

ارزیابی روند فصلی شاخص هواویز (AI) ایران مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای Nimbus 7، Earth Probe و Aura

عباسعلی داداشی رودباری - دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
محمود احمدی* - دانشیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
علیرضا شکیبا - دانشیار سنجش از دور و GIS، مرکز GIS و سنجش از دور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۳۱

چکیده

هدف از این پژوهش ارزیابی روند شاخص هواویز (AI) فصلی در ایران است. در این راستا، داده‌های سنجنده TOMS دو ماهواره Nimbus 7 و Earth Probe و سنجنده OMI ماهواره Aura اخذ شد و از آزمون ناپارامتریک من-کندال (MK) برای شناسایی روند شاخص هواویز استفاده شد. نتایج نشان داد داده‌های سنجنده TOMS ماهواره EP برای مطالعه روند مناسب نیست، زیرا از سال ۲۰۰۱ داده‌های این سنجنده کالیبراسیون نمی‌شود. بیشینه و کمینه روند شاخص هواویز ایران به ترتیب برای سنجنده OMI و TOMS ماهواره Nimbus 7 محاسبه شد. در فصل بهار به دلیل فعال شدن چشمه‌های گرد و غبار از مناطقی با روند کاهشی کاسته شد و بر مناطقی با روند افزایشی افزوده شد. بیشینه روند افزایشی معنی‌دار و همچنین بیشینه مقدار متوسط شدت روند شاخص هواویز (AI) بر اساس سنجنده OMI در فصل پاییز محاسبه شد. روند افزایشی شاخص هواویز (AI) در ایران به دلیل شرایط محیطی (خشک‌سالی و تغییرات کاربری اراضی) و آب و هوایی (باد شمال تابستانه، الگوهای دینامیکی و حرارتی غرب آسیا، و کم‌فشار حرارتی سیند) است. مقایسه داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های ایستگاه‌های همدید گرد و غبار در پهنه‌های مختلف آب و هوایی نشان از تطابق داده‌های ماهواره‌ای و زمینی دارد.

واژگان کلیدی: آزمون من-کندال (MK)، ایران، سنجنده OMI، سنجنده TOMS، شاخص جذب هواویز (AAI).

مقدمه

هواویزها ذرات جامد، مایع، یا گاز موجود در جو با شعاع معمول ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند که نقش چشم‌گیر و زیان‌آوری در سلامت انسانی دارند (جمیز گاودرمن و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۳۸۳). هواویزها از دو منشأ طبیعی و انسانی وارد جو می‌شوند و در ارتباط با شهرنشینی و صنعتی‌شدن جوامع این ذرات به افزایش پایدار منجر می‌شوند (بابو و همکاران، ۲۰۱۳). هواویزها بزرگ‌ترین منبع عدم قطعیت در تغییرات آب و هوایی در سطح بین‌المللی شناخته شده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱۷۹) و به‌طور مستقیم با تغییر تابش در هواسپهر بر آب و هوا تأثیر می‌گذارند (هریسون و همکاران، ۲۰۰۱: ۴۴). همچنین، با تغییر در خواص نوری ابرها و نقش چشم‌گیری که در هسته ابر دارند، باعث برهم‌خوردن چرخه طبیعی ابرها و در نهایت بازخورد در سامانه آب و هوا می‌شوند (ورزلی و همکاران، ۲۰۰۰: ۴۵۰۱). همچنین، کارایی نیمه‌مستقیم هواویزها با گرم‌کردن لایه‌های هواسپهر و کاهش کسر ابر تغییرات گسترده‌ای را به‌وجود می‌آورند. بنابراین، ضرورت دارد تا توزیع زمانی-مکانی و به‌ویژه روند هواویزها در بلندمدت مطالعه شود و اثرهای آن را در مطالعات مربوط به تغییرات آب و هوایی به کار بست.

در طی چند دهه گذشته، تغییرات منطقه‌ای در خورتوجهی در انتشار و غلظت آلودگی‌های جوی در سطح جهانی به وجود آمده است؛ بیشینه افزایش آلاینده‌ها در سطح جهانی طی چهار دهه گذشته به طور گسترده‌ای در منطقه خاورمیانه، هند، و منطقه جنوب شرقی آسیا رخ داده است (زیمکه و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۲۵۷). به دلیل گستردگی مناطق بیابانی و فقدان ایستگاه در بیشتر این مناطق، سنجش از دور ابزاری مؤثر برای پایش جهانی هواویزها و بازخوردهای آن در سامانه آب و هوا است. سنجش از دور به ما اجازه می‌دهد تا توزیع فضایی و خواص هواویزها را ارزیابی کنیم (کوسمپولوس و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۳۵۴). همچنین، مزیت عمده آن اخذ مستمر داده است که بدون شک فرصت منحصربه‌فردی برای مطالعات محلی، منطقه‌ای، و جهانی ایجاد می‌کند.

جنوب غرب آسیا (خاورمیانه، شبه‌جزیره عربستان، و ایران- پاکستان- افغانستان) شامل چندین بیابان (بیابان‌های عراق و سوریه، روب‌الخالی، ان- نافود، الدنه، خارخوم، مارگو، و ریگستان) و نواحی نیمه‌بیابانی (فلات ایران و دشت سیستان) است که عامل انتشار گرد و غبار چشم‌گیری است که تحت سامانه‌های گوناگون منطقه‌ای جو به مناطق مختلف انتقال داده می‌شوند (کاسکوتیس و همکاران، ۲۰۱۴: ۷۳۵؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۷). بر این اساس، مطالعه تغییرپذیری دقیق شاخص هواویز (AI) در بلندمدت می‌تواند اطلاعات سودمندی در خصوص گرد و غبارها، منشأ آن‌ها، وردایی زمانی- مکانی، واداشت آب و هوایی، و بازخورد آن در سامانه آب و هوا ارائه دهد.

