

بررسی تغییرات ضریب خاموشی جو بر مبنای دید افقی در چهار فرودگاه پرتدد کشور

سمانه ثابت‌قدم^{۱*}، مسعود خوش‌سیما^۲ و فرهنگ احمدی گیوی^۱

۱. استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۳/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۱۱)

چکیده

دید، علاوه بر اینکه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نوری جو محسوب می‌شود، از جنبه‌های گوناگون از جمله ترافیک زمینی و هوایی دارای اهمیت است. در تحقیق حاضر بانک اطلاعات تاریخی به‌منظور نشان دادن تغییرات دید در ۴ فرودگاه پرتدد کشور شامل فرودگاه‌های مهرآباد تهران، مشهد، شیراز و اصفهان در دوره مشترک چهار ساله بررسی شده است. ضریب خاموشی با استفاده از رابطه کشماید برآورد می‌شود. تغییرات بلندمدت خاموشی در روزهای آفتابی و به‌نسبت خشک و حذف داده‌های دید در شرایط رطوبت نسبی بیش از ۷۰٪ و ابرناکی بیش از ۵۰٪ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات میانگین سالانه ضریب خاموشی جو در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ افزایش به‌نسبت ملایمی در هر چهار ایستگاه فرودگاهی دارد. مقایسه حدهای پایین و بالای دید، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در ایستگاه‌های گوناگون نشان نمی‌دهد. کمترین مقادیر حدی دید مربوط به ایستگاه مهرآباد تهران است. بررسی تغییرات ماهانه میانگین دید افقی حاکی از آن است که در ماه‌های زمستان کمترین مقادیر وجود داشته و اندازه آن حدود ۲ کیلومتر کمتر از ماه‌های دیگر بوده است. ارتباط مستقیم بین رطوبت نسبی و ضریب خاموشی جو احتمالاً ناشی از تبدیل آلاینده‌های اولیه به ثانویه در حضور رطوبت است. نتایج بررسی حساسیت روند تغییرات بلندمدت خاموشی به رطوبت نسبی و ابرناکی نشان می‌دهد که با اعمال پالایه، تغییر اندکی در مقادیر مطلق داده‌ها ایجاد می‌شود؛ ولی در روند کلی تغییرات خاموشی، به‌ویژه در ایستگاه‌های تهران و اصفهان، تغییری دیده نمی‌شود که می‌تواند بیانگر کاهش دید در بلندمدت به‌سبب افزایش غلظت آلاینده‌های جو باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب خاموشی جو، دید افقی، فرودگاه‌های پرتدد، رطوبت، تغییرات بلندمدت.

۱. مقدمه

طی شده نور و شدت نور در آن نقطه است (لاتیمر و همکاران، ۱۹۷۸).

قابلیت دید، نشانگر مشاهداتی ساده‌ای برای کیفیت هوا به‌شمار می‌رود که تغییرات آن به‌سادگی و با چشم غیر مسلح قابل مشاهده است (مالم، ۱۹۹۴؛ جاکوبسن، ۲۰۰۵؛ سینفیلد و پاندیس، ۲۰۰۶؛ بامر و همکاران، ۲۰۰۸). تعیین کاهش میدان دید بستگی به ویژگی‌های فیزیکی جو و جذب و پراکنش نور در ذرات و گازها دارد (ایدلس-دوبوی، ۲۰۰۲؛ لی و همکاران، ۲۰۱۵). در بسیاری از تحقیقات از ضریب خاموشی جو یا میدان دید افقی به‌منزله جایگزینی برای بررسی آلودگی جو استفاده می‌شود (دویل و دورلینگ، ۲۰۰۲). از آنجاکه جذب و پراکنش نور بستگی زمانی و مکانی دارد، بنابراین باید در

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نوری جو، خاموشی نور در جو است که از جنبه‌های گوناگون مانند ترافیک زمینی و هوایی دارای اهمیت است. میزان خاموشی جو با استفاده از میدان دید افقی قابل محاسبه است (بامر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ثابت‌قدم و همکاران، ۱۳۹۴). میدان دید به دورترین فاصله‌ای گفته می‌شود که ناظر با دید عادی و در شرایط جو مناسب قادر به تشخیص اجسام است (هوروات، ۱۹۸۱). این محدوده براساس معادله انتقال تابش بیان می‌شود که چگونگی برهم‌کنش نور و جو را نشان می‌دهد. بر این اساس، شدت نور دریافتی از یک جسم در راستای مسیر دید ناظر، به‌علت جذب یا پراکنش نور در طول مسیر نوری با فاصله از چشمه کاهش می‌یابد. کاهش شدت نور متناسب با طول مسافت

مقیاس محلی بررسی شود.

