

ارزیابی تغییرات روزانه غلظت ذرات ریز معلق ($PM_{2.5}$) در فازهای نوسان مادن - جولیان (MJO)

محمدجعفر ناظم السادات^۱، علیرضا دشتی^{۲*}

۱- استاد، بخش مهندسی آب، مرکز پژوهش‌های علوم جوی و اقیانوسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲- دانشجوی دکترا، بخش مهندسی آب، مرکز پژوهش‌های علوم جوی و اقیانوسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

چکیده

مواردی از رخداد همزمان یا با فاصله چند روزه پدیده افزایش غلظت ذرات ریز معلق با قطر آبرودینامیکی $2/5$ میکرومتر ($PM_{2.5}$) در ایستگاه های پایش گرد و غبار، پایه این پژوهش بوده است. بررسی اولیه داده های غلظت $PM_{2.5}$ در این ایستگاه ها نشان داد این افزایش در تاریخ های مشابه یا نزدیک به هم رخ داده است. ارزیابی تغییرات غلظت این ذرات در برابر دو متغیر متناسب با مقیاس زمانی این پدیده (روزانه) صورت گرفت. برای این کار داده های روزانه سری زمانی $PM_{2.5}$ و بیشینه سرعت باد روزانه ($DMWS$) با فازهای هشتگانه پدیده نوسان مادن- جولیان (MJO) برای تمام روزهای فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) در دوره سال های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ مطابقت داده شد. سپس پیوند میان روزهای آلودگی هوا به این ذرات ($PM_{2.5} > 35 \mu g m^{-3}$) و بیشینه سرعت باد روزانه سه ایستگاه هواشناسی همدیدی اصفهان، مشهد و یزد با فازهای MJO بررسی گردید. ارزیابی داده های این سه ایستگاه بر پایه روش های آماری متداول از جمله رگرسیون خطی، آزمون های کای اسکور (χ^2)، کولموگروف - اسمیرنوف ($K-S$) و آزمون تک نمونه ای $student's t$ استوار بوده است. همبستگی $PM_{2.5}$ و سرعت باد نشان داد که با افزایش سرعت باد، آلودگی هوا به $PM_{2.5}$ در هر سه ایستگاه کاهش یافته و روند کاهشی در اصفهان بیشترین و در یزد کمترین است. همچنین یافته ها نشان داد که فراوانی روزهای آلوده در سرعت های بالای وزش باد (چارک ۱) به گونه ای معنی دار کمتر از فراوانی آنها در سرعت های پایین باد (چارک ۴) است. در فاز ۵ نوسان مادن جولیان سرعت باد کمترین اندازه و غلظت های بالای این ذرات بیشترین مقدار را نشان داد. همچنین فاز ۵ MJO بیشترین فراوانی روزهای بالاتر از میانگین فصلی ($PM_{2.5} > 20 \mu g m^{-3}$) را داشت. بیشترین فراوانی روزهای با هوای پاک ($PM_{2.5} < 35 \mu g m^{-3}$) نیز در فاز ۷ نوسان مادن- جولیان دیده شد.

کلید واژه‌ها: آلودگی هوا، ایستگاه پایش گرد و غبار، بیشینه سرعت باد روزانه، ذرات ریز معلق، نوسان مادن- جولیان.

مقدمه

چرخش به دور زمین میان ۳۰ تا ۶۰ روز در نوسان است. در سنجش با ENSO که ناهنجاریهای آب و هوایی و اقیانوسی وابسته به آن بیشتر میان چند فصل تا چند سال در نوسان است، ناهنجاریهای وابسته به MJO بیشتر در گذر یک تا سه ماه یک چرخه کامل را پوشش می‌دهد (Nazemosadat and Baxter et al., 2010). بکستر و همکاران (Baxter et al., 2014) نشان دادند که بی‌هنجاری‌های مثبت معنی‌دار دما در ایالت‌های شرقی ایالت‌های متحده آمریکا از فاز ۳ و بی‌هنجاری‌های منفی از فاز ۷ نمایه MJO پیروی می‌کند. یافته‌های سبزی پرور و نادری مقدم (Sabziparvar and Naderi Moghadam, 2014) نشان داد فازهای هشتمگانه MJO روی تبخیر تعرق گیاه مرجع در ناحیه جنوب ایران تأثیر معنی‌دار داشته و فازهای ۱ و ۸ بیشترین درصد همبستگی معنی‌دار با ET₀ را دارند. پور اصغر و همکاران (Pourasghar et al., 2021) پیوند میان نوسان مادن-جولیان و دمای هوای سطح زمین روی ایران را آزمایش کردند. یافته‌های آنها نشان داد ترکیب‌های بی‌هنجاری دمای هوای روزانه سطح زمین در فازهای ۱ و ۸ MJO مثبت و در فازهای ۳ و ۴ منفی هستند و با ناحیه‌های گسترده‌تر در فازهای ۲ و ۷ مثبت و در فازهای ۵ و ۶ گرایش‌های منفی دارند. همچنین ناظم السادات و همکاران (Nazemosadat et al., 2023) در پژوهشی توضیح دادند که تعامل بین سیستم‌های آب و هوایی در اقیانوس اطلس و هند چگونه طول عمر فاز ۸ را در طول دو قطبی مثبت (منفی) اقیانوس هند، کوتاه (دراز) می‌کند. در مورد بررسی پیوند یا تأثیر نوسان مادن - جولیان بر آلودگی هوا در سطح جهانی، سبتی و پالازوگلو (Singh and Palazoglu., 2011) یک چارچوب آماری برای شناسایی تأثیر رویدادهای جوی در مقیاس بزرگ برای آلودگی هوای منطقه‌ای ارائه کرده‌اند. راگزدیل و همکاران (Ragsdale et al., 2013) در زمینه تغییر پذیری PM₁₀ با فازهای MJO در سانتیاگوی شیلی دریافتند غلظت PM₁₀ بوسیله فازهای MJO تغییر می‌کند به این گونه که غلظت‌های بالای PM₁₀ در فازهای ۴، ۵ و ۷ و غلظت‌های پایین در فازهای ۱ و ۲ رخ می‌دهد. یو و گینوکس (Yu and Ginoux., 2021) در ارزیابی سهم ENSO و MJO در فعالیت گرد و غبار استرالیا بر پایه دیدبانی‌های ماهواره‌ای و زمینی نشان دادند نوسان‌های گرد و غبار بر پایه ENSO با فازهای MJO ارتباط دارد. به این صورت که در طول فازهای پشت سر هم MJO مرکز فعال گرد و غبار از غرب به شرق

آلاینده‌های مهم هوا شامل CO, HCHO, NOX, SO2, O3 و ذرات ریز معلق هستند. ذرات ریز با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۲/۵ میکرومتر (PM_{2.5}) بیشترین نقش را در آلودگی هوا دارند زیرا با قدرت نفوذی که دارند به ژرفای ریه‌ها می‌رسند و باعث اختلالات تنفسی می‌شوند. همچنین این ذرات بر ویژگی‌های هواشناختی مانند اندازه تابش، دمای سطح زمین و کاهش دید افقی (پدیده هیز) اثر می‌گذارند. غلظت این ذرات در هوا با نوسان‌های زیادی همراه بوده و بسته به جایگاه جغرافیایی، شرایط آب و هوایی و دوره‌های گوناگون زمانی، متفاوت است (Kermani et al., 2020). تغییر در غلظت ذرات PM_{2.5}، تابع شرایط زمانی و مکانی مختلف بوده و ممکن است بر حسب ساعت یا روز خاص متفاوت باشد (Kelley et al., 2020). هر چند عوامل گوناگونی در افزایش غلظت آلاینده‌ها نقش دارند اما ویژگی‌های آب و هوایی از بنیادی‌ترین کنترل‌کننده‌های غلظت و پراکنش آلاینده‌ها هستند (Ranjbar and Soori, 2017). از این رو پدیده‌هایی همچون النینو-نوسان جنوبی و نوسان مادن-جولیان که آب و هوای جهان در مقیاس‌های قاره‌ای تا محلی را دگرگون می‌کنند، نقش بالایی در شناسایی تأثیر آنها بر آلودگی هوا دارند (Fotros et al, 2019). تغییرات روزانه آلودگی هوا می‌تواند از دور تحت تأثیر MJO باشد زیرا نوسان مادن جولیان اثر دورپیوند دارد (Jung et al., 2022). نوسان مادن-جولیان حالت غالب تغییرپذیری آب و هوای زیر فصلی در مناطق استوایی، متشکل از الگوهای انتشار همرفت همراه با بادهای سطح بالا و پایین است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که MJO از طریق انتشار امواج راسبی، تأثیر زیادی بر تغییرپذیری آب و هوا در مناطق فرا استوایی مرتبط با همرفت گرمسیری غیرعادی دارد. درک اثرات همرفت مربوط به MJO در جنب حاره ابزاری مفید در بهبود پیش‌بینی‌های کوتاه مدت آب و هوا (۲-۳ هفته) فراهم می‌کند. ارزیابی موارد مشاهده شده این تأثیر به منظور درک نقش مستقیم واداشت MJO مهم بوده و اثرات این پدیده با تأخیرهای زمانی به صورت گام‌های منظم همراه است (Baxter et al., 2014). ناهم‌ساز با ENSO که دامنه گسترش آن بخش‌های استوایی اقیانوس آرام است، MJO یک ناهنجاری پیشروانه خاور سوی سامانه همرفتی از ابرها، بارندگی، بادهای و فشار است که نزدیک به سراسر پهنه استوایی کره زمین را پوشش می‌دهد. بیشترین فراوانی دوره زمانی هر

