

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره نهم، شماره سی و چهارم، زمستان ۱۳۹۷

تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۳۰

صص ۷۶-۹۲

بررسی اثر پارامترهای اقلیمی بر تغییر غلظت ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرومتر و ارتباط آن با رخداد فرسایش بادی در مناطق خشک

زهره ابراهیمی خوشفی*، استادیار بیابان‌زدایی-دانشگاه جیرفت

فاطمه درگاهیان، استادیار اقلیم‌شناسی-سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران

چکیده

یکی از علل اصلی آلودگی هوا در مناطق خشک جهان و به‌ویژه در ایران، وقوع توفان‌های گردوغبار حاوی غلظت بالای ذرات معلق با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM10) است. هدف اصلی تحقیق حاضر، شناسایی مهم‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر تغییر غلظت PM10 در نزدیکی دشت یزد- اردکان و ارتباط آن با رخداد فرسایش بادی در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ است. بدین منظور از متوسط ماهیانه‌ی داده‌های اقلیمی، غلظت روزانه‌ی ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر و داده‌های ساعتی مربوط به پدیده‌های مختلف گردوغبار ایستگاه سینوپتیک یزد استفاده شد. جهت شناسایی دقیق‌ترین رابطه بین پارامترهای هواشناسی و غلظت PM10، ۱۰ تابع رگرسیون دومتغیره (لگاریتمی، معکوس، توانی، نمایی، درجه دو، درجه سه، منحنی رشد، ترکیبی، لجستیک و منحنی S) بر اساس چهار معیار ضریب همبستگی، آماره‌ی F، میزان خطای نسبی و میانگین مربعات خطا با یکدیگر مقایسه گردید. درنهایت از طریق تحلیل ارتباط بین شاخص توفان گردوغبار و PM10، نقش رخداد فرسایش بادی بر تغییرات آن موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در این بازه‌ی زمانی هیچ رابطه‌ی خطی معنی‌داری بین پارامترهای هواشناسی و غلظت ذرات معلق وجود نداشته است؛ درحالی‌که بین مقادیر متوسط درجه حرارت ماهیانه و درجه حرارت بیشینه با PM10 رابطه‌ی غیرخطی معنی‌داری برقرار شده است. مقادیر مربوط به ضریب همبستگی، آماره‌ی F، خطای نسبی و مجذور میانگین مربعات خطا بر اساس دقیق‌ترین تابع غیرخطی بین PM10 و متوسط درجه حرارت ماهیانه به ترتیب ۰/۶۷، ۸/۰۶، ۰/۱، ۰/۰۹ برآورد گردید. مقادیر مربوط به این پارامترها بر اساس درجه حرارت بیشینه به ترتیب ۰/۶۵، ۷/۳، ۰/۱۱ و ۰/۰۸ تخمین زده شد. همچنین نتایج نشان داد که ۲۴٪ افزایش غلظت ذرات معلق در سال‌های اخیر به دلیل وقوع رخداد فرسایش بادی بوده است.

واژگان کلیدی: بیابان‌زایی، ذرات معلق، تغییر اقلیم، فرسایش بادی، مناطق خشک.

* Email: Zohrebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

۱- مقدمه

ذرات معلق موجود در هوا که دارای منشأ طبیعی و انسانی می‌باشند، اثرات قابل توجه و چشم‌گیری بر اقلیم، محیط زیست، سلامت انسان‌ها، تابش‌های حرارتی و خورشیدی، کیفیت هوا و حتی خفه شدن حیوانات دارند (Faraji et al., 2018: 175). منشأ طبیعی ذرات معلق، ذرات نمک برخاسته از اقیانوس‌ها و گردوغبار حمل‌شده توسط باد از مناطق بیابانی و ذرات جامد ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی می‌باشند (Stix et al., 2018: 6508; Tan et al., 2017: 318). یکی از علل اصلی انتشار ذرات معلق با قطر آئروپدینامیکی کم‌تر از ۱۰ میکرومتر (PM10) در هوای مناطق خشک جهان و از جمله در هوای استان‌های خشک و بیابانی کشور ایران، وقوع توفان‌های گردوغبار است که شدت و تواتر آن نسبت به گذشته افزایش یافته و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی به دنبال داشته است (Modarres et al., 2018: 113-114). مهم‌ترین پیامد منفی ناشی از افزایش غلظت ذرات معلق، به خطر افتادن سلامت انسان‌های ساکن در این مناطق است که در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است (Daryanoosh et al., 2018: 313; Gautman, Patra, 2018: 79). (Sahu, & Hitch, 2018: 79).

میزان غلظت این ذرات در هوای مناطق مختلف جغرافیایی و از جمله در هوای مناطق شهری به عوامل متعدد اقلیمی، محیطی و زمینی وابسته است که از بین این عوامل، عوامل اقلیمی نقش مؤثرتری بر تغییر غلظت این آلاینده‌ها دارند (Sharafi & Pirsaeheb, 2015: 54-56). از این رو، شناسایی عوامل مؤثر بر تغییر غلظت این آلاینده‌ها گامی مؤثر برای کاهش اثرات نامطلوب ناشی از آن‌ها به شمار می‌رود (Ashpole & Washington, 2013: 6970).

شناسایی عوامل اقلیمی مؤثر بر تغییر غلظت ذرات معلق موجود در هوای مناطق مختلف، توسط پژوهشگران متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از این پژوهشگران، عوامل مختلفی را در افزایش و یا کاهش غلظت ذرات معلق مؤثر دانسته‌اند. به عنوان مثال در یک مطالعه، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش غلظت PM10 در سال ۲۰۱۰ در شهر اگزیان چین، افزایش سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی گزارش شده است (Wang et al., 2015: 1844). وجود رابطه‌ی معکوس معنی‌دار بین رطوبت نسبی و غلظت ذرات معلق موجود در هوای کشور بحرین طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ و نیز رابطه‌ی مستقیم معنی‌دار بین درجه حرارت هوا و غلظت ذرات معلق در مطالعه‌ی دیگری به اثبات رسیده است (Jassim & Munir, 2018: 62). علل اصلی افزایش غلظت ذرات معلق در هوای شهر مکه، کاهش رطوبت نسبی و افزایش سرعت باد معرفی شده است (Munir, 2016: 62). نامداری و همکارانش (۲۰۱۸) از شاخص اپتیکی آئروسول‌ها (AOD)^۱ برای سنجش میزان فعالیت توفان‌های گردوغبار در بیابان‌های خاورمیانه استفاده کردند و ارتباط بین AOD، دما و بارندگی را در فصل بهار مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌های حاصل از تحقیق آن‌ها، افزایش دما و کاهش بارندگی از علل اصلی کاهش رویدادهای گردوغبار در خاورمیانه بوده است. ولی و روستایی (۱۳۹۶) با استفاده از شاخص توفان گردوغبار (DSI)^۲ نشان دادند که پدیده‌ی فرسایش بادی در ایران مرکزی و به‌ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی آن در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته است. افزایش غلظت ذرات معلق در هوای شهر کرمانشاه در فصل تابستان و به‌ویژه در تیرماه و نیز قرار داشتن حدود ۲۰٪ کل روزهای بازه‌ی زمانی ۹۲-۱۳۸۴ این شهر در وضعیت هوای ناسالم توسط محققین به اثبات رسیده است (عطافر و همکاران، ۱۳۹۳: ۲۸-۲۷). در تحقیقی راجع به بررسی تغییرات زمانی غلظت PM10 شهر کرمانشاه و تأثیر پارامترهای هواشناسی بر آن طی سال‌های ۸۹-۱۳۸۴، اثر معکوس رطوبت نسبی، بارندگی و درصد باد آرام با PM10 و رابطه‌ی مستقیم درصد باد غالب، دما و سرعت باد غالب با آن نشان داده شده است (نظری و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۱۱-۱۱۰). در یک مطالعه نشان داده شد که در سال‌های اخیر غلظت ذرات معلق در هوای شهر اهواز تا ۱۶/۵ برابر استاندارد غلظت ذرات در ایران افزایش یافته است. علل اصلی افزایش غلظت ذرات معلق در این شهر، افزایش دما، کاهش بارندگی و کاهش رطوبت نسبی معرفی شده است (Shahsavani