تعیین روند تغییرات زمانی و مکانی میزان دید و خاموشی جو، از دهه‌های گذشته تاکنون توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و بررسی‌های گسترده‌ای در این زمینه در کشورهای گوناگون دنیا صورت گرفته است (تریچونیس، ۱۹۸۲؛ اسلوان، ۱۹۸۲a,b، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴؛ مالم، ۱۹۹۹؛ شیچتل و همکاران، ۲۰۰۱؛ دوپل و دورلینگ، ۲۰۰۲؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ سای، ۲۰۰۵؛ قیم و همکاران، ۲۰۰۵؛ چه و همکاران، ۲۰۰۷؛ مولنار و همکاران، ۲۰۰۸؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ وو و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳؛ لین و همکاران، ۲۰۱۴؛ خو و همکاران، ۲۰۱۵؛ بالاریب و همکاران، ۲۰۱۵). برای نمونه در تحقیقات اسلوان (۱۹۸۳، ۱۹۸۲a,b) دو روش آماری برای تعیین روند تغییرات بلندمدت دید افقی معرفی و سپس این روند برای دوره‌ی سی ساله از ۱۹۴۸ تا ۱۹۷۸ در شرق آمریکا بررسی شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوی یکسان در روند تغییرات بلندمدت دید در شهرهای گوناگون آمریکا وجود ندارد. همچنین روند کاهش میزان دید در ایستگاه‌های شهری نسبت به ایستگاه‌های غیر شهری مشهودتر است. نتایج حاکی از آن است که روند تغییرات دید، تا حد زیادی به فصل و منطقه مورد بررسی بستگی دارد؛ طوری که در شهرهای کوچک و کم‌جمعیت، روند تغییرات دید به‌ویژه در فصل‌های بهار و تابستان قابل‌ملاحظه نیست. در بررسی‌های تکمیلی دیگر نیز چگونگی تغییرات مکانی و زمانی دید افقی در ۲۹۸ ایستگاه همدیدی در کشور آمریکا طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۵ بررسی شده است (شیچتل و همکاران، ۲۰۰۱). نتایج این تحقیقات، افزایش ۱۰ درصدی میزان دید در کل آمریکا طی ۱۵ سال را نشان می‌دهد. بررسی روند تغییرات دید در جنوب لندن در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۷، افزایش میزان دید در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد (دوپل و دورلینگ، ۲۰۰۲). در بررسی داده‌های دید افقی ایستگاه‌های همدیدی جنوب لندن،

روند افزایشی کلی در بازه ۴۷ ساله مشاهده می‌شود که البته آهنگ روند افزایش در هر ایستگاه متفاوت است. چنین تحقیقاتی در برخی از کشورهای شرق آسیا صورت گرفته است که از بارزترین آنها می‌توان به بررسی روند تغییرات دید در شش شهر بزرگ چین در بازه ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۷ اشاره کرد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۹). در بسیاری از تحقیقات پیشین، ارتباط بین افزایش خاموشی جو با غلظت هواویزهای جو بررسی شده است (چه و همکاران، ۲۰۰۷؛ بامر و همکاران، ۲۰۰۸).

هدف از پژوهش حاضر، بررسی بانک اطلاعات تاریخی برای نشان دادن تغییرات سالانه، روند بلندمدت و تعیین الگوی ماهانه ضریب خاموشی جو در چهار فرودگاه پرتدد کشور است. براساس گزارش سال‌نامه آماری سازمان هواپیمایی کشوری در سال‌های ۹۱ و ۹۲، فرودگاه‌های مهرآباد تهران، مشهد، امام خمینی، شیراز و اصفهان از نظر تعداد فرود و برخاست هواپیماها بیشترین تعداد را از میان فرودگاه‌های کشور به خود اختصاص داده‌اند. همه این فرودگاه‌ها، به‌جز فرودگاه امام خمینی، دارای اطلاعات تاریخی بیش از ۴۰ سال هستند. ازاین‌رو با توجه به اهمیت میزان دید در فرودگاه‌ها، روند تغییرات دید در ۴ فرودگاه پرتدد کشور که دارای بیشترین بازه مشترک داده‌های آماری هستند، در ماه‌های گوناگون سال بررسی و کمترین میزان دید در هریک از این فرودگاه‌ها تعیین می‌شود. سپس نقش رطوبت در کاهش میدان دید یا افزایش خاموشی جو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. داده‌ها و روش کار

داده‌های به‌کار رفته در تحقیق حاضر، شامل داده‌های دیدبانی روزانه دید افقی، میزان پوشش ابری و درصد رطوبت نسبی از ایستگاه‌های همدیدی فرودگاه‌های نام-برده، در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ است. این اطلاعات اغلب در فاصله‌های زمانی سه ساعته گزارش می‌شوند. آزمون کنترل کیفی برای اطمینان از دقت همه داده‌ها نیز

برای شاخص خاموشی جو تعیین می‌شود. حدّهای بالا و پایین خاموشی در هر ایستگاه با استفاده از دهمین و نودمین صدک دید به‌دست می‌آید.

از اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی در فرودگاه‌های مهرآباد تهران، مشهد، شیراز و اصفهان برای تحلیل‌های بلندمدت استفاده و روند تغییرات خاموشی جو در بازه زمانی ۴۰ ساله تعیین شد. از آنجا که میزان دید تحت‌تأثیر عوامل هواشناسی متفاوت دچار تغییر می‌شود (تسای، ۲۰۰۵؛ خو و همکاران، ۲۰۱۵)، تغییرات بلندمدت میدان دید در روزهای آفتابی و به‌نسبت خشک با کاربست پالایه وو و همکاران (۲۰۱۳) و حذف داده‌های دید در شرایط رطوبت نسبی بیش از ۷۰٪ و ابرناکی بیش از ۵۰٪ (کسر ابری مساوی یا بیشتر از ۵ به ۸)، بررسی می‌شود. استفاده از چنین پالایه‌ای تضمین می‌کند که تغییرات بلندمدت عمدتاً ناشی از تغییرات آلودگی هوا بوده‌اند. در بسیاری از تحقیقات پیشین نیز، دید در شرایط خاص از سری داده‌ها حذف شده است (مانند کرایگ و فالکنبری، ۱۹۷۹؛ اسلوان، ۱۹۸۴؛ دوئل و دورلینگ، ۲۰۰۲؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۹).

