامت (Health Effects Institute)، در سال ۲۰۱۹ آلودگی هوای شهری به‌عنوان چهارمین عامل خطر مرگ زود هنگام در سطح جهانی معرفی شده است.

دید افقی جوی، اندازه فاصله‌ای است که در آن یک جسم یا نور می‌تواند تشخیص داده شود و نشان‌دهنده شفافیت جوی است (واتسون، ۲۰۰۲). دید خوب از ویژگی‌های مطلوب هر موقعیت جغرافیایی است و اهمیت آن باید مورد توجه قرار گیرد (دویل و دورلینگ، ۲۰۰۲). با این حال، بسیاری از کلان‌شهرها با رویدادهای آلودگی هوا همراه با کاهش دید در طول چند دهه گذشته مواجه بوده‌اند (هو و همکاران، ۲۰۱۷). دید افقی زیاد (بیش از ۱۰ کیلومتر) را می‌توان در شرایط بدون آلودگی با هوای صاف مشاهده کرد؛ در حالی که دید کم اغلب به آلودگی شدید هوا و پدیده‌های جوی محدودکننده دید نسبت داده می‌شود (دنگ و همکاران، ۲۰۱۲). دید افقی جوی موضوع پیچیده‌ای است که از یک سو به‌طور مستقیم تحت تأثیر آلودگی هوا ناشی از فعالیت‌های انسانی و پدیده‌های طبیعی است و از طرفی تحت تأثیر شرایط هواشناسی نیز قرار دارد (دنگ و همکاران، ۲۰۱۴). این عامل (دید افقی) در پاییز و زمستان به دلیل شرایط نامطلوب هواشناسی از اهمیت بیشتری برخوردار است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

اندازه، ترکیب شیمیایی و غلظت عددی ذرات معلق در هوا به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر روی دید افقی تأثیر می‌گذارد (چنگ و تسای، ۲۰۰۰). این ذرات که از نظر اندازه با طول موج نور مرئی قابل مقایسه هستند، تا حد قابل‌توجهی موجب کاهش دید افقی در جو می‌شوند (واگنر و همکاران، ۱۹۸۱). دید افقی می‌تواند به دلیل پراکندگی و جذب نور مرئی توسط ذرات و گازهای موجود در جو کاهش یابد (هیسلوب، ۲۰۰۹). الگوهای آلودگی هوا دقیقاً منطبق بر گسیل گسترده ذرات و آلاینده‌های گازی در هوا هستند. دید افقی می‌تواند کدورت جو که بیانگر میزان آلودگی هوا، به‌ویژه آلودگی مه‌دود ناشی از غلظت بالای هواویز است را نشان دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۴). آلودگی

(یانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

در این ارتباط، انگلهارت و همکاران (۲۰۱۱) میزان رشد حجمی ذرات شهری در اثر رطوبت برای شهری در یونان را بررسی و آهنگ تغییر آن را به صورت تابعی از رطوبت بررسی کردند. آنها نشان دادند که برای رطوبت نسبی بالاتر از ۳۰ درصد، افزایش اندازه ذرات تقریباً به صورت خطی با رطوبت تغییر می‌کند. سینگ و همکاران (۲۰۱۷)، تأثیر ترکیبی ذرات هواویز جوی و هواشناسی را بر روی دید افقی در یک بازه بلندمدت بررسی کردند. آنها از داده‌های دید افقی برگرفته از هشت ایستگاه هواشناسی واقع در انگلیس استفاده کردند. محل‌های این ایستگاه‌ها شامل محیط‌های شهری، روستایی و دریایی بود. اکثر ایستگاه‌ها روند بلندمدت افزایش دید را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده کاهش آلودگی هوا به ویژه در مناطق شهری است. علاوه بر این، دید افقی در همه مکان‌ها وابستگی بسیار واضحی به رطوبت نسبی نشان می‌دهد که بیانگر اهمیت رطوبت بر توانایی رشد ذرات هواویز برای پراکندگی تابشی آنها است. وابستگی دید افقی به سایر پارامترهای هواشناسی مانند سرعت باد و جهت باد نیز توسط آنها بررسی شده است. بیشتر ایستگاه‌ها افزایش طولانی‌مدت دما را نشان می‌دهند که می‌تواند به تغییرات وضع هوا، تغییرات کاربری زمین (مانند اثرات جزیره گرمایی شهری) یا ترکیبی از هر دو نسبت داده شود. بیشترین تأثیر مشاهده شده در مناطق شهری است.

سان و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تعیین تأثیر آلاینده PM2.5 و RH بر تغییر دید جوی در زمستان‌های اخیر طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۹ در نانجینگ بر اساس تحلیل داده‌های محیطی و هواشناختی چین پرداختند. آنها نشان دادند که دید با غلظت PM2.5 و تغییرات رطوبت نسبی (RH) همبستگی منفی معنی‌داری دارد. روابط غیرخطی بین غلظت PM2.5 و دید افقی و همچنین بین RH و دید افقی، با نقاط عطف در تغییرات دید جو وجود داشت. نتایج آنها نشان داد که اگرچه کاهش غلظت PM2.5 به طور کلی موجب بهبود دید می‌شود، اما در شرایط رطوبت نسبی بالا، این بهبود ممکن است محدود یا کمتر محسوس باشد.

تغییرات دید بیشترین حساسیت را نسبت به غلظت PM2.5 و RH در محدوده بین ۶۰ تا ۸۰ درصد در مناطق شهری شرق چین ایفا می‌کرد. سهم نسبی عامل طبیعی RH و عامل انسانی (غالباً ناشی از فعالیت‌های انسانی) در تولید PM2.5 در تغییرات دید جوی زمستانی در مطالعه سان و همکاران (۲۰۲۰) تعیین شد که نشان‌دهنده نقش مهم عامل طبیعی RH در تغییر دید جوی در منطقه شهری منطقه موسمی شرق آسیا است.

زاو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های ایستگاه ملی هواشناسی پایه، تغییرات دید افقی در ژنگزو را از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ اندازه‌گیری کردند. اثرات PM2.5 و پارامترهای هواشناسی بر روی دید نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین دید سالانه بین ۸/۰۷ کیلومتر و ۱۴/۰۲ کیلومتر در نوسان بوده است که طی دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ کاهش یافته و پس از سال ۲۰۱۳ اندکی افزایش یافته است (۹/۴۲ کیلومتر در پاییز و ۸/۹۸ کیلومتر در زمستان). میانگین غلظت سالانه PM2.5 از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ به ترتیب ۹۰/۸۳، ۷۹/۸۹ و ۶۶/۶۹ میکروگرم بر متر مکعب بود که ۱۵۹/۵۱٪، ۱۲۸/۲۶٪ و ۹۰/۵۴٪ بالاتر از ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب از درجه دوم استانداردهای ملی کیفیت هوای محیط چین بودند. علاوه بر این، دما و رطوبت نسبی با دید همبستگی مثبت داشتند، در حالی که غلظت جرمی PM2.5 و سرعت باد با دید همبستگی منفی داشتند. کثیات و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه تأثیر رطوبت نسبی بر دید افقی در دو ایستگاه همدیدی واقع در دو شهر غرب نپال (BWA و SKH) با استفاده از داده‌های اقلیم‌شناسی (۱۹۷۷-۲۰۲۰) برگرفته از آرشیو ساعتی جهانی اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) پرداختند. آنها شرایط دید کم (با دید افقی کمتر از ۳ کیلومتر) را مشاهده کردند که در RH برابر ۵۰ درصد در BWA رخ می‌دهد. در BWA، تأثیر RH در طول فصل خشک مشهود است. در مقابل، مقدار آستانه RH در SKH بسیار بالا است (۸۰ درصد) و این رابطه در طول فصل مرطوب برجسته است. همچنین، وایشالی و همکاران (۲۰۲۳) به ارتباط بین غلظت ذرات معلق به‌ویژه (PM2.5) و پارامترهای هواشناسی در سه مکان

کمینه دما روی غلظت دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن و آزون را با استفاده از مدل رگرسیون خطی بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مقادیر بارش تنها روی غلظت دی اکسید نیتروژن تأثیر منفی دارد. همچنین، بین رطوبت نسبی و غلظت دی اکسید گوگرد همبستگی مثبت وجود داشت در حالی که یک رابطه معکوس بین رطوبت نسبی و غلظت دی اکسید نیتروژن و آزون مشاهده شد.

همچنین، ثابت‌قدم و همکاران (۱۳۹۲) اثر غلظت آلاینده‌های جو شهری بر دید افقی را در منطقه جنوب غرب تهران در سال ۲۰۰۸ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آلاینده‌های تأثیرگذار بر کاهش دید به ترتیب مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و سپس PM10 هستند. نتایج بررسی ماهانه آن‌ها حاکی از آن بود که در ماه‌های سرد سال، آلاینده‌های شهری نقش بارزتری در کاهش دید افقی دارند.