1- Aerosol Optical Depth

2- Dust Storm Index

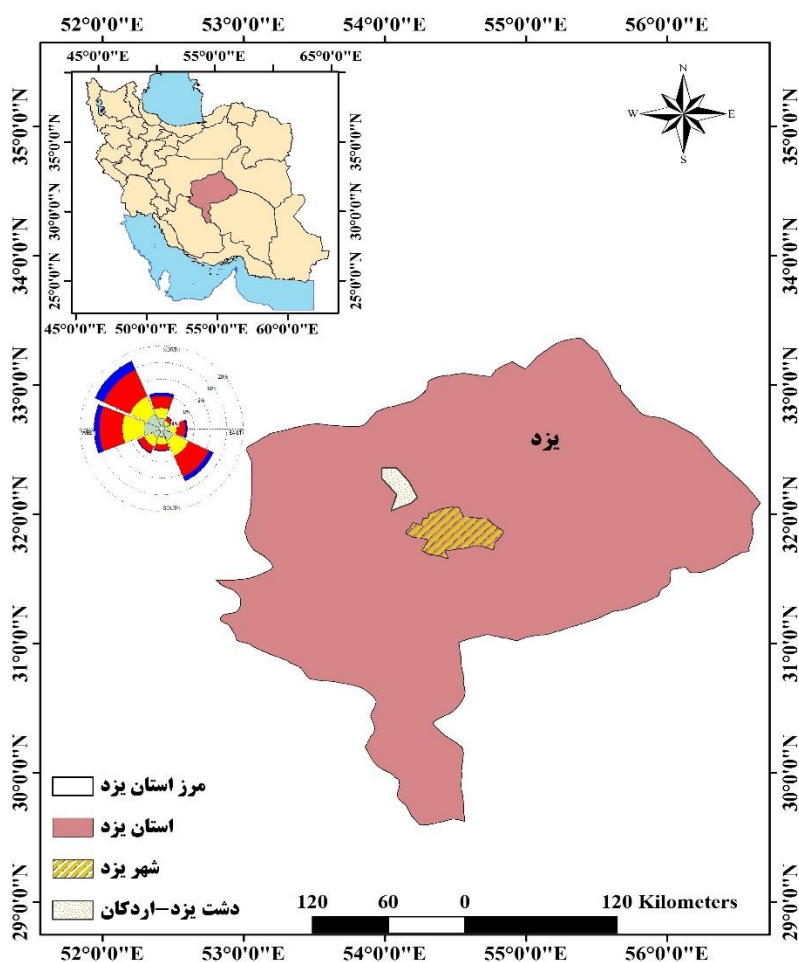
(et al., 2012: 192). نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین غلظت PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} و درصد رطوبت نسبی، سرعت باد و درجه حرارت در هوای شهر قم نشان داد که میزان ضریب همبستگی بین ذرات PM_{10} و درصد رطوبت نسبی، سرعت باد و درجه حرارت به ترتیب برابر 0.03 ، 0.01 و 0.001 و میزان این ضریب برای $PM_{2.5}$ به ترتیب برابر 0.32 ، 0.2 و 0.31 و برای PM_1 به ترتیب برابر 0.6 ، 0.32 و 0.48 بوده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱). ارتباط مستقیم بین غلظت ذرات معلق و میانگین دمای ماهیانه و ارتباط معکوس بین میانگین رطوبت نسبی ماهیانه و غلظت ذرات معلق در هوای شهر سنندج نیز گزارش شده است (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۹۹-۱۰۰). در تحقیقی راجع به تحلیل زمانی و مکانی و شناسایی منشأ تولید ذرات PM_{10} سال ۲۰۱۳ در سطح شهر یزد نشان داده شد که غلظت ذرات معلق در فصل بهار به میزان قابل توجهی بالاتر از حد استاندارد جهانی بوده است (۱۵۵ میکروگرم بر مترمکعب). بیشترین غلظت ذرات معلق در این فصل برای مناطق با ترافیک سنگین گزارش شده است (Miri et al., 2016: 55-56)، اما تاکنون علل اقلیمی مؤثر بر تغییر غلظت این ذرات شناسایی نشده‌اند.

در سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی، خشک‌سالی‌های متوالی، تخریب پوشش گیاهی، خشکیده شدن تالاب‌ها، تشدید رخداد فرسایش بادی و فقدان برنامه‌ریزی‌ها و سرمایه‌گذاری‌های طولانی‌مدت برای مبارزه با این پدیده، میزان فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار و غلظت ذرات معلق هوا بر فراز بسیاری از شهرهای بیابانی ایران افزایش یافته است. با توجه به اینکه شهر یزد، شهری صنعتی است که در نزدیکی یکی از مهم‌ترین کانون‌های بحرانی تولید گردوغبار استان یزد به نام دشت یزد- اردکان و در مسیر بادهای غبارآلود نشأت گرفته از آن واقع شده است (Azimzaseh et al., 2008: 169-173)، ترکیب آلاینده‌های صنعتی و ذرات گردوغبار می‌تواند منجر به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تهدید بیش‌تر ساکنین این منطقه از کشور شود. همچنین با توجه به اینکه عوامل اقلیمی نقش مهمی بر تغییر غلظت ذرات معلق دارند و تاکنون مطالعه‌ای راجع به شناسایی مهم‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر تغییر غلظت ذرات معلق هوای شهر یزد انجام نگرفته، در این مقاله سعی بر آن است که در ابتدا به این موضوع پرداخته شود. از طرف دیگر و با توجه به اینکه منشأ ذرات PM_{10} متفاوت است و یکی از منابع تولید این ذرات می‌تواند ذرات شن و گردوغبار برخاسته در اثر وقوع پدیده‌ی فرسایش بادی باشد؛ لذا در فاز دوم تحقیق حاضر، ارتباط تغییرات PM_{10} با تغییرات شاخص توفان گردوغبار به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص مبین میزان فعالیت این رخدادها، نیز مورد بررسی قرار گرفت تا سهم این وقایع در تغییر غلظت ذرات معلق مشخص شود که در واقع جنبه‌ی نوآوری این تحقیق در همین موضوع است. به‌طور کلی و با عنایت به توضیحات مذکور، در این مقاله سعی شد که با توجه به اهداف زیر به این موضوعات پرداخته شود:

- ۱) بررسی تغییرات زمانی غلظت PM_{10} در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۷-۲۰۱۲)؛
- ۲) تحلیل نقش تغییرات اقلیم بر اساس تغییر ۷ پارامتر مهم بارندگی، دمای متوسط، دمای حداقل، دمای حداکثر، متوسط سرعت باد، بیشینه سرعت باد و رطوبت نسبی؛
- ۳) محاسبه‌ی شاخص توفان گردوغبار و ارتباط آن با تغییرات PM_{10} .

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، شهرستان یزد است که در مرکز ایران و در محدوده‌ی جغرافیایی 53° تا 56° درجه طول شرقی و 31° درجه و 45° دقیقه تا 32° درجه و 10° دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت کلی منطقه‌ی مطالعاتی، 2397 کیلومترمربع است و اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن، گرم و خشک است. بر اساس داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه سینوپتیک یزد، متوسط بارندگی و متوسط دمای شهر یزد برای بازه‌ی زمانی مورد بررسی (۲۰۱۷-۲۰۱۲) به ترتیب $42/5$ میلی‌متر و $20/9$ درجه سانتی‌گراد است. میانگین سرعت باد غالب در یزد، 21 متر بر ثانیه و جهت وزش بادهای فرساینده در این منطقه از سمت شمال غرب است. مهم‌ترین منبع تولید گردوغبار در استان یزد، دشت یزد-اردکان است که در فاصله 13 کیلومتری از شهر یزد، در شمال غربی این شهر واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعاتی در ایران و استان یزد

۳- مواد و روش‌ها

روش کلی انجام تحقیق حاضر شامل دو مرحله‌ی اصلی است که در ادامه به‌طور کامل شرح داده شده است.

۳-۱- بررسی ارتباط غلظت ذرات معلق و عناصر هواشناختی محلی

برای انجام تحقیق حاضر ابتدا داده‌های روزانه مربوط به غلظت ذرات معلق با قطر آئرودینامیک کم‌تر از ۱۰ میکرون شهرستان یزد از سازمان حفاظت محیط زیست استان یزد اخذ گردید. اطلاعات مربوط به این پارامتر از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ به ثبت رسیده است؛ لذا متوسط ۷ پارامتر مهم هواشناسی نیز که شامل مقادیر متوسط بارندگی، میانگین دمای ماهیانه، دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد غالب، حداکثر سرعت باد و رطوبت نسبی است، برای بازه‌ی زمانی مذکور از سازمان هواشناسی استان یزد دریافت گردید. مقادیر متوسط ماهیانه‌ی این متغیرها در جدول (۱) ارائه شده است. با اعمال میانگین حسابی بر روی داده‌های روزانه‌ی PM_{10} ، مقادیر متوسط غلظت ذرات معلق برای سه بازه‌ی زمانی ماهیانه، فصلی و سالیانه محاسبه و تحلیل شد. با توجه به اینکه داده‌های موردبررسی دارای مقیاس نسبی و فاصله‌ای می‌باشند، جهت تعیین میزان همبستگی بین غلظت ذرات معلق و پارامترهای هواشناسی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. سپس از روش رگرسیون خطی چندمتغیره جهت بررسی روابط بین متغیرهای اقلیمی و غلظت ذرات معلق استفاده شد، اما به دلیل عدم وجود ارتباط معنی‌دار، از توابع مختلف رگرسیون دومتغیره جهت شناسایی رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده گردید. بدین منظور از ۱۰ تابع رگرسیون دومتغیره (خطی، لگاریتمی،

معکوس، توانی، نمایی، درجه‌دو، درجه سه، منحنی رشد، ترکیبی، لجستیک و منحنی S) در محیط نرم‌افزار SPSS20 استفاده شد (روابط ۱۰-۱).