۳. نتایج

در این بخش نتایج تغییرات بلندمدت سالانه و ماهانه خاموشی جو برای فرودگاه‌های مورد تحقیق و نقش رطوبت در این تغییرات در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ بررسی می‌شود.

۳.۱. بررسی تغییرات سالانه خاموشی جو و روند بلندمدت آن

روند تغییرات میانگین سالانه ضریب خاموشی جو برای فرودگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ در شکل‌های الف تا د نشان داده شده است. برای رسم کردن خط روند و تعیین تغییرات بلندمدت، از تحلیل وایازی حداقل مربعات صدک‌های تجمعی متفاوت استفاده شده است. تغییرات بلندمدت ضریب خاموشی

صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، اطلاعات مربوط به متوسط روزانه ساعت‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ UTC در حکم داده‌های اصلی استفاده شده است؛ زیرا مقادیر میان‌روزی برای پژوهش‌هایی از این دست، بسیار مناسب‌تر هستند (لی، ۱۹۹۰؛ وو و همکاران، ۲۰۱۲؛ بالاریب و همکاران، ۲۰۱۵). برای برآورد ضریب خاموشی جو براساس میدان دید افقی از رابطه زیر استفاده می‌شود (جاکوبسن، ۲۰۱۲):

$$x = \frac{\ln(Cratio)}{-b_{ext}} \quad (1)$$

که در آن، x فاصله برابر با میدان دید، b_{ext} ضریب خاموشی جو و مقدار $Cratio$ بیانگر نسبت شدت نور پس‌زمینه و جسم است. بنابراین ضریب خاموشی با استفاده از رابطه زیر به نام رابطه کشمایدنر، براساس میدان دید افقی (V) برآورد می‌شود:

$$b_{ext} = \frac{3.912}{V} \quad (2)$$

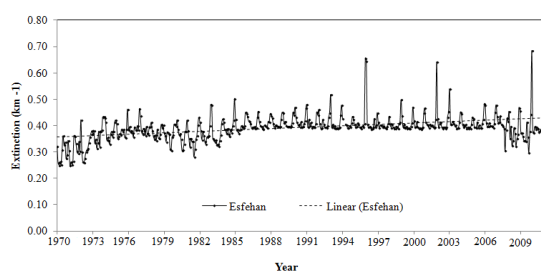
در رابطه (۲)، کمیت‌های V و b_{ext} دارای واحد مشابه هستند. در این رابطه فرض شده است که ناظر قابلیت آشکارسازی تضاد روشنایی ۰/۰۲ را دارد که این قابلیت برای ناظری با دید عادی امکان‌پذیر است (میدلتون، ۱۹۵۲). در جو پاک، محدوده دید بین ۱۴۵ تا ۲۲۵ کیلومتر است. در جو معمولی میدان دید بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر متغیر و در مناطق آلوده این مقدار کمتر است (وو و همکاران، ۲۰۱۲).

در پژوهش‌های مربوط به دید، معمولاً داده‌ها را با صدک‌ها بیان می‌کنند (اسلوان، ۱۹۸۲، ۱۹۸۳ و ۱۹۸۴؛ شیتچل و همکاران، ۲۰۰۱؛ دوئل و دورلینگ، ۲۰۰۲، مولنار و همکاران، ۲۰۰۸؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ وو و همکاران، ۲۰۱۳). صدک N ام برابر مقداری است که دید در N درصد از مواقع مساوی یا بیشتر از آن است. در بررسی تغییرات زمانی بلندمدت از صدک‌های ۱۰، ۵۰ و ۹۰ دیدبانی‌های سالانه استفاده می‌شود. از صدک‌های ۱۰ و ۹۰ به ترتیب برای نشان دادن بهترین و بدترین دیدها و از صدک ۵۰ به مثابه نماینده دید یا دید میانه استفاده می‌شود. با بهره‌گیری از این تعریف‌ها، دو مقدار حدّی

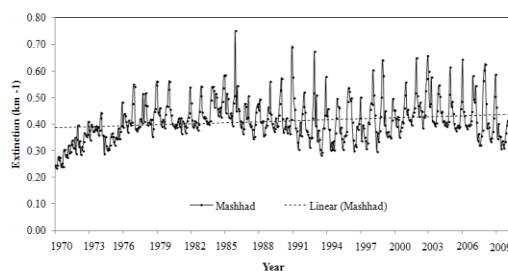
جو از ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ در هر چهار ایستگاه دارای روند افزایشی است. استفاده از ضریب همبستگی پی‌یرسون نشان می‌دهد که در روند افزایشی به‌دست آمده برای ایستگاه‌های اصفهان، تهران و مشهد در سطح اعتماد ۰/۰۱ و در ایستگاه شیراز در سطح اعتماد ۰/۰۵ معنی‌دار است. میانگین سالانه خاموشی در بیشتر ایستگاه‌ها در اوایل دهه ۱۹۷۰ حدود 0.3 km^{-1} است، درحالی‌که از میانه دهه ۲۰۰۰ این مقدار به حدود 0.4 km^{-1} افزایش می‌یابد. با وجود آنکه این شاخص نوساناتی را در سال‌های متفاوت نشان می‌دهد، ولی افزایش به‌نسبت ملایمی در هر چهار ایستگاه دارد. همچنین افزایش بیشتری در سال‌های ابتدای دوره دیده می‌شود.