در این مطالعه سعی بر آن است که با استفاده از داده‌های سازمان هواشناسی کشور از متغیرهای جوی دید افقی، باد، رطوبت نسبی، دما و بارش همچنین داده‌های آلاینده‌ها مربوط به عامل انسانی (PM2.5) برگرفته از مرکز کنترل کیفیت هوای تهران طی دوره ۱۰ ساله، ۱۴۰۲-۱۳۹۲، تأثیر رطوبت نسبی و غلظت هواویزهای شهری بر تغییرات دید افقی در شهر تهران برای فصول پاییز و زمستان مورد بررسی قرار گیرد.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

در این مطالعه، دید افقی در شهر تهران به‌عنوان تابعی از غلظت هواویزهای شهری (PM2.5) و برخی پارامترهای جوی مانند رطوبت نسبی، دما، باد و بارش طی فصول پاییز و زمستان در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به گستردگی ایستگاه‌ها، تنها داده‌های ایستگاهی مرکزی و کامل‌تر سنجش آلودگی هوا استفاده شده است.

۲-۱. داده‌ها

به‌منظور بررسی عواملی از جمله میزان غلظت هواویزهای PM2.5 و پارامترهای هواشناسی از جمله رطوبت نسبی بر

مختلف دهلی با کمک تحلیل‌های آماری و همبستگی پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد که پارامترهای هواشناسی تأثیر قابل توجهی بر PM2.5 دارند. آن‌ها با مطالعه آماری و بررسی همبستگی‌ها نشان دادند که غلظت PM2.5 با دما در فصل‌های زمستان، پیش‌موسمی و پس‌موسمی همبستگی منفی دارد، در حالی که در فصل باران‌های موسمی (تابستان) این همبستگی مثبت است. همچنین، در شرایط رطوبت نسبی بالای ۵۰٪، همبستگی منفی قوی‌تری بین دما و PM2.5 مشاهده شد، اما در رطوبت‌های پایین‌تر، این رابطه ضعیف‌تر بود.

جیانگ و همکاران (۲۰۲۴) ارتباط بین عوامل هواشناسی و آلاینده‌های هوا در چهار نمونه برداشت‌شده از دانشگاه جنگل‌داری نانجینگ در ۲۵ جولای ۲۰۲۲ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تأثیر اصلی عوامل هواشناسی از جمله دما و رطوبت به نوع سطح زیرین منطقه (جنگلی، چمنزار، جاده آسفالت و میدان بتنی) بستگی دارد. عوامل اصلی مؤثر بر آلاینده‌ها عبارت‌اند از: سپیدایی، سرعت باد، دما و رطوبت نسبی. در این میان، سپیدایی و دما با PM2.5 همبستگی منفی، سرعت باد و رطوبت نسبی با PM2.5 همبستگی مثبت دارند. آن‌ها نشان دادند که تغییر فضای سبز می‌تواند با تغییر عوامل هواشناسی، غلظت آلاینده‌ها را کاهش دهد.

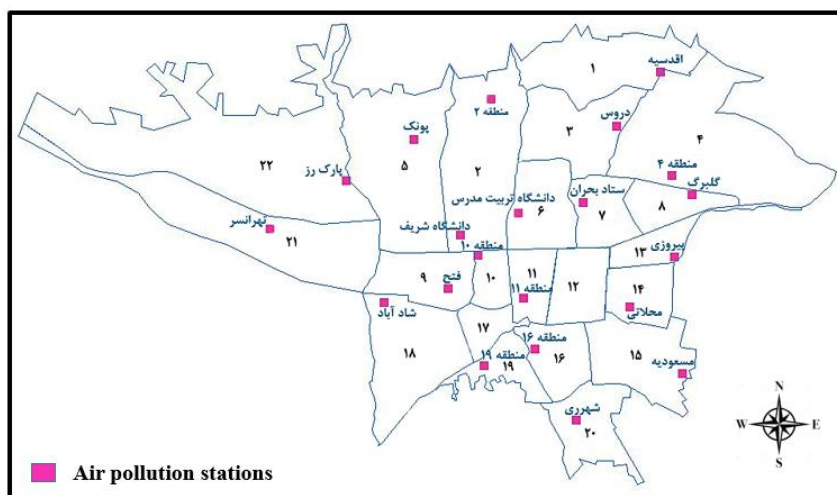
در ایران نیز، شرعی‌پور و علی اکبری بیدختی (۱۳۹۲) به بررسی داده‌های دید افقی و عوامل مؤثر بر آن از جمله مه، بارش، غبار و توفان‌های گردو خاک در ایستگاه هواشناسی ژئوفیزیک و داده‌های آلودگی هوا مربوط به شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۱ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات ساعتی دید جوی در ساعت‌های اولیه صبح رخ می‌دهد و به تدریج دید جوی کاهش می‌یابد. بررسی جهت وزش باد نشان داد که با شروع صبح به تدریج وزش باد جنوبی دشت به کوه آغاز می‌شود و آلاینده‌ها از مناطق جنوب شهر به شمال شهر تهران منتقل شده و دید جوی کاهش می‌یابد. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر عوامل هواشناختی بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، بیشینه سرعت باد، میانگین، بیشینه و

شهری بر دید افقی در شهر تهران برای فصول پاییز و زمستان بررسی می‌شود. از آنجایی که دید افقی کم ممکن است به علت شرایط آب‌وهوا از جمله بارش باشد که رطوبت نسبی بالایی را دارد، این بررسی در حالت روزهای بدون بارش انجام می‌شود. در حالت بررسی روزهای بدون بارش، روزهایی که رطوبت نسبی در آنها برابر یا بیشتر از ۹۰٪ باشد حذف می‌شوند تا تأثیر مستقیم رطوبت بالا بر دید افقی در تحلیل‌های این دسته کاهش یابد و تأثیر واقعی غلظت هواویزها و رطوبت نسبی بر دید افقی به صورت دقیق‌تری ارزیابی شود. لازم به ذکر است که این حذف شامل شرایط مه‌آلود نمی‌شود و صرفاً برای جداسازی اثر رطوبت بالا، بدون مه صورت گرفته است. این رویکرد با استناد به مطالعات پیشین، از جمله پژوهش کنیات و همکاران (۲۰۲۲)، اتخاذ شده است؛ در آن مطالعه نیز روزهایی با رطوبت نسبی برابر یا بیشتر از ۹۰٪ به‌منظور حذف اثرات مستقیم پدیده‌های جوی مانند مه، بارش و شبنم از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند.

تغییرات زمانی دید افقی در کلان‌شهر تهران که از توپوگرافی خاصی برخوردار است، داده‌های میانگین روزانه سازمان هواشناسی مهرآباد و ژئوفیزیک (ایستگاه‌های همدیدی) از متغیرهای دید افقی، سرعت باد، رطوبت نسبی، دما و بارش و همچنین داده‌های میانگین روزانه آلاینده‌ها مربوط به PM2.5 برگرفته از مرکز کنترل کیفیت هوای تهران طی دوره ۱۰ساله، ۱۴۰۲-۱۳۹۲ (۲۰۱۳-۲۰۲۳) برای ایستگاه‌های دانشگاه شریف و تربیت مدرس (آلودگی هوا) (شکل ۱) جمع‌آوری شد. اگرچه ایستگاه‌های مهرآباد و ژئوفیزیک از نظر جغرافیایی نزدیک هستند و شرایط هواشناختی مشابهی دارند، ویژگی‌های آلودگی هوا و دید جوی در دو منطقه ممکن است به دلیل ویژگی‌های انتشار متفاوت و سطح شهرنشینی متفاوت باشد. مشخصات جغرافیایی این دو ایستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲. روش انجام پژوهش

در این مطالعه، تأثیر رطوبت نسبی و غلظت هواویزهای



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه (شهر تهران) که در آن موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا نشان داده شده است. داده‌های PM2.5 در این پژوهش از ایستگاه‌های دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه تربیت مدرس استخراج شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های همدیدی مورد بررسی.

ایستگاه	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)
مهرآباد	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹
ژئوفیزیک	۵۱/۳۸	۳۵/۷۴

در نظر گرفته شده و رشد برای این هسته نمونه گیری اعمال شود (انگلهارت و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین کل حجم های ذرات اندازه گیری شده با توزیع های $n(D)$ محیط (رطوبت گرفته) و خشک آنها به ترتیب عبارت اند از:

$$V_{ambient} = \frac{\pi}{6} \int_{D_{d1}}^{D_{d2}} D^3 n_{ambient}(D) dD \quad (1)$$

$$V_{dry} = \frac{\pi}{6} \int_{D_{d1}}^{D_{d2}} D^3 n_{dry}(D) dD \quad (2)$$

که در اینجا D قطر ذرات با طیفی از اندازه $d1$ تا $d2$ است.