اهمیت مطالعه هواویزها باعث شده تا پژوهشگران به مطالعه شاخص جذب هواویز (AAI) در ارتباط با پدیده گرد و غبار بپردازند؛ در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره خواهد شد. انفورم و همکاران (۲۰۰۷) تغییرپذیری درون‌سالی و روند بلندمدت شاخص هواویز در فصل هارماتان را در منطقه صحرای غرب افریقا مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار هواویزهای دوره ۲۰۰۱-۲۰۰۴ نسبت به دوره ۱۹۷۹-۱۹۸۴ حدود ۲۴ درصد بیشتر از میانگین سالانه است. در منطقه ساحلی نیجریه نیز متوسط گرد و غبار هواسپهر بیشتر از دهه‌های گذشته بود که نام‌برندگان آن را به مقدار بالای بار گرد و غبار به منطقه نسبت داده‌اند. هامر و همکاران (۲۰۱۸) روند جهانی ترکیبات هواویز را طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ با استفاده از سنجنده OMI ماهواره Aura براساس شاخص جذب هواویز (AAI) مطالعه کردند؛ نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روند گرد و غبار با منشأ بیابانی در شمال افریقا، خاورمیانه، شرق آسیا، و استرالیا غالب است؛ همچنین، روند منفی در استرالیا و افزایش هواویزها در اطراف دریاچه آرال را گزارش کردند. در ایران نیز راشکی و همکاران (۲۰۱۴) دگرگونی زمانی- مکانی طوفان‌های گرد و غباری منطقه سیستان را با استفاده از شاخص گرد و غبار (AI) و عمق نوری هواویزها (AOD) را با استفاده از سنجنده‌های MODIS، OMI، TOMS، و MISR بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت بالای ذرات معلق در هواسپهر در فصل تابستان نتیجه خشک‌شدن فصلی دریاچه هامون و بادهای شدید در منطقه است. ارجمند و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شاخص AAI به پایش زمانی- مکانی گرد و غبار در منطقه جازموریان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمده وقایع گرد و غباری منطقه جازموریان در فصل بهار و تابستان اتفاق می‌افتد. احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۷) به آشکارسازی روند و نقطه تغییر گرد و غبار با استفاده از شاخص جذب هواویز (AAI) در پهنه‌های کلان آب و هوایی ایران با استفاده از دو سنجنده TOMS ماهواره Nimbus 7 و EP و سنجنده OMI ماهواره EOS Aura پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که شاخص هواویز در هشت پهنه موردبررسی روند افزایشی داشته و نقطه تغییر نیز مقدار افزایشی را تأیید کرده است. داداشی رودباری و احمدی (۱۳۹۸) تغییرات زمانی- مکانی و نقطه تغییر شاخص جذب هواویز (AAI) ایران مبتنی بر برون‌داد سنجنده‌های TOMS و OMI را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشینه شاخص هواویز در دوره گرم سال و بهار به دلیل کاهش میزان

رطوبت خاک و فعال شدن چشمه‌های گرد و خاک بیشینه شاخص هواویز فصلی را داراست. همچنین، فصل زمستان به دلیل اثر کنترلی بارش مقدار هواویز کمتری را داراست. همچنین، سال‌های ۱۹۸۳، ۲۰۰۰، و ۲۰۰۷ به ترتیب برای ماهواره‌های EP، Nimbus 7 و Aura به عنوان سال‌های میانگین جهش در سری زمانی تشخیص داده شدند که نویسندگان بیان کردند این سه سال گرانیگاه دوره فعال و غیرفعال شاخص هواویز در ایران‌اند.

مرور منابع نشان می‌دهد، به رغم وجود شاخص‌ها و داده‌های روزآمد ماهواره‌ای، تاکنون روند شاخص جذب هواویز (AAI) در کل ایران مطالعه نشده است؛ معدود مطالعات انجام شده نیز به صورت منطقه‌ای بوده است و نتوانسته دیدگاه جامعی از رفتار این شاخص مهم در ایران ارائه دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی روند فصلی شاخص جذب هواویز (AAI) مبتنی بر داده‌های سنجنده TOMS و OMI در ایران انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در شناسایی کانون‌های فصلی گرد و غبار، مناطق بحرانی، و در نهایت بازخورد آن در سامانه آب و هوایی برای مطالعات بعدی مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش ایران با بازه زمانی فصلی است. ایران دارای تنوع زیاد آب و هوایی است و بخش‌های چشم‌گیری از آن را دشت‌های داخلی، مناطق نیمه‌خشک، و خشک پوشش می‌دهد. هم‌زمانی شرایط نام‌برده همراه قرارگرفتن کشور در کمربند گرد و غبار، که از کرانه غربی افریقای شمالی شروع می‌شود و با عبور از خاورمیانه و آسیای مرکزی و جنوبی تا چین ادامه دارد، در سال‌های اخیر با مشکلات فراوانی مواجه شده است. بنابراین، مطالعه جنبه‌های گوناگون گرد و غبار مبتنی بر داده‌های روزآمد می‌تواند کمک شایان توجهی در کنترل آن بکند.

داده‌های مورد استفاده

فراوانی سالانه گرد و غبار ایستگاه‌های منتخب همدید

برای ارزیابی بهتر و مقایسه نتایج روند گرد و غبار داده‌های ماهواره‌ای با زمینی از ده ایستگاه همدید طی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ میلادی در پهنه‌های گوناگون آب و هوایی ایران، که بیشتر تحت تأثیر پدیده گرد و غبار قرار دارند، استفاده شد (۱). اهواز؛ ۲. بندرعباس؛ ۳. بوشهر؛ ۴. اصفهان؛ ۵. کرمانشاه؛ ۶. مشهد؛ ۷. شیراز؛ ۸. تبریز؛ ۹. یزد؛ ۱۰. زاهدان). سپس، کدهای پدیده ۰۶ تا ۰۹، ۳۰ تا ۳۵، و ۹۸، که معرف گرد و غبارند، از بین کدهای پدیده هوای حاضر استخراج و نمودار سالانه برای ایستگاه‌های منتخب ترسیم شد.

شاخص جذب هواویز (AAI) مبتنی بر داده‌های سنجش از دور

شاخص جذب هواویز (AAI)، که به طور خلاصه شاخص هواویز (AI) گفته می‌شود، شاخصی کیفی از ذرات هواویز جاذب فرابنفش نزدیک مانند دود یا گرد و غبار معدنی است. از آنجا که بازتاب سطحی فرابنفش در مناطق بیابانی تیره است، سنجنده‌هایی همچون TOMS از اطلاعات طیفی به منظور تعیین شاخص هواویز جذب‌کننده UV (AAI) استفاده می‌کنند. این شاخص به گرد و غبار و دود در درجه نخست حساس است (ارجمند و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۵۶؛ داداشی رودباری و احمدی، ۱۳۹۸: ۶۱۲). شاخص AI به عنوان باقی‌مانده بین تابش اندازه‌گیری شده و محاسباتی با استفاده از

معادله^۱ LER فرض می‌شود (هرمن و همکاران، ۱۹۹۷: ۲۸۰۰۳). شاخص هواویز (AI) براساس رابطه^۱ محاسبه می‌شود (کاسکوتیس و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۹).

$$AI = -100 \log \left\{ \left(\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \right)_{meas} \right\} + 100 \log \left\{ \left[\frac{I_{\lambda_1}(ALER_{\lambda_1})}{I_{\lambda_2}(ALER_{\lambda_2})} \right]_{calc} \right\} \quad (۱)$$

در این پژوهش داده‌های سنجنده TOMS دو ماهواره Earth Probe و Nimbus 7 و سنجنده OMI ماهواره Aura از پایگاه LAADS DAAC اخذ شد. جزئیات داده‌های منتخب در جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱. جزئیات شاخص هواویز (AI) سنجنده‌های TOMS و OMI

ردیف	ماهواره	سنجنده	تفکیک زمانی	تفکیک مکانی
۱	Nimbus 7	TOMS	۱۹۷۹-۱۹۹۲	۱٫۲۵ × ۱٫۰۳ درجه قوسی
۲	Earth Probe (EP)	TOMS	۱۹۹۶-۲۰۰۵	۱٫۲۵ × ۱٫۰۳ درجه قوسی
۳	EOS Aura	OMI	۲۰۰۵-۲۰۱۵	۰٫۲۵ × ۰٫۲۵ درجه قوسی

پایش روند شاخص هواویز (آزمون ناپارامتریک من - کندل)

برای بررسی تحلیل روند در سری زمانی بلندمدت شاخص هواویز از آزمون ناپارامتریک من - کندال (MK) استفاده شد. در این آزمون H_0 بیان‌کننده فقدان روند و H_1 بیان‌کننده وجود روند در سری زمانی داده‌هاست (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۵۵).