مقایسه تغییرات میانگین سالانه ضریب خاموشی طی دوره ۴۰ ساله در فرودگاه‌های مورد بررسی، بیشترین آهنگ افزایش را در ایستگاه مهرآباد تهران نشان می‌دهد (شکل ۱). سال‌های مورد تحقیق برای بررسی تغییرات خاموشی جو در ایستگاه‌های موردنظر به ۸ دوره تقسیم شده است (جدول ۱). مقدار خاموشی و نحوه تغییرات آن در این دوره‌ها با نوسان‌هایی همراه است؛ در دوره اول، بین ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۵، مقدار میانگین خاموشی در همه ایستگاه‌ها حدود 0.3 km^{-1} است و افزایش ضریب

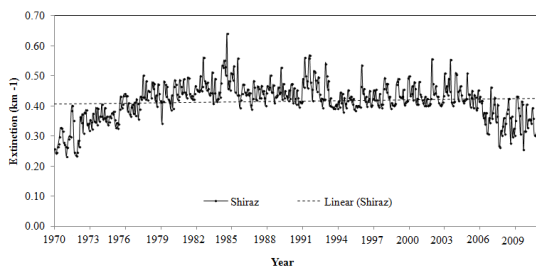
خاموشی در طول دوره در هر چهار ایستگاه مشاهده می‌شود. آهنگ تغییرات خاموشی در ایستگاه تهران روند معناداری را در این دوره نشان نمی‌دهد. دوره دوم از ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۰ در همه ایستگاه‌ها به‌جز اصفهان بر میزان خاموشی جو افزوده شده است که البته تغییرات در ایستگاه‌های تهران و مشهد از نظر آماری معنی‌دار نیستند. سپس در بازه ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰ که دو دوره سوم و چهارم را پوشش می‌دهد، در همه ایستگاه‌ها افزایش ضریب خاموشی مشاهده می‌شود. بین ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۵، کاهش معنادار ضریب خاموشی در ایستگاه شیراز نسبت به دیگر ایستگاه‌ها مشهودتر است. بیشترین آهنگ تغییر ضریب خاموشی جو در تهران بین ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ رخ داده است. سپس از ۲۰۰۱ مقدار میانگین خاموشی جو کاهش پیدا کرده است. این کاهش ضریب خاموشی همراه با افزایش میانگین سالانه دید افقی، به‌ویژه در دو ایستگاه مشهد و تهران است. در همه ایستگاه‌های مورد بررسی، مقدار ضریب خاموشی در پنج سال اخیر کمتر است. در بررسی کل دوره، تغییرات خاموشی جو در شیراز بسیار ناچیز، مشهد و اصفهان کم و در ایستگاه مهرآباد تهران قابل ملاحظه است. افزایش ضریب خاموشی در تهران احتمالاً مربوط به افزایش غلظت آلاینده‌های جوی در شهر تهران است.



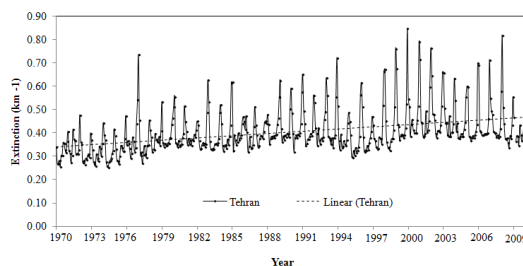
(ب)



(الف)



(د)

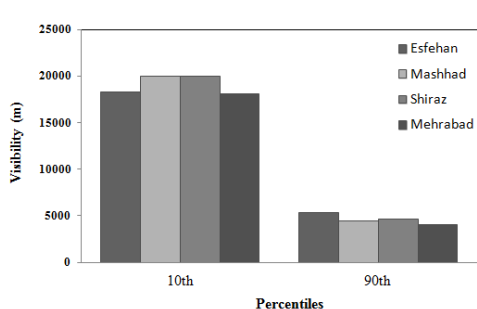


(ج)

شکل ۱. سری زمانی تغییرات بلندمدت خاموشی جو در فرودگاه‌های، (الف) مشهد، (ب) اصفهان، (ج) مهرآباد تهران و (د) شیراز در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰

جدول ۱. میانگین میزان خاموشی و نرخ تغییرات دوره‌ای در چهار فرودگاه موردنظر در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰. مقادیر با رنگ تیره با دو زیرخط در سطح اعتماد ۰/۰۱ و یک زیرخط در سطح اعتماد ۰/۰۵ معنی‌دار هستند.

دوره زمانی	اصفهان		مشهد		شیراز		تهران	
	میانگین (km ⁻¹)	آهنگ تغییر (m ⁻¹)	میانگین (km ⁻¹)	آهنگ تغییر (m ⁻¹)	میانگین (km ⁻¹)	آهنگ تغییر (m ⁻¹)	میانگین (km ⁻¹)	آهنگ تغییر (m ⁻¹)
1970-1975	0.34	<u>1.7</u>	0.34	<u>1.5</u>	0.34	<u>1.8</u>	0.32	0.1
1976-1980	0.38	<u>-0.5</u>	0.43	0.2	0.43	<u>0.9</u>	0.38	0.6
1981-1985	0.38	<u>1.1</u>	0.45	<u>2</u>	0.47	0.9	0.39	0.5
1986-1990	0.41	<u>0.2</u>	0.43	0.03	0.44	0.9	0.41	0.7
1991-1995	0.42	0.2	0.4	-0.6	0.44	<u>-1.8</u>	0.41	-1.2
1996-2000	0.41	-0.2	0.41	0.4	0.44	0.2	0.44	<u>2.1</u>
2001-2005	0.41	-0.2	0.46	-0.9	0.44	0.008	0.46	-1
2006-2010	0.4	0.02	0.4	<u>-2.4</u>	0.36	-0.6	0.44	-0.7
1970-2010	0.39	<u>0.1</u>	0.41	<u>0.1</u>	0.42	<u>0.04</u>	0.41	<u>0.3</u>



شکل ۲. حدّهای بالا و پایین دید که به‌ترتیب با استفاده از دهمین و نودمین صدک داده‌های دید در فرودگاه‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ به‌دست آمده است.