بنابراین کسر رشد حجمی ذرات عبارت است از:

$$VGF = \frac{V_{ambient}}{V_{dry}} \quad (3)$$

همان طور که شکل ۲-الف نشان می دهد، رشد حجمی ذرات ابتدا (برای رطوبت نسبی کم) کم است، ولی با افزایش رطوبت نسبی به طور تقریباً خطی افزایش می یابد. اگر برای داده های مشابه شکل ۲-الف برای رطوبت های بیش از ۳۰ درصد داده ها برازش شود، رابطه خطی می توان بر نقاط برازش داد که در شکل ۲-ب دیده می شود.

۳. تحلیل نتایج

در این بخش به ارائه نتایج شامل تحلیل همبستگی ها بر اساس داده ها و بحث آنها پرداخته می شود. مقادیر کسر رشد حجمی هواویزها در اثر رطوبت نیز محاسبه شده و با غلظت آنها مقایسه می شود.

۳-۱. تحلیل داده های ایستگاه مهرآباد

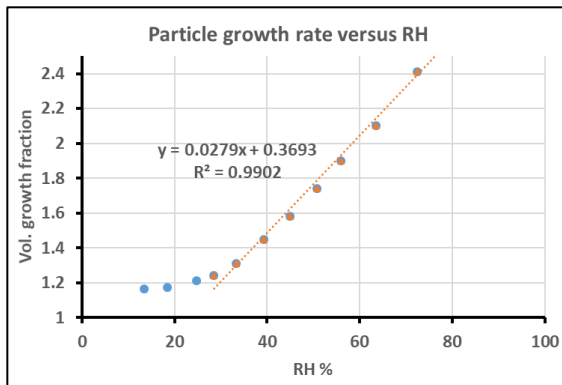
در شکل ۳ رابطه بین غلظت $PM_{2.5}$ و دید افقی در ۳ بازه مختلف رطوبت نسبی برای ایستگاه مهرآباد برای شرایط بارانی و بدون بارش نشان داده شده است. برای هر دو حالت روزهای با بارش (شکل ۳)، رابطه غیرخطی بین غلظت $PM_{2.5}$ و دید افقی به مقادیر مختلف RH در جو بستگی دارد. در یک غلظت ثابت $PM_{2.5}$ ($30 \mu g/m^3$)، هر چه RH بیشتر باشد، دید افقی کمتر است. این موضوع در رطوبت های بالای ۷۰٪ به وضوح قابل مشاهده است. زمانی که غلظت $PM_{2.5}$ بسیار زیاد است، دید افقی معمولاً کم است، که مستقل از RH است. همچنین وقتی که RH بالاتر باشد، آلودگی ناشی از ذرات ریز بالاتر است. وقتی RH و غلظت $PM_{2.5}$ هر دو کم هستند، دید

در این مطالعه، دید افقی روزانه به ترتیب در سطوح دید خوب، کم و ضعیف با حد پایین ۵ کیلومتر و حد بالایی ۱۰ کیلومتر طبقه بندی شده است. همچنین، RH به سه محدوده تقسیم شده است: رطوبت نسبی کمتر از ۶۰ درصد، بین ۶۰ و ۷۰ درصد و بیش از ۷۰ درصد. اثر رطوبت سنجی هواویز زمانی قابل توجه می شود که RH از ۹۰ درصد بیشتر شود. همچنین میانگین دما به دسته های کمتر از ۱۰ و بین ۱۰ و ۱۵ و بیش از ۱۵ درجه سلسیوس و تندی باد در ۳ بازه مختلف کمتر از ۲ m/s، بین ۲ و ۴ m/s و بیش از ۴ m/s در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که به جز دسته بندی دید افقی و رطوبت نسبی که بر اساس مطالعه کثیات و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده، دسته بندی دما و تندی باد با هدف تفکیک شرایط اقلیمی و دینامیکی مؤثر بر پراکندگی هواویزها، بر اساس آستانه های رایج در مناطق نیمه خشک ایران طراحی شده است؛ به طوری که دماهای کمتر از ۱۰، بین ۱۰ تا ۱۵ و بیش از ۱۵ درجه سلسیوس به ترتیب معرف شرایط سرد، معتدل و گرم بوده و بادهای کمتر از ۲، بین ۲ تا ۴ و بیش از ۴ متر بر ثانیه بیانگر بازه های مؤثر در جابه جایی هواویزها هستند.

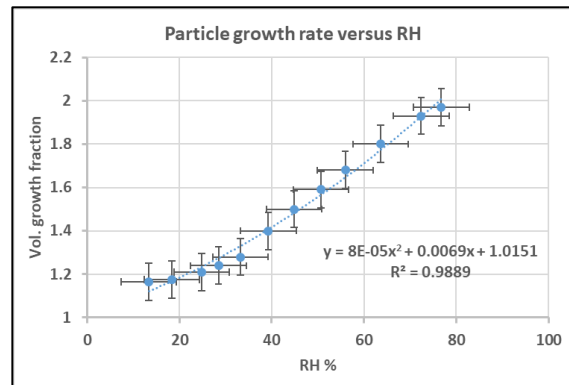
از روابط تجربی و نظری انگلهارت و همکاران (۲۰۱۱) نیز برای برآورد رشد حجمی نسبی (Volume Growth Fraction) هواویزهای $PM_{2.5}$ استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که آنها این روابط را برای یک شهر ساحلی در مدیترانه انجام داده اند و بنابراین لازم است روابطی برای هواویزهای تهران تابعی از رطوبت با اندازه گیری های دقیق انجام شود و مورد استفاده قرار بگیرد. نمونه تغییر رشد حجمی در شکل ۲-الف ارائه شده است. همان طور که شکل نشان می دهد، برای رطوبت نسبی بیش از ۳۰ درصد ارتباط رشد حجمی ذرات با رطوبت تقریباً خطی است. آنها این نتایج را توسط یک مدل ترمودینامیکی E-AIM (Extended-Aerosol Inorganic Model) نیز به دست آوردند. در این مدل رشد هواویزهای آلی و غیر آلی بررسی شده است که نشان می دهد میزان رشد در محیط مرطوب آلی کمی بیشتر از محیط غیر آلی است. به منظور تعیین مقدار آب جذب شده توسط ذرات باید یک هسته کوچک

که غلظت جرم PM2.5 کمتر از ۳۰ میکروگرم در متر مکعب باشد. این شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که در شرایط RH بالاتر از ۶۰ تا ۷۰ درصد، دید افقی کمتر از ۱۰۰۰۰ متر است حتی اگر غلظت PM2.5 نسبتاً کم باشد. زمانی که غلظت PM2.5 از ۲۰ به ۳۰ میکروگرم بر متر مکعب افزایش می‌یابد، دید به ترتیب از ۶۰۰۰ به ۴۰۰۰ متر کاهش می‌یابد. در مقابل، دید از ۱۰۰۰۰ متر با RH کمتر از ۴۰ درصد به ۶۰-۷۰ درصد به ۵۰۰۰ کاهش می‌یابد. این پدیده بیشتر مربوط به افزایش خاموشی جو برای رشد رطوبت‌سنجی PM2.5 تحت RH بالاتر است (یه و همکاران، ۲۰۱۳).

افقی معمولاً بسیار بیشتر است. در این ارتباط سان و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که افزایش RH جذب رطوبت توسط ذرات را تقویت می‌کند و منجر به کاهش دید افقی می‌شود. لازم به ذکر است که در حالت با بارش (شکل ۳-الف) در مقایسه با حالت بدون بارش (شکل ۳-ب)، دیدهای افقی کم خیلی بیشتر است به این دلیل که رطوبت‌های بالا (حالت با بارش) باعث دید افقی کم می‌شود. تخریب دید در شرایط نسبتاً تمیز به PM2.5 و بسیار حساس است. برای PM2.5 در غلظت‌های کمتر از ۳۰ میکروگرم بر متر مکعب، $RH < 70\%$ در شرایط RH بالاتر (۷۰٪)، دید می‌تواند کمتر از ۵۰۰۰ متر باشد حتی زمانی

