

## پیش‌بینی میانگین حداکثر سرعت سالیانه باد در منطقه سیستان با استفاده از روش رگرسیون فضایی- زمانی

احمد حسینی<sup>۱</sup>؛ استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیای دانشگاه پیام نور(واحد بیرجند)، بیرجند، ایران.  
عماد اشتتری نژاد؛ دکتری آمار ریاضی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰  
پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

### چکیده

باد یک کمیت برداری است که از مراکز پرفشار به طرف مراکز کم فشار به حرکت در می‌آید و با دو فاکتور سنجیده می‌شود، جهت باد که مبدأ آن شمال جغرافیایی بوده و در جهت عقربه‌های ساعت درجهات آن افزایش می‌یابد و سرعت باد که جریان افقی هوا است که در واحد زمان سنجیده می‌شود. سرعت حرکت باد می‌تواند با تفکیک ذرات کلوئیدی شامل رس و سلیت را از محل تخریب تا فاصله صدها کیلومتر منتقل کند. مطالعات نشان می‌دهد که بیشترین روزهای گرد و غباری در مناطق شرقی کشور به وقوع می‌پیوندد به طوری که در محدوده وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فراوانی وقوع گرد و غبار در سال به بیش از ۱۵۰ روز می‌رسد. لذا با توجه به اهمیت موضوع بررسی و پیش‌بینی میانگین عددی حداکثر سرعت باد سالیانه با استفاده از روش رگرسیون فضایی- زمانی در این تحقیق مد نظر قرار گرفت بررسی پارامترهایی همچون: خود همبستگی، ایستایی، نرمال بودن خطاهای عدم همبستگی آنها، همسانی واریانس خطاهای و برسی هم خطی با استفاده از شاخص تورم واریانس نشان داد که مدل‌های عددی رگرسیون فضایی- زمانی داده‌ها، این قابلیت را دارند که می‌توانند میانگین حداکثر سرعت باد را در طی سالهای آینده پیش‌بینی کنند نتایج نیز نشان می‌دهد که رگرسیون فضایی- زمانی تا سال ۲۰۲۲ می‌تواند سرعت باد را پیش‌بینی کند مدل عددی بیانگر آنست که کمترین میانگین سالیانه سرعت باد طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ مربوط به ایستگاه قاین است و روند پیش‌بینی آن نشان می‌دهد تا سال ۲۰۲۲ از میانگین سالیانه سرعت باد کاسته می‌شود. بیشترین میزان میانگین سالیانه سرعت باد مربوط به ایستگاه زابل است که روند پیش‌بینی این ایستگاه نشان می‌دهد از میانگین سالیانه سرعت باد تا ۲۰۲۲ کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون فضایی- زمانی، پیش‌بینی سرعت باد سالیانه، منطقه سیستان

## مقدمه

باد جریان هوایی است که از مراکز پرفشار به طرف مراکز کم فشار به حرکت در می‌آید. (ولايتی، ۱۳۸۵: ۲۶). هر چند گردابیان فشار بین دو نقطه بیشتر باشد شدت جریان هوا نیز بیشتر و باد قوی تر خواهد بود (اجلالی، ۱۳۸۷: ۱۶۰). معمولاً سرعت باد با تفکیک مواد نرم سطحی از محل تخریب شروع می‌شود و تا فاصله صدها کیلومتری ادامه پیدا می‌کند و گرد و غبار حاصله از آن که اغلب از ذرات کلورئیدی (رس و سیلت) تشکیل شده است، کمتر تابع مانع بوده و بیشتر به قدرت حرکت باد بستگی دارد (سالاری، ۱۳۷۵: ۳۶). مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد و کاهش پوشش گیاهی، میزان گرد و غبار افزایش می‌یابد (Kurosaki & Mikami, ۲۰۰۵). نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل توزیع زمانی- مکانی طوفان‌های شن و ماسه در منطقه کیسلین گل مغولستان داخلی توسط مانگ- مانگ گو و دیگران (Mang-Mang Gou & etc., ۲۰۱۰) نشان داد که عواملی مانند بادهای قوی نسبت به باران و حرارت تأثیری بیشتری بر طوفان شن و ماسه دارند ضریب همبستگی بین روز طوفان شن و ماسه و روز باد قوی ۰/۸۹ است. بیشترین روزهای طوفان شن و ماسه در غرب نسبت به شرق دیده می‌شود به طوری که فرکانس طوفان شن در ۳۰ سال گذشته به طور مداوم کاهش یافته است.

مطالعات در ایران نیز نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد با افزایش گرد و غبار رابطه مستقیمی دارد، بررسی آماری پدیده گرد و غبار و تحلیل الگوی وزش بادهای مولد در شهرستان سبزوار نشان داد که بیشترین احتمال وقوع گرد و غبار در ماه‌های اردیبهشت و خرداد است و در بیش از ۷۱ درصد مواقع سرعت باد در ساعت بعد از ظهر افزایش می‌یابد (مهرشاهی و نکونام، ۱۳۸۸).