$Y = b_0 + b_1x$	رابطه‌ی ۱: مدل خطی
$Y = b_0 + b_1 \text{Log}x$	رابطه‌ی ۲: مدل لگاریتمی
$Y = b_0 + \frac{b_1}{x}$	رابطه‌ی ۳: مدل معکوس
$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	رابطه‌ی ۴: مدل درجه دوم
$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$	رابطه‌ی ۵: مدل درجه سوم
$Y = b_0x^{b_1}$	رابطه‌ی ۶: مدل ترکیبی
$Y = b_0x^{b_1}$	رابطه‌ی ۷: مدل توانی
$Y = e^{b_0+b_1/x}$	رابطه‌ی ۸: مدل S شکل
$Y = e^{b_0+b_1x}$	رابطه‌ی ۹: مدل منحنی رشد
$Y = b_0e^{b_1x}$	رابطه‌ی ۱۰: مدل نمایی

به‌منظور تعیین دقیق‌ترین تابع و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر غلظت ذرات معلق کم‌تر از ۱۰ میکرون، از چهار معیار ضریب همبستگی (R)، خطای نسبی (RE)، میانگین مربعات خطا (RMSE) (روابط ۱۳-۱۱) و آماره‌ی F استفاده شد (Chi & Draxler., 2014: 1248-1250).

$$R = \frac{\sum_i^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_e - \bar{Q}_e)}{\sqrt{\sum_i^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_e - \bar{Q}_e)^2}} \quad \text{رابطه‌ی ۱۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_e)^2}{N}} \quad \text{رابطه‌ی ۱۲}$$

$$RE = \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_o} \right| \times 100 \quad \text{رابطه‌ی ۱۳}$$

در این روابط:

RE مقدار خطای نسبی، RMSE مجذور میانگین مربعات خطا، Q_o مقدار مشاهده‌ای متغیر وابسته، Q_e مقدار تخمینی متغیر وابسته و N تعداد مشاهدات است (Das., 2000: 445-449).

جدول ۱: میانگین ماهیانه‌ی پارامترهای هواشناسی موردبررسی در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۷-۲۰۱۲)

ماه‌ها	بارندگی (میلی‌متر)	دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد)	حداقل دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (%)	باد غالب (متر بر ثانیه)	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه)
ژانویه	۵/۸	۸/۲	۲۳/۵	-۳/۴	۲۵/۷	۲/۳	۱۵/۲
فوریه	۷/۳	۹/۹	۲۴/۹	-۴/۳	۲۳/۷	۲/۶	۱۴/۳
مارس	۶/۱	۱۵/۵	۲۸/۳	۲/۴	۱۸/۷	۲/۸	۱۸/۸
آوریل	۶/۴	۲۱/۳	۳۳/۹	۷/۱	۱۵/۵	۲/۸	۱۷/۳
می	۴/۳	۲۷/۲	۳۹/۲	۱۵/۱	۱۱/۸	۲/۹	۲۲/۵
ژوئن	۰	۳۲/۲	۴۲/۴	۲۰/۴	۶/۵	۲/۹	۱۵/۸
جولای	۰	۳۳/۷	۴۳/۶	۲۲	۷/۲	۲/۹	۱۵/۳
آگوست	۰	۳۱	۴۲	۱۸/۸	۷/۲	۲/۹	۱۳/۸
سپتامبر	۰	۲۸	۳۸/۷	۱۵/۷	۸	۲/۳	۱۲/۵
اکتبر	۰/۸	۲۱/۶	۳۵	۹	۱۴/۲	۲/۱	۱۳/۷
نوامبر	۸/۶	۱۳/۱	۲۸	۱/۵	۲۴/۸	۱/۹	۱۳
دسامبر	۳/۳	۸/۸	۲۴/۵	-۲/۵	۲۷/۲	۲/۱	۱۲/۳

۳-۲- محاسبه‌ی شاخص توفان گردوغبار و ارتباط آن با غلظت ذرات معلق

جهت تعیین سهم رخدادهای توفان گردوغبار ناشی از فرسایش بادی در تغییر غلظت ذرات معلق، از شاخص توفان گردوغبار استفاده گردید. بدین منظور لازم است تعداد رویدادهای مختلف گردوغبار (محلی، متوسط و شدید) محاسبه شوند. در مطالعه‌ی حاضر، داده‌های ساعتی مربوط به این رویدادها همراه با میدان دید افقی و سرعت وزش بادها در هنگام وقوع این وقایع برای ایستگاه سینوپتیک یزد از سازمان هواشناسی استان یزد اخذ گردید. به‌طور کلی، ۱۰۰ کد هواشناسی (۹۹-۰۰) توسط سازمان جهانی هواشناسی برای پدیده‌های مختلف تعریف شده که ۱۱ مورد آن مربوط به پدیده‌ی گردوغبار است (جدول ۲). پس از اخذ داده‌های موردنیاز، تعداد رویدادهای محلی، متوسط و شدید بر اساس حداکثر کد ثبت‌شده‌ی روزانه طی ۸ بار دیده‌بانی محاسبه گردید. درنهایت، شاخص DSI ماهیانه برای سال‌های آماری موردبررسی بر اساس رابطه‌ی (۱۴) محاسبه شد (O’Loingsigh et al., 2014: 35).

$$DSI = (5 \times SDS) + MDS + \left(\frac{LDE}{20}\right) \quad \text{رابطه‌ی ۱۴}$$

که در این رابطه SDS ، بیانگر تعداد روزهای توأم با توفان‌های گردوغبار شدید با حداکثر کد روزانه (۳۳ تا ۳۵)، MDS بیانگر تعداد روزهای توأم با توفان‌های گردوغبار متوسط با حداکثر کد روزانه (۳۰ تا ۳۲ و ۹۸) و LDS بیانگر تعداد روزهای توأم با گردوغبارهای ملایم با حداکثر کد روزانه (۷ تا ۹) است.

پس از محاسبه‌ی شاخص DSI ، نمودار پراکنش نقطه‌ای بین این شاخص و مقادیر ماهیانه‌ی غلظت ذرات معلق ترسیم شد و بر این اساس با استفاده از ضریب تعیین (R^2)، میزان وابستگی تغییر غلظت ذرات معلق به رخداد فرسایش بادی تعیین گردید.

جدول ۲: کدهای تعریف شده توسط سازمان جهانی هواشناسی برای بیان پدیده‌ی گردوغبار

کد هواشناسی	نام علمی	توضیحات
۰۶	گردوغبار معلق	گردوغبار معلق در هوا که مسافت زیادی را پوشانده است.
۰۷	گردوخاک	گردوغبار یا ماسه‌ای که در محل ایستگاه بلند شده است
۰۸	گردباد	گردبادهای تکامل یافته در خود ایستگاه یا اطراف آن
۰۹	توفان	گرد و خاک در ساعت دیده‌بانی در اطراف ایستگاه وجود دارد یا در طی ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۱	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۲	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۳	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۴	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۵	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۹۸	توفان گردوغبار یا ماسه خیلی شدید یا تندر	توفان‌هایی که در محل ایستگاه یا اطراف آن بلند شده‌اند با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تحلیل تغییرات زمانی غلظت PM10

نتایج حاصل از بررسی تغییرات سالیانه‌ی غلظت PM10 در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۲-۲۰۱۷) در شکل (۲) نشان داده شده است.