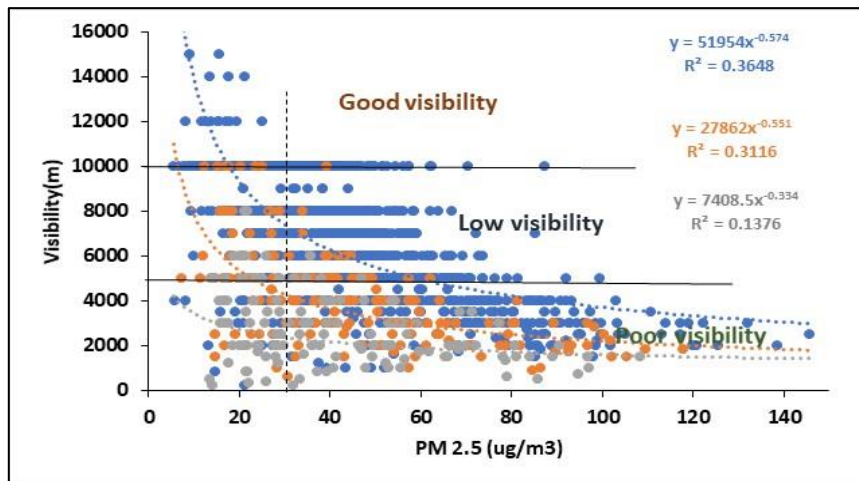


(ب)

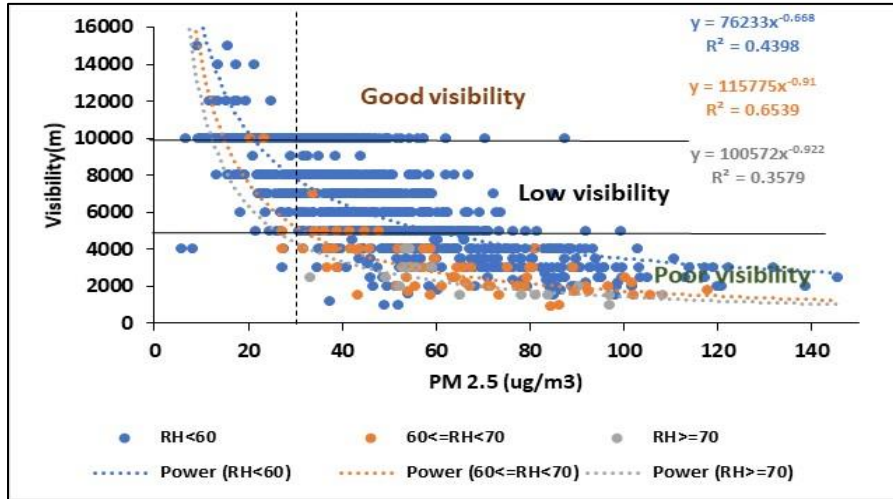


(الف)

شکل ۲. (الف) نمودار میزان رشد حجمی ذرات هواویز شهری (نسبت به مقدار حجمی خشک آنها) به صورت تابعی از رطوبت نسبی که در آن خطوط دامنه خطای اندازه‌گیری‌ها (حدود ۱۵ درصد) نیز نشان داده شده است. (ب) مانند قسمت (الف) برای رطوبت نسبی بیش از ۳۰ درصد. لازم به ذکر است که الگوی ترسیم این شکل برگرفته از انگلهارت و همکاران (۲۰۱۱) اقتباس شده ولی داده‌های استفاده شده متعلق به این مطالعه است.



(الف)



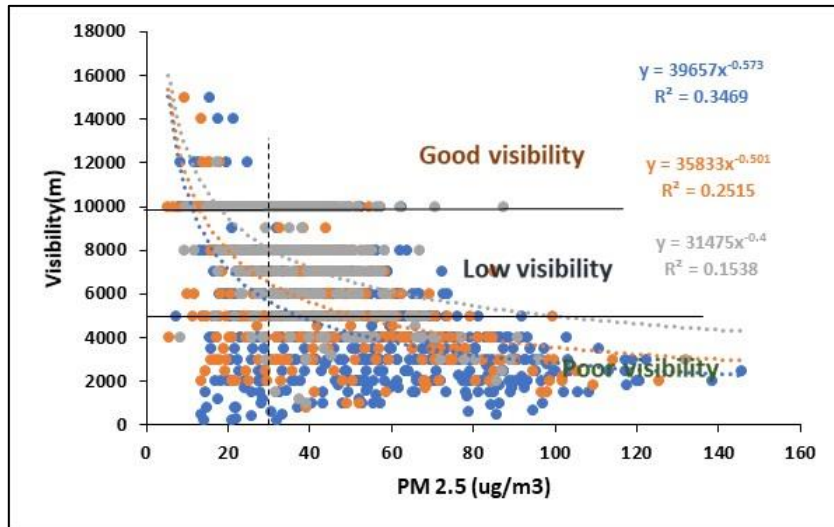
(ب)

شکل ۳. نمودار پراکنش دید افقی (m) و غلظت PM_{2.5} (μg/m³) در حالت بررسی (الف) تمام روزها، شامل بارش و (ب) فقط روزهای بدون بارش در ۳ بازه مختلف رطوبت نسبی (دایره‌های آبی رنگ، نارنجی رنگ و خاکستری رنگ به ترتیب منطبق بر روزهای با رطوبت نسبی کمتر از ۶۰ درصد، بین ۶۰ و ۷۰ درصد و بیش از ۷۰ درصد هستند) در ایستگاه مهرآباد. خطوط سیاه رنگ افقی در دید افقی ۵ و ۱۰ کیلومتر، سه محدوده دید افقی بد، کم و خوب را نشان می‌دهند. خط چین سیاه رنگ بیانگر یک غلظت ثابت PM_{2.5} (۳۰ μg/m³) است.

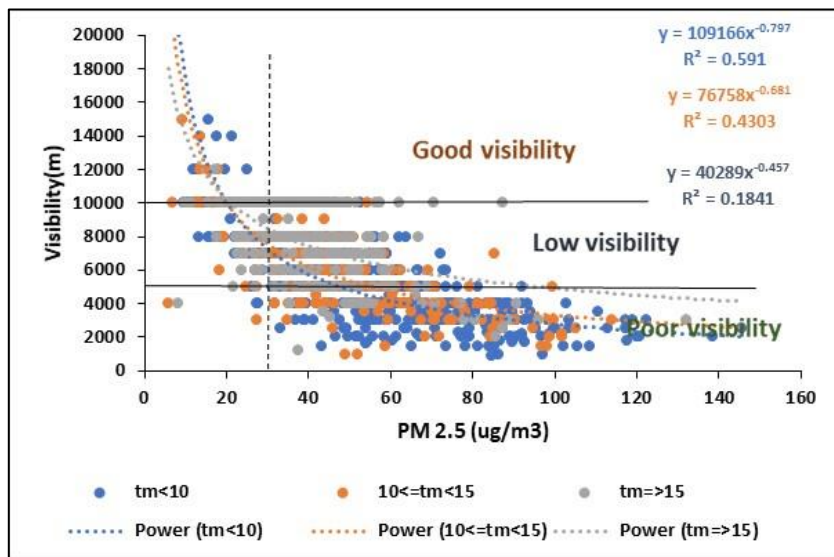
آنها نیز ممکن است. در دماهای پایین به ویژه زمانی که وارونگی رخ می‌دهد باعث افزایش آلاینده‌های جوی می‌شود.

در دماهای پایین، مصرف انرژی برای گرمایش خانه‌ها و ساختمان‌ها افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند باعث افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه افزایش آلاینده‌های جوی مانند دی‌اکسید کربن و ذرات معلق شود. در دماهای پایین، اگر هوا خشک باشد و به نقطه شبنم نرسد، تشکیل مه یا بخار آب (که دید را کاهش می‌دهد) اتفاق نمی‌افتد و مطابق شکل ۳ رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی، هوا شفاف‌تر و دید افقی بالاتر است، زیرا ذرات پراکنده نوری کمتری ایجاد می‌کنند. در دماهای بسیار پایین، بخار آب موجود در هوا ممکن است به صورت یخ یا برف بر سطح زمین بنشیند و از حالت معلق در هوا خارج شود. این امر می‌تواند باعث کاهش کدورت هوا و افزایش دید افقی شود.