متوسط دید در ماه‌های زمستان کمترین مقادیر را دارد که اندازه آن حدود ۲ کیلومتر کمتر از ماه‌های دیگر است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در هر چهار ایستگاه، در ماه‌های با رطوبت نسبی کم (معمولاً ماه‌های تابستان)، میزان دید بیشتر و در نتیجه خاموشی کمتر است و در ماه‌های با رطوبت نسبی بیشتر (ماه‌های پاییز و زمستان)، دید به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که با افزایش خاموشی جو همراه است. هنگامی که درصد رطوبت نسبی جو بیشتر است (جدول ۲)، بسیاری از آلاینده‌های اولیه مانند گوگردی اکسید، نیتروژن دی-اکسید و کربن مونوکسید به آلاینده‌های ثانویه از جمله سولفات‌ها، نترات‌ها و هواپیزهای ارگانیک تبدیل می‌شوند (مالم و دی، ۲۰۰۱؛ سینفیلد و پانديس، ۲۰۰۶).

حدّهای پایین و بالای دید برای چهار ایستگاه در بازه ۴۰ ساله در شکل ۲ مقایسه شده است. با توجه به شکل، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدارهای حدّ بالا و پایین دید طی ۴۰ سال در ایستگاه‌های متفاوت وجود ندارد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کمترین مقادیر حدّی دید مربوط به فرودگاه مهرآباد تهران با مقدار متوسط حدود ۴ کیلومتر است. بیشترین مقادیر دید در دوره مورد بررسی، مربوط به فرودگاه‌های شیراز و مشهد با مقدار ۲۰ کیلومتر برآورد شده است.

۲.۳. بررسی تغییرات ماهانه خاموشی جو

تغییرات ماهانه میانگین دید افقی برای دوره ۴۰ ساله در ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۳ آورده شده است.

بودن تغییرات ماهانه دید در این ایستگاه است. انحراف معیار متوسط ماهانه داده‌های دید در ایستگاه شیراز حدود ۳۰۰ متر است؛ در صورتی که این مقدار برای ایستگاه‌های اصفهان، مشهد و تهران به ترتیب حدود ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ متر است.

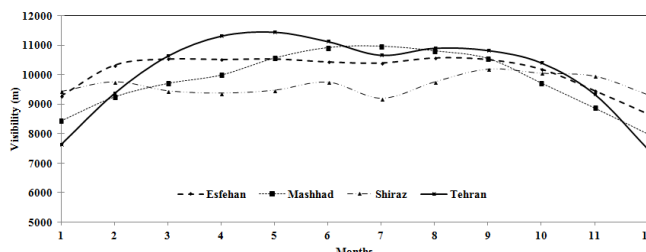
۳.۳. نقش رطوبت در تغییرات بلندمدت

همان‌طور که اشاره شد، میزان رطوبت موجود در جو یکی از مهم‌ترین علت‌های تأثیرگذار بر ضریب خاموشی جو است. از این رو برای بررسی تغییرات کیفیت هوای دیداری، با استفاده از پالایه معرفی شده وو و همکاران (۲۰۱۳)، داده‌های دید در شرایط رطوبت نسبی بیش از ۷۰٪ و ابرناکی بیش از ۵۰٪ (کسری مساوی یا بیشتر از ۵ به ۸) از سری داده‌ها کنار گذاشته و سپس تغییرات بلندمدت ضریب خاموشی بررسی شده است.