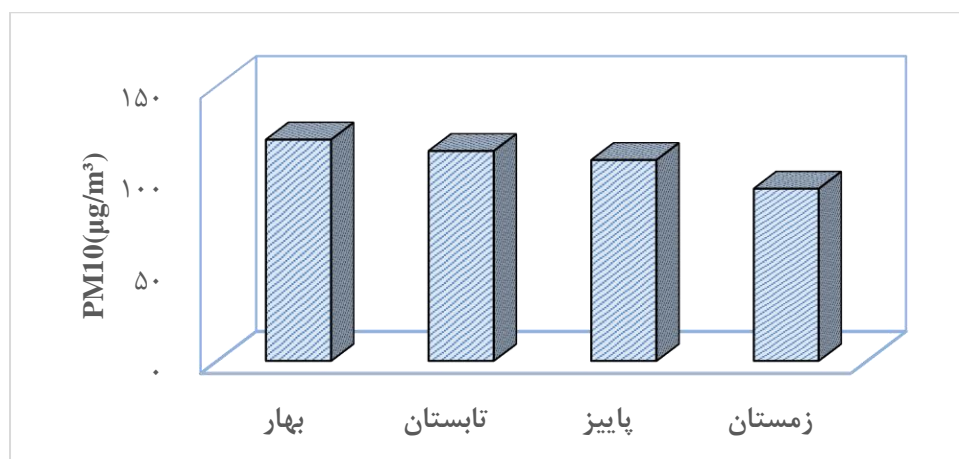
شکل ۲: مقادیر سالانه و میانگین طولانی‌مدت غلظت ذرات معلق در هوای شهر یزد در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۲-۲۰۱۷)

بررسی کلی نمودار تغییرات سالیانه‌ی غلظت PM10 در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه (شکل ۲) نشان می‌دهد که روند تغییرات غلظت ذرات معلق از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ تابع یک الگوی سینوسی و یا به عبارتی افزایشی-کاهشی بوده است؛ اما آنچه بیش‌تر از همه مشهود است، بالاتر بودن غلظت سالیانه‌ی ذرات معلق در سال ۲۰۱۵ نسبت به دیگر سال‌های بازه‌ی زمانی مورد بررسی است؛ به‌طوری‌که میانگین سالیانه‌ی غلظت PM10 در این سال به ۱۲۹/۸ میکروگرم بر مترمکعب رسیده است؛ در حالی که میانگین ۶ ساله‌ی PM10 در سطح شهر یزد، ۱۰۸ میکروگرم بر مترمکعب بوده

است. گرچه میانگین ذرات معلق موجود در هوای شهر یزد در سال ۲۰۱۴ نسبت به سایر سال‌های مورد بررسی کم‌تر بوده است (۹۵/۷ میکروگرم بر مترمکعب)، اما اختلاف چشم‌گیری با متوسط غلظت PM_{10} (۱۰۸ میکروگرم بر مترمکعب) در بازه‌ی زمانی مورد بررسی نداشته است. همچنین نتایج حاصل از بررسی تغییرات سالیانه‌ی غلظت PM_{10} حاکی از آن است که به‌طور کلی غلظت ذرات معلق با قطر آئرودینامیکی کم‌تر از ۱۰ میکرومتر در هوای شهر یزد در سه سال پایانی دوره‌ی آماری بیش‌تر از سه سال قبل از آن و تا حدودی بیش‌تر از میانگین ۶ ساله‌ی غلظت ذرات بوده است.

مقایسه‌ی میانگین غلظت سالیانه ذرات معلق موجود در هوای شهر یزد از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ با مقادیر استاندارد تعریف‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست (متوسط غلظت سالیانه: ۷۵ میکروگرم بر مترمکعب) نشان می‌دهد که میانگین غلظت سالیانه‌ی PM_{10} در تمامی سال‌های مورد بررسی بالاتر از حد مجاز بوده است؛ لذا با توجه به وجود رابطه‌ی خطی و مستقیم بین غلظت این نوع از آلاینده‌ها و میزان مرگ‌ومیر (غیاث‌الدین، ۱۳۸۵) می‌توان ادعان کرد که هوای شهر یزد در تمامی این سال‌ها از لحاظ بهداشتی ناسالم بوده است و ادامه‌ی این روند می‌تواند مخاطرات بهداشتی و زیست‌محیطی متعددی را به دنبال داشته باشد.

نتایج حاصل از بررسی تغییرات فصلی غلظت ذرات معلق از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ (شکل ۳) نشان می‌دهد که غلظت ذرات معلق با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرومتر در فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه به ترتیب $120/7$ ، $114/5$ ، $109/6$ و 94 میکروگرم بر مترمکعب بوده است. به‌عبارت‌دیگر، روند تغییرات غلظت PM_{10} در مقیاس فصلی تابع الگوی خاص و منظم بوده است؛ به‌طوری‌که غلظت ذرات معلق از فصل بهار تا زمستان روند کاهشی داشته است. در واقع، در بازه‌ی زمانی مورد بررسی، بیش‌ترین غلظت ذرات معلق کم‌تر از ۱۰ میکرومتر متعلق به فصل بهار و کم‌ترین غلظت این ذرات متعلق به فصل زمستان بوده است. به‌طور کلی از مجموع ۲۱۹۰ روز مورد بررسی (۲۰۱۲-۲۰۱۷)، در ۳۸ روز غلظت ذرات معلق با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرومتر فراتر از حد مجاز (۲۶۰ میکروگرم بر مترمکعب) بوده است. توزیع زمانی این روزها (جدول ۳) حاکی از آن است که بیش‌ترین تعداد روزهای غبارآلود با مقادیر غلظت PM_{10} بیش‌تر از حد استاندارد جهانی در مقیاس ماهیانه (۲۶۰ میکروگرم بر مترمکعب) مربوط به ماه‌های فصل بهار و تابستان بوده است.

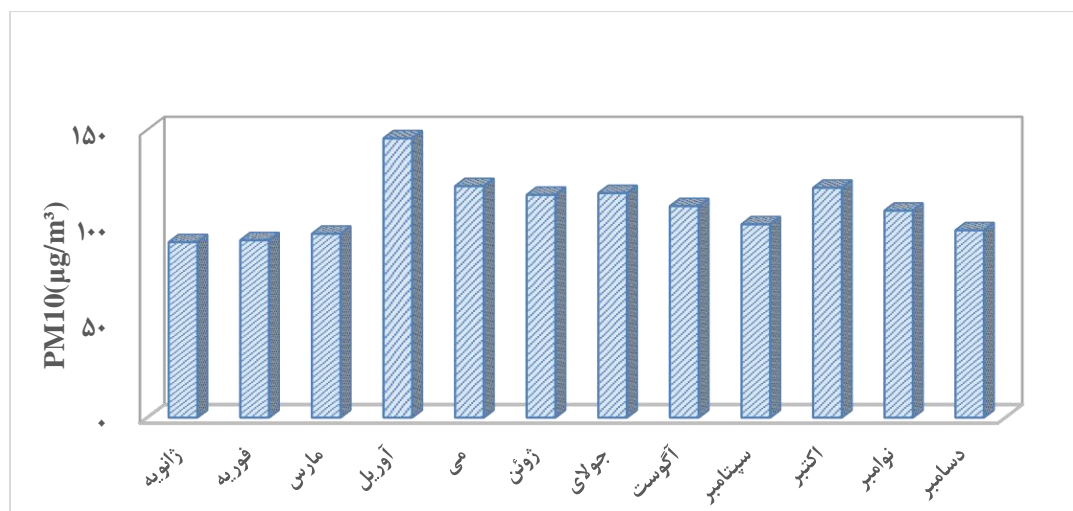


شکل ۳: میانگین فصلی غلظت ذرات معلق در هوای شهر یزد در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۲-۲۰۱۷)

جدول ۳: تعداد روزهای توأم با مقادیر بالاتر از حد استاندارد PM10 هوای شهر یزد در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۲-۲۰۱۷)

سال	تعداد روزها	ماه‌های غبارآلود
۲۰۱۲	۵	می، ژوئن، ژولای
۲۰۱۳	۶	مارس، می، ژوئن
۲۰۱۴	۱	آوریل
۲۰۱۵	۱۱	فوریه، مارس، آوریل، می، ژولای، آگوست
۲۰۱۶	۹	فوریه، می، ژوئن، ژولای، آگوست، نوامبر، دسامبر
۲۰۱۷	۶	ژانویه، مارس، آوریل، می، ژوئن، ژولای

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تغییرات ماهیانه‌ی غلظت PM10 (شکل ۴) نشان می‌دهد که روند تغییر غلظت این ذرات در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۲-۲۰۱۷) تابع الگویی خاص و منظم نبوده است؛ اما کاملاً آشکار است که بیش‌ترین غلظت PM10 (۱۴۵/۵ میکروگرم بر مترمکعب) متعلق به ماه آوریل و کم‌ترین غلظت PM10 متعلق به ماه ژانویه بوده است. بررسی دقیق‌تر نمودار تغییرات ماهیانه غلظت PM10 نشان می‌دهد که هوای شهر یزد در ماه‌های اکتبر، می و آوریل غبارآلودتر از ژانویه، فوریه و مارس بوده است.