در شکل ۴ پراکنش نگاهت غلظت PM_{2.5} و دید افقی در ۳ بازه مختلف دمای میانگین برای ایستگاه مهرآباد برای شرایط بارانی و بدون بارش نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها، رابطه غیرخطی بین PM_{2.5} و دید افقی در غلظت ثابت PM_{2.5} در دماهای بالا مشهودتر است و پراکنده‌گی آن زیاد است. هرچه میانگین دما کمتر باشد دید افقی نسبت به روزهایی که میانگین دما بیشتر باشد، کمتر است (شکل ۴). ضرایب همبستگی دید روزانه با PM_{2.5} در بازه‌های مختلف میانگین دما در طول ده سال در این شکل آورده شده است. در دماهای پایین دید افقی کاهش می‌یابد. این بدان دلیل است که در دماهای پایین، قطرات کوچک تشکیل شده و مه را بوجود می‌آورند که این قطرات نور را پراکنده می‌کنند و دید را کاهش می‌دهند. همچنین بارش برف یا باران نیز باعث کاهش دید می‌شود. در شرایطی که دما کاهش می‌یابد، علاوه بر کاهش آلاینده‌های جوی، افزایش



(الف)

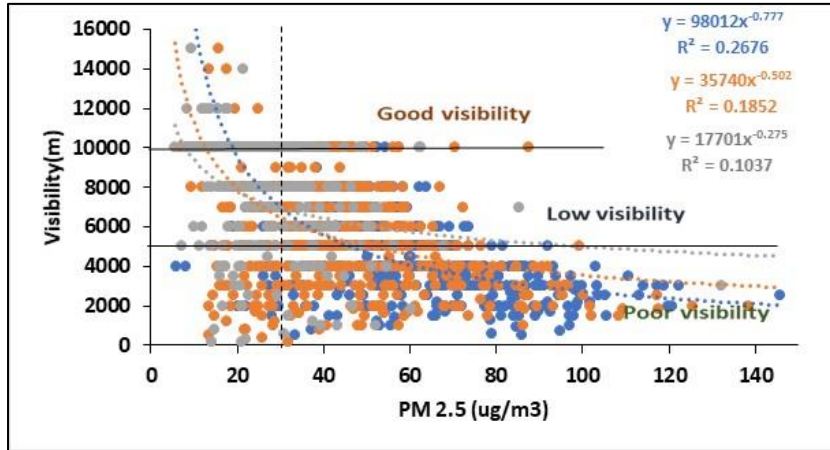


(ب)

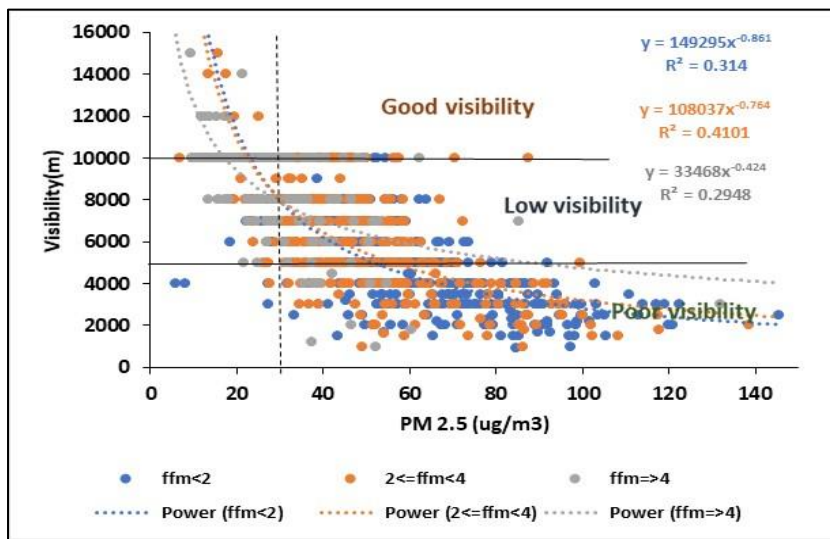
شکل ۴. نمودار پراکنش دید افقی (m) و غلظت $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) در حالت بررسی (الف) تمام روزها، شامل بارش و (ب) فقط روزهای بدون بارش در ۳ بازه مختلف میانگین دما (دایره‌های آبی رنگ، نارنجی رنگ و خاکستری رنگ به ترتیب منطبق بر روزهای با میانگین دما کمتر از ۱۰، بین ۱۰ و ۱۵ و بیش از ۱۵ درجه سلسیوس هستند) در ایستگاه مهرآباد. خطوط سیاه رنگ افقی در دید افقی ۵ و ۱۰ کیلومتر، سه محدوده دید افقی بد، کم و خوب را نشان می‌دهند. خط چین سیاه رنگ بیانگر یک غلظت ثابت $PM_{2.5}$ ($30 \mu g/m^3$) است.

دید افقی در غلظت ثابت $PM_{2.5}$ در سرعت‌های بالای باد مشهودتر است و پراکندگی آن زیاد است. هرچه سرعت باد کمتر باشد، دید افقی نسبت به روزهایی که سرعت باد بیشتر باشد، کمتر است (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب).

پراکنش‌نگاشت غلظت $PM_{2.5}$ و دید افقی در ۳ بازه مختلف تندی باد برای ایستگاه مهرآباد برای شرایط بارانی و بدون بارش در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهند، رابطه غیرخطی بین $PM_{2.5}$ و



(الف)

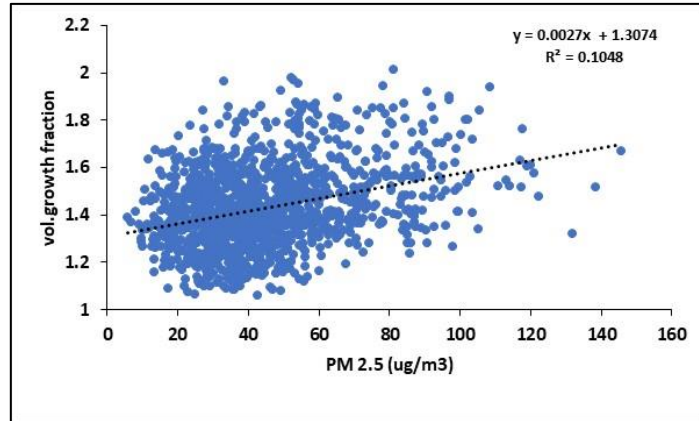


(ب)

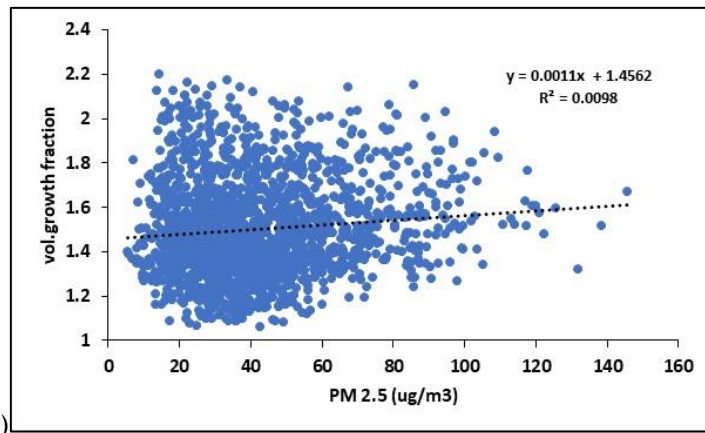
شکل ۵. نمودار پراکنش دید افقی (m) و غلظت PM_{2.5} (μg/m³) در حالت بررسی (الف) تمام روزها، شامل بارش و (ب) فقط روزهای بدون بارش در ۳ بازه مختلف تند باد (دایره‌های آبی‌رنگ، نارنجی‌رنگ و خاکستری‌رنگ به ترتیب منطبق بر روزهای با تندی باد کمتر از ۲ m/s، بین ۲ و ۴ m/s و بیش از ۴ m/s هستند) در ایستگاه مهرآباد. خطوط سیاه‌رنگ افقی در دید افقی ۵ و ۱۰ کیلومتر، سه محدوده دید افقی بد، کم و خوب را نشان می‌دهند. خط‌چین سیاه‌رنگ بیانگر یک غلظت ثابت PM_{2.5} (۳۰ μg/m³) است.

را پراکنده یا جذب کنند و با توجه به شکل ۲ رابطه خطی دارند. طبق شکل ۶ با افزایش رشد نسبی حجمی، VGF برای مقادیر PM کمتر تغییرات بیشتری دارد. این شکل نشان می‌دهد که وقتی ذرات کمتر هستند تنوع در نحوی جذب رطوبت نیز بیشتر به نظر می‌رسد. البته با مقادیر کمتر ذرات، رقابت برای جذب رطوبت نیز توسط آنها کمتر می‌شود.

همان‌گونه که در بخش ۲ بیان شد، طبق شکل ۲ با افزایش رطوبت نسبی، رشد حجمی نسبی (VGF) هواویزها افزایش می‌یابد و هرچه VGF بیشتر باشد، رطوبت نسبی نیز بیشتر است و اگر به یک نزدیک شود، یعنی رطوبت نسبی نداریم. وقتی رطوبت نسبی داریم، هواویزها قطرات بخار آب را جذب می‌کنند و دید را کاهش می‌دهند. به این ترتیب، حجم افزایش یافته و هواویزها می‌توانند بیشتر نور خورشید



(الف)



(ب)

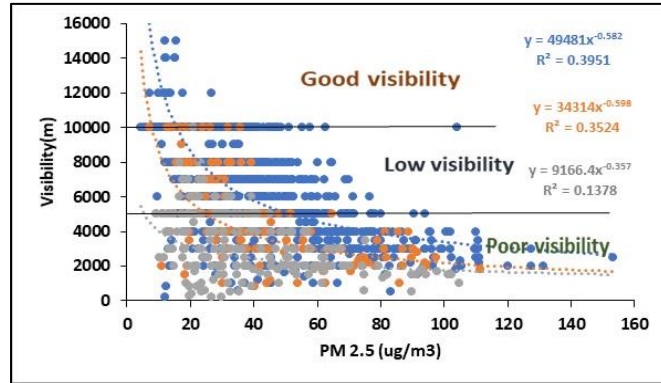
شکل ۶. نمودار پراکنش غلظت $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) نسبت به میزان رشد حجمی نسبی ذرات هواویز شهری در حالت بررسی (الف) تمام روزها، شامل بارش و (ب) فقط روزهای بدون بارش در ایستگاه مهرآباد.