اهمیت این مسئله در منطقه سیستان به حدی است که مک ماهون (McMahon, ۱۹۰۵) هنگامی که به همراه یک گروه تحقیقاتی ۱۰۰۰ نفره برای مدت دو سال در صدد نقشه برداری از مرزهای شرقی ایران بود، به دفعات با طوفان‌های شدیدی در منطقه سیستان مواجه شد، بنا به اظهارات ماهون «در سرزمین بادها»، باد ۱۲۰ روزه باشد و تداوم بالای خود طی ماه‌های ژوئن تا سپتامبر ۱۹۰۴، ضمن ایجاد طوفان‌های گرد و غباری و ماسه ای سهمگین علاوه بر جایگزین نمودن باتلاق‌های عمیق با تپه‌های ماسه ای به ارتفاع ۳ متر، یکی دو روزتا را نیز در زمان اقامت آن‌ها در محدوده سیستان دفن نموده است. در همین زمینه بررسی‌های انجام شده پروسپرو و همکاران (Prospero, & etc., ۲۰۰۲) نشان داد که در ایران وقوع طوفان‌ها به شدت از توپوگرافی منطقه تأثیر می‌گیرد به طوری که در چاله‌های محصور شده سیستان میزان طوفان‌های گرد و غباری به شدت افزایش پیدا می‌کند. در این زمینه می‌توان گفت عامل اصلی ایجاد طوفان‌های گرد و غباری منطقه سیستان بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، تشکیل یک ناحیه‌ی پرفشار در شمال شرقی ایران و دریای خزر، وجود یک مرکز کم فشار در شرق ایران در فصل تابستان است (حسین‌زاده، ۱۳۷۶).

مطالعات نشان می‌دهد که در محدوده وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فراوانی وقوع گرد و غبار در سال به بیش از ۱۵۰ روز می‌رسد (علیجانی، ۱۳۸۲: ۳۴). نتایج نهایی در خصوص تحلیل فضایی و زمانی کدهای طوفان‌های گرد و غباری نشان داد که ایستگاه زابل با میانگین فراوانی ۱۸۳ روز بیشترین تعداد روزهای طوفانی و پس از آن ایستگاه زاهدان، طبس، ایرانشهر، به ترتیب بیشترین فراوانی‌ها را دارند (فرج‌زاده، ۱۳۹۰). همچنین مطالعات در شهر زابل نشان می‌دهد که هزینه بیماری‌های تنفسی از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۴ بیش از ۷۰ میلیون دلار تخمین زده است (میری و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت از دیگر مطالعاتی که در زمینه گرد و غبار در منطقه سیستان صورت گرفته است می‌توان به

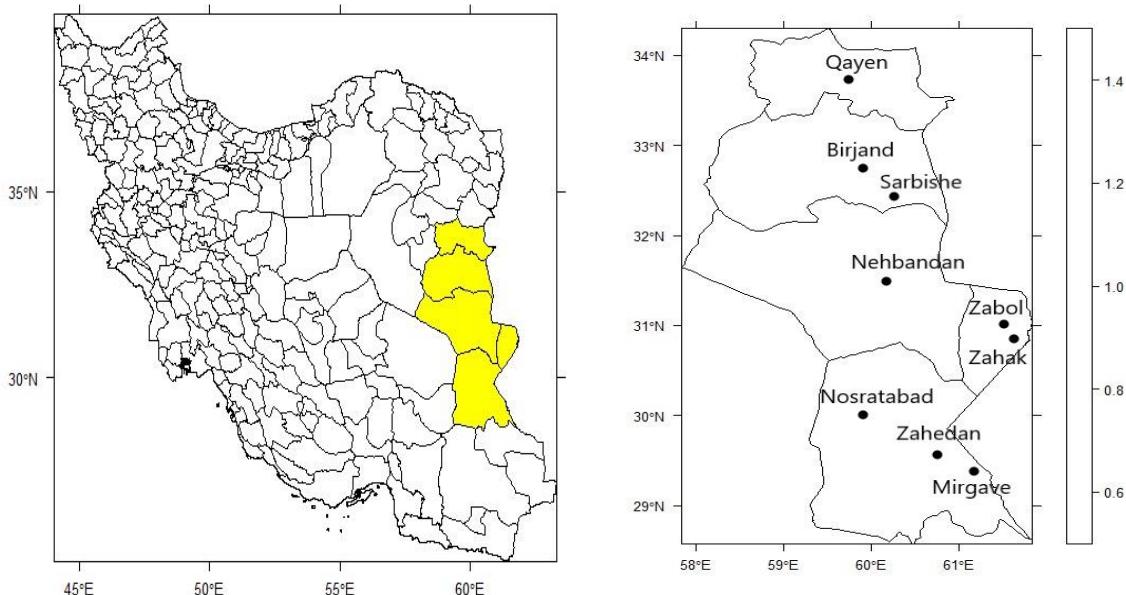
ایرانمنش و همکاران (۱۳۸۴)، (راشکی و همکاران، ۱۳۸۶)، خسروی محمود (۱۳۸۹)، واشنگتن و همکاران (Washington & etc, ۲۰۰۰) اشاره کرد.