آزمون MK را می‌توان در سری زمانی x_i ، که از $i = 1, 2, \dots, n-1$ و x_j رتبه‌بندی شده، از $j = i + 1, 2, \dots, n$ به شکل رابطه^۲ نوشت.

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (۲)$$

آماره^۳ S در آزمون MK را می‌توان از طریق رابطه^۳ محاسبه کرد.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (۳)$$

در این رابطه x_j و x_i مقادیر سری زمانی به ترتیب نشان‌دهنده^۴ i و $j > i$ می‌باشند و $sgn(x_j - x_i)$ تابع علامت است (المغربی و الوتایی، ۲۰۱۸: ۱۰۱۶). در رابطه^۳ فرض می‌شود که آماره^۳ S به طور متناوب نرمال است و مقدار مورد انتظار $E(S) = 0$ برای اندازه نمونه $n \geq 8$ باشد؛ واریانس مطابق با رابطه^۴ خواهد بود (دوهان و پاندی، ۲۰۱۳).

$$V(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (۴)$$

در این رابطه q نشان‌دهنده تعداد گروه‌ها و tp تعداد مقادیر داده را در گروه p نشان می‌دهد. در نهایت، مقادیر S و V برای محاسبه آماره^۵ Z به شرح رابطه^۵ است.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

1. Lambert Equivalent Reflectivity (LER)

آماره استاندارد Z در آزمون من-کندال از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک پیروی می‌کند و برای اندازه‌گیری روند استفاده می‌شود. بر این اساس، اگر $|Z|$ بزرگ‌تر از $Z_{crit} = (100 \times (1 - \alpha / 2))$ باشد، مقدار آماره از توزیع نرمال استاندارد با سطح اطمینان (α) منتخب خواهد بود که بر این اساس فرض صفر رد و آزمون نشان می‌دهد که روند معنی‌دار در سری زمانی وجود دارد (مثلاً، برای سطح آماری ۵ درصد با $Z_{0.025} = \pm 1.96$). در آزمون MK مقدار مثبت Z نشان‌دهنده روند صعودی است؛ درحالی‌که مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی منتخب است (لیو و همکاران، ۲۰۱۴: ۷). همچنین، باید توجه داشت که در این آزمون عدم پذیرش H_0 به این معنی نیست که روند در سری زمانی وجود ندارد. در حقیقت، نشان می‌دهد که شواهد موجود برای نتیجه‌گیری فقدان روند در سری زمانی کافی نیست (مغربی و الوتایی، ۲۰۱۸: ۱۰۱۶).

یافته‌های پژوهش

نتایج ارائه‌شده برای روند شاخص هواویز در شکل ۱، درصد روند در سطوح مختلف آماری در جدول ۲، و مشخصات آماری روند در جدول ۳ نشان داده شد. اندازه‌گیری روند برای شاخص هواویز (AI) در ایران نشان داد بخش عمده‌ای از ایران در فصول مختلف سال هم در سنجنده TOMS هم در سنجنده OMI دارای روند مثبت بوده است که با رنگ زرد تا قرمز نشان داده شد.

روند کاهشی درخور توجه شاخص هواویز (AI) سنجنده TOMS ماهواره EP با توجه به فراوانی روزهای گرد و غبار و اطلاعات ماهواره Aura دور از انتظار به نظر می‌رسد. پژوهش‌های بسیار از جمله بولاسینا و همکاران (۲۰۰۸) داده‌های سنجنده TOMS ماهواره EP را برای تجزیه روند توصیه نمی‌کنند، زیرا از سال ۲۰۰۱ به دلیل کالیبراسیون نامناسب از سوی این سنجنده داده‌های این سنجنده و ماهواره ارقام غیرمنطقی را ارائه می‌کنند؛ بنابراین، نتایج ارائه‌شده برای این سنجنده در خصوص روند نمی‌تواند درست باشد و پیشنهاد می‌شود در پژوهش بعدی از داده‌های این سنجنده و ماهواره برای ارزیابی روند شاخص هواویز در ایران استفاده نشود.

بزرگ‌ترین گرایش کاهشی در روند کلی شاخص هواویز (AI) در ایران در فصل زمستان سنجنده TOMS ماهواره Earth Probe در شمال شرق و بخش‌های مرکزی مشاهده می‌شود (جدول‌های ۲ و ۳). ثابت‌قدم و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعه روند عمق نوری هواویزهای (AOD) ۱۶ شهر مهم در ایران برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ روند مثبتی را برای بیشتر شهرهای مورد مطالعه به جز کرمانشاه و زاهدان، که روند منفی را نشان دادند، به دست آوردند که با مطالعه انجام‌شده برای فصل زمستان سنجنده OMI ماهواره Aura همخوانی دارد. بیشینه روند افزایشی شاخص هواویز (AI) ایران برای سنجنده OMI و بیشینه روند کاهشی شاخص هواویز (AI) برای فصل زمستان (سنجنده TOMS ماهواره EP) و فصل پاییز (سنجنده TOMS دو ماهواره EP و Nimbus7) محاسبه شد. متوسط روند شاخص هواویز (AI) ایران در فصل زمستان برای هیچ یک از دو سنجنده و سه ماهواره معنی‌دار نیست. با این حال، در فصل پاییز از دوره سرد سال براساس اطلاعات سنجنده OMI ماهواره Aura مقدار روند ۲/۷۱ محاسبه شد که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. در فصل زمستان مناطقی با روند افزایشی معنی‌دار سنجنده TOMS در سواحل بوشهر در خلیج فارس تا بخش‌های شمالی استان خراسان جنوبی کشیده شده است. از مهم‌ترین شهرهایی که در این منطقه قرار گرفته‌اند براساس اطلاعات سنجنده TOMS می‌توان به بوشهر، شیراز، اصفهان، یزد، کرمان، و بیرجند اشاره کرد. براساس سنجنده OMI، هم از وسعت هم از شدت مناطقی با روند کاهشی کاسته شده است؛ به طوری که مناطقی با روند کاهشی معنی‌دار براساس اطلاعات این سنجنده مشاهده نشد.