۲-۳. تحلیل داده‌های ایستگاه ژئوفیزیک

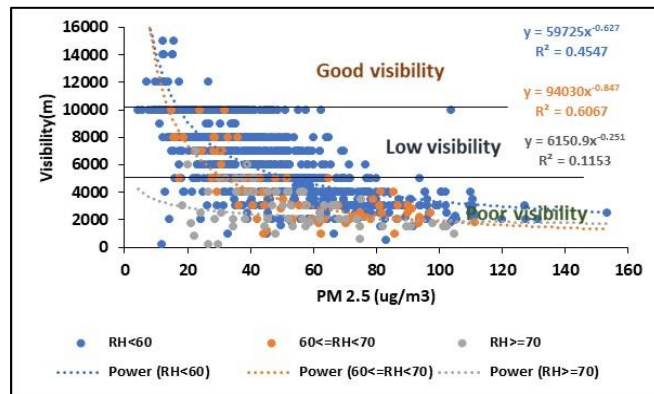
بالاست. در شرایط رطوبتی بالاتر، دید افقی می‌تواند حتی پایین‌تر از ۵۰۰۰ متر باشد، حتی زمانی که غلظت $PM_{2.5}$ کمتر از ۳۰ میکروگرم بر متر مکعب است و این وضعیت نسبت به شکل ۳ (ایستگاه مهرآباد) پراکندگی کمتری را نشان می‌دهد.

شکل ۸ پراکنش‌نگاشت غلظت‌های $PM_{2.5}$ و دید افقی در سه بازه مختلف دمای میانگین، برای ایستگاه ژئوفیزیک در شرایط بارانی و بدون بارش را نمایش می‌دهند. از تحلیل این شکل مشخص می‌شود که همانند ایستگاه ژئوفیزیک، در دماهای بالا، رابطه غیرخطی میان غلظت‌های $PM_{2.5}$ و دید افقی بیشتر نمایان است و پراکندگی داده‌ها نیز افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، با کاهش میانگین دما، دید افقی معمولاً کمتر از روزهای با دماهای بالاتر است.

شکل ۷، رابطه بین غلظت‌های $PM_{2.5}$ و دید افقی را در سه بازه مختلف رطوبت نسبی برای ایستگاه ژئوفیزیک، در شرایط بارانی و بدون بارش نمایش می‌دهد. بررسی این شکل مشخص می‌کند که در هر دو حالت (روزهای بارانی و روزهای خشک)، یک رابطه غیرخطی میان غلظت $PM_{2.5}$ و دید افقی وجود دارد که به مقادیر مختلف RH بستگی دارد. با ثابت نگه‌داشتن غلظت $PM_{2.5}$ به میزان ۳۰ میکروگرم بر متر مکعب، افزایش RH منجر به کاهش دید افقی می‌شود. این کاهش به‌ویژه در رطوبت‌های بالای ۸۰٪ مشهودتر است که با تحقیقات سان و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد. در مقایسه با حالت بدون بارش (شکل ۷-ب)، در شرایط بارانی (شکل ۷-الف) وقوع دید افقی کم بسیار بیشتر است، که این موضوع ناشی از تأثیر رطوبت

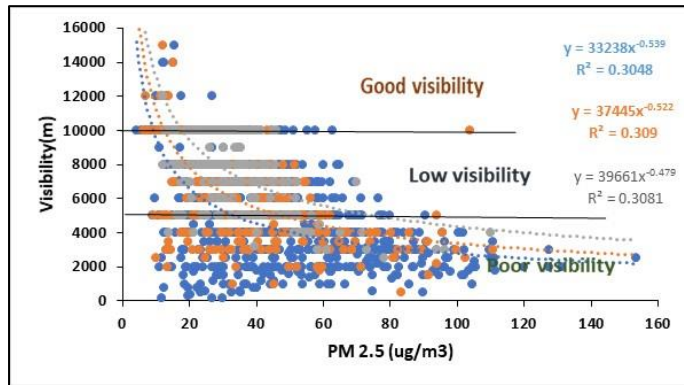


(الف)

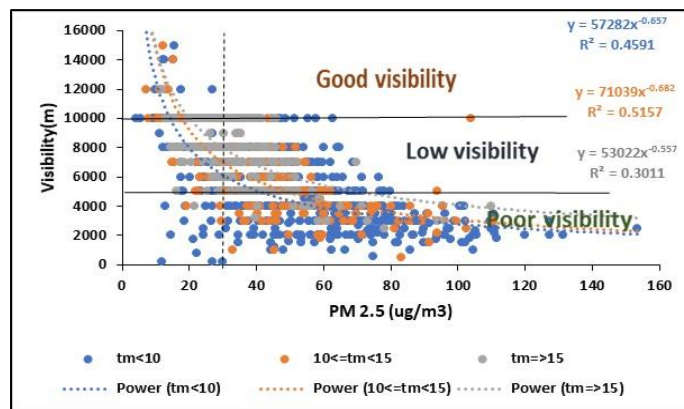


(ب)

شکل ۷. مانند شکل ۳ ولی برای ایستگاه ژئوفیزیک.



(الف)

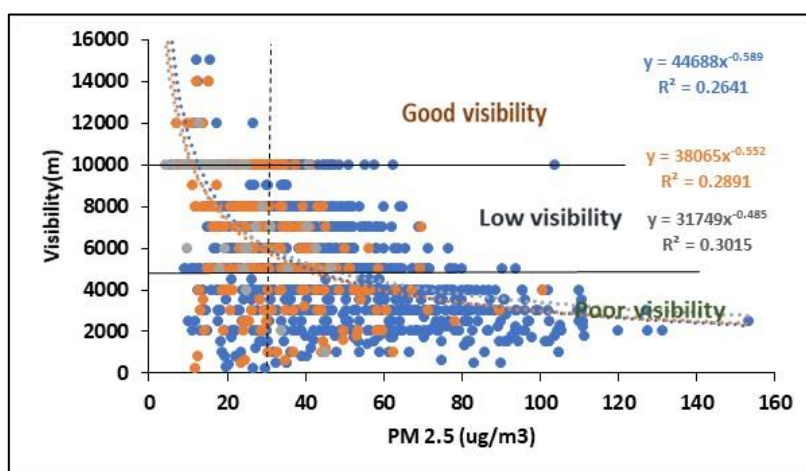


(ب)

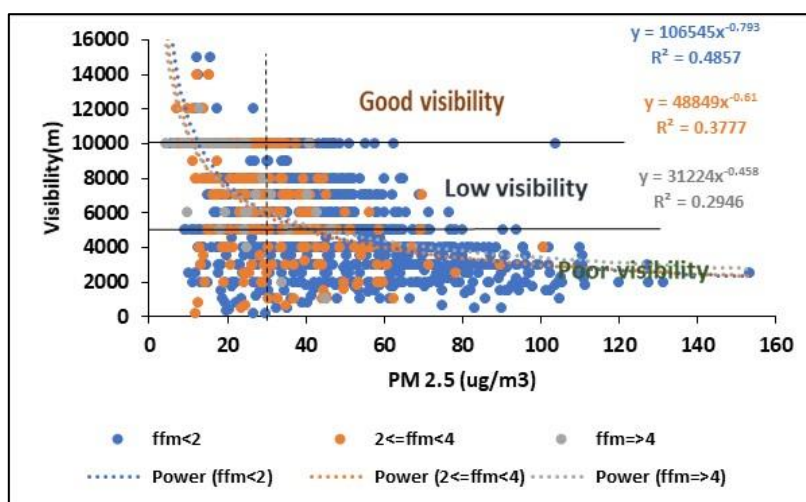
شکل ۸. مانند شکل ۵ ولی برای ایستگاه ژئوفیزیک.

ایستگاه ژئوفیزیک با افزایش رشد حجمی نسبی، VGF برای مقادیر کمتر غلظت‌های PM2.5 بیشتر اهمیت می‌یابد. البته شکل ۱۰ نشان می‌دهد که عوامل مختلفی، بسته به ترکیب هواویزها و عوامل هواشناختی بر جذب رطوبت هواویزها مؤثر هستند که لازم است تفکیک و بررسی شوند. البته ذرات ریزتر (شکل ۱۰) حساسیت بیشتری و افزایشی برای رشد با رطوبت را دارند. اما برای ذرات درشت‌تر این کمتر و حتی بر عکس است. ذرات درشت‌تر معمولاً منشا غیرمحلی داشته و غیر شهری هستند.