بر این اساس و با توجه به مطالعات انجام شده و اهمیت موضوع، بررسی و پیش بینی میانگین سالانه حداکثر سرعت باد در منطقه سیستان در این تحقیق با کمک مدل عددی رگرسیون فضایی - زمانی مد نظر قرار گرفت در این خصوص می توان گفت مدل های عددی این قابلیت را دارند که می توانند مقادیر حداکثر سرعت باد را با الگوریتم عددی مناسب، رفتار طبیعی آنها در طی سالهای آینده پیش بینی کنند که نتایج آن برای تک تک ایستگاه های مورد مطالعه با کمترین میزان خطای قابل استخراج است. براین اساس، در این تحقیق میانگین حد اکثرسرعت باد سالانه در منطقه سیستان تا سال ۲۰۲۲ پیش بینی شده است.

### داده ها و روش کار

#### • قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

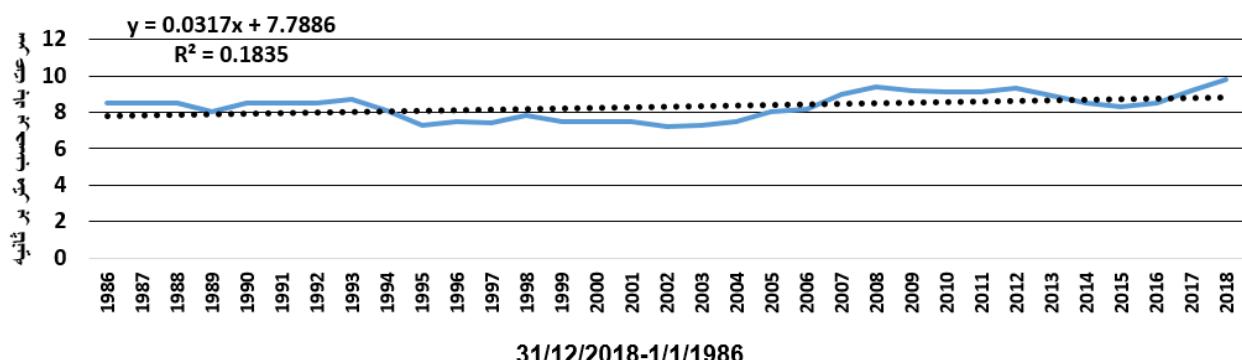
محدوده مورد مطالعه به ترتیب بین ۵۸ تا ۶۲ و ۲۸ تا ۳۵ درجه طول و عرض جغرافیایی در شرق ایران واقع شده است که به آن حوزه سیستان گفته می شود این منطقه محدوده بادهای ۱۲۰ روزه سیستان است که از نیمه اردبیهشت ماه شروع و تا اواسط شهریور ماه ادامه دارد (حمیدیان پور، ۱۳۹۲).



شکل شماره (۱): منطقه مورد مطالعه

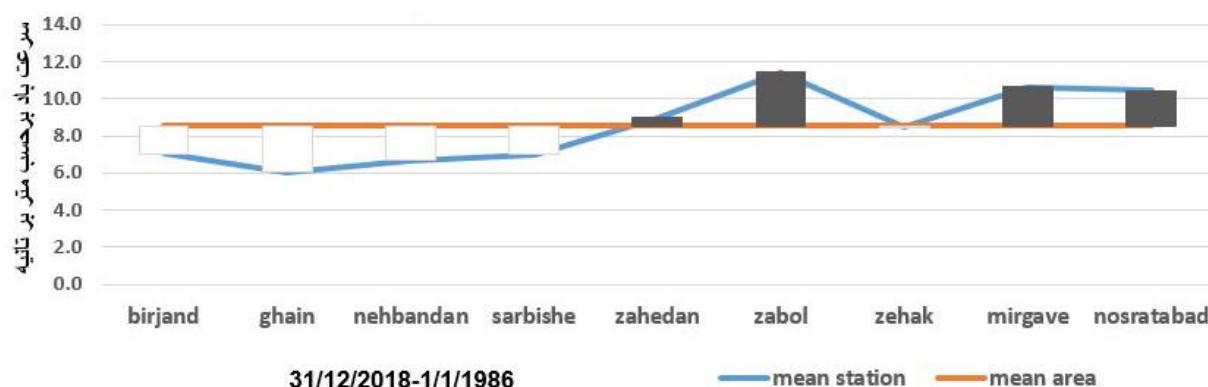
#### - توصیف حداکثر سرعت باد سالیانه

به منظور تحلیل سرعت باد در منطقه مورد مطالعه، آمار حداکثر سرعت روزانه باد در ایستگاه های مورد نظر تهیه شد. سپس نمودار سری زمانی میانگین سرعت باد رسم شد. همان طور که شکل ۲ نشان می دهد سرعت باد روندی افزایشی دارد که حدوداً از ۸/۲ متر در ثانیه در سال ۱۹۸۶ شروع شده و به ۱۰ متر در ثانیه در سال ۲۰۱۸ می رسد.