شکل ۴: متوسط ماهانه‌ی غلظت ذرات معلق در هوای شهر یزد در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۲-۲۰۱۷)

نظر به اینکه که شهر یزد در مسیر بادهای غبارآلود و در نزدیکی دشت یزد- اردکان (کانون بحرانی تولید گردوغبار استان یزد) واقع شده و از طرفی در مطالعات اخیر به اثبات رسیده که تعداد روزهای غبارآلود بهاره‌ی ناشی از وقوع توفان‌های شن و گردوغبار در بسیاری از مناطق خشک ایران و از جمله در یزد، بیش‌تر از تعداد روزهای غبارآلود سایر فصول بوده است، لذا به نظر می‌رسد یکی از دلایل افزایش غلظت PM10 در فصل بهار، تشدید پدیده‌ی فرسایش بادی در نواحی شمال غربی منطقه‌ی مطالعاتی باشد.

بالاتر بودن میزان غلظت ذرات معلق هوای شهر یزد در ماه‌های فصل بهار در مطالعه‌ی میری و همکاران (۲۰۱۶) نیز به اثبات رسیده که مؤید نتایج تحقیق حاضر است. همان‌گونه که در مقدمه گفته شد، عوامل اقلیمی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر غلظت این ذرات می‌باشند و تحلیل تأثیر این عوامل در هر منطقه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است که در ادامه، نتایج حاصل از بررسی اثر پارامترهای هواشناسی بر تغییر غلظت PM10 برای منطقه‌ی مطالعاتی ارائه شده است.

۴-۲- نقش تغییر اقلیم بر تغییر غلظت PM10

همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، در تحقیق حاضر به‌منظور تعیین میزان همبستگی و نوع ارتباط بین هرکدام از متغیرهای هواشناسی با مقادیر PM10 از روش رگرسیون دومتغیره استفاده گردید. نتایج حاصل از برقراری روابط رگرسیونی دومتغیره بین ۷ پارامتر هواشناسی مورد مطالعه و مقادیر غلظت ذرات معلق در مقیاس زمانی ماهیانه با استفاده از توابع مختلف خطی، لگاریتمی، معکوس، توانی، نمایی، درجه دو، درجه سه، منحنی رشد، ترکیبی و حالت S در جداول شماره‌ی (۴) تا (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۴: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و بارندگی

Sig	F	RMSE	RE	R	نوع مدل	پارامتر
۰/۶۴	۰/۲۳	۵۹/۱۱	۱۶/۰۷	۰/۱۵	linear	بارندگی
۰/۹	۰/۱	۲۹/۵	۱۶/۹	۰/۱۵	quadratic	
۰/۹۷	۰/۰۶	۱۹/۷	۱۷/۹	۰/۱۵	cubic	
۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	compound	
					power	
					S	
۰/۵۴	۰/۴	۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	growth	
۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	exp	
۰/۵۴	۰/۴	۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	logistic	

جدول ۵: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های رگرسیون دومتغیره بین PM10 و متوسط درجه حرارت

Sig	F	RMSE	RE	R	نوع مدل	پارامتر
۰/۰۸	۳/۷	۷۲۵/۶	۱۳/۸	۰/۵۲	linear	T mean (°C)
۰/۰۴	۵/۳	۹۱۷/۳	۱۳/۱	۰/۵۹	logarithmic	
۰/۰۳	۶/۵	۱۰۴۱/۵	۱۲/۶	۰/۶۳	inverse	
۰/۰۵	۴/۱	۶۳۲/۶	۱۲/۳	۰/۶۹	quadratic	
۰/۱۳	۲/۵	۴۲۳/۹۳	۱۳/۰۸	۰/۶۹	cubic	
۰/۰۵۱	۴/۷	۰/۰۶۷	۰/۱۱۷	۰/۵۷	compound	
۰/۰۳	۶/۶	۰/۰۸۱	۰/۱۱	۰/۶۳	power	
۰/۰۲	۸/۰۶	۰/۰۹۱	۰/۱	۰/۶۷	S	
۰/۰۵۴	۴/۷	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۵۷	growth	
۰/۰۵۴	۴/۷	۰/۰۶۶	۰/۱۲	۰/۵۷	exp	
۰/۰۵۴	۴/۷	۰/۰۶۶	۰/۱۱	۰/۵۶	logistic	

جدول ۶: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و درجه حرارت بیشینه

Sig	F	RMSE	RE	R	نوع مدل	پارامتر
۰/۰۷	۴/۲	۷۸۳/۵	۱۳/۶	۰/۵۴	linear	Tmax (°C)
۰/۰۴۹	۴/۹	۸۸۰	۱۳/۲	۰/۵۷	logarithmic	
۰/۰۴	۵/۸	۹۶۹	۱۲/۹	۰/۶	inverse	
۰/۰۳	۴/۸	۶۸۱/۶	۱۱/۹	۰/۷۲	quadratic	
۰/۰۳	۴/۸	۶۸۱/۶	۱۱/۹	۰/۷۲	cubic	
۰/۰۴	۵/۳	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۵۹	compound	
۰/۰۳	۶/۳	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۶۲	power	
۰/۰۲	۷/۳	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۶۵	S	
۰/۰۴	۵/۴	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۵۹	growth	
۰/۰۴	۵/۴	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۵۹	exp	
۰/۰۴	۵/۴	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۵۹	logistic	

جدول ۷: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و درجه حرارت کمینه

Sig	F	RMSE	RE	R	نوع مدل	پارامتر
۰/۱	۳/۱	۶۳۰	۱۴/۱	۰/۴۸	linear	Tmin (°C)
۰/۴	۰/۹	۲۱۷/۸	۱۵/۶	۰/۲۸	logarithmic	
۰/۰۶	۳/۹	۶۱۷	۱۲/۵	۰/۶۸	inverse	
۰/۱۲	۲/۶	۴۳۸	۱۲/۸	۰/۷۱	quadratic	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۴	cubic	
۰/۳	۱/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۳۱	compound	
۰/۰۷	۴/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۴	power	
۰/۰۷	۴/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۴	S	
۰/۰۷	۴/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۴	growth	
۰/۰۷۲	۴/۰۵	۰/۰۵۹	۰/۱۲	۰/۵۳	exp	
۰/۰۷۲	۴/۰۵	۰/۰۵۹	۰/۱۲	۰/۵۳	logistic	

جدول ۸: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و رطوبت نسبی

Sig	F	RMSE	RE	R	نوع مدل	پارامتر
۰/۱۱	۳/۱	۶۳۰	۱۴/۱	۰/۴۹	linear	RH%
۰/۴	۰/۸	۲۱۷	۱۵/۵	۰/۲۸	logarithmic	
۰/۰۶	۳/۹	۶۱۶	۱۲/۵	۰/۶۸	inverse	
۰/۱۲	۲/۶	۴۳۸	۱۲/۸	۰/۷	quadratic	
۰/۰۷	۴/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۳	cubic	
۰/۳	۱/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۳۱	compound	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۴	power	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۳	S	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۳	growth	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۳	exp	
۰/۰۷	۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵۳	logistic	

جدول ۹: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و متوسط سرعت باد

پارامتر	نوع مدل	R	RE	RMSE	F	Sig
WSmean	linear	۰/۳۵	۱۵/۲	۳۱۶	۱/۳	۰/۳
	logarithmic	۰/۳۲	۱۵/۳	۲۸۳	۱/۲	۰/۳
	inverse	۰/۳	۱۵/۴	۲۴۹	۱/۰۴	۰/۳
	quadratic	۰/۵	۱۴/۷	۳۴۱/۵	۱/۶	۰/۲۶
	cubic	۰/۵۱	۱۴/۷	۳۴۳	۱/۶	۰/۲۵
	compound	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۳	۰/۲
	power	۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۱	۰/۳
	S	۰/۳	۰/۱۴	۰/۰۲	۱	۰/۳۴
	growth	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۲۴	۱/۳	۰/۲۷
	exp	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۳	۰/۲۷
logistic	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۲۴	۱/۳۵	۰/۲۷	

جدول ۱۰: پارامترهای آماری مربوط به ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین PM10 و حداکثر سرعت باد