شکل ۹ پراکنش غلظت‌های PM2.5 و دید افقی در سه بازه مختلف سرعت باد برای ایستگاه ژئوفیزیک در شرایط بارانی و بدون بارش را نشان می‌دهند. طبق این شکل، رابطه غیرخطی بین غلظت‌های PM2.5 با دید افقی در سرعت‌های بالای باد بیشتر نمایان است و پراکندگی داده‌ها نیز افزایش می‌یابد. به علاوه، هرچه سرعت باد کمتر باشد، دید افقی معمولاً نسبت به روزهایی که سرعت باد بیشتر است، کاهش می‌یابد (شکل ۹). شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که همانند ایستگاه مهرآباد، برای

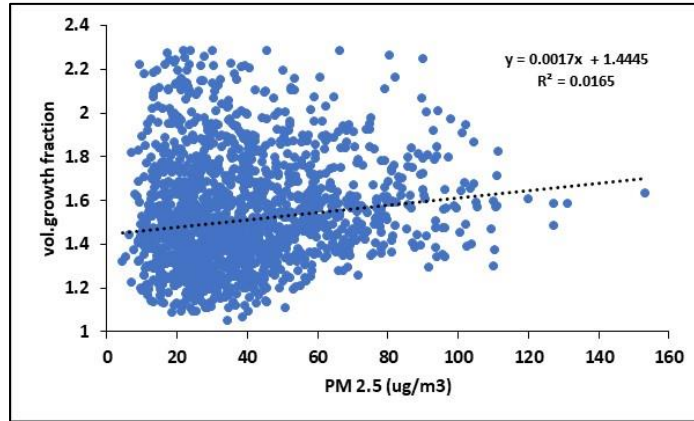


(الف)

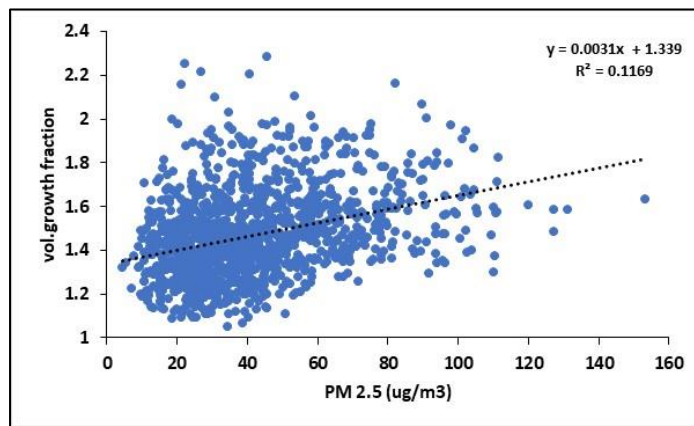


(ب)

شکل ۹. مانند شکل ۶ ولی برای ایستگاه ژئوفیزیک.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نمودار پراکنش غلظت $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) نسبت به میزان رشد حجمی نسبی ذرات هواویز شهری در حالت بررسی (الف) تمام روزها، شامل بارش و (ب) فقط روزهای بدون بارش در ایستگاه ژئوفیزیک.

وابستگی به رطوبت متوسط و به‌ویژه زیاد و دمای کم را دارا است. این نتیجه بخصوص برای مهرآباد که دارای داده‌های کامل‌تری است، بارزتر است البته برای ایستگاه ژئوفیزیک برای رطوبت متوسط بیشتر صادق است. با باد و دمای بیشتر، توان همبستگی دید افقی با غلظت نیز کمتر می‌شود.

در ادامه، جدول‌هایی از پارامترهای ضرایب همبستگی بین دید و رطوبت، دما و سرعت باد ارائه می‌شود. جدول‌های ۲ تا ۴ خلاصه نتایج تغییرات تغییر دید افقی برحسب غلظت ذرات $PM_{2.5}$ را برای مقادیر مختلف رطوبت، دما و باد را در ایستگاه‌های بررسی شده نشان می‌دهد. شکل تابع کلی: $V=aC^n+b$ است که در آن a و b مقادیر ثابت هستند. همان‌طور که از این جداول پیدا است، دید بیشترین

جدول ۲. خلاصه نتایج پارامترهای منحنی‌های برازش شده برای دید افقی بر حسب $PM_{2.5}$ با رطوبت (برگرفته از شکل‌های ۳ و ۷).

ایستگاه	رطوبت	توان غلظت، n	R^2
مهرآباد	کم	-۰/۶۷	۰/۴۴
	متوسط	-۰/۹۱	۰/۶۵
	زیاد	-۰/۹۲	۰/۳۶
ژئوفیزیک	کم	-۰/۶۲	۰/۴۵
	متوسط	-۰/۸۵	۰/۶۰
	زیاد	-۰/۲۵	۰/۱۱

جدول ۳. خلاصه نتایج پارامترهای منحنی‌های برازش شده برای دید افقی بر حسب PM2.5 با دما (براساس شکل‌های ۴ و ۸).

ایستگاه	دما	توان غلظت، n	R ²
مهرآباد	کم	-۰/۸	۰/۶
	متوسط	-۰/۶۸	۰/۴۳
	زیاد	-۰/۴۶	۰/۱۸
ژئوفیزیک	کم	-۰/۶۶	۰/۴۶
	متوسط	-۰/۶۸	۰/۵۲
	زیاد	-۰/۵۶	۰/۳۰

جدول ۴. خلاصه نتایج پارامترهای منحنی‌های برازش شده برای دید افقی بر حسب PM2.5 با باد (براساس شکل‌های ۵ و ۹).

ایستگاه	باد	توان غلظت، n	R ²
مهرآباد	کم	-۰/۸۶	۰/۳
	متوسط	-۰/۷۶	۰/۴
	زیاد	-۰/۴۲	۰/۳
ژئوفیزیک	کم	-۰/۷۹	۰/۴۸
	متوسط	-۰/۶۱	۰/۳۸
	زیاد	-۰/۴۶	۰/۳۰

۴. نتیجه‌گیری

آلاینده‌ها در جو به دلیل کاهش اختلاط قائم هوا، پدیده وارونگی دما، مه و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی بیشتر می‌شود. این عوامل باعث افزایش آلاینده‌ها در سطح زمین و کاهش کیفیت هوا می‌شوند. بنابراین، در این شرایط، نه تنها دید افقی کاهش می‌یابد، بلکه کیفیت هوای محیط نیز به خطر می‌افتد و می‌تواند برای سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست مضر باشد. در دماهای پایین، دید افقی می‌تواند به دلیل کاهش رطوبت، کاهش ذرات معلق و کاهش فعالیت‌های طبیعی بهبود یابد. با این حال، عوامل مانند مه، برف یا وارونگی دما می‌توانند این وضعیت را تغییر دهند. بنابراین دید افقی در دماهای پایین، به شرایط جوی خاص بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی برای مقادیر بیشتر از ۲۰ درصد، رشد حجمی نسبی (VGF) هواویزها افزایش می‌یابد؛ هرچه VGF بیشتر باشد، رطوبت نسبی نیز بیشتر است و بالعکس. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش دید افقی تنها تابع یک متغیر منفرد مانند PM2.5 یا RH نیست، بلکه برهم‌کنش پیچیده‌ای میان شرایط هواشناسی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذرات وجود دارد. به‌ویژه در شرایط رطوبت بالا،

در این مطالعه، تأثیر رطوبت نسبی و غلظت هواویزهای شهری بر دید افقی در شهر تهران برای فصول پاییز و زمستان در یک دوره ده ساله بررسی شد. این مطالعه تأثیر PM2.5 و RH را در تغییر دید افقی فصول پاییز و زمستان نشان داد. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی، PM2.5 بر کاهش دید افقی تأثیر بیشتری می‌گذارد و در رطوبت‌های بالای ۹۰٪، دید افقی با افزایش PM2.5 کاهش می‌یابد. اگرچه دید افقی با غلظت PM2.5 و RH و همبستگی منفی و رابطه غیرخطی دارد. باد نیز به‌ویژه برای بادهای بیش از ۲ متر بر ثانیه و دماهای بیش از ۱۰ درجه سلسیوس نقش افزایشی در دید افقی دارد. باید تأکید کرد که توزیع اندازه ذرات، خواص نوری و ترکیب شیمیایی هواویزها نیز بر دید افقی تأثیر می‌گذارد و بنابراین تأثیر هواویزها و شرایط هواشناسی بر دید جوی نسبتاً پیچیده است. این موضوع می‌تواند موضوع مطالعات آتی با استفاده از یک مدل عددی جامع کیفیت هوا و مشاهدات دقیق هواشناسی و محیط‌زیست باشد. در دماهای پایین و شرایط دید افقی کم، امکان تجمع

عوامل هواشناسی روی غلظت های دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن و ازون در تهران. *نشریه مدیریت و برنامه ریزی محیط زیست*، ۷(۱۳۹۲)، ۶۱-۷۰.