جدول ۲. درصد یاخته‌های دارای روند شاخص هواویز (AI) فصلی در ایران با استفاده از سنجنده‌های TOMS و OMI

فصل / سنجنده	فاقد روند معنی‌دار افزایشی	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱	روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵	فاقد روند معنی‌دار کاهش	روند کاهش معنی‌دار در سطح ۰/۰۱	روند کاهش معنی‌دار در سطح ۰/۰۵	روند کاهش معنی‌دار در سطح ۰/۰۱	روند کاهش معنی‌دار در سطح ۰/۰۱
زمستان	TOMS Nimbus 7	۷۸,۷۴	۳,۹۳	۷,۸۹	-	-	۹,۴۴	-
	TOMS EP	۳۰,۷۰	۰,۷۸	۳,۱۴	-	۰,۸۳	۵۰,۳۹	۱,۵۷
	OMI	۶۵,۳۵	۹,۱۵	۱۹,۶۰	-	۱,۹۸	۳,۹۲	-
بهار	TOMS Nimbus 7	۱۸,۸۹	۱۱,۰۲	۴۱,۷۳	-	۲۷,۵۸	۰,۷۸	-
	TOMS EP	۴۸,۰۳	۱۴,۹۶	۳۶,۲۲	-	۰,۷۹	-	-
	OMI	۶۴,۰۵	۲۰,۹۱	۱۴,۳۷	-	۰,۶۷	-	-
تابستان	TOMS Nimbus 7	۱۸,۸۹	۱۱,۸۱	۵۰,۳۹	-	۱۸,۹۱	-	-
	TOMS EP	۵۵,۹۰	۱,۵۷	۳,۹۵	-	-	۳۸,۵۸	-
	OMI	۸۸,۲۳	۴,۵۷	۳,۹۴	-	-	۳,۲۶	-
پاییز	TOMS Nimbus 7	۵۳,۵۴	۱,۵۷	۱,۶۰	-	-	۴۰,۹۴	۰,۷۸
	TOMS EP	۸,۶۶	-	۰,۸۱	-	-	۴۴,۸۸	۴,۷۲
	OMI	۴,۵۷	۴,۵۹	۲۷,۴۵	۷,۸۴	۵۵,۵۵	-	-

در فصل بهار به نسبت فصل زمستان از مناطقی با روند کاهش به دشت کاسته شد و بر مناطقی با روند افزایشی افزوده شد؛ به طوری که مناطقی با روند کاهش فقط در ماهواره Nimbus 7 با ۰,۷۸ درصد مشاهده شد (جدول ۲). بیشینه مناطقی با روند معنی‌دار افزایشی فصل بهار با ۵۱,۹۷ درصد در ماهواره EP به دست آمده است. مناطقی که بیشینه روند معنی‌دار افزایشی را نشان داده‌اند در ماهواره Nimbus 7 حوالی استان‌های کرمان، اصفهان، یزد، و خراسان جنوبی قرار گرفته‌اند. اطلاعات ماهواره EP نیز نشان داده است مناطقی که روند معنی‌دار افزایشی را نشان داده‌اند از مرزهای غربی تا سواحل چابهار کشیده شده‌اند؛ ماهواره Aura نیز همانند ماهواره EP روند یک طرفه افزایشی را برای کل کشور نشان داده است؛ الگوی روند افزایشی معنی‌دار بر اساس اطلاعات سنجنده OMI در مرزهای شرقی کشور بیشینه است. از آنجا که ایران در مرکز کمربند گرد و غباری نیمکره شمالی قرار گرفته است، این روند رو به رشد افزایشی در بیشتر مناطق ایران را می‌توان با وقایع گرد و غباری با منشأ سرزمین‌های خشک و بیابانی جنوب غرب ایران، به خصوص کشور عراق، که به دلایل بیابان‌زایی تشدید شده‌اند، مرتبط دانست (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). روند افزایشی شاخص هواویز (AI) نشان می‌دهد که شرایط محیطی (مانند پوشش سطح زمین، رطوبت خاک، سطح زمین، و غیره) و شرایط آب و هوایی در مناطق تحت تأثیر گرد و غبار به طور فزاینده‌ای برای انتشار گرد و غبار مطلوب است.

در فصل تابستان مناطقی با روند افزایشی (به استثنای ماهواره EP به دلیل کالیبره نبودن از سال ۲۰۰۱) بر اساس اطلاعات ماهواره Nimbus 7 (۱۰۰ درصد) و ماهواره Aura (۹۶,۷۴) از کل کشور را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲). پهنه‌هایی با روند افزایشی سنجنده TOMS (ماهواره Nimbus 7) در سراسر کلان‌شهرهای ایران با بیش از یک میلیون جمعیت (اهواز، قم، تبریز، شیراز، کرج، اصفهان، مشهد، و تهران) و شهرهایی با بیش از پانصد هزار تا یک میلیون جمعیت

(اراک، اردبیل، یزد، کرمان، همدان، و رشت) دیده می‌شود و در هیچ شهری روند منفی دیده نمی‌شود. براساس برون‌داد سنجنده OMI (ماهواره Aura) مناطقی با روند افزایشی معنی‌دار کاهش می‌یابد. بیشینه روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۰۵ در سنجنده TOMS ماهواره Nimbus 7 با ۵۰/۳۹ درصد بیشینه روند معنی‌دار افزایشی را در بین فصول و ماهواره‌های مختلف داراست. متوسط روند کشور نیز براساس سنجنده TOMS ماهواره Nimbus 7 ۲/۱۲ به‌دست آمده است که در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است (جدول ۳). براساس اطلاعات سنجنده OMI ماهواره Aura از متوسط شدت روند نیز کاسته شده است؛ به طوری که متوسط روند کشور ۰/۸۵۷ محاسبه شده است که به‌رغم افزایشی بودن اما از نظر آماری معنادار نیست. از دلایل این روند افزایشی قابل توجه رخدادهای گرد و غبار فراوان در جنوب غربی ایران، غرب، و اخیراً در شمال شرق ایران در فصل بهار و تابستان رخ می‌دهد و باعث می‌شود که این منطقه تغییرات فصلی زیادی در شاخص هواویز (AI) داشته باشد که به تبع آن روند نیز باید افزایش درخورتوجهی داشته است (شکل ۱). افزایش انتشار هواویزهایی با منشأ انسانی را، که نتیجه افزایش جمعیت، رشد صنعتی، و شهرنشینی است، می‌توان یکی از دلایل این افزایش دانست. زیرا روندهای افزایشی درخورتوجه بیشتر حول کلان‌شهرهای ایران قرار دارد.