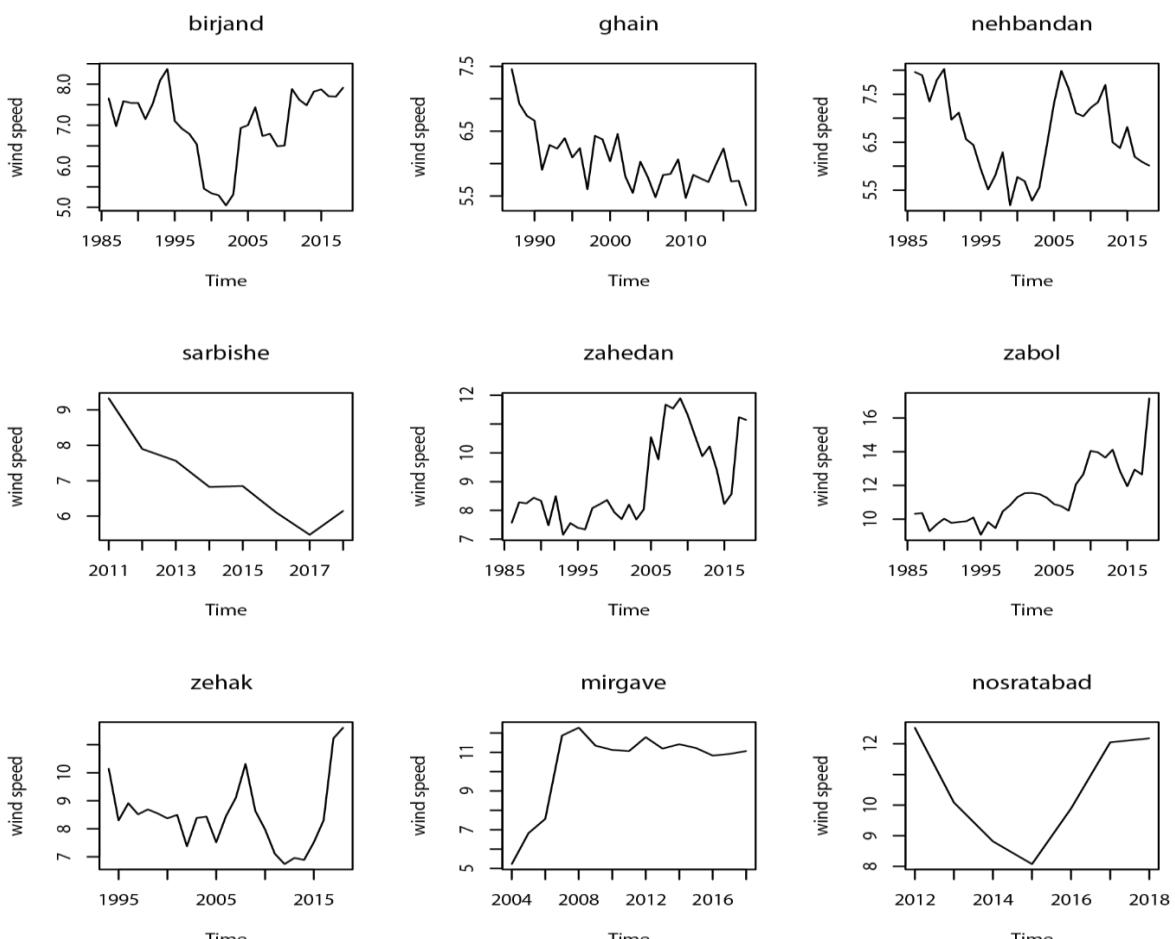
شکل شماره (۲) : روند تغییرات میانگین سالیانه حداکثر سرعت باد

همچنین میزان سرعت باد در کلیه ایستگاه ها در طول دوره آماری نشان می دهد که ایستگاه قاین با میانگین ۶ متر در ثانیه و ایستگاه زابل با میانگین تقریبا ۱۲ متر در ثانیه به ترتیب کمترین و بیشترین میانگین سالیانه حداکثر سرعت باد را در طول دوره آماری داشته اند (شکل ۳)



شکل (۳) میانگین حداکثر سرعت باد روزانه

در این خصوص به منظور بررسی وضعیت حداکثر سرعت باد در تک ایستگاه ها ، نمودار سری زمانی آنها نیز رسم شد. همان طور که شکل ۴ نشان می دهد سرعت باد در اکثر ایستگاه ها روندی افزایشی دارد.