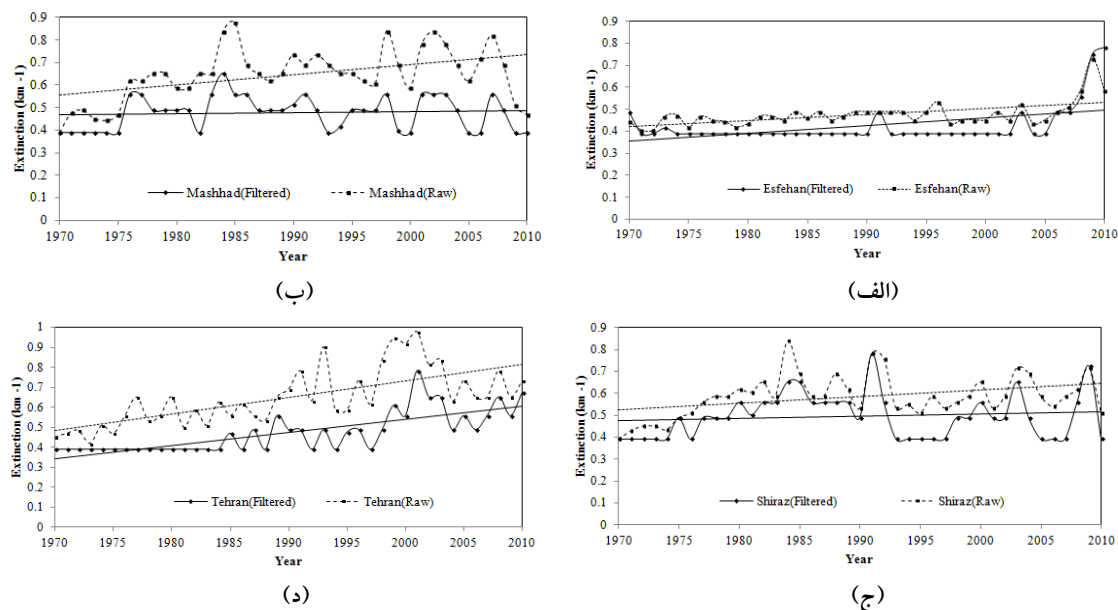
روند تغییرات بلندمدت ضریب خاموشی جو برای کل داده‌ها و همچنین داده‌های پالایه در فرودگاه‌های مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با کاربست پالایه، تغییر اندکی در مقادیر مطلق ضریب‌های خاموشی جو رخ می‌دهد. مقدار قطع و شیب خط روند برای داده‌های پالایه نسبت به داده‌های خام کمتر است که این بر تأثیرپذیری ضریب خاموشی از رطوبت و ابرناکی تأکید دارد. همان‌طور که در شکل‌های ۴الف تا ۴د مشاهده می‌شود، استفاده از پالایه رطوبت و ابرناکی در روند کلی تغییرات بلندمدت خاموشی در ایستگاه‌های تهران و اصفهان تأثیری قابل توجه ندارد؛ به این معنا که افزایش ضریب خاموشی در این دو ایستگاه، احتمالاً به سبب افزایش غلظت آلاینده‌های جوی در ۴۰ سال گذشته رخ داده است.

هواویزهای ثانویه به علت کوچک بودن اندازه‌شان تأثیری بسزا در پخش و پراکنش نور دارند (مالم، ۱۹۹۹). تحقیقات پیشین در شهر تهران نشان داده است که بیشتر آلاینده‌ها در شرایط مرطوب تأثیر بیشتری بر میزان دید دارند که این نتیجه به‌ویژه در مورد گوگرد دی‌اکسید بسیار چشم‌گیر است (ثابت‌قدم و همکاران، ۱۳۹۲). از سوی دیگر، با توجه به اینکه میزان دید در ایستگاه‌های مورد بررسی، در ماه‌های فصل تابستان نسبت به زمستان بیشتر است، به نظر می‌رسد واکنش‌های کاتالستی تبدیل گاز به ذره، نسبت به فرایندهای فوتوشیمیایی که عمدتاً در دمای زیاد رخ می‌دهند، نقش موثرتری در کاهش میزان دید دارند. همچنین وارونگی دما که معمولاً در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد، به علت ایجاد شرایط پایدار در جو، مانع از پخش آلاینده‌ها و موجب انباشت بیشتر آنها می‌شود.

برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و تعیین رابطه بین میزان رطوبت و خاموشی جو، از تحلیل همبستگی استفاده شده است که روشی مناسب برای نشان دادن ارتباط متغیرها است. ضریب‌های همبستگی پی‌یرسون بین ضریب خاموشی روزانه جو و میانگین رطوبت ماهانه در بازه ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ برای هر چهار ایستگاه تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان ضریب همبستگی بیت رطوبت نسبی و خاموشی جو در ایستگاه‌های تهران، مشهد، اصفهان و شیراز به ترتیب برابر ۰/۸۸، ۰/۸۷، ۰/۸۳ و ۰/۳۳ است. ضریب‌های همبستگی در سه ایستگاه تهران، مشهد و اصفهان در سطح اعتماد بیش از ۹۹/۹٪ (یعنی سطح ۰/۰۱) معنی‌دار هستند که بیانگر قابل اعتماد بودن نتایج است. با این حال در فرودگاه شیراز ارتباط معنی‌داری بین رطوبت نسبی و میزان خاموشی جو به‌دست نیامده است. علت نبود این ارتباط، احتمالاً ناچیز



شکل ۳. میانگین بلندمدت (۱۹۷۰-۲۰۱۰) ماهانه میزان دید افقی در فرودگاه‌های مورد بررسی



شکل ۴. تغییرات بلندمدت ضریب خاموشی جو در فرودگاه‌های، (الف) اصفهان، (ب) مشهد، (ج) شیراز و (د) مهرآباد تهران. تغییرات زمانی و روند آن برای داده‌های خام با خط چین و پس از استفاده از پالایه با خط پیوسته نشان داده شده است.

جدول ۲. مقایسه متوسط ماهانه میزان خاموشی و رطوبت نسبی در چهار فرودگاه موردنظر در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰

ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر		
0.42	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.38	0.37	0.37	0.38	0.41	0.45	ضریب خاموشی (km^{-1})	اصفهان
45	34	28	21	21	14	15	15	16	24	34	44	رطوبت نسبی (%)	
0.46	0.42	0.4	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.37	0.4	0.44	0.49	ضریب خاموشی (km^{-1})	مشهد
64	59	55	36	36	25	23	23	26	36	49	61	رطوبت نسبی (%)	
0.42	0.4	0.41	0.41	0.41	0.4	0.43	0.4	0.38	0.39	0.39	0.42	ضریب خاموشی (km^{-1})	شیراز
49	40	35	17	17	12	14	14	14	20	32	46	رطوبت نسبی (%)	
0.51	0.42	0.37	0.34	0.34	0.35	0.37	0.36	0.36	0.38	0.42	0.52	ضریب خاموشی (km^{-1})	تهران
55	47	38	24	24	18	19	19	21	28	39	53	رطوبت نسبی (%)	