های پایش نوسان مادن - جولیان یک مدل پیش بینی $PM_{2.5}$ را با الگوریتم LightGBM در شانگهای چین توسعه دادند. یافته‌های ارزیابی و پیش بینی آنها نشان داد که MJO مهارت پیش بینی برد گسترده $PM_{2.5}$ را بهبود می‌دهد. همچنین ژو و همکاران (Zhu et al., 2024) با اجرای مدل‌های دینامیکی دریافتند انتقال دود آتش سوزی جنگل به شهر نیویورک در اوایل ژوئن ۲۰۲۳ با امواج راسبی که توسط MJO برانگیخته شده پیوند داشته است. با توجه به رخداد غلظت‌های بالای $PM_{2.5}$ به طور همزمان یا با تأخیرهای زمانی کوتاه مدت چند ساعته در چندین ایستگاه هواشناسی و در یک پهنه گسترده جغرافیایی، این پژوهش با انگیزه: الف) ارزیابی سرعت باد بر غلظت $PM_{2.5}$ (ب) بررسی پیوند میان این غلظت و فازهای هشتمانه MJO (ج) آمیخته نشان سرعت باد و فازهای MJO بر غلظت $PM_{2.5}$ انجام شد.

داده‌ها و روش

داده‌های غلظت $PM_{2.5}$

اندازه غلظت‌های روزانه (میانگین ۲۴ ساعته) ذرات ریز معلق در هوا با قطر آیرودینامیکی $2/5$ میکرون ($PM_{2.5}$) که در این پژوهش به کار رفته‌اند، از سامانه‌های پایش گرد و غبار نصب شده در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مشهد، یزد و ازن سنجی اصفهان گردآوری شده است. جایگاه جغرافیایی این ایستگاه‌ها روی نقشه مشخص گردیده است (شکل ۱). داده‌های $PM_{2.5}$ در این ایستگاه‌ها به صورت پیوسته و زمان واقعی سنجش شده و میانگین ساعتی آنها در بانک داده مرکز پایش کیفیت هوای کشور <https://Pollution1.irimo.ir> وابسته به سازمان هواشناسی کشور ثبت و نگهداری می‌شود. ایستگاه‌های پایش گرد و غبار از نوع M-APM هستند که از یک دستگاه اندازه‌گیری زمان واقعی برای پایش مداوم غلظت کوچکترین ذرات در هوای محیط و نرم افزارهای پیوست برای ثبت و ذخیره سازی داده‌ها تشکیل شده است. دستگاه M-APM غلظت ذرات ریز معلق در هوا را بر پایه کاربرد اشعه بتای تولید شده از یک منبع کربن-۱۴ کم انرژی، اندازه‌گیری می‌کند. یافته‌های این پژوهش بر پایه داده‌های روزانه (میانگین ۲۴ ساعته) $PM_{2.5}$ در چند ایستگاه پایش گرد و غبار و در دوره سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ به دست آمده است. آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا، میانگین روزانه ۳۵ میکروگرم بر مترمکعب ($35 \mu g/m^3$) را برای آستانه آلودگی هوا به

استرالیا با انتشار شرق سوی MJO همراه می‌شود. فطرس و همکاران (Fotros et al, 2019) در بررسی اثرات دورپیوندی دو نوسان اقیانوس اطلس شمالی و مادن- جولیان بر آلودگی هوای کلانشهر تهران دریافتند تجمع آلاینده‌ها با منشأ محلی در فصول سرد و گرم سال با فاز مثبت MJO به ویژه فاز ۴ همراه بوده است. از سوی دیگر فرونشست آلاینده‌ها با منشأ فرامحلی با فاز منفی MJO به ویژه فاز ۱ و قرارگیری سامانه همرفتی نزدیک به مناطق بیابانی همسایه‌های غربی و جنوب غربی ایران، در رخداد این شرایط مؤثر بوده است. کرمانی و همکاران (Kermani et al., 2020) با بررسی پیوند میان $PM_{2.5}$ و متغیرهای هواشناسی در اصفهان نشان دادند که غلظت $PM_{2.5}$ با دمای هوا، رطوبت نسبی و فشار هوا همبستگی مثبت دارند. کواتا و همکاران (Kuwata et al., 2021) نقش MJO را بر کیفیت هوا در مالزی بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان داد که در فاز ۳ MJO که طی آن منطقه توسط ابرهای همرفتی پوشیده شده است، تنها 2 ± 4 درصد از روزهای با غلظت بالای PM_{10} دیده می‌شوند. در مقابل مقادیر متناظر در فازهای ۱ و ۵ تا ۸ MJO به طور قابل توجهی بالاتر بود. لی و همکاران (Li et al., 2022) نشان دادند که الگوی دور پیوند اطلس شرقی- روسیه غربی منجر به الگوهای آب و هوایی مساعد برای افزایش غلظت آلاینده‌ها از جمله جو پایدار و بادهای ضعیف در شمال چین می‌شوند. ژانگ و همکاران (Jung et al., 2022) دریافتند غلظت PM_{10} به طور معنی‌دار در فازهای ۵ و ۶ نوسان مادن- جولیان، بالا و در فازهای ۱ و ۲ آن پایین است. وطن پرست و همکاران (Vatanparast et al, 2023) اثر دو شاخص OMI و RMM نوسان مادن- جولیان بر فراوانی رخداد توفان‌های گرد و غبار ایستگاه‌های آبادان، اهواز، بستان، بندر ماهشهر، دزفول، رامهرمز و مسجد سلیمان واقع در استان خوزستان را بررسی کردند. یافته‌های آنها پیوند مثبت و معنی‌دار بین فازهای مثبت و منفی هر دو شاخص با گرد و غبار را برای بیشتر ایستگاه‌ها نشان داد. ژیا و همکاران (Jia et al., 2023) شاخصی را بر پایه گرادیان فشار هوای شمال به جنوب روی دلتای رودخانه یانگ تسه در چین به کار گرفتند که سطوح آلودگی به $PM_{2.5}$ و چگونگی تغییرات آن را بر پایه گردش سامانه‌های جوی بزرگ مقیاس تعیین می‌کند. یو و همکاران (Yu et al., 2023) بر پایه داده‌های $PM_{2.5}$ و دیدبانی هواشناسی، پیش بینی‌های فصلی و زیرفصلی (S2S) و داده

200 میلی باری نزدیک گرمسیری به دست آمده است. سری زمانی این نمایه، چند متغیره بوده و مؤلفه‌های شاخص (RMM1, RMM2) نوسان مادن - جولیان اطلاعاتی درباره شماره فازهای هشتگانه MJO در هر روز و دامنه آن را در بر می‌گیرد. هر فاز پدیده MJO نمایه ارزشمندی است که نشان می‌دهد سامانه همرفتی در کدامین بخش از گستره استوایی اقیانوس هند یا آرام در حال بارشزایی است.