شکل شماره (۴) : سری زمانی حداکثر سرعت باد سالیانه به تفکیک هریک از ایستگاه ها

با این وجود با توجه به اهمیت موضوع و اثرات زیست محیطی طوفان های گرد و غباری و نقش اصلی سرعت باد در وقوع پدیده گرد و غبار، پیش بینی آن در سال های آینده با استفاده از روش آماری رگرسیون فضایی- زمانی ۱ و با کمک نرم افزار R<sup>۲</sup> و با استفاده از بسته نرم افزاری<sup>۳</sup> spdep<sup>۴</sup> (Luc Anselin, ۲۰۰۳)، (Bivand & etc. ۲۰۲۰) و با استفاده از بسته KML (Hengl & etc., ۲۰۱۵) در این تحقیق مذکور قرار گرفته است.

#### - خود همبستگی داده ها<sup>۵</sup>

در آمار اغلب به منظور بررسی همبستگی بین داده ها از شاخص ضریب همبستگی استفاده می شود. در بررسی های سری زمانی و برای همبستگی بین داده ها با تأخیر زمانی در این تحقیق از شاخص خوهمبستگی با استفاده از رابطه زیر استفاده شده است (Cryer & Chan. ۲۰۰۸:۴۹).

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (Z_t - \bar{Z})(Z_{t-k} - \bar{Z})}{\sum_{t=1}^n (Z_t - \bar{Z})^2}$$

که در آن  $Z_t$  مقدار یک متغیر همانند سرعت باد در زمان  $t$ ،  $k$  تأخیر زمانی و  $n$  حجم داده ها است.

۱. Spatio-temporal regression.

۲. R Development Core Team. ۲۰۱۸.

۳. spdep package.

۴. Autocorrelation data.

خود همبستگی داده‌ها قبل از تجزیه تحلیل فضایی - زمانی از اهمیت بالایی برخودار است. و داده‌ها باید در درون خودشان وابستگی زمانی داشته باشند به عنوان مثال این موضوع نشان می‌دهد سرعت باد در ایستگاه نهیندان چند روز ادامه دارد آیا سرعت باد امروز به دیروز وابسته است یعنی ارقام آن شبیه به یکدیگرند و چنانچه پاسخ مثبت باشد این وابستگی تا چند روز ادامه دارد با این فرض قابلیت پیش‌بینی داده‌ها و حدود زمانی پیش‌بینی آنها مطرح می‌شود و چنان‌چه این فرض برقرار نباشد، نمی‌توان از روش‌های فضایی- زمانی استفاده کرد و داده‌ها قابلیت پیش‌بینی ندارند.

#### - ایستایی داده‌ها<sup>۱</sup>

باید به این نکته توجه داشت که زمانی می‌توانیم از شاخص خودهمبستگی استفاده کنیم که داده‌های مورد مطالعه مانا (ایستا) باشند. این موضوع بیانگر این نکته است که روابط بین هر زیرمجموعه از داده‌ها بدون توجه به موقعیت قرار گرفتن نقاط در فضای یکسان باقی بماند. فاصله دو موقعیت  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  در فضای  $n$  بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود(محمدزاده، ۱۳۹۴: ۲۰):

$$\|h\| = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}$$

در صورتی که توزیع داده‌ها تنها به فاصله آن‌ها( $\|h\|$ ) بستگی داشته باشد نه موقعیت مکانی آن‌ها، داده‌های مورد مطالعه ایستا هستند. برای بررسی ماناگی می‌توان فرضیه آماری زیر را در نظر گرفت:(محمدزاده، ۱۳۹۴: ۱۳):

داده‌ها مانا نیستند:  $H_0$

داده‌ها مانا هستند:  $H_1$

برای بررسی ماناگی از آزمون ریشه واحد را برای داده‌های فضایی- زمانی استفاده می‌شود. در این آزمون برای متغیر  $z_{s,t}$  ابتدا مدل رگرسیون زیر را برآورد شد:(محمدزاده، ۱۳۹۴):

$$\begin{aligned}\Delta z_{s,t} &= \beta z_{s,t-1} + \varepsilon_{s,t} \\ \Delta z_{s,t} &= z_{s,t} - z_{s,t-1}\end{aligned}$$

که در آن:

$z_{s,t}$  متغیر در زمان  $t$  و موقعیت  $s$ ،  $\varepsilon_s$  موقعیت نزدیک ترین ایستگاه به ایستگاه با موقعیت  $s$  است. در صورتی که در مدل فوق معنی دار باشد فرضیه ماناگی تأیید می‌گردد.