ثابت قدم، س.، احمدی گیوی، ف.، گلستانی، ی. و علی اکبری بیدختی، ع. (۱۳۹۲). ارتباط آلاینده های شهری با دید افقی منطقه تهران در سال ۲۰۰۸. *فیزیک زمین و فضا*، ۳۹(۴)، ۱۰۹-۱۲۲.

زارعی، ف.، قرایلو، م. و علیزاده چوبری، ا. (۱۳۹۶). تأثیر هواویزها بر بارش در شرایط رطوبت های نسبی متفاوت: مطالعه موردی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۲)، ۱۳۵-۱۵۵.

شرعی پور، ز. و علی اکبری بیدختی، ع. (۱۳۹۲). تغییرات دید جوی و عوامل مؤثر بر آن در ایستگاه ژئوفیزیک تهران طی دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۱). *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۷(۲)، ۱۲۸-۱۴۱.

اثر افزایشی PM2.5 بر کاهش دید افقی بیانگر آن است که ذرات ریز با جذب رطوبت، اندازه و ویژگی های نوری خود را تغییر داده و پراکندگی نور را افزایش می دهند (سان و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، نقش باد و دما در بهبود دید افقی نشان می دهد که شرایط همدیدی منطقه می تواند اثرات منفی آلاینده ها را تعدیل کند (هسو و چنگ، ۲۰۱۹). از سوی دیگر، نقش باد و دما در بهبود دید افقی نشان می دهد که شرایط همدیدی منطقه می تواند اثرهای منفی آلاینده ها را کاهش دهند (هسو و چنگ، ۲۰۱۹). بنابراین، تحلیل نتایج این مطالعه بیانگر آن است که دید افقی در تهران نه تنها شاخصی از شرایط هواشناسی، بلکه بازتابی از وضعیت آلودگی هوا و برهم کنش آن با محیط است.

مراجع

اسفندیاری، س.، کمالی، ا. و باقری، س. (۱۳۹۲). تأثیر

- Alizadeh-Choozari, O., & Gharaylou, M. (2017). Aerosol impacts on radiative and microphysical properties of clouds and precipitation formation. *Atmospheric Research*, 185, 53-64.
- Cheng, M. T., & Tsai, Y. I. (2000). Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas. *Science of the total environment*, 263(1-3), 101-114.
- David, L. M., Ravishankara, A. R., Kodros, J. K., Venkataraman, C., Sadavarte, P., Pierce, J. R., Chaliyakunnel, S., & Millet, D.B. (2018). Aerosol optical depth over India. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(7), 3688-3703.
- Deng, X., Tie, X., Wu, D., Zhou, X., Bi, X., Tan, H. & Jiang, C. (2008). Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1424-1435.
- Deng, J., Du, K., Wang, K., Yuan, C. S., & Zhao, J. (2012). Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973-2010. *Atmospheric Environment*, 59, 11-21.
- Deng, J., Xing, Z., Zhuang, B., & Du, K. (2014). Comparative study on long-term visibility trend and its affecting factors on both sides of the Taiwan Strait. *Atmospheric research*, 143, 266-278.
- Doyle, M., & Dorling, S. (2002). Visibility trends in the UK 1950-1997. *Atmospheric Environment*, 36(19), 3161-3172.
- Engelhart, G. J., Hildebrandt, L., Kostenidou, E., Mihalopoulos, N., Donahue, N. M., & Pandis, S. N. (2011). Water content of aged aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 911-920.
- Hsu, C. H., & Cheng, F. Y. (2019). Synoptic weather patterns and associated air pollution in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1139-1151.
- Hu, Y., Yao, L., Cheng, Z., & Wang, Y. (2017). Long-term atmospheric visibility trends in megacities of China, India and the United States. *Environmental research*, 159, 466-473.
- Hyslop, N. P. (2009). Impaired visibility: the air pollution people see. *Atmospheric Environment*, 43(1), 182-195.
- Jiang, Y., Liu, C., Wen, C., & Long, Y. (2024). Study of summer microclimate and PM2.5 concentration in campus plant communities. *Scientific Reports*, 14(1), 3311.
- Kathayat, B., Chapagain, N. P., & Lamsal, Y. R. (2022). Influence of ambient relative humidity on horizontal visibility in the two cities of western Nepal having contrasting urban-cum-industrial backgrounds and study of long-term variation. *Journal of Nepal Physical Society*, 8(1), 55-62.
- Kreidenweis, S. M., Remer, L. A., Bruantjes, R., & Dubovik, O. (2001). Smoke aerosol from biomass burning in Mexico: Hygroscopic smoke optical model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5), 4831-4844.
- Löndahl, J., Pagels, J., Boman, C., Swietlicki, E., Massling, A., Rissler, J., Blomberg, A., Bohgard, M., & Sandström, T. (2008).

- Deposition of biomass combustion aerosol particles in the human respiratory tract. *Inhalation toxicology*, 20(10), 923-933.
- Lee, J. Y., Jo, W. K., & Chun, H. H. (2014). Characteristics of atmospheric visibility and its relationship with air pollution in Korea. *Journal of Environmental Quality*, 43(5), 1519-1526.
- Leung, D. M., Tai, A. P., Mickley, L. J., Moch, J. M., van Donkelaar, A., Shen, L., & Martin, R. V. (2018). Synoptic meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM 2.5) air quality in major metropolitan regions of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6733-6748.
- Malm, W. C., & Day, D. E. (2001). Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity. *Atmospheric Environment*, 35(16), 2845-2860.
- Martonen, T. B., & Zhang, Z. (1993). Deposition of sulfate acid aerosols in the developing human lung. *Inhalation toxicology*, 5(1), 165-187.
- Pendergrass, D. C., Shen, L., Jacob, D. J., & Mickley, L. J. (2019). Predicting the impact of climate change on severe wintertime particulate pollution events in Beijing using extreme value theory. *Geophysical Research Letters*, 46(3), 1824-1830.
- Perkins, H. C. (1974). *Air Pollution* McGraw-Hill. London, Tokyo, Sydney.
- Singh, A., Bloss, W. J., & Pope, F. D. (2017). 60 years of UK visibility measurements: impact of meteorology and atmospheric pollutants on visibility. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 2085-2101.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Sequeira, R., & Lai, K. H. (1998). The effect of meteorological parameters and aerosol constituents on visibility in urban Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 32(16), 2865-2871.
- Spichtinger, P., & Cziczo, D. J. (2008). Aerosol-cloud interactions—a challenge for measurements and modeling at the cutting edge of cloud-climate interactions. *Environ. Res. Lett*, 3(2), 025002.
- Sun, X., Zhao, T., Liu, D., Gong, S., Xu, J., & Ma, X. (2020). Quantifying the influences of PM2.5 and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East China. *Atmosphere*, 11(5), 461.
- Tsai, Y. I., Lin, Y. H., & Lee, S. Z. (2003). Visibility variation with air qualities in the metropolitan area in southern Taiwan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 144, 19-40.
- Vaishali, Verma, G., & Das, R. M. (2023). Influence of temperature and relative humidity on PM2.5 concentration over Delhi. *MAPAN*, 38(3), 759-769.
- Waggoner, A. P., Weiss, R. E., Ahlquist, N. C., Covert, D. S., Will, S., & Charlson, R. J. (1981). Optical characteristics of atmospheric aerosols. *Atmospheric Environment (1967)*, 15(10-11), 1891-1909.
- Wang, H., Xu, J., Zhang, M., Yang, Y., Shen, X., Wang, Y., & Guo, J. (2014). A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China. *Atmospheric Environment*, 98, 146-157.
- Watson, J. G. (2002). Visibility: Science and regulation. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(6), 628-713.
- Yang, Y. R., Liu, X. G., Qu, Y., An, J. L., Jiang, R., Zhang, Y. H., & Ma, Q. X. (2015). Characteristics and formation mechanism of continuous hazes in China: a case study during the autumn of 2014 in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8165-8178.
- Ye, X., Tang, C., Yin, Z., Chen, J., Ma, Z., Kong, L., & Geng, F. (2013). Hygroscopic growth of urban aerosol particles during the 2009 Mirage-Shanghai Campaign. *Atmospheric environment*, 64, 263-269.
- Zou, J., Lu, J., Wang, Y., Li, J., Liu, H., Wang, L., & Liu, W. (2021). Visibility Variation in Zhengzhou from 2008–2017. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (631(1), 012034). IOP Publishing.