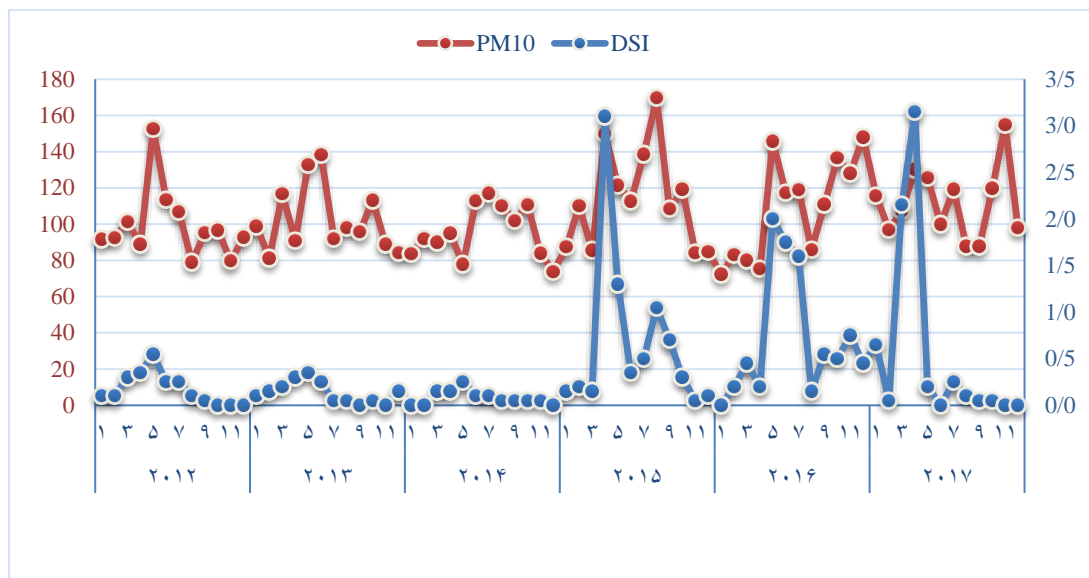
پارامتر	نوع مدل	R	RE	RMSE	F	Sig
WSmax	linear	۰/۳۴	۱۵/۲	۳۰۹	۱/۳	۰/۲۷
	logarithmic	۰/۳۶	۱۵/۱	۳۳۴/۷	۱/۴	۰/۲۵
	inverse	۰/۳۷	۱۵/۱	۳۵۵	۱/۵	۰/۲۴
	quadratic	۰/۳۷	۱۵/۸	۱۸۶	۰/۷۴	۰/۵
	cubic	۰/۳۷	۱۵/۹	۱۸۶/۰۵	۰/۷۴	۰/۵
	compound	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۲	۰/۲۸
	power	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۲۴	۱/۳	۰/۲۷
	S	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۰۲۵	۱/۴	۰/۲۶
	growth	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۰۲۳	۱/۲۵	۰/۲۹
	exp	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۰۲۳	۱/۲۵	۰/۲۸
logistic	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۰۲۳	۱/۲۵	۰/۲۸	

اگرچه بارندگی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین رطوبت خاک و یکی از علل اصلی افزایش سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی و تضعیف رخداد فرسایش بادی و میزان انتشار ذرات گردوغبار است، اما نتایج حاصل از بررسی روابط رگرسیونی مختلف بین پارامتر بارندگی و غلظت PM10 (جدول ۴) حاکی از آن است که این پارامتر مهم اقلیمی، اثر قابل توجهی بر کاهش غلظت ذرات معلق در هوای شهر یزد نداشته؛ زیرا ضرایب همبستگی بین مقادیر PM10 و بارندگی در ۱۰ تابع دومتغیره موردبررسی، غیر معنی‌دار نشان داده شده است ($P \text{ value} > 0.05$)، لذا فرض تأثیر این پارامتر بر روند تغییرات غلظت ذرات معلق رد می‌شود. نتایج ارائه‌شده در جدول (۵) نشان می‌دهد که علی‌رغم بالا بودن ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر میانگین درجه حرارت هوا و غلظت PM10 در روش رگرسیون خطی، درجه سه، ترکیبی، رشد، نمایی و لجستیک، این روابط در سطوح مختلف آماری معنی‌دار نشده‌اند ($P \text{ value} > 0.05$)؛ این در حالی است که در سایر روش‌های رگرسیونی، علاوه بر بالا بودن مقدار ضریب همبستگی پیرسون، رابطه‌ی آماری معنی‌داری بین این پارامترها برقرار شده است ($P \text{ value} < 0.05$). بررسی دقیق‌تر این روابط حاکی از آن است که میزان خطای تخمین و میانگین مربعات خطا در روش‌های لگاریتمی، معکوس و درجه دو بالاتر از میزان خطای تخمین و

میانگین مربعات خطا در روش‌های رگرسیونی توانی و منحنی S بوده است. مقایسه‌ی دو روش توانی و منحنی S نیز نشان می‌دهد که بین مقادیر خطای نسبی و میانگین مربعات خطای محاسبه‌شده با استفاده از این دو روش اختلاف ناچیزی وجود دارد؛ این در حالی است که مقدار آماره‌ی F در روش رگرسیونی S بالاتر از روش توانی است؛ بنابراین می‌توان گفت از بین ۵ تابع لگاریتمی، معکوس، درجه دو، توانی و منحنی S که می‌توانند با سطوح آماری قابل‌قبول، تغییرات غلظت ذرات معلق را در منطقه‌ی مطالعاتی توجیه کنند، تابع منحنی S بر دیگر روش‌ها ارجحیت دارد. به بیانی دیگر، مدل رگرسیونی حاصل از این روش می‌تواند ۶۷٪ تغییر غلظت ذرات معلق را در منطقه توجیه کند. نتایج حاصل از بررسی روابط رگرسیونی بین درجه حرارت بیشینه و غلظت PM10 (جدول ۶) بیانگر آن است که هیچ‌گونه رابطه‌ی معنی‌دار خطی بین این دو پارامتر وجود ندارد؛ این در حالی است که تمامی روابط غیرخطی موردبررسی به‌ویژه روش‌های ترکیبی، توانی، منحنی S، تابع رشد، نمایی و لجستیک (به دلیل بالاتر بودن ضریب همبستگی و آماره‌ی F و نیز پایین بودن میزان خطا) نسبت به روش لگاریتمی، معکوس، درجه دو و سه توانسته‌اند به‌خوبی تغییرات غلظت ذرات معلق را در منطقه‌ی مطالعاتی توجیه کنند. مقایسه‌ی دقیق‌تر این روش‌ها نشان می‌دهد که روش منحنی S از درجه اعتبار بیش‌تری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. بررسی کلی نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های مختلف رگرسیون دومتغیره بین مقادیر غلظت ذرات معلق و سایر پارامترهای هواشناسی موردبررسی (درجه حرارت کمینه، رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد و حداکثر سرعت باد) در منطقه‌ی مطالعاتی نشان می‌دهد که علی‌رغم بالا بودن مقدار ضریب همبستگی بین برخی پارامترهای موردبررسی (رطوبت نسبی و دمای کمینه) و غلظت PM10، استفاده از آن‌ها برای توجیه روند تغییر غلظت مواد معلق از لحاظ آماری درست نیست؛ زیرا هیچ‌گونه همبستگی معنی‌داری بین این پارامترها ($P \text{ value} > 0.05$) برقرار نشده است. لذا بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان اذعان کرد که تغییر غلظت ذرات با قطر آئرودینامیکی کم‌تر از ۱۰ میکرومتر در شهرستان یزد، فقط تحت تأثیر تغییرات متوسط درجه حرارت ماهیانه و ماکزیمم درجه حرارت در منطقه‌ی مطالعاتی بوده است. به نظر می‌رسد دما از طریق تأثیر دوگانه‌ی خود منجر به افزایش ریزگردها در هوای شهر یزد شده است؛ زیرا از یک‌طرف افزایش دما باعث کاهش میزان رطوبت خاک و در نتیجه کاهش سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی و افزایش توان باد برای حمل ذرات خاک می‌شود و از دیگر سو با افزایش تنش خشکی در گیاهان و از بین رفتن پوشش‌های گیاهی در منطقه منجر به افزایش وقوع پدیده‌ی فرسایش بادی و غبارآلودگی هوا می‌شود. به‌طورکلی نتایج حاصل از این مرحله از پژوهش حاضر نشان داد که مهم‌ترین عامل اقلیمی مؤثر بر تغییر غلظت ذرات معلق، تغییرات دمای هوا بوده است که با یافته‌های برخی از پژوهش‌های گذشته (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ نظری و همکاران، ۱۳۹۲؛ جمشیدی و همکاران، ۱۳۸۶) مطابقت دارد.