#### • تعیین نوع رگرسیون فضایی- زمانی

برای انجام رگرسیون فضایی- زمانی سه پیش‌فرض شامل: نرمال بودن جملات خطاهای خطاهای و همسانی واریانس خطاهای بررسی شود. چنانچه تمامی پیش‌فرضها برقرار باشد می‌توان از برآوردگر کمترین مربعات خطای<sup>۲</sup> (*OLS*) در غیر این صورت حتی اگر یکی از این پیش‌فرضها برقرار نباشد از رگرسیون فضایی- زمانی تعمیم یافته<sup>۳</sup> (Anselin & etc. ۲۰۱۰: ۷۳-۸۹). برای برآش مدل استفاده می‌شود (*GLM*).

۱. Stationary data.  
۲. Ordinary Least Square.  
۳. Generalized Linear Model.

### - آزمون نرمال بودن خطاهای

جهت انجام رگرسیون فضایی - زمانی از آزمون جارک- برا استفاده شد (Jarque & Bera, ۱۹۸۷: ۱۶۳-۱۷۲) سپس به کمک آماره آزمون مقدار خطاهای در منطقه بحرانی در سطح ۹۵٪ با درجه آزادی  $df=n-2$  و  $\alpha/2$  به کمک جدول استیویدنت فرضیه تحقیق به شرح زیر تعریف شد.

فرضیه تحقیق: داده ها دارای توزیع نرمال است.

فرضیه مخالف: داده ها دارای توزیع نرمال نیست.

$$\begin{aligned} H_0 : \beta &= 0 \\ H_1 : \beta &\neq 0 \end{aligned}$$

### - همبستگی خطاهای

در رگرسیون فضایی- زمانی خطاهای نباید به هم وابسته باشند این بدان معنی ایست که خطاهای باید به صورت اتفاقی پراکنش داشته باشند. بدین سان جهت همبستگی نوع خطاهای در این تحقیق از آزمون دوربین واتسون استفاده شده است (Verbeek, ۱۹۸۷: ۱۱۷) و فرضیه تحقیق بدین صورت در نظر گرفته شد.

فرضیه تحقیق: خطاهای خود همبسته نیستند.

فرضیه مخالف: خطاهای خود همبسته هستند.

$$\begin{aligned} H_0 : \beta &= 0 \\ H_1 : \beta &\neq 0 \end{aligned}$$

### - همسانی واریانس خطاهای

برای همسانی واریانس خطاهای نیز از آزمون بروش پاگن استفاده شد (Maddala & Lahiri, ۲۰۰۹: ۲۱۶) و فرضیه تحقیق در سطح بحرانی ۹۵٪ به شرح زیر تعریف گردید.

فرضیه تحقیق: واریانس های همسان هستند.

فرضیه مخالف: واریانس های همسان نیستند.

$$\begin{aligned} H_0 : \beta &= 0 \\ H_1 : \beta &\neq 0 \end{aligned}$$

### • ضرایب رگرسیون فضایی- زمانی

### • آزمون معنی دار بودن ضرایب رگرسیون (آماره $t$ )

تحلیل رگرسیون چند گانه نشان می دهد که تا چه اندازه، واریانس متغیر وابسته توسط مجموعه ای از پیش بینی کننده ها قابل تبیین می باشد برای این که بتوان شبیه خط رگرسیون را آزمون نمود ابتدا می باشد به تعیین یک طرفه یا دو طرف بدون بودن آزمون پرداخت . اگر آزمون با مقدار صفر صورت گیرد آزمون همیشه دو طرفه ولی اگر با مقدار غیر صفر صورت گیرد به هر دو شکل یک طرفه و دو طرفه می تواند مطرح شود. در این تحقیق آزمون به صورت دو طرف با مقدار صفر انجام شد و برای بررسی معنی داری شبیه هریک از متغیرهای مستقل فرضیه آماری به صورت زیر تعیین گردید. (Montgomery & etc. ۲۰۱۲: ۲۳):

$$\begin{aligned} H_0 : \beta &= 0 \\ H_1 : \beta &\neq 0 \end{aligned}$$

فرضیه  $H_0$  بدين معناست که رابطه معنی داری بین متغیر مستقل و وابسته وجود ندارد. همچنین  $H_1$  نشان دهنده وجود یک رابطه معنی دار بین متغیر مستقل و وابسته است. برای بررسی این فرضیه آماری، اگر  $y$  متغیر وابسته باشد، آماره  $t$  برای ضریب متغیر مستقل  $x$  یعنی  $\beta$  به صورت زیر محاسبه می شود.

$$t = \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\frac{MSE}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}}$$

که در  $x_i$  ها مشاهدات متغیر  $x$  بوده است و  $\hat{\beta}$  و  $MSE$  از رابطه زیر به دست می آید.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

که در این رابطه  $K$  تعداد متغیرهای مستقل و متغیر  $t$  دارای توزیع  $t$  با درجه آزادی  $n - k - 1$  است. تصمیم درباره پذیرش یا رد فرض صفر، بر اساس مقدار و احتمال آماره  $t$  انجام می گرد پس از مقایسه مقدار آماره  $t$  و احتمال آن در سطح ۰/۰۵ با مقادیر جدول  $t$  در صورتی که احتمال این آماره از ۰/۰۵ کمتر باشد، فرض صفر مبنی بر عدم تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته رد شده و رابطه معنی دار بین متغیر مستقل و وابسته، مورد پذیرش قرار می گیرد.