در فصل پاییز شاهد بیشینه روند افزایشی معنی‌دار شاخص هواویز (AI) در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ براساس سنجنده OMI ماهواره Aura در کشور هستیم؛ به طوری که از چهار سطح احتمالاتی که در جدول ۲ ارزیابی شد روند افزایشی در همه سطوح معنی‌دار بوده است. در مجموع، ۹۵/۴۳ درصد دارای روند افزایشی بوده‌اند. همگام با بیشینه درصد مناطق تحت پوشش روند افزایشی فصل پاییز بیشینه مقدار متوسط شدت روند شاخص هواویز (AI) فصلی ایران را نیز به خود اختصاص داده است؛ به طوری که متوسط روند این سنجنده در کل کشور ۲/۷۱ محاسبه شده است که این مقدار روند در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. تهران و کرج تغییرات بسیار مشابهی در روند شاخص هواویز (AI) دارند، زیرا آن‌ها به لحاظ جغرافیایی نزدیک به هم‌اند. بنابراین، نقش هواویزهای انسانی در این مقدار افزایشی کاملاً مشهود است؛ از آنجا که پاییز جزو فصول سرد سال محسوب می‌شود و همه این شهرها نیز در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز قرار گرفته‌اند و مصرف انرژی (بخش مهمی از انرژی مصرفی ایران از سوخت‌های فسیلی است و سوخت‌های سبز نقش بسیار ضعیف در ایران دارند) بسیار بالاست، به تبع آن مقدار شاخص هواویز (AI) نیز افزایش خواهد داشت (شکل ۱). یکی از دلایل افزایش مقدار شاخص هواویز (AI) ایران به‌خصوص در فصل پاییز براساس نتایج به‌دست‌آمده از روند شاخص هواویز (AI) دو سنجنده TOMS و OMI برای ایران همگام با مطالعه پوزر و همکاران (۲۰۱۵) در این منطقه می‌تواند با کاهش بارش و عدم مهار ذرات زیر موجود در هوا سپهر در نتیجه کاهش رطوبت در ارتباط باشد. بررسی نقشه روند شاخص هواویز ماهواره Nimbus 7 نشان می‌دهد که مرزهای غربی ایران دارای روند کاهشی است. این روند کاهشی شاخص هواویز (AI) در استان‌های غربی ایران شاید کمی دور از انتظار باشد، اما همان‌طور که نامداری و همکاران (۲۰۱۶) نیز آن را تایید کردند روند کاهشی شاخص هواویز (AI) در نوار غربی ایران (استان‌های کردستان کرمانشاه، خوزستان، لرستان، و ایلام) مرتبط با تغییرپذیری هواشناسی است. همچنین، پوزر و همکاران (۲۰۱۵) نیز تأیید کردند که در منطقه صحرا در شمال آفریقا و خاورمیانه تغییرات هواشناسی نقش مهمی را در روند کاهشی [هواویزها ایفا می‌کنند.

جدول ۳. مشخصات آماری روند شاخص هواویز (AI) فصلی در ایران با استفاده از سنجنده‌های TOMS و OMI

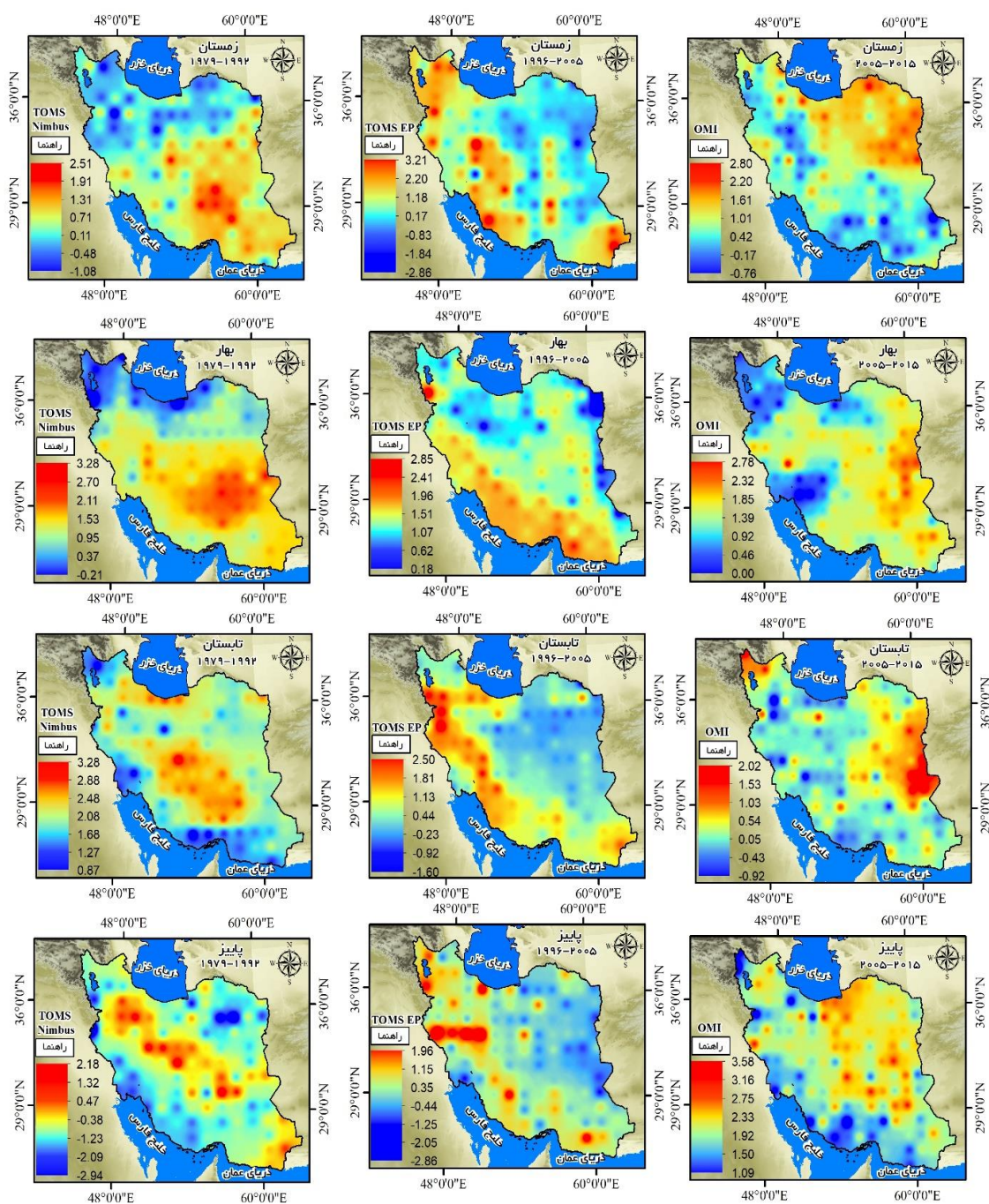
آماره/ فصل	TOMS-Nimbus 7	TOMS-EP	OMI- EOS Aura
زمستان بهار تابستان پاییز	-۱,۰۹۵	-۲,۸۶۲	-۰,۷۷۸
	-۰,۲۱۹	۰,۱۷۹	۰,۰۰۰
	۰,۸۷۶	-۱,۶۱۰	-۰,۹۳۴
	-۲,۹۵۶	-۲,۸۶۲	۱,۰۹۰
زمستان بهار تابستان پاییز	۲,۵۱۸	۳,۲۲۰	۲,۸۰۳
	۳,۲۸۵	۲,۸۶۲	۲,۸۰۳
	۳,۲۸۵	۲,۵۰۴	۲,۰۲۴
	۲,۱۹۰	۱,۹۶۸	۳,۵۸۱
زمستان بهار تابستان پاییز	-۰,۹۲۲	-۰,۵۳۳	۱,۲۴۲
	۲,۱۸۵	۱,۶۷۳	۱,۳۸۹
	۲,۱۲۳	۰,۲۱۷	-۰,۸۵۷
	۰,۰۴۹	-۱,۳۸۱	۲,۷۱۲

براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش و مطالعات پیشین، می‌توان تغییرات مرتبط با الگوهای هواشناسی را در تغییرپذیری روند شاخص هواویز (AI) ایران در فصول مختلف سال تا سطح بالایی مرتبط دانست. تحقیقات مختلف نشان داده است وردایی شاخص دریای خزر- هندوکوش (CashKI) و ایجاد شرایط آب و هوایی به خصوص (شرایط دمایی و سرعت باد) باعث فعالیت گرد و غبار در حوضه سیستان و جنوب شرق ایران و مناطق اطراف آن می‌شود (کاسکوتیس و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۸). اخیراً یو و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که فاز لانینا همراه فاز منفی شاخص نوسانات ده ساله اقیانوس آرام (PDO) معمولاً با ناهنجاری گردش و اچرخندی باعث خشک سالی طولانی و تشدید باد شمال در خاورمیانه و شبه جزیره عربستان است که به فعالیت گرد و غبار منجر می‌شود. شمال یک باد قوی شمال غربی است که با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند و از حوضه دجله و فرات به سوی شبه جزیره عربستان و خلیج فارس نفوذ می‌کند و باعث ایجاد گرد و غبار فراوان می‌شود. باد شامل معمولاً توسط یک شیو باروکلینک قوی بین و اچرخند دائمی در شمال عربستان و چرخندهای حرارتی جنوب ایران ایجاد می‌شود که موجی قوی در امتداد منطقه همگرایی ایجاد می‌کند (شائو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۸۸). فارغ از سامانه‌های همدید و دینامیک بزرگ مقیاس، طوفان‌های گرد و غبار محلی تحت تأثیر پدیده‌های کوتاه مدت همچون سامانه‌های جبهه‌ای، جهت‌های سطح پایین (LLJs)^۱، و توسعه کم فشارهای حرارتی محلی ایجاد می‌شوند (میلر و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۴؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۸) که نقش چشم‌گیری در افزایش شاخص هواویز دارند.

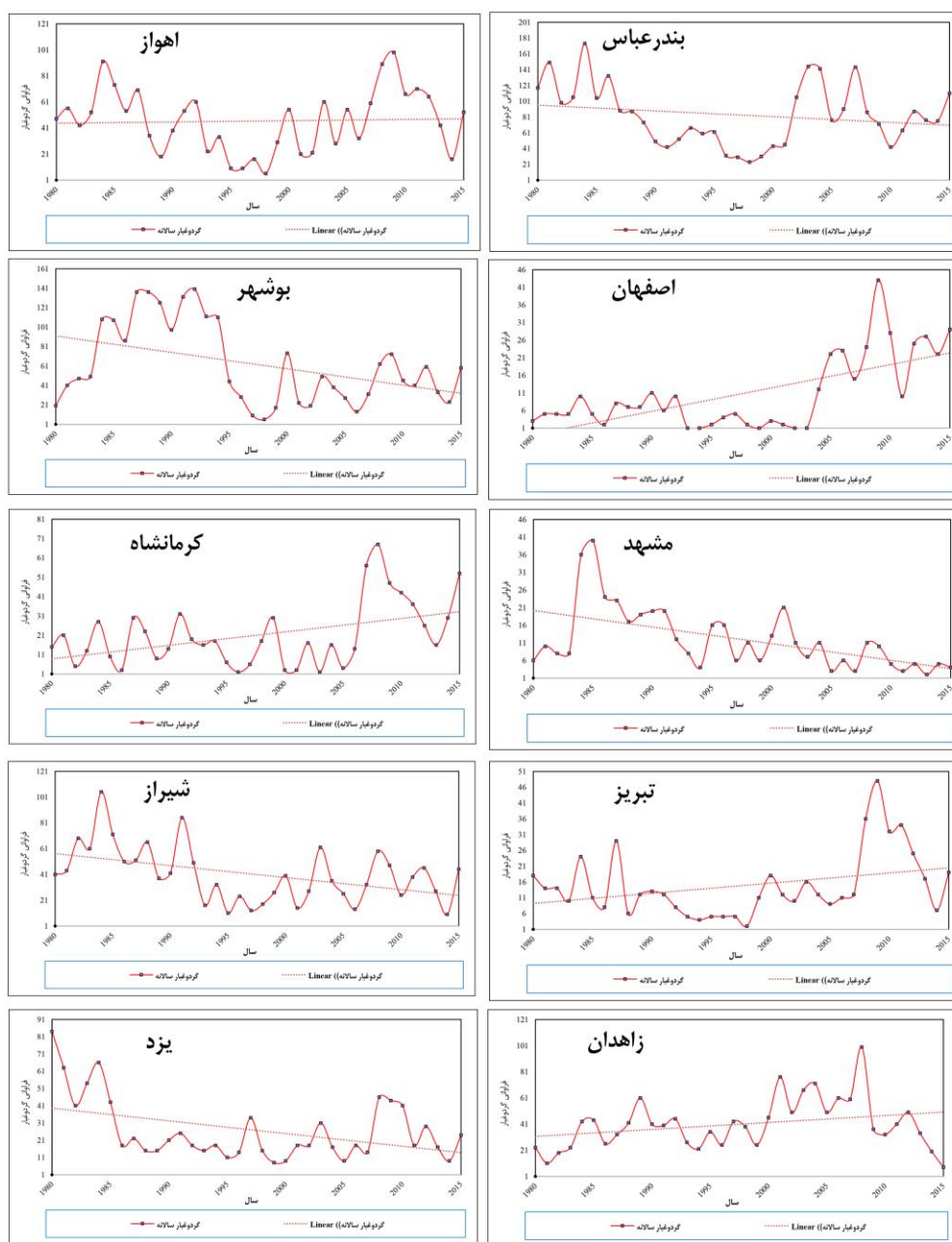
شکل ۲ روند سالانه گرد و غبار را با استفاده از اطلاعات ده ایستگاه همدید در مناطق مختلف آب و هوایی ایران، که متأثر از پدیده گرد و غبارند، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل پیداست، ایستگاه‌های اهواز، اصفهان، کرمانشاه، تبریز، و زهدان روند افزایشی و ایستگاه‌های بندرعباس، بوشهر، مشهد، شیراز، و یزد روند کاهشی را برای گرد و غبار سالانه نشان می‌دهند. مقایسه سری زمانی داده‌های ایستگاهی با دوره‌های سه سنجنده مورد مطالعه به روشنی نشان‌دهنده تطابق داده‌های ماهواره‌ای و زمینی گرد و غبار است.