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، روند تغییرات بلندمدت و الگوی ماهانه ضریب خاموشی جو در چهار فرودگاه پرتردد کشور بررسی شده است. براساس گزارش سال‌نامه آماری سازمان هواپیمایی کشوری مبنی بر معرفی فرودگاه‌های مهرآباد تهران، مشهد، امام خمینی تهران، شیراز و اصفهان درحکم فرودگاه‌های پرتردد کشور از نظر تعداد فرود و برخاست هواپیماها و با توجه به بیشترین داده‌های آماری مشترک برای یک دوره چهار ساله از ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰، از

اطلاعات مربوط به فرودگاه‌های مهرآباد تهران، اصفهان، شیراز و مشهد برای بررسی‌های این پژوهش استفاده شده است.

داده‌های به‌کار رفته در این مقاله، شامل داده‌های دیدبانی‌های روزانه از ایستگاه‌های همدیدی فرودگاه‌های نام‌برده است. اطلاعات مربوط به متوسط روزانه ساعت‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ UTC درحکم داده‌های اصلی استفاده و ضریب خاموشی به‌کمک رابطه کشمایدی براساس میدان دید افقی برآورد شده است. کمترین و

بیشترین میزان دید در هریک از فرودگاه‌ها با استفاده از صدک‌های ۹۰ و ۱۰ داده‌ها تعیین و سپس نقش رطوبت در افزایش ضریب خاموشی جو بررسی شده است.

بررسی روند تغییرات بلندمدت ضریب خاموشی جو برای فرودگاه‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰، نشان می‌دهد با وجود آنکه میزان ضریب خاموشی جو نوسان‌هایی در سال‌های گوناگون دارد، ولی با افزایش به نسبت ملایمی در هر چهار ایستگاه همراه است که البته افزایش بیشتری در سال‌های ابتدای دوره مشاهده می‌شود. تغییرات خاموشی جو در شیراز، مشهد و اصفهان بسیار کم و در ایستگاه مهرآباد تهران قابل ملاحظه است. مقادیر حد‌های پایین و بالای دید برای ایستگاه‌های مورد بررسی تغییر قابل ملاحظه‌ای طی ۴۰ سال نشان نمی‌دهد. کمترین مقادیر حدی دید مربوط به ایستگاه فرودگاه مهرآباد تهران با مقدار متوسط حدود ۴ کیلومتر است.

بررسی تغییرات ماهانه میانگین دید افقی، بیانگر وجود کمترین مقادیر در ماه‌های زمستان است که اندازه آن حدود ۲ کیلومتر از ماه‌های دیگر کمتر است. در ماه‌های با رطوبت نسبی کم، ضریب خاموشی کمتر و در ماه‌های با رطوبت نسبی بیشتر، ضریب خاموشی جو بیشتر است. ارتباط مستقیم بین رطوبت نسبی و ضریب خاموشی جو احتمالاً ناشی از تبدیل آلاینده‌های اولیه به ثانویه در حضور رطوبت است که به سبب کوچک بودن اندازه‌شان تاثیر بسزایی در پخش و پراکنش نور و افزایش خاموشی جو دارند (مالم و دی، ۲۰۰۱؛ سینفیلد و پاندیس، ۲۰۰۶). با توجه به بیشتر بودن میزان دید در ایستگاه‌های مورد بررسی در ماه‌های فصل تابستان نسبت به زمستان، به نظر می‌رسد که واکنش‌های کاتالستی تبدیل گاز به ذره نسبت به فرایندهای فوتوشیمیایی که عمدتاً در دمای زیاد رخ می‌دهند، نقش موثرتری در کاهش میزان دید و افزایش ضریب خاموشی دارند. وارونگی دما نیز که

معمولاً در فصل‌های سرد سال رخ می‌دهد، به علت ایجاد شرایط پایدار در جو، سبب انباشت بیشتر آلاینده‌ها و افزایش میزان خاموشی جو در ماه‌های این فصل‌ها می‌شود.

نتایج مطالعه بررسی روند تغییرات بلندمدت خاموشی به رطوبت نسبی و ابرناکی با استفاده از پالایه معرفی شده وو و همکاران (۲۰۱۳)، نشان می‌دهد که با اعمال پالایه، تغییر اندکی در مقادیر مطلق داده‌های دید ایجاد می‌شود. روند تغییرات زمانی داده‌ها پس از استفاده از پالایه در همه ایستگاه‌ها شیب کمتری نسبت به داده‌های اولیه دارد، ولی در روند کلی تغییرات خاموشی به‌ویژه در ایستگاه‌های تهران و اصفهان تغییری ایجاد نمی‌شود. یعنی کاهش دید بلندمدت در این دو ایستگاه احتمالاً به علت افزایش غلظت آلاینده‌های جو در ۴۰ سال گذشته رخ داده است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۳۰۴۵۱/۱/۰۱ با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران صورت گرفته است. از حمایت مالی دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

مراجع

ثابت‌قدم، س.، احمدی گیوی، ف.، گلستانی، ی. و علی‌اکبری بیدختی، ع. ع.، ۱۳۹۲، ارتباط آلاینده‌های شهری با دید افقی منطقه تهران در سال ۲۰۰۸، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۴)، ۱۲۲-۱۰۹.