#### • آزمون معنادار بودن معادله خط رگرسیون (آماره $F$ )

در معادله رگرسیون چند گانه، اگر رابطه ای میان متغیر وابسته و متغیر مستقل وجود نداشته باشد باید تمام ضرایب متغیرهای مستقل در معادله، مساوی صفر باشد. با داشتن مدل معادله رگرسیون چند گانه قاعده تصمیم گیری به صورت زیر تعریف شد (Montgomery & etc. ۲۰۱۲:۲۷)

$$H_0: B_1 = B_2 = \dots = B_k = 0$$

$$H_1: B_i \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots$$

(که حداقل یکی از آن ها غیر صفر است)

اگر  $u$  متغیر وابسته در معادله رگرسیون باشد آزمون آماره  $F$  از طریق رابطه زیر بدست می آید

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

اگر  $n$  تعداد مشاهدات و تعداد متغیرهای مستقل  $k$  باشند  $MSR$  و  $MSE$  که به ترتیب میانگین مربعات رگرسیون و میانگین مربعات خطأ هستند از رابطه زیر به دست می آیند.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}$$

$$MSR = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{k}$$

آماره  $F$  دارای توزیع  $F$  با درجه آزادی  $k$  و  $n-k-1$  است. اگر در سطح اطمینان ۹۵٪، آماره  $F$  محاسبه شده از معادله رگرسیون، بزرگتر از مقدار  $F$  در سطح بحرانی باشد فرض  $H_0$  رد شده و در غیر این صورت فرض  $H_1$  پذیرفته می شود.

### • ضریب تعیین<sup>۱</sup>

با توجه به فرض های مدل کلاسیک رگرسیون خطی، روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی، شرایط برآورد کننده مطلوب برای پیش بینی داده ها را دارد. اگر پیش فرض های اساسی یک رگرسیون برای تمامی جملات خطها برقرار باشد، برآورد کننده های حاصل از روش رگرسیون حداقل مربعات، دارای حداقل واریانس است. Montgomery & etc. (۲۰۱۲:۳۴) به این ترتیب یک معیار برای انتخاب مدل رگرسیونی که از سایر مدل ها، تغییرات متغیر وابسته را بر حسب متغیر مستقل بهتر می تواند توضیح می دهد، این مساله است که ضرایب رگرسیون واریانس کمتری نسبت به سایر تخمین ها داشته باشند. همچنین در صورتیکه که متغیرهای وابسته در مدل ، مشابه باشند، از ضریب تعیین برای انتخاب مدل استفاده می شود علاوه بر این ضریب تعیین برای اندازه گیری قدرت تبیین رگرسیون نیز به کار می رود.. بنابراین برای محاسبه میزان تغییرات و ارتباط میان  $y, x$  از ضریب تعیین استفاده شد. اگر  $y$  متغیر وابسته در معادلا رگرسیون باشد  $R^2$  از رابطه زیر به دست می آید

:Montgomery & etc. ۲۰۱۲:۳۵)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

در آن  $\hat{y}_i$  مشاهده  $i$  ام از  $y$ ،  $\bar{y}$  مقدار برآورد شده  $y$  و  $\bar{y}$  میانگین مشاهدهات از  $y$  است.

به عبارت دیگر ضریب تعیین که با  $R^2$  نشان داده می شود، درصد تغییرات  $y$  را که به وسیله  $x$  توجیه می کند و مکمل آن یعنی  $1 - R^2$  نیز به ضریب عدم تعیین بیان می شود و ناپایداری  $y$  نسبت به  $x$  را تشریح می نماید. ضمناً ضریب تعیین مقداری برابر با صفر تا یک را می پذیرد و هرچه بیش تر باشد نشان دهنده مطلوبیت بیش تر خط رگرسیون است.