1. Pacific Decadal Oscillation (PDO)

2. low-level jets (LLJs)



شکل ۱. روند شاخص هواویز (AI) فصلی ایران مبتنی بر داده‌های سنجنده‌های TOMS و OMI سه ماهواره Earth، Nimbus 7 و Probe، و Aura (نام فصل، ماهواره، و سنجنده در هر شکل نوشته شده است)



شکل ۲. روند گرد و غبار سالانه در پهنه‌های مختلف آب و هوایی متأثر از گرد و غبار

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داده است که سنجنده TOMS ماهواره EP به دلیل عدم کالیبراسیون از سال ۲۰۰۱ برای تجزیه روند مناسب نیست که بولاسینا و همکاران (۲۰۰۸) نیز آن را تأیید کردند. بیشینه‌گرایی کاهشی در روند کلی شاخص هواویز (AI) در ایران در فصل زمستان سنجنده TOMS ماهواره Earth Probe در شمال شرق و بخش‌های مرکزی مشاهده می‌شود که، همان‌طور که گفته شد، به دلیل عدم کالیبراسیون این سنجنده و ماهواره است. بیشینه روند افزایشی شاخص هواویز (AI) ایران برای سنجنده OMI و بیشینه روند کاهشی شاخص هواویز (AI) برای فصل پاییز (سنجنده TOMS ماهواره Nimbus 7) محاسبه شد. متوسط روند شاخص هواویز (AI) ایران در فصل زمستان برای هیچ یک از دو سنجنده و سه

ماهواره معنی‌دار نیست. در فصل بهار به نسبت فصل زمستان بر شدت و درصد روند افزایشی افزوده شد. روند رو به رشد افزایشی در بیشتر مناطق ایران با وقایع گرد و غباری با منشأ سرزمین‌های خشک و بیابانی جنوب غرب ایران به خصوص کشور عراق در ارتباط است که گودی و میدلتون (۲۰۰۶) نیز اثبات کرده‌اند. در فصل تابستان، اطلاعات ماهواره‌های 7 Nimbus و Aura روند بیش از ۹۵ درصدی از کل کشور را نشان دادند. پهنه‌هایی با روند افزایشی سنجنده TOMS ماهواره 7 Nimbus در سراسر کلان‌شهرهای ایران با پانصد هزار تا یک میلیون و بیش از یک میلیون جمعیت دیده می‌شود و در هیچ شهری روند منفی محاسبه نشد. در فصل پاییز شاهد بیشینه درصد و شدت روند افزایشی معنی‌دار شاخص هواویز (AI) بر اساس سنجنده OMI ماهواره Aura هستیم. این روند قابل توجه با کاهش بارش و عدم مهار ذرات ریز موجود در هواسپهر در نتیجه کاهش رطوبت می‌تواند در ارتباط باشد که پوزر و همکاران (۲۰۱۵) تأیید کرده‌اند. افزایش روند شاخص هواویز در ایران ناشی از شرایط محیطی مانند پوشش سطح زمین، رطوبت خاک، خشک‌سالی، و ... است و نقش سامانه‌های گردش منطقه‌ای جو همچون شاخص دریای خزر- هندوکوش (CasHKI) (کاسکاوتیس و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۸)، فاز منفی شاخص نوسانات ده‌ساله اقیانوس آرام (PDO) با ناهنجاری گردش و اچرخندی (میلر و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۴؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۸)، باد شمال تابستانه (شائو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۸۸)، پدیده‌های کوتاه‌مدت همچون سامانه‌های جبهه‌ای، جت‌های سطح پایین (LLJs)، و کم‌فشار سند (براتی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۰۸) در تریبرد این ذرات چشم‌گیر است. شایان ذکر است که عراق و سوریه مهم‌ترین چشمه‌های تولید گرد و غبار فرامنطقه‌ای در ایران‌اند. عامل محتمل دیگری که در افزایش رویدادهای گرد و غباری نقش دارد و در آینده نیز می‌تواند این پدیده را تشدید کند تغییرات آب و هوایی است. زیرا افزایش دما و خشکی زیاد به از بین رفتن پوشش گیاهی و عدم چسبندگی خاک (به دلیل تبخیر زیاد از واحد سطح) منجر می‌شود که روند بیابان‌زایی را تشدید می‌کند. فلاح قاهری و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که دما در ایران روند افزایشی قابل توجهی داشته و در آینده نیز ناهنجاری دما به صورت یکپارچه افزایشی خواهد بود که بر این اساس باید انتظار افزایش رویدادهای گرد و غباری تحت شرایط تغییرات آب و هوایی باشیم.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری آب‌وهواشناسی (گرایش شهری) دانشگاه «شهید بهشتی» با عنوان «واکاوی وردایی زمانی-مکانی الگوهای قائم و افقی ریزگردها و ارزیابی بازخوردهای آب هوایی آن در ایران» است که با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (بنیاد ملی علم ایران) (INSF) با کد ۹۶۰۰۰۹۹۳ انجام شد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از بنیاد ملی علم ایران، دانشگاه شهید بهشتی و داوران نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

منابع

- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۷). آشکارسازی روند و نقطه تغییر گرد و غبار با استفاده از شاخص جذب هواویز (AAI) در پهنه‌های کلان آب و هوایی ایران مبتنی بر برون‌داد داده‌های سنجش از دور، هفتمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، ۸ و ۹ بهمن ۱۳۹۷ دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- ارجمند، م.؛ راشکی، ع. و سرگز، ح. (۱۳۹۷). پایش زمانی و مکانی پدیده گرد و غبار با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در جنوب شرق ایران، با تأکید بر منطقه جازموریان، *اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۲۷(۱۰۶): ۱۵۳-۱۶۸.
- براتی، غ.؛ مرادی، م.؛ شامخی، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۶). تحلیل روابط طوفان‌های غباری جنوب ایران با کم‌فشار سبند، *مخاطرات محیط طبیعی*، ۶(۱۳): ۹۱-۱۰۸.
- داداشی رودباری، ع. و احمدی، م. (۱۳۹۸). وردایی زمانی- مکانی و نقطه تغییر شاخص جذب هواویز (AAI) ایران مبتنی بر برون‌داد سنجنده‌های TOMS و OMI، *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۳): ۶۰۹-۶۳۳.
- Ahmadi, M. and Dadashirodbari, A. (1397). Detection of the trend and point of dust change using AAI in Iran's large Climatological zones based on Remote Sensing Data Output, *7th National Conference on Air Pollution and Sound Management*, 8th and 9th Bahman 1397 Shahid University Beheshti, Tehran (In Persian).
- Anuforum, A.C.; Akeh, L.E.; Okeke, P.N. and Opara, F.E. (2007). Inter-annual variability and long-term trend of UV-absorbing aerosols during Harmattan season in sub-Saharan West Africa, *Atmospheric Environment*, 41(7): 1550-1559.
- Arjmand, M.; Rashki, A. and Sargazi, H. (2018). Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun e Jazmuriyan, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106):153-168 (In Persian).
- Babu, S.S.; Manoj, M.R.; Moorthy, K.K.; Gogoi, M.M.; Nair, V.S.; Kompalli, S.K.; Satheesh, S.K.; Niranjana, K.; Ramagopal, K.; Bhuyan, P.K. and Singh, D. (2013). Trends in aerosol optical depth over Indian region: Potential causes and impact indicators, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(20).
- Barati, G.; Moradi, M.; Shamekhi, A. and dadashirodbari, A. (2017). Analysis of Relations between Dust Storms and Indus Low Pressure over Southern Iran, *Natural Environmental Hazards*, 6(13): 91-108 (In Persian).
- Bollasina, M.; Nigam, S. and Lau, K.M. (2008). Absorbing aerosols and summer monsoon evolution over South Asia: An observational portrayal, *Journal of Climate*, 21(13): 3221-3239.
- Dadashi Roudbari, A. and Ahmadi, M. (2019). Spatio-temporal variation and change point of Iran Aerosol absorption index (AAI) based on the output of TOMS and OMI sensors, *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(3): 609-623 (In Persian).
- Duhan, D. and Pandey, A. (2013). Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901-2002 at Madhya Pradesh, India, *Atmospheric Research*, 122: 136-149.
- Fallah-Ghalhari, G.; Shakeri, F. and Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 138: 1539-1562.
- Ghasem, A.; Shamsipour, A.; Miri, M. and Safarrad, T. (2012). Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran, *Natural hazards*, 64(2): 1625-1638.
- Godon, N.A. and Todhunter, P.E. (1998). A climatology of airborne dust for the Red River Valley of North Dakota, *Atmospheric Environment*, 32(9): 1587-1594.

- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). Desert dust in the global system. Springer Science & Business Media.
- Hammer, M.S.; Martin, R.V.; Li, C.; Torres, O.; Manning, M. and Boys, B.L. (2018). Insight into global trends in aerosol composition from 2005 to 2015 inferred from the OMI Ultraviolet Aerosol Index, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 18(11).
- Harrison, S.P.; Kohfeld, K.E.; Roelandt, C. and Claquin, T. (2001). The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future, *Earth-Science Reviews*, 54(1-3): 43-80.
- Herman, J.R. and Celarier, E.A. (1997) Earth surface reflectivity climatology at 340–380 nm from TOMS data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D23): 28003-28011.
- James Gauderman, W.; McConnell, R.O.B.; Gilliland, F.; London, S.; Thomas, D.; Avol, E.; Vora, H.; Berhane, K.; Rappaport, E.B.; Lurmann, F. and Margolis, H.G. (2000). Association between air pollution and lung function growth in southern California children, *American journal of respiratory and critical care medicine*, 162(4): 1383-1390.
- Kaskaoutis, D.G.; Houssos, E.E.; Rashki, A.; Francois, P.; Legrand, M.; Goto, D.; Bartzokas, A.; Kambezidis, H.D. and Takemura, T. (2016). The Caspian Sea–Hindu Kush Index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia, *Global and Planetary Change*, 137: 10-23.
- Kaskaoutis, D.G.; Nastos, P.T.; Kosmopoulos, P.G.; Kambezidis, H.D.; Kharol, S.K. and Badarinath, K. V. S. (2010). The aura–OMI aerosol index distribution over Greece, *Atmospheric Research*, 98(1): 28-39.
- Kaskaoutis, D.G.; Rashki, A.; Houssos, E.E.; Goto, D. and Nastos, P.T. (2014). Extremely high aerosol loading over Arabian Sea during June 2008: The specific role of the atmospheric dynamics and Sistan dust storms, *Atmospheric environment*, 94: 374-384.
- Kendall, M.G. (1955). Rank correlation methods.
- Kosmopoulos, P.G.; Kaskaoutis, D.G.; Nastos, P.T. and Kambezidis, H.D. (2008). Seasonal variation of columnar aerosol optical properties over Athens, Greece, based on MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2354-2366.
- Li, J.; Carlson, B.E. and Laci, A.A. (2009). A study on the temporal and spatial variability of absorbing aerosols using Total Ozone Mapping Spectrometer and Ozone Monitoring Instrument Aerosol Index data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D9).
- Liu, H.; Remer, L.A.; Huang, J.; Huang, H.C.; Kondragunta, S.; Laszlo, I.; Oo, M. and Jackson, J.M. (2014). Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(7): 3942-3962.
- Maghrabi, A. H. and Alotaibi, R. N. (2018). Long-term variations of AOD from an AERONET station in the central Arabian Peninsula, *Theoretical and Applied Climatology*, 134(3-4): 1015-1026.
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Miller, S.D.; Kuciauskas, A.P.; Liu, M.; Ji, Q.; Reid, J.S.; Breed, D.W.; Walker, A.L. and Mandoos, A.A. (2008). Haboob dust storms of the southern Arabian Peninsula, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D1).
- Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sarraf, B. S. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 191.
- Pozzer, A., De Meij, A., Yoon, J., Tost, H., Georgoulias, A. K., & Astitha, M. (2015). AOD trends during 2001–2010 from observations and model simulations. *Atmos. Chem. Phys*, 15(10): 5521-5535.

- Rashki, A.; Kaskaoutis, D.G.; Eriksson, P. G.; Rautenbach, C.D.W.; Flamant, C. and Vishkaee, F.A. (2014). Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations, *Natural hazards*, 71(1): 563-585.
- Rashki, A.; Kaskaoutis, D.G.; Mofidi, A.; Minvielle, F.; Chiapello, I.; Legrand, M.; Dumka, U.C. and Francois, P. (2019). Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the Arabian Sea during summer–The July 2016 case, *Aeolian Research*, 36: 27-44.
- Sabetghadam, S., Khoshsima, M., and Alizadeh-Choobari, O. (2018). Spatial and temporal variations of satellite-based aerosol optical depth over Iran in Southwest Asia: Identification of a regional aerosol hot spot. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5): 849-856.
- Shao, Y.; Wyrwoll, K.H.; Chappell, A.; Huang, J.; Lin, Z.; McTainsh, G.H.; Mikami, M.; Tanaka, T.Y.; Wang, X. and Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science, *Aeolian Research*, 2(4): 181-204.
- Wurzler, S.; Reisin, T. G. and Levin, Z. (2000). Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D4): 4501-4512.
- Yu, Y.; Notaro, M.; Kalashnikova, O.V. and Garay, M.J. (2016). Climatology of summer Shamal wind in the Middle East, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1): 289-305.
- Ziemke, J.R.; Oman, L.D.; Strode, S.A.; Douglass, A.R.; Olsen, M.A.; McPeters, R.D.; Bhartia, P.K.; Froidevaux, L.; Labow, G.J.; Witte, J.C. and Thompson, A.M. (2019). Trends in global tropospheric ozone inferred from a composite record of TOMS/OMI/MLS/OMPS satellite measurements and the MERRA-2 GMI simulation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(5): 3257-3269.