ثابت‌قدم، س.، احمدی گیوی، ف. و گلستانی، ی.، ۱۳۹۴، کاربست روش پردازش رقمی تصویر در تعیین ضریب خاموشی جو شهری تهران، م. ژئوفیزیک ایران، ۹(۲)، ۱۴-۱.

Balarabe, M., Abdullah, K. and Nawawi, M., 2015, Long-term trend and seasonal variability of horizontal visibility in Nigerian Troposphere, Atmosphere, 6(10), 1462-1486.

Baumer, D., Vogel, B., Versick, S., Rinke, R., Möhler, O. and Schnaiter, M., 2008,

Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany, Atmos. Environ., 42, 989-998.

Chang, D., Song, Y. and Liu, B., 2009, Visibility trends in six megacities in China 1973-2007,

- Atmospheric Research, 94, 161-167.
- Che, H., Zhang, X., Li, Y., Zhou, Z. and Qu, J., 2007, Horizontal visibility trends in China 1981-2005, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24706.
- Craig, C. and Faulkenberry, G., 1979, The application of ridit analysis to detect trends in visibility, *Atmospheric Environment*, 13, 1617-1622.
- Doyle, M. and Dorling, S., 2002, Visibility trends in the UK 1950-1997, *Atmospheric Environment*, 36, 3161-3172.
- Eidels-Dubovoi, S., 2002, Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City, *Sci. Tot. Environ.*, 287, 213-220.
- Ghim, Y., Moon, K., Lee, S., Kim, Y., 2005, Visibility trends in Korea during the past two decades, *J. Air Waste Manage. Assoc.* 55, 73-82.
- Horvath, H., 1981, Atmospheric visibility, *Atmos. Environ.*, 15, 1785-1796.
- Jacobson, M., 2005, *Fundamentals of aAtmospheric modeling*, Cambridge University Press, Second Edition, 813 pp.
- Jacobson, M., 2012, *Air pollution and global warming: history, science, and solutions*, Cambridge University Press, Second Edition, 406 pp.
- Latimer, D., Bergstrom, R., Hayes, S., Liu, M., Seinfeld, J., Whitten, G., Wojcik, M. and Hillyer, M., 1978, The development of mathematical models for the prediction of anthropogenic visibility impairment, EPA-450/3/78-110a.
- Lee, D. O., 1990, The influence of wind direction, circulation type and air pollution emissions on summer visibility trends in southern England, *Atmos. Environ.*, 24A, 195-201.
- Lee, J. Y., Jo, W. K. and Chun, H. H., 2015, Long-term trends in visibility and its relationship with mortality, air-quality index, and meteorological factors in selected areas of Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 15(2), 673-681.
- Lin, J., van Donkelaar, A., Xin, J., Che, H. and Wang, Y., 2014, Clear-sky aerosol optical depth over East China estimated from visibility measurements and chemical transport modeling, *Atmospheric Environment*, 95, 258-267.
- Malm, W. C., 1999, *Introduction to visibility*, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere (CIRA), Ft. Collins, Colorado, 79 pp.
- Malm, W. C. and Day, D. E., 2001, Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity, *Atmos. Environ.*, 35, 2845-2860.
- Malm, W., Sisler, J., Huffman, D., Eldred, R. and Cahill, T., 1994, Spatial and seasonal trends in particle concentrations and optical extinction in the United States, *Geophys Res Lett.*, 99, 1347-1370.
- Molenar, A., Meszaros, E., Imre, K. and Rull, A., 2008, Trends in visibility over Hungary between 1996 and 2002, *Atmos. Environ.*, 42, 2621-2629.
- Middleton, W., 1952, *Vision through the atmosphere*, University of Toronto Press, Toronto, Canada.
- Schichte, B. A., Husar, R. B., Falke, S. and Wilson, W., 2001, Haze trends over the United States, 1980-199., *Atmos. Environ.*, 35, 5205-5210.
- Seinfeld, H. and Pandis, N., 2006, *Atmospheric chemistry and physics-from air pollution to climate change*, Second Edition, John Wiley & Sons, 1203 pp.
- Sloane, C.S., 1982a, Visibility trends I: methods of analysis, *Atmos. Environ.*, 16, 41-51.
- Sloane, C. S., 1982b, Visibility trends II: Mideastern United States, *Atmos. Environ.*, 16, 2309-2321.
- Sloane, C.S., 1983, Summertime visibility declines: meteorological influences, *Atmos. Environ.*, 17, 763-774.
- Sloane, C.S., 1984, Meteorologically adjusted air quality trends: visibility, *Atmos. Environ.*, 18, 1217-1229.
- Trijonis, J., 1982, Existing and natural background levels of visibility and fine particles in the rural East, *Atmos. Environ.*, 16, 2431-2445.
- Tsai, Y., 2005, Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961-2003, *Atmos. Environ.*, 39, 5555-5567.
- Wang, S., Zhang, X. and Xu, X., 2003, Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing, *Meteorology Science and Technology*, 31, 109-114.
- Wu, J., Fu, C., Zhang, L. and Tang, J., 2012, Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years, *Atmos. Environ.*, 55, 339-346.
- Wu, J., Zhang, X., Hu, J. and Zhai, D., 2013, Probability of different visibility grades in China over a 50-year period, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 122, 115-123.
- Xue, D., Li, C. and Liu, Q., 2015, Visibility characteristics and the impacts of air pollutants and meteorological conditions over Shanghai, China. *Environmental monitoring and assessment*, 187(6), 1-10.
- Zhao, P., Zhang, X., Xu, X. and Zhao, X., 2011, Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. *Atmospheric Research*, 101(3), 711-718.