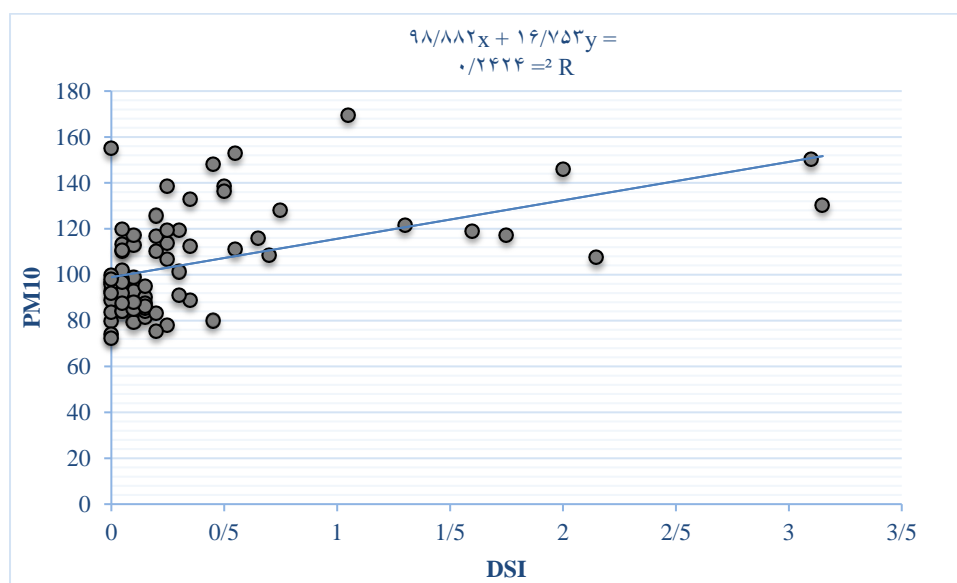
۳-۴- بررسی ارتباط غلظت ذرات معلق و شاخص توفان گردوغبار

به‌منظور تحلیل نقش پدیده‌ی فرسایش بادی بر تغییر غلظت ذرات معلق هوای شهر یزد اقدام به برقراری روابط رگرسیون دومتغیره بین مقادیر متوسط ماهیانه‌ی PM10 و شاخص توفان گردوغبار گردید. مقادیر مربوط به این پارامترها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: مقادیر متوسط ماهیانه‌ی غلظت ذرات معلق و شاخص توفان گردوغبار شهر یزد

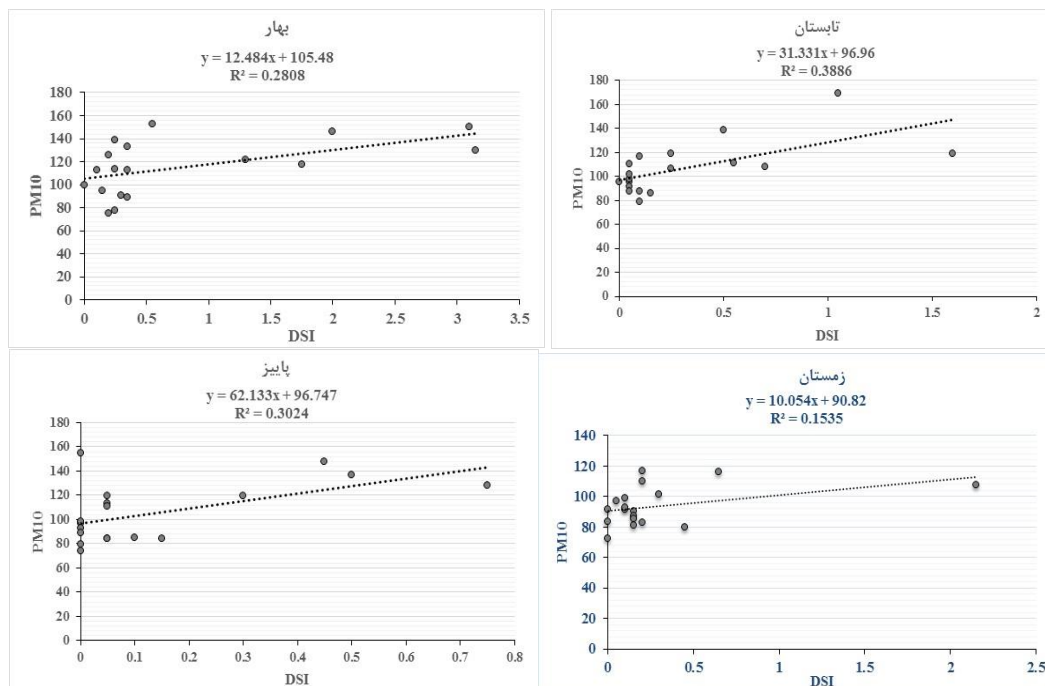
مقادیر متوسط ماهیانه‌ی شاخص توفان گردوغبار (شکل ۵) بیانگر تشدید وقوع رخداد فرسایش بادی در منطقه‌ی مطالعاتی است. در بازه‌ی زمانی موردبررسی، بیش‌ترین شدت فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ به وقوع پیوسته است. در این مدت افزایش غلظت ذرات، تابعی از افزایش رخدادهای فرسایش بادی بوده است. میزان تأثیر این پدیده بر تغییر غلظت آلاینده‌های شهر یزد، نسبتاً قابل‌توجه بوده است؛ زیرا ضریب تعیین حاصل از برازش مدل رگرسیونی بین PM10 و DSI، ۰/۲۴ تخمین زده شده است (شکل ۶).



شکل ۶: نمودار حاصل از برازش مقادیر متوسط غلظت ذرات معلق و شاخص توفان گردوغبار شهر یزد

درواقع، این نتایج بیانگر آن است که ۲۴٪ تغییرات سالانه‌ی غلظت ذرات معلق به علت افزایش فعالیت رخدادهای شن و گردوغبار بوده است که بیش‌ترین مقدار این تغییرات به وسیله‌ی تغییر متغیرهای موردبررسی در فصل تابستان (۳۸٪) و کم‌ترین آن در اثر تغییرپذیری آن‌ها در فصل زمستان (۱۵٪) قابل تبیین است. به‌طورکلی، میزان تأثیرپذیری غلظت ذرات معلق از رخداد فرسایش بادی در فصول پاییز و بهار به ترتیب ۳۰٪ و ۲۸٪ برآورد شده است

(شکل ۷). گرچه بر اساس مطالعات انجام شده توسط میری و همکاران (۲۰۱۳)، غلظت ذرات معلق هوای شهر یزد در فصل بهار قبل از بازه‌ی زمانی مورد بررسی این تحقیق حداکثر بوده است؛ اما بر اساس نتایج پژوهش حاضر، انتشار ذرات گردوغبار ناشی از وقوع فرسایش بادی، اثر مهمی در به حداکثر رساندن ذرات PM10 در فصل تابستان بعد از بازه‌ی زمانی مورد بررسی آن‌ها داشته است. این نتایج می‌تواند بیانگر تشدید بیابان‌زایی ناشی از پدیده‌ی فرسایش بادی در این فصل و به‌ویژه در سال‌های اخیر باشد که بر اساس نتایج پژوهش حاضر، علت اصلی آن نوسانات دمای متوسط هوای شهر یزد در این سال‌ها بوده است. در واقع، یافته‌های تحقیق حاضر، نقش مهم توفان‌های شن و گردوغبار تابستانه در افزایش غلظت ذرات معلق کم‌تر از ۱۰ میکرومتر در هوای شهر یزد طی سال‌های اخیر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مهم‌ترین منبع انتشار این ذرات، دشت یزد- اردکان است که در شمال غربی منطقه‌ی مطالعاتی قرار دارد و شهرستان یزد در مسیر عبور جریان‌های غبارآلود واقع شده است (Azimzaseh et al., 2008)، انتظار می‌رود که بخش عمده‌ی این ذرات، از این کانون بحرانی تأمین شده باشد. البته اثبات این ادعا نیاز به پژوهش‌های دقیق‌تر و مفصل‌تری دارد که در راستای اهداف مطالعه‌ی حاضر نیست و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۷: نمودار حاصل از برازش مقادیر متوسط ماهیانه‌ی غلظت ذرات معلق و شاخص توفان گردوغبار شهر یزد در مقیاس فصلی (هر نقطه، یک ماه از فصل مورد نظر را نشان می‌دهد)