### • شاخص تورم واریانس<sup>۲</sup>

یک مدل رگرسیون در صورتی معتبر است که متغیر وابسته با متغیرهای ورودی از قبیل مستقل و کنترلی همبستگی بالایی داشته باشد. هرچه این وابستگی قوی تر باشد، مدل مناسب تر بوده و کاربرد بیشتری دارد. اما باید بین خود متغیرهای ورودی همبستگی وجود نداشته باشد. در صورت وجود همبستگی بین متغیرهای ورودی، اصطلاحاً گفته می شود هم خطی چندگانه بین متغیرها به وجود آمده است که اصلاً مناسب نیست و از اعتبار مدل می کاهد. یکی از راه های برطرف نمودن این مشکل، حذف متغیر مزاحمی است که با دیگر متغیرها همبستگی دارد و این کار از طریق برآش مدل های مختلف و مقایسه آنها صورت می گیرد. (Studenmund, ۲۰۰۶:۲۵۸)

برای بررسی بیشتر هم خطی بین متغیرها، در مدل برآش شده از عامل تورم واریانس (VIF) استفاده می شود. برای به دست آوردن شاخص VIF ابتدا  $x$  متغیر وابسته فرض شده و با سایر متغیرهای مستقل در یک مدل رگرسیونی برآش داده می شود و مقدار ضریب تعیین آن یعنی  $R^2$  به دست می آید در انتها VIF از رابطه زیر محاسبه می شود

:Montgomery & etc. ۲۰۱۲:۱۱۸)

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2}$$

۱. Coefficient of Determination .

۲- Variance Inflation Factor. (VIF)

حالات خاص این ضربی به صورت زیر است:

اگر مقدار آن از ۵ کوچکتر باشد، مدل خوب است.

اگر مقدار آن بین ۵ و ۱۰ باشد، نگرانی چندانی درباره مدل وجود ندارد.

اگر مقدار آن از ۱۰ بزرگتر باشد، هم خطی بطور جدی وجود دارد.

#### • رگرسیون فضایی- زمانی

رگرسیون یک نوع روش آماری است که برای پیش‌بینی یک متغیر از روی یک یا چند متغیر دیگر به کار می‌رود. در این تحقیق، برای پیش‌بینی میزان سرعت باد، در موقعیت‌های فضایی و زمانی مشخص از داده‌های همسایگی فضایی-زمانی همراه با سایر اطلاعات استفاده شده است..( Wikle & etc. ۲۰۱۹:۸۴ ) رگرسیون خطی نوعی تابع پیش‌بینی کننده خطی است که در آن متغیر وابسته به صورت ترکیبی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود، بدین معنی که هر کدام از متغیرهای مستقل، در ضربی که در فرآیند تخمین، برای آن متغیر به دست آمده ضرب می‌شود که پاسخ نهائی مجموع حاصل ضرب‌ها، یک مقدار ثابت خواهد بود که آن هم در فرآیند تخمین به دست آمده است..( Wikle & etc. ۲۰۱۹:۹۹ ) ساده‌ترین نوع رگرسیون خطی، رگرسیون خطی ساده است که برخلاف رگرسیون خطی چندگانه، تنها یک متغیر مستقل دارد.( Wikle & etc. ۲۰۱۹:۱۰۰ ) نوع دیگر آن رگرسیون خطی چندگانه است که در آن به جای پیش‌بینی یک متغیر وابسته چندین متغیر وابسته پیش‌بینی می‌شود. اما رگرسیون فضایی-زمانی شکل پیچیده‌تری دارد که در آن متغیر مورد مطالعه به موقعیت و زمان وابسته است..( Wikle & etc. ۲۰۱۹:۱۰۱ ) که در این تحقیق از آن استفاده شده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

چنانچه  $T$  را مجموعه اندیس گذار یک بعدی فرض کنیم آنگاه  $\{Z_t, t \in T\}$  یک فرآیند تصادفی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. نمونه‌ای از یک فرآیند تصادفی را می‌توان یک سری زمانی نامید. حال در صورتی که فضای دو بعدی  $S$  داشته باشیم  $\{Z_s, s \in S\}$ ، می‌توان آن را داده‌های فضایی ذکر کرد. تعمیمی از داده‌های فضایی و سری زمانی، داده‌های فضایی-زمانی هستند که بدین به صورت تعریف می‌شوند (Pebesma<sup>۲</sup> و گرالر، ۲۰۱۷).

$$\{Z_{s,t}, s \times t \in S \times T\}$$

بنا براین جهت پیش‌بینی میانگین حداکثر سرعت باد، مدل رگرسیونی فضایی-زمانی به صورت زیر تعریف شد (محمدزاده، ۱۳۹۴:۲۴۰) :

$$z_{s,t} = \beta_0 + \beta_1 z_{s,t-1} + \beta_2 z_{s,t-2} + \beta_3 x_s + \beta_4 y_s + \varepsilon_{s,t}$$

که در آن  $z_{s,t}$  سرعت باد در زمان  $t$  در موقعیت  $s$ ،  $\varepsilon_{s,t}$  موقعیت تزدیک ترین ایستگاه به ایستگاه مورد نظر با موقعیت  $s$ ، که  $y_s$  و  $x_s$  طول و عرض جغرافیایی و  $\varepsilon_{s,t}$  جمله خطاهای است.

در نهایت حد بالا و پائین میانگین سالیانه سرعت باد در منطقه مورد نظر در فاصله اطمینان ۹۵٪ با توجه به رابطه زیر محاسبه شد (Cressie, ۱۹۹۳:۱