روش

پس از میانگین‌گیری ۲۴ ساعته غلظت‌های PM_{2.5} از داده‌های ساعتی، نخست، سری زمانی داده‌های PM_{2.5} بر پایه روزهای فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) با پارامترهای MJO برابرسازی و به طور جداگانه برای هر ایستگاه و در هر سال آماده سازی شدند. این آماده سازی بدون در نظر گرفتن اندازه دامنه و تنها بر پایه فازهای هشتگانه MJO انجام شد. از ۵ ایستگاه پایش گرد و غبار که مورد بررسی اولیه قرار گرفتند، در ۲ ایستگاه بم و یاسوج و برای فصل زمستان تنها چند مورد از آلودگی هوا (غلظت بالاتر از ۳۵ میکروگرم بر مترمکعب) دیده شد که به دلیل معنی دار نبودن داده‌ها از دیدگاه آماری، این دو ایستگاه از گردونه ارزیابی‌ها کنار گذاشته شدند و کار با سه ایستگاه باقی مانده ادامه یافت. داده‌های سرعت باد و PM_{2.5} با کار برد رابطه ۱ به اندازه نرمال شده آنها برگردان شد.

PM_{2.5} توصیه می‌کند (Kelley et al., 2020). ویژگی‌های آمار توصیفی همه داده‌های PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) به همراه شمار روزهای اندازه‌گیری در جدول ۱ آورده شده است.

داده‌های بیشینه سرعت باد روزانه

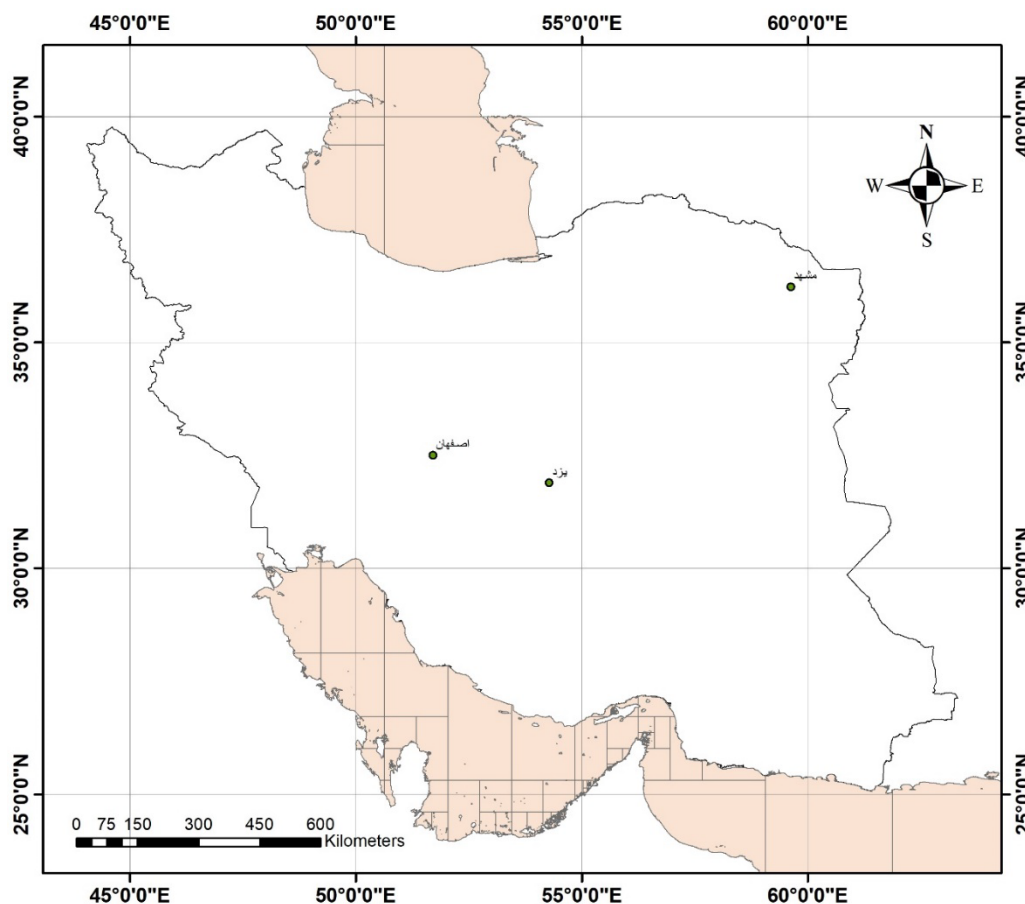
سنجه مطلق بیشینه سرعت باد روزانه از داده‌های زمان واقعی ثبت شده در این چند ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گرفته شده‌اند. در این پژوهش برای دسته‌بندی سرعت وزش باد به بادهای ملایم و بالاتر و کاربرد آن در ارزیابی‌ها، مقیاس باد بوفورت به کار رفته است. با توجه به اینکه در دسته بندی سرعت وزش باد در این مقیاس، سرعت باد ۷ متر بر ثانیه (7 m/s) به عنوان مرز بین دو گروه از بادهای با وزش ملایم و بادهای نیرومند مشخص گردیده است. بنابراین در ارزیابی‌های صورت گرفته، این اندازه سرعت باد به عنوان آستانه‌ای برای گروه بندی داده‌ها به دو دسته بادهای با سرعت پایین تر از ۷ متر بر ثانیه و بالاتر از آن به کار گرفته شده است.

داده‌های نوسان مادن - جولیان

سری زمانی روزانه نمایه MJO از تارنمای <http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RM> برای دوره زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ دریافت شده است. این نمایه بر پایه تحلیل مؤلفه‌های اصلی متغیرهای تابش خروجی موج بلند از سطح زمین و بادهای منطقه‌ای ترازهای 850 و

جدول ۱. ویژگی‌های آماری داده‌های PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) به همراه شمار روزهای اندازه‌گیری در سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد

Station	Mean	Median	Min	Max	St Dev	N(Days)
اصفهان	۳۶/۶	۳۱/۲	۱/۸	۱۵۷/۳	۲۴/۱	۴۵۲
مشهد	۲۸/۹	۲۷/۲	۲/۹	۹۴/۱	۱۳/۹	۳۶۱
یزد	۲۵/۴	۲۲/۷	۵/۸	۱۰۴	۱۲/۶	۵۴۱



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سنجش گرد و غبار مورد بررسی

دیدگاه آماری معنی دار بودن تفاوت فراوانی روزهای با هوای آلوده ($PM_{2.5} > 35 \mu g/m^3$) در برابر روزهای با هوای پاک ($PM_{2.5} < 35 \mu g/m^3$) با روش آماری کای اسکوئر (χ^2) و جدول توافقی (2×2) سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد آزمون گردید تا این ارزیابی صورت گیرد که آیا فراوانی روزهای آلوده و پاک از نظر آماری با فراوانی روزهای با سرعت باد بسیار بالا (Q1) یا بسیار کم (Q4) مرتبط است یا خیر (جدول ۲). درصد فراوانی هر یک از فازهای MJO در شرایط رخداد روزهای با آلودگی هوا و وزش بادهای با سرعت ملایم همچنین روزهای پاک و بادهای تندتر از ۷ متر بر ثانیه نیز به دست آمد (جدول ۳).

سهم فراوانی روزهای با غلظت بالاتر و پایین تر از ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب نسبت به جمع کل روزها با نمودار ستونی پشته‌ای نشان داده شد. در این نمودارها هر ستون نمایانگر فراوانی کل یکی از فازهای هشتمانه MJO در بازه داده‌های در دسترس می‌باشد و تکه‌ای از هر ستون که با رنگ

$$X' = \frac{X - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}} \quad (1)$$

در این جا X' داده نرمال شده است که در بازه ۰ تا ۱ قرار می‌گیرد. $X_{Max} - X_{Min}$ هم به ترتیب کمینه و بیشینه اندازه دیده بانی شده هستند. با کاربرد این داده‌ها نوسانهای همزمان اندازه نرمال شده روزانه سرعت باد و $PM_{2.5}$ برای یک فصل زمستان در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۸ برای نمونه آورده شده است (شکل ۲). برای دریافت بهتر از پیوند باد-آلودگی، خط رگرسیونی میان غلظت های $PM_{2.5}$ با سرعت های وزش باد تهیه گردید (شکل ۳). در گام بعدی، تاریخ هریک از روزهای با هوای پاک یا آلوده با فازهای MJO برابر سازی شد. با نگرش به همه داده های آماری، تاریخ روزهایی که سرعت باد در چارک های اول (Q1) و چهارم (Q4) خود بودند، به ترتیب، به عنوان روزهای با باد بسیار تند یا بسیار آرام شناسایی گردید. سپس تاریخ این روزها با تاریخ روزهایی که غلظت $PM_{2.5}$ بیشتر یا کمتر از $35 \mu g/m^3$ بود به ترتیب به عنوان روزهای آلوده و نآلوده دسته بندی گردیدند. در پایان، از

از ۵ تا ۱۰ متر در ثانیه در نوسان است. در برابر، در ایستگاه یزد روزهای آلوده هم در روزهای با باد تند و هم با باد ملایم دیده می‌شود. به بیان دیگر، هنگامی که سرعت باد در یزد به بیشترین اندازه خود و میان ۱۴ تا ۲۰ متر در ثانیه در نوسان است، باز هم در شمار زیادی از روزها، آلاینده‌های هوای این شهر به بیشترین اندازه دیده بانی شده می‌رسد. همچنین در روزهای با هوای آرام، اندازه آلاینده‌های در اصفهان، مشهد و یزد میل به افزایش دارد. گمان می‌رود که در اصفهان و مشهد آلاینده‌های PM_{2.5} بیشتر ناشی از دود خودروها و کارخانجات صنعتی باشد که در پی وزش باد شدید از گستره شهر بیرون می‌روند. در یزد، بادهای تند می‌توانند گرد و غبار فراوانی به درون شهر بیاورند و آلودگی به PM_{2.5} را افزایش دهند. با این همه، جغرافیای این شهرها و نزدیکی آنان با کانونهای تولید گرد و غبار طبیعی و نیز نوسان در جهت وزش باد در هنگام آلودگی می‌توانند از شوندهای طبیعی، شمار کارخانجات صنعتی باشند. افزون‌بر شوندهای طبیعی، شمار کارخانجات صنعتی در هر شهر و جایگاه آنان نسبت به ایستگاه هواشناسی نیز از شوندهای انسان‌زاد این ناهمسانی هستند.

آمارهای نشان داده شده در جدول ۲ گویای آن است که در هر سه ایستگاه، شمار روزهای با هوای آلوده کمتر از روزهای پاک است. این فراوانی در اصفهان ۱۰۹ روز آلوده در برابر ۱۳۹ روز پاک، مشهد ۶۲ در برابر ۱۵۴ و یزد ۵۷ در برابر ۲۷۳ روز می‌باشد. همچنین در هر سه ایستگاه، درصد روزهای با هوای آلوده در گروه سرعت های بالای باد (چارک اول) کمتر از درصد روزهای آلوده در برابر سرعت های پایین باد (چارک چهارم) می‌باشد. برای نمونه، در ایستگاه اصفهان ۱۸ روز هوای آلوده در Q₁ (باد تند) در برابر ۹۱ روز هوای آلوده در Q₄ (باد کند) قرار دارد که این نسبت ها برای ایستگاه مشهد ۸ در برابر ۵۴ روز و در ایستگاه یزد ۲۱ در برابر ۳۶ روز می‌باشد. بنابراین، روی هم رفته، وزش بادهای تند با کاهش آلاینده‌های PM_{2.5} در این شهرها همراه است و با توجه به شیب خط‌های رگرسیون در شکل ۳ می‌توان گفت که این نقش در یزد (اصفهان) کمترین (بیشترین) است. یادآور می‌شود که بازه بیشینه سرعت باد روزانه در ایستگاه اصفهان (۲ تا ۲۰ متر بر ثانیه)، مشهد (۲ تا ۱۵ متر بر ثانیه) و یزد (۲ تا ۲۱ متر بر ثانیه) بوده است.

سیاه (خاکستری) جدا شده است نشان دهنده روزهای با غلظت بالاتر (پایین تر) از ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد (شکل ۴). هیستوگرام داده‌های PM_{2.5} در فازی که نرمال بودن پراکنش آنها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) بررسی شده بود رسم گردید (شکل ۵). افزون بر این، با آزمون تک نمونه‌ای *student's t* معنی دار بودن تفاوت میانگین غلظت این ذرات با میانگین فصلی (20 µg/m³) آنها در دوره مطالعه بررسی شد (جدول ۴). به عبارت دیگر، در این پژوهش بررسی شد که آیا غلظت PM_{2.5} از نظر آماری بین فازهای MJO متفاوت است یا خیر.

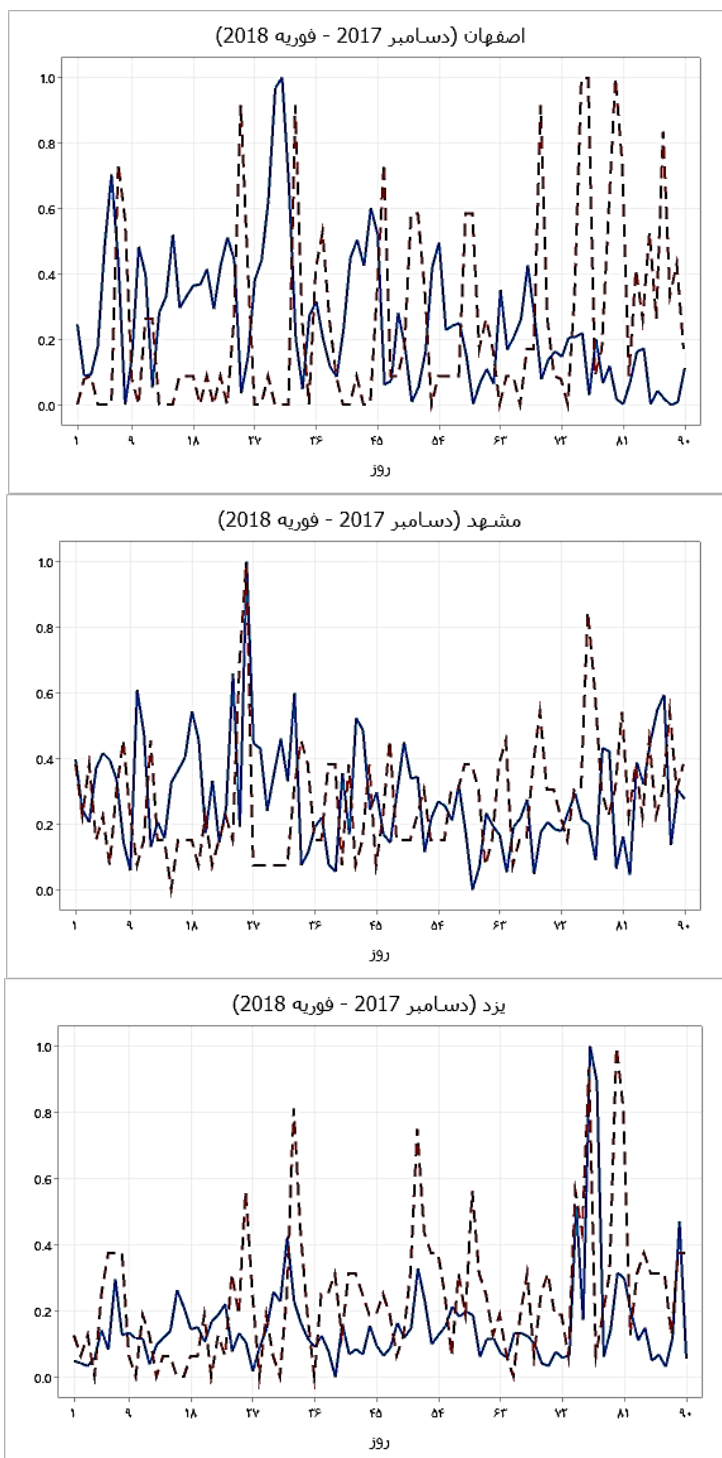
نتایج و بحث

فراوانی رخداد روزهای با آلودگی هوا به PM_{2.5} در برابر بیشینه سرعت های وزش باد روزانه

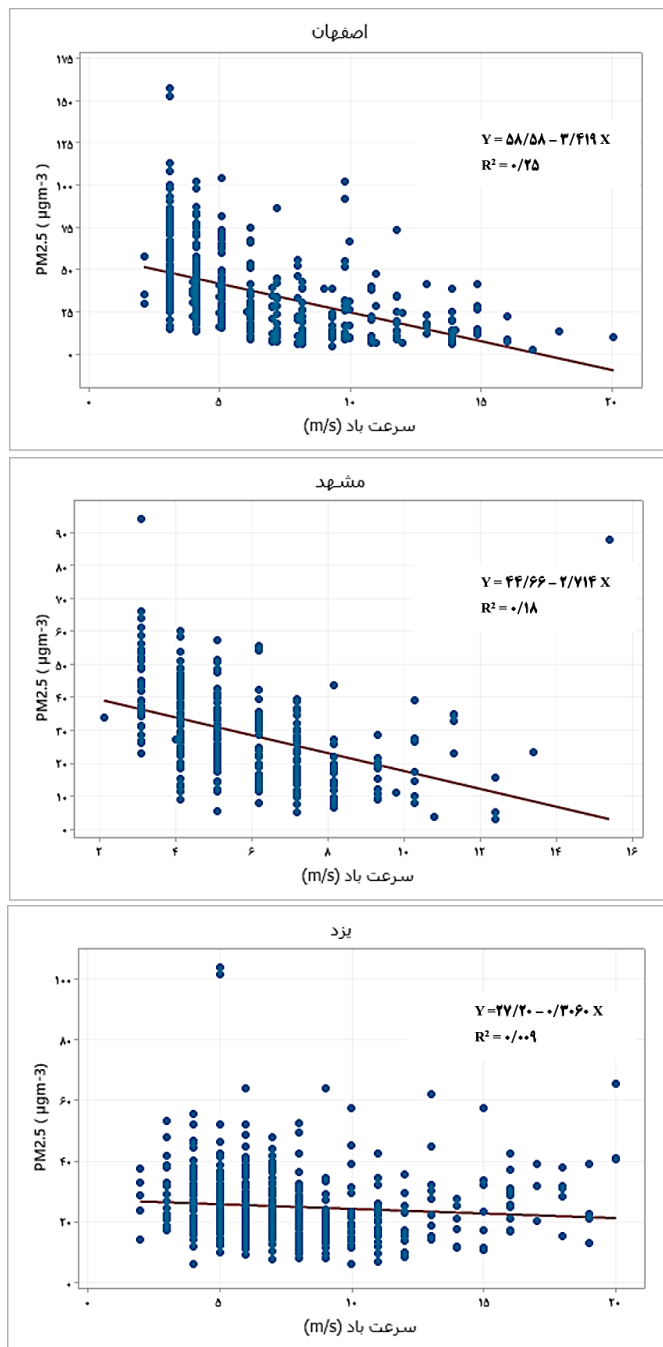
شکل ۲ نوسان های همزمان بیشینه سرعت باد سطح زمین و غلظت ذرات PM_{2.5} را برای سری زمانی ۹۱ روزه زمستان ۲۰۱۷-۲۰۱۸ در ایستگاه های اصفهان، مشهد و یزد برای نمونه نشان می‌دهد. در این نمودارها سرعت باد و غلظت PM_{2.5} بر پایه اندازه های نرمال شده این دو فراسنج آورده شده اند. این شکل گویای آن است که هر چند اندازه واکنش آلاینده‌های هوا به سرعت باد در این سه ایستگاه یکسان نیست ولی به در بیشتر حالت ها در هر سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد آلاینده‌های بالای (پایین) هوا به PM_{2.5} در سرعت های پایین (بالا) باد رخ می‌دهد. به عبارتی این دو متغیر رفتاری مخالف یکدیگر از خود نشان می‌دهند. این ناهمسازی در واکنش آلاینده‌های به سرعت باد در شکل ۳ نمایان تر است و یک همبستگی منفی میان این دو سنج دیده می‌شود که برای ایستگاه یزد این همبستگی از نیرومندی کمتری برخوردار است. همانگونه که دیده می‌شود شیب خط روند برای اصفهان، مشهد و یزد به ترتیب ۳/۴-، ۲/۷- و ۰/۳۰- که در هر سه مورد از دیدگاه آماری معنی‌دار می‌باشد (شکل ۳). به بیان دیگر، وزش بادهای تند در اصفهان و مشهد بیشتر از یزد به پالایش آلاینده‌های هوا از PM_{2.5} می‌انجامد. این شکل نشانگر آن است که در سرعت‌های بالا (نزدیک به ۱۴ تا ۲۰ متر در ثانیه به ترتیب در اصفهان و مشهد) شمار روزهای آلوده در این دو شهر بسیار کمتر از روزهایی است که سرعت باد

گروه بادهای آرام است. همان گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، اندازه احتمال برای دو ایستگاه اصفهان و مشهد $0/000$ و برای ایستگاه یزد $0/029$ می‌باشد. که در هر سه مورد این اندازه‌ها کوچکتر از احتمال $0/05$ هستند.

همچنین یافته‌های آزمون آماری کای اسکوئر و جدول توافقی با ابعاد (۲×۲) نشان داد که در هر سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد، فراوانی روزهای با هوای آلوده در گروه سرعت های باد شدید به گونه‌ای معنی‌دار کمتر از فراوانی این روزها در



شکل ۲. نوسان های همزمان بیشینه سرعت باد روزانه (نمودار خط چین) و میانگین های غلظت روزانه $PM_{2.5}$ (نمودار پیوسته) در ۹۱ روز زمستان (۲۰۱۷-۲۰۱۸) در ایستگاه های اصفهان، مشهد و یزد (سرعت باد و غلظت $PM_{2.5}$ بر پایه اندازه های نرمال شده این دو فراسنج ارائه شده است).



شکل ۳. نمودار پراکندگی داده های PM2.5 به کار رفته در این پژوهش در برابر بیشینه سرعت باد روزانه به همراه معادله خط رگرسیون

جدول ۲. جدول توافقی (۲×۲) از فراوانی روزهای با آلودگی هوا به ذرات PM2.5 در برابر روزهای با هوای پاک و در چارک اول (Q1) با سرعت

بالای وزش باد و چارک چهارم (Q4) با سرعت پایین وزش باد در سه ایستگاه اصفهان(الف)، مشهد(ب) و یزد(ج)

Wind Speed	PM _{2.5} > 35 µg/m ³	PM _{2.5} < 35 µg/m ³	Total	P-Value
Q ₁ (High)	۱۸ ٪ ۱۴/۵۲	۱۰۶ ٪ ۸۵/۴۸	۱۲۴ ٪ ۱۰۰	
Q ₄ (Low)	۹۱ ٪ ۷۳/۳۹	۳۳ ٪ ۲۶/۶۱	۱۲۴ ٪ ۱۰۰	۰/۰۰۰
Total	۱۰۹ ٪ ۴۳/۹۵	۱۳۹ ٪ ۵۶/۰۵	۲۴۸ ٪ ۱۰۰	

ب- مشهد

Wind Speed	PM _{2.5} > 35 µg/m ³	PM _{2.5} < 35 µg/m ³	Total	P-Value
Q ₁ (High)	۸ ٪ ۷/۴۱	۱۰۰ ٪ ۹۲/۵۹	۱۰۸ ٪ ۱۰۰	
Q ₄ (Low)	۵۴ ٪ ۵۰	۵۴ ٪ ۵۰	۱۰۸ ٪ ۱۰۰	۰/۰۰۰
Total	۶۲ ٪ ۲۸/۷۰	۱۵۴ ٪ ۷۱/۳۰	۲۱۶ ٪ ۱۰۰	

ج- یزد

Wind Speed	PM _{2.5} > 35 µg/m ³	PM _{2.5} < 35 µg/m ³	Total	P-Value
Q ₁ (High)	۲۱ ٪ ۱۲/۷۳	۱۴۴ ٪ ۸۷/۲۷	۱۶۵ ٪ ۱۰۰	
Q ₄ (Low)	۳۶ ٪ ۲۱/۸۲	۱۲۹ ٪ ۷۸/۱۸	۱۶۵ ٪ ۱۰۰	۰/۰۲۹
Total	۵۷ ٪ ۱۷/۲۷	۲۷۳ ٪ ۸۲/۷۳	۳۳۰ ٪ ۱۰۰	

فراوانی‌ها به ترتیب وابسته به فازهای ۴، ۱ و ۸ است. بنابراین احتمال اینکه کمترین فراوانی‌ها در فازهای ۱ و ۸ باشد، بالاست. در برابر، در هر سه ایستگاه، بیشترین فراوانی آلودگی در سرعت پایین باد، وابسته به فاز ۵ می‌باشد. به بیان دیگر، رخداد این فاز در بیشتر موارد با کاهش سرعت باد، افزایش پایداری هوا و بالا رفتن غلظت آلودگی همراه است. شمار رخداد روزهای با هوای پاک ($PM_{2.5} < 35 \mu g/m^3$) در شرایط وزش بادهای با سرعت بالاتر از ۷ متر بر ثانیه نیز نشان داد فاز ۷ MJO در هر سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد به ترتیب با ۱۷/۵ درصد، ۲۱/۳ درصد و ۱۹/۱ درصد، بیشترین فراوانی را دارد. در این شرایط، کمترین فراوانی در فاز ۱ دیده می‌شود (جدول ۳-ب).

همچنین تاریخ روزهای با وزش باد ملایم (۰/۵ تا ۷ متر بر ثانیه)، را با تاریخ روزهای همراه با آلودگی هوا ($PM_{2.5} > 35 \mu g/m^3$) رو در رو نمودیم. در این ارزیابی، ما به دنبال یافتن پاسخ برای این پرسش بودیم که اگر شرایط باد برای همه فازهای MJO یکسان باشد، آیا بازهم تفاوتی در فراوانی روزهای آلوده به ذرات معلق ($PM_{2.5} > 35 \mu g/m^3$) دیده می‌شود؟ برای نمونه، جدول ۳ گویای آن است که در اصفهان، شمار روزهای با باد ملایم و آلودگی بالا، برابر ۲۰۴ است. از میان این ۲۰۴ روز، ۴۲ روز (۲۰/۶ درصد) آن در فاز ۵ و ۱۴ روز (۶/۷ درصد) آن در فاز ۱ رخ داده است. آماره‌های جدول ۳ نشان دهنده آن است که در شرایط باد ملایم، کمترین فراوانی آلودگی هوا برای هر دو ایستگاه اصفهان و مشهد به ترتیب در فازهای ۳، ۱ و ۸ رخ داده است. در یزد، کمترین

جدول ۳. فراوانی نسبی (درصد) هر یک از فازهای هشتگانه MJO در شرایط رخداد: الف- روزهای با هوای آلوده ($PM_{2.5} > 35 \mu g/m^3$) و بادهای با سرعت پایین تر از ۷ متر بر ثانیه و ب- روزهای با هوای پاک ($PM_{2.5} < 35 \mu g/m^3$) و بادهای با سرعت بالاتر از ۷ متر بر ثانیه.

الف:

Station	MJO Phase								Total N
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Frequency (%)								
اصفهان	۶/۷	۱۱/۷	۵/۶	۱۲/۸	۲۰/۶	۱۷/۸	۱۶/۲	۸/۴	۲۰۴
مشهد	۸/۴	۱۳/۷	۵/۲	۱۲/۶	۱۹/۰	۱۶/۸	۱۳/۷	۱۰/۵	۹۵
یزد	۹/۱	۱۱/۰	۱۸/۱	۵/۵	۲۲/۰	۹/۱	۱۶/۴	۹/۱	۵۶

ب:

Station	MJO Phase								Total N
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Frequency (%)								
اصفهان	۷/۱	۷/۱	۱۳/۵	۱۴/۳	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۷/۵	۱۳/۵	۱۲۶
مشهد	۶/۷	۱۲/۴	۱۰/۱	۱۲/۴	۱۲/۴	۱۱/۲	۲۱/۳	۱۳/۵	۸۹
یزد	۵/۴	۹/۸	۸/۸	۷/۸	۱۶/۷	۱۶/۲	۱۹/۱	۱۳/۲	۱۹۸

در این دو ایستگاه بیشترین است. در برابر، فازهای ۳ و ۸ در ایستگاه اصفهان و فازهای ۳، ۴ و ۸ در ایستگاه مشهد کمترین نسبت را دارند. یافته‌ها نشان داد در هر سه ایستگاه، بیشترین فراوانی روزهای با غلظت پایین ذرات ($PM_{2.5} < 20 \mu g/m^3$) وابسته به فاز ۷ است (شکل ۴). همانگونه که در بخش خاکستری رنگ ستون‌ها دیده می‌شود، این فراوانی‌ها برای ایستگاه اصفهان ۲۴ روز، مشهد ۲۱ روز و یزد ۴۰ روز بوده که به ترتیب ۱۹/۲ درصد، ۲۳/۳ درصد و ۲۱/۴ درصد از کل روزهای با هوای پاک در هر ایستگاه را در بر می‌گیرد. آزمونهای آماری کولموگروف-اسمیرنوف و نیز Student's

t نشان داد:

الف) هیستوگرام داده های $PM_{2.5}$ و میزان آلاینده‌گی در فاز ۵ نوسان مادن- جولیان از توزیع نرمال پیروی می‌کند (شکل ۵).
 ب) در هنگام رخداد این فاز، اندازه آلودگی هوا به $PM_{2.5}$ از دیدگاه آماری به گونه‌ای معنی‌دار بالاتر از $20 \mu g/m^3$ و 35 $\mu g/m^3$ است (جدول‌های ۳ و ۴). پردازش جداگانه ویژگی‌های آماری داده های ۲۴ ساعته غلظت $PM_{2.5}$ برای هر سال و در هر ایستگاه، برای روزهایی که در آنها غلظت $PM_{2.5}$ بیشتر از ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب بود نشان داد، در بیشتر سال‌ها، فاز ۵ و پس از آن فاز ۶ نوسان مادن- جولیان، بالاترین فراوانی را دارند.

آزمون معنی داری تفاوت فراوانی رخداد غلظت های بالاتر از میانگین ذرات $PM_{2.5}$

بررسی ها نشانگر آن است که برای سال های مورد بررسی، میانگین فصلی غلظت $PM_{2.5}$ در هر سه ایستگاه نزدیک به $20 \mu g/m^3$ می باشد. ما فراوانی روزهای با غلظت پایین تر و بالاتر از ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب را در هر یک از فازهای هشتگانه MJO بررسی کردیم که در شکل ۴ آورده شده است. یافته‌ها نشانگر آن است که در هر سه ایستگاه، شمار روزهای آلوده در فاز ۵ مادن - جولیان بالاترین می‌باشد. در دوران چیرگی این فاز شمار روزهای همراه با هوای آلوده در ایستگاه اصفهان ۶۰ روز، مشهد ۴۲ روز و یزد ۶۷ روز هستند که به ترتیب ۱۸/۵ درصد، ۱۸/۵ درصد و ۱۹/۵ درصد از کل روزهای آلوده در این سه ایستگاه را در بر می‌گیرند و همانند آن در دیگر فازها دیده نشد (بخش سیاه رنگ ستون‌ها در شکل ۴). در برابر، برای فاز ۵ شمار روزهای پاک به ترتیب ۷، ۱۵ و ۳۰ می‌باشد که برای دو ایستگاه نخست از کمترین ها است (بخش خاکستری رنگ ستون‌ها در شکل ۴). بر پایه داده‌های شکل ۴ در دو ایستگاه اصفهان و مشهد، فاز ۵ MJO در برابر داشتن یک روز آلوده دارای کمترین روزهای پاک است. به بیان دیگر، در فاز ۵، نسبت روزهای آلوده به پاک

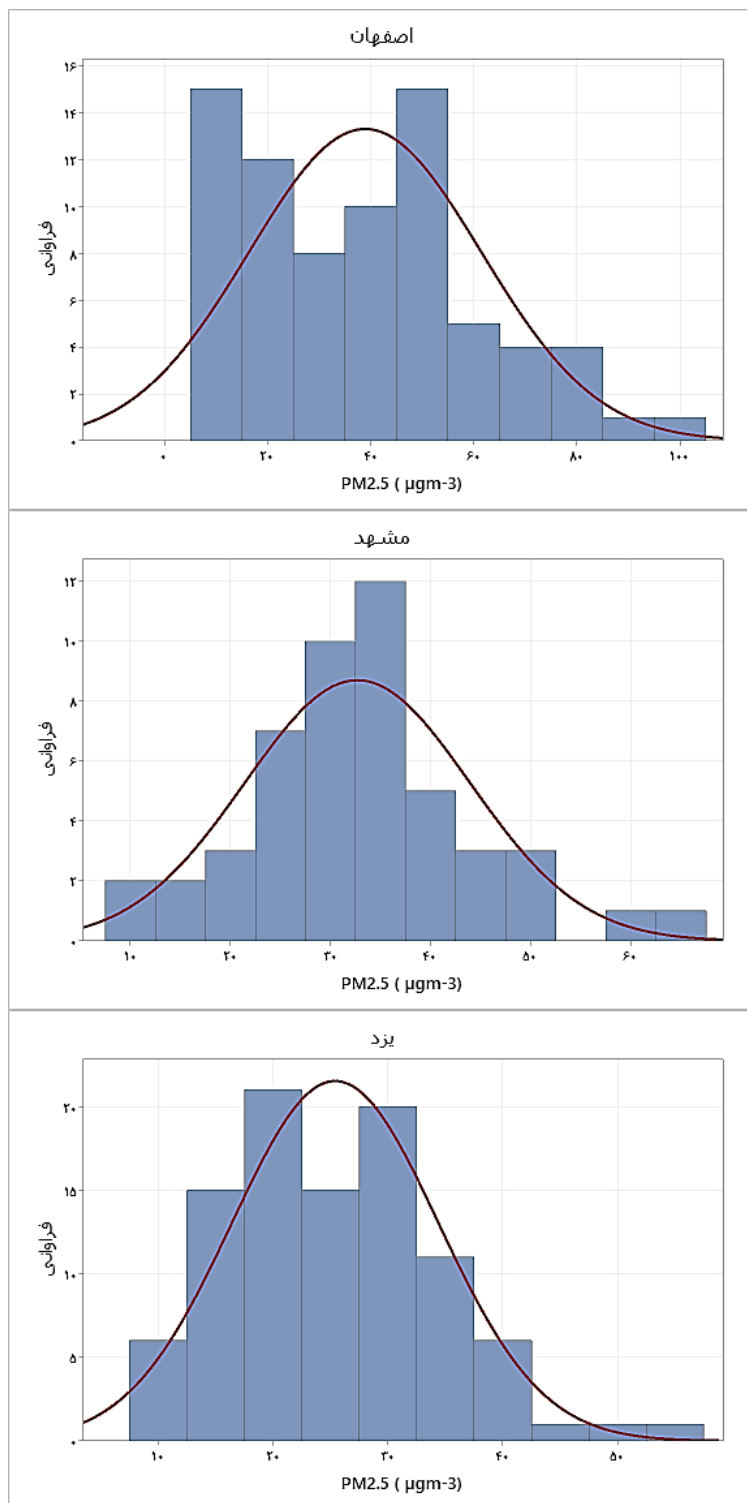
جدول ۴. ویژگی‌های آماری میانگین روزانه غلظت $PM_{2.5}$ در فاز ۵ MJO در هر سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد برای همه داده های به کار رفته در این پژوهش. علامت ستاره (*) نشانگر آن است که میانگین غلظت های روزانه $PM_{2.5}$ در فاز ۵ به طور معنی دار بیشتر از میانگین فصلی (۲۰ میکروگرم بر متر مکعب) بوده است.

Station	frequency	Mean	St Dev	P-Value	Total N
اصفهان	۷۵	۳۸/۹۱*	۲۲/۵	۰/۰۰۱	۴۵۲
مشهد	۴۹	۳۲/۶۸*	۱۱/۲۴	۰/۰۰۱	۳۶۱
یزد	۹۷	۲۵/۴۱*	۸/۹۸	۰/۰۰۱	۵۴۱

* The mean difference is significant at the 0.05 level.



شکل ۴. فراوانی روزهای با غلظت‌های بالاتر (آلوده) و پایین‌تر (پاک) از میانگین فصلی (۲۰ میکروگرم بر مترمکعب) ذرات $PM_{2.5}$ در هر فاز MJO و برای هر ایستگاه به همراه نسبت روزهای آلوده به پاک.



شکل ۵. هیستوگرام فراوانی همه داده های روزانه (PM2.5 (µg/m³) در هنگام چیرگی فاز ۵ نوسان ماندن - جولیان

با توجه به دیدگاه به دست آمده در ارزیابی های صورت گرفته، شمار روزهای با هوای آلوده یعنی غلظت های بالاتر از ۳۵ میکروگرم بر مترمکعب ذرات PM2.5 در برابر سرعت های باد ملایم (کمتر از ۷ متر بر ثانیه) همچنین غلظت

بررسی سری زمانی داده های PM2.5 در برابر بیشینه سرعت باد روزانه در سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد، همبستگی منفی را میان این دو سنجه نشان می دهد که برای ایستگاه یزد این همبستگی از نیرومندی کمتری برخوردار است. همچنین

به پاک هم در آستانه ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب در فاز ۵ نوسان مادر- جولیان در ایستگاه‌های اصفهان و مشهد با فاصله قابل قبولی از دیگر فازها بیشتر است.

نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف یافتن پیوند میان رخداد آلودگی هوا به ذرات ریز معلق در فصل زمستان و فازهای هشتمانه نوسان مادر-جولیان، داده های میانگین روزانه (۲۴ ساعته) $PM_{2.5}$ چند ایستگاه پیش گرد و غبار در بخش‌های مرکزی ایران در دوره زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ به کار گرفته شد. سری زمانی داده های غلظت روزانه $PM_{2.5}$ بر پایه فازهای گوناگون MJO و بیشینه سرعت باد روزانه برای چند سال و در ایستگاه‌هایی که آمار آن‌ها در دسترس بود به طور جداگانه، تهیه گردید. در ابتدا معادله خط رگرسیونی میان داده های غلظت ذرات ریز معلق و سرعت وزش باد (متر بر ثانیه) محاسبه شد. در ادامه، فراوانی رخداد غلظت‌های بالاتر و پایین‌تر از آستانه در گروه های با وزش باد تند و کند بررسی گردید. همچنین فراوانی نسبی هر یک از فازهای MJO در شرایط روزهای با هوای آلوده و پاک نیز ارزیابی شد. همبستگی منفی بین سرعت باد و غلظت $PM_{2.5}$ نشان داد که مقادیر زیاد (کم) این غلظت‌ها با سرعت باد کم (بالا) همراه است. این ارتباط منفی با نتایج آزمون Chi-square به کار گرفته شده تأیید شد که در آن فراوانی روزهای آلوده همزمان با باد پرسرعت (Q1) به طور قابل توجهی کمتر از آن در طول باد با سرعت پایین (Q4) بود. به طور کلی، فراوانی روزهای پاک در آن روزهایی که به عنوان سرعت باد بسیار زیاد (کم) مشخص می‌شود، بیشتر (کمتر) بوده است. همچنین نتایج نشان داد که فراوانی روزهای آلوده (پاک) در طول فاز (۷) MJO بالاترین میزان بود. پس از فاز ۵، بیشترین فراوانی روزهای آلوده مربوط به فاز ۶ MJO بود. همچنین نسبت روزهای آلوده به روزهای پاک در هر فاز MJO بررسی شد. صرف نظر از استفاده از آستانه ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب یا ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب و یا ایستگاه‌های مورد مطالعه، این نسبت در فاز ۵ بالاترین بود. همچنین میانگین غلظت $PM_{2.5}$ در فاز ۵ MJO با دو آستانه (۲۰ و ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب) این

های پایین‌تر از ۳۵ میکروگرم بر مترمکعب این ذرات در برابر سرعت های باد تند (بیشتر از ۷ متر بر ثانیه) جداسازی و بررسی های آماری برای سه ایستگاه یاد شده با رسم جدول درصد فراوانی و با آزمون های آماری صورت گرفت. یافته ها نشان داد پراکنش روزهای آلودگی هوا با الگوی رفتار فازهای گوناگون MJO در بیشتر موارد همراه است. در بازه بادهای ملایم، رخداد روزهای با هوای آلوده در فاز ۵ و در بازه بادهای تند، رخداد روزهای با هوای پاک در فاز ۷ نوسان مادر- جولیان بیشترین درصد فراوانی را دارند. یافته‌های Fotros et al., (2019) در بررسی اثرات دورپیوندی دو نوسان اقیانوس اطلس شمالی و مادر- جولیان بر آلودگی هوای کلانشهر تهران تا اندازه زیادی با یافته های این بخش از پژوهش هماهنگ است. از آنجا که دو متغیر سرعت وزش باد و فشار هوا در سطح زمین با هم در ارتباط هستند و به عبارتی وزش باد بر اثر گرادبان فشار رخ می‌دهد. هنگامی که فشار هوا در ایستگاه کاهش می‌یابد این حالت می‌تواند منجر به وزش باد گردد و در نتیجه آلودگی هوا کاهش می‌یابد. این بخش از پژوهش نیز با یافته‌های Kermani et al., (2020) که با بررسی پیوند میان $PM_{2.5}$ و متغیرهای هواشناسی در اصفهان نشان دادند غلظت $PM_{2.5}$ با دمای هوا، رطوبت نسبی و فشار هوا همبستگی مثبت دارد، توجیه پذیر است. در همین راستا، پژوهش Jia et al., (2023) که شاخصی را بر پایه گرادبان فشار هوای شمال به جنوب روی دلتای رودخانه یانگ تسه در چین به کار گرفتند تا سطوح آلودگی به $PM_{2.5}$ و چگونگی تغییرات آن را بر پایه گردش سامانه های جوی بزرگ مقیاس تعیین کند، می‌تواند شاهدهی بر درستی این یافته‌ها باشد. به طور کلی، فراوانی روزهای پاک (آلوده) به طور معنی داری با سرعت باد زیاد (کم) مرتبط بود. فراوانی رخداد غلظت‌های بالاتر و پایین‌تر از میانگین فصلی $PM_{2.5}$ (یعنی ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب) نیز بررسی شد که یافته‌ها نشان داد در هر سه ایستگاه، فاز ۵ بیشترین روزهای آلوده و در برابر، فاز ۷ بیشترین روزهای پاک را در بر می‌گیرند. همچنین میانگین غلظت $PM_{2.5}$ در فاز ۵ مادر- جولیان با میانگین فصلی این ذرات نیز تفاوتی معنی دار داشت. این تفاوت برای هر سه ایستگاه بررسی و معنی دار بودن آن‌ها در سطح ۰/۰۵ مشخص گردید. نسبت شمار روزهای آلوده

منابع

- 1- Baxter, S., Weaver, S., Gottschalck, J., & Xue, Y. (2014). Pentad Evolution of Wintertime Impacts of the Madden-Julian Oscillation over the Contiguous United States. *Journal of Climate*, Vol 27.
- 2- Fotros, Sh., Meshkati, A. H., Kamali, Gh. A., & Sedaghatkardar, A. (2019). The effect of NAO and MJO on Tehran metropolitan air pollution. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, Vol. 2(2): 93-113.
- 3- Jia, Z., Ordonez, C., Doherty, R. M., Wild, O., Turnock, S. T., & O'Connor, F. M. (2023). Modulation of daily PM2.5 concentrations over China in winter by large-scale circulation and climate change. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol 23: 2829–2842.
- 4- Jung, M. I., Son, S-W., Kim, H., & Chen, D. (2022). Tropical modulation of East Asia air pollution. *Nature Communications* .13:5580.
- 5- Kelley, M.C., Brown, M.M., Fedler, C.B., & Ardon-Dryer, K. (2020). Long-term Measurements of PM2.5 Concentrations in Lubbock, Texas. *Aerosol and Air Quality Research*, 20: 1306–1318.
- 6- Kermani, M., Jonidi Jafari, A., Gholami, M., Farzadkia, M., Arfaeinia, H., & Shahsavani, A. (2020) Investigation of relationship between particulate matter (PM2.5) and meteorological parameters in Isfahan, Iran. *Journal of Air Pollution and Health*; 5(2):97-106.
- 7- Kuwata, M., Miyakawa, T., Yokoi, S., Khan, M. F., & Latif, M. T. (2021). The Madden-Julian Oscillation modulates the air quality in the Maritime Continent. *Earth and Space Science*, 8.
- 8- Li, J., Hao, X., Liao, H., Wang, Y., Cai, W., Li, K., & Yue, X. (2022). Winter particulate pollution severity in North China driven by atmospheric teleconnections. *Nature Geoscience*. Vol. 15 .
- 9- Nazemosadat, M., Shahgholian, K., & Ghaedamini, H. (2023). The wet and dry spells within the MJO-phase 8 and the role of ENSO and IOD on the characteristics of these spells: A regional to continental-scales analysis. *Atmospheric Research*. Vol 285.
- 10- Pourasghar, F., C. J. Oliver, E., & J. Holbrook, N. (2021). Influence of the MJO on daily surface air temperature over Iran. *International Journal of Climatology*. 41(9), 4562-4573
- 11- Ragsdale, K.M., Bradford, B.S., & Testino, A.P. (2013). Variability of particulate matter (PM10) in Santiago, Chile by phase of the

ذرات تفاوت معنی داری نشان داد. آزمون های همبستگی و کای اسکوئر نشان دادند که سرعت باد زیاد (کم) باعث کاهش (افزایش) فراوانی روزهای آلوده می شود. در طول فاز ۵ MJO، زمانی که سرعت باد به طور مداوم کمتر از سایر فازهای MJO بود، آلودگی هوا توسط PM2.5 و نسبت روزهای آلوده به پاک بیشتر از سایر فازها بود. اگر ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب به عنوان آستانه روزهای پاک و آلوده در نظر گرفته شود، فازهای ۳ و ۸ را می توان به عنوان تمیزترین فازهای MJO در دو ایستگاه اصفهان و مشهد تعیین کرد. با وجود اینکه در هر سه ایستگاه، شیب خط رگرسیون از دیدگاه آماری معنی دار می باشد ولی اندازه واکنش آلاینده های هوا به سرعت باد در این سه ایستگاه یکسان نیست. پس می توان گفت، وزش بادهای تند در ایستگاه اصفهان و مشهد بیشتر از یزد به پالایش آلاینده های هوا از PM2.5 می انجامد. همچنین در هر سه ایستگاه اصفهان، مشهد و یزد آلاینده های بالای (پایین) هوا به PM2.5 در سرعت های پایین (بالا) باد رخ می دهد. ارزیابی فراوانی روزهای با هوای آلوده و پاک (غلظت های بیشتر و کمتر از ۳۵ میکروگرم بر متر مکعب PM2.5) در دو گروه بادهای با بیشترین سرعت (چارک یکم) و کمترین سرعت (چارک چهارم) نیز نشان داد که شمار روزهای با هوای آلوده در هر سه ایستگاه در دسته بادهای با سرعت کند از دسته بادهای تند بیشتر است. بنابراین می توان گفت هنگامی که هوا آرام و سرعت باد پایین است رخداد غلظت های بالای ذرات معلق بیشتر می باشد. همچنین، یافته ها در این بخش نشانگر آن است که افزون بر سرعت وزش باد، آلودگی هوا به ذرات ریز معلق به عوامل دیگری همانند روزهای هفته، تعداد خودروها در خیابان، غلظت صنایع آلاینده و ابری یا بارانی بودن هوا نیز بستگی دارد که باید در جای خود مورد بررسی قرار گیرند.

سیاس گزارى

در این پژوهش داده های چند ایستگاه هواشناسی سینوپتیک همچنین پایش گرد و غبار و سامانه پایش کیفیت هوای کشور وابسته به سازمان هواشناسی کشور به کار رفته است. بدین وسیله از همکاری کارکنان این سازمان در زمینه در اختیار قرار دادن آمار قدردانی می گردد.

- 16- Yu, Y., & Ginoux, P. (2021). Assessing the contribution of the ENSO and MJO to Australian dust activity based on satellite- and ground-based observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 8511–8530
- 17- Yu, Zh., Ma, J., Qu, Y., Pan, L., & Wan, Sh. (2023). PM2.5 extended-range forecast based on MJO and S2S using LightGBM. *Science of The Total Environment*. Vol 880
- 18- Zhu, Y., Hsu, P.-c., & Qian, Y. (2024). Influence of Western Pacific Madden-Julian Oscillation on New York city's record-breaking Air pollution in early June 2023. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109061.
- Madden-Julian Oscillation (MJO). *Atmospheric Environment*. 81 304e310
- 12- Ranjbar SaadatAbadi, A., & Soori, M. (2017). A study of the impacts of the MJO on atmospheric circulations and winter precipitation in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, Vol 11, No 1, 2017, P. 4 (In Persian)
- 13- Sabziparvar, A. A., & Naderi Moghadam, F. (2014). The Effect of Madden - Julian Oscillation (MJO) on the Variation of Reference Evapotranspiration in Southern Regions of Iran. *Journal of Agricultural Meteorology* Vol. 2, No. 1, Spring & Summer. 2014, p.32-44 (In Persian)
- 14- Singh, A., & Palazoglu, A. (2011). A Statistical Framework to Identify the Influence of Large-Scale Weather Events on Regional Air Pollution. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 50
- 15- Vatanparast Galeh Juq, F., Salahi, B., & , B., Zeinali. (2023). Investigating the role of the Maden-Julian Oscillation (MJO) on the frequency of dust storms in selected stations of Khuzestan province and tracking the paths of dust entering it. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*. 25 (77), 198-217