۵- نتیجه‌گیری

آلودگی هوای شهرها، نیازمند شناخت دقیق عوامل مؤثر بر آن است که موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها بر فراز شهرها، به‌ویژه شهرهای صنعتی واقع در مناطق بیابانی گردیده است. این مسئله، مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به دنبال داشته است که از جمله می‌توان به مسئله‌ی تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در اثر تجمع این ذرات در جو اشاره کرد؛ لذا با توجه به اهمیت این پدیده و گسترش وسیع مکانی آن در شهرستان یزد به‌عنوان یک منطقه‌ی صنعتی و بیابانی، ضرورت انجام این تحقیق، بیش‌ازپیش احساس می‌گردد. یافته‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان غلظت ذرات معلق هوای شهر یزد، در فصول گرم سال بیش‌تر از بقیه‌ی ایام سال و بالاتر از حد استاندارد جهانی بوده است. مهم‌ترین علت روند افزایشی غلظت ذرات معلق بر فراز این شهر، تغییرات دمای هوا و وقوع پدیده‌ی فرسایش

بادی به‌ویژه در فصل تابستان سال‌های اخیر شناخته شده است. نظر به اینکه کنترل شرایط اقلیمی خارج از کنترل بشر است و از طرفی مهار پدیده‌ی زیان‌بار فرسایش بادی می‌تواند در حیطه‌ی کنترل بشر باشد، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی‌های اساسی و اصولی در راستای بهبود وضعیت اکولوژیکی این منطقه انجام گیرد؛ لذا با توجه به شرایط بوم‌شناختی منطقه توصیه می‌شود اقدامات مدیریتی و اجرایی لازم از قبیل مالچ‌پاشی در کانون‌های بحرانی تولید گردوغبار و کاشت گیاهان مقاوم به تنش‌های حرارتی و خشکی در فضای سبز شهری و احداث بادشکن‌های زنده و غیرزنده در حومه‌ی شهر به‌منظور کاهش غلظت این نوع آلاینده‌ها انجام شود. در غیر این صورت پیامدهای نامطلوب آن، سلامت عده‌ی زیادی از ساکنین این منطقه را به خطر خواهد انداخت. علاوه بر این، با توجه به اینکه پژوهش حاضر برای دوره‌ی آماری ۶ ساله (۲۰۱۷-۲۰۱۲) انجام شده است، پیشنهاد می‌گردد که در سال‌های آتی نیز به تناوب این‌گونه بررسی‌ها انجام گیرد تا درک بیش‌تری از روند تغییر غلظت ذرات معلق و علل این تغییرات به دست آید.

۶- منابع

- ۱- رحیمی، محمد، یزدانی، محمدرضا، اسدی، مسلم، حیدری محمد طالب (۱۳۹۴). بررسی آلودگی هوای شهر سنندج با تأکید بر تغییرات زمانی غلظت PM10. دو فصلنامه‌ی علمی- پژوهشی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۱۱، صص ۹۹-۱۱۶.
- ۲- عزیزی‌فر، محمد، صفدری، مرتضی، ندافی، کاظم، تیرایی، یاسر (۱۳۹۱). بررسی ارتباط بین غلظت PM2.5، PM1 و PM10 و پارامترهای هواشناسی در هوای شهر قم، پانزدهمین همایش ملی بهداشت محیط، قم.
- ۳- عطا‌فر، زهرا، اسلامی، اکبر، پیرصاحب، مقداد، اسدی، فاطمه (۱۳۹۳). بررسی روند تغییرات غلظت ذرات معلق (PM10) و تعیین شاخص کیفیت هوا در شهر کرمانشاه، فصلنامه‌ی بهداشت در عرصه، دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱، صص ۱۹-۲۸.
- ۴- نظری، زینب، خراسانی، نعمت‌الله، فیض‌نیا، سادات، کرمی، محمود (۱۳۹۲). بررسی تغییرات زمانی غلظت PM10 و تأثیر پارامترهای هواشناسی بر آن طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۸۴، نشریه‌ی محیط زیست طبیعی، دوره‌ی ۶۶، شماره‌ی ۱، صص ۱۱۱-۱۰۱.
- ۵- ولی، عباسعلی، روستایی، فاطمه (۱۳۹۶). بررسی روند فرسایش بادی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص توفان گردوغبار در پنجاه سال اخیر. نشریه‌ی علوم آب و خاک- علوم و فنون کشاورزی و منابع، دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۴، صص ۱۸۹-۲۰۰.
- 6- Ashpole I, Washington R. (2013). A new high-resolution central and western Saharan summertime dust source map from automated satellite dust plume tracking. *J Geophys Res* 118:6981-6995. doi:10.1002/jgrd.50554.
- 7- Azimzadeh, H. R., Ekhtesasi, M. R., Refahi, H. G., Rohipour, H., & Gorji, M. (2008). Wind erosion measurement on fallow lands of Yazd-Ardakan plain, Iran. *Desert*, 13(2), 167-174.
- 8- Chai, T., Draxler, R.R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?-Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development* 7, 1247-1250.
- 9- Das, G. (2000). *Hydrology and Soil Conservation Engineering* Prentice-Hal of India Press, 489p.
- 10- Daryanoosh, M., Goudarzi, G., Rashidi, R., Keishams, F., Hopke, P.K., Mohammadi, M.J., Nourmoradi, H., Sicard, P., Takdastan, A., Vosoughi, M. (2018). Risk of morbidity attributed to ambient PM10 in the western cities of Iran. *Toxin Reviews* 37, 313-318.
- 11- Faraji, M., Pourpak, Z., Naddafi, K., Nodehi, R.N., Nicknam, M.H., Shamsipour, M., Rezaei, S., Ghoskhal, M.G., Ghanbarian, M., Mesdaghinia, A. (2018). Effects of airborne particulate matter (PM10) from dust storm and thermal inversion on global DNA methylation in human peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) in vitro. *Atmospheric Environment* 195, 170-178.
- 12- Gautam, S., Patra, A.K., Sahu, S.P., Hitch, M. (2018). Particulate matter pollution in opencast coal mining areas: a threat to human health and environment. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 32, 75-92.

- 13- Islami, A., Attafar, Z., Pirashab, M and Asadi, F. (2014). Investigation of the process of changes in suspended particle concentration and determination of air quality index in Kermanshah city from 2005 to 2012, *Journal of Sanitary Engineering*, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Faculty of Health, Volume 2, Issue 1, pp. 28-19.
- 14- Jassim, M.S., Coskuner, G., Munir, S. (2018). Temporal analysis of air pollution and its relationship with meteorological parameters in Bahrain, 2006–2012. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 62.
- 15- Jury, W.A., Stolzy, L.H. (2018). *Soil physics, Handbook of Soils and Climate in Agriculture*. CRC Press, pp. 131-158.
- 16- Miri, M., Jamshidi, S., Derakhshan, Z., Gholizadeh, A., Karimi, H., Amanalikhani, S., Hashemi, S.Y. (2016). Spatial analysis and source identification of particulate matter (PM10) in Yazd city. *Journal of Community Health Research* 5, 45-56.
- 17- Modarres, R., Sadeghi, S. (2018). Spatial and temporal trends of dust storms across desert areas of Iran. *Natural Hazards* 90, 101-114.
- 18- Munir, S. (2016). Modelling the non-linear association of particulate matter (PM 10) with meteorological parameters and other air pollutants—a case study in Makkah. *Arabian Journal of Geosciences* 9, 64.
- 19- Namdari, S., Karimi, N., Sorooshian, A., Mohammadi, G., Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric Environment* 173, 265-276.
- 20- Shahsooni, A., Yar-Ahmadi, M., Mosadaghinia, A., Younesian, M., Jafarzadeh, N., Naemabadi, A.S., Nadafi, K. (2012). Analysis of the trend of entering dust to Iran with an emphasis on Khuzestan province, *Journal of Hakim Research* 15, 192-202.
- 21- Sharafi, K., Khosravi, T., Moradi, M., Pirsaeheb, M. (2015). Air quality and variations in PM10 pollutant concentration in Western Iran during a four-year period (2008–2011), Kermanshah—a case study. *Journal of Engineering Science and Technology* 10, 47-56.
- 22- Stix, J., de Moor, J.M., Rüdiger, J., Alan, A., Corrales, E., D'Arcy, F., Diaz, J.A., Liotta, M. (2018). Using drones and miniaturized instrumentation to study degassing at Turrialba and Masaya volcanoes, Central America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 6501-6520.
- 23- Tan, S.-C., Li, J., Che, H., Chen, B., Wang, H. (2017). Transport of East Asian dust storms to the marginal seas of China and the southern North Pacific in spring 2010. *Atmospheric Environment* 148, 316-328.
- 24- Wang, P., Cao, J., Tie, X., Wang, G., Li, G., Hu, T., Wu, Y., Xu, Y., Xu, G., Zhao, Y. (2015). Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM2. 5 and PM10 mass concentrations during 2010 in Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research* 15, 1844-1854.
- 25- O'Loingsigh, T., G.McTainsh, E. Tews, C. Strong, J. Leys, P. Shinkfield and N. Tapper. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research* 12: 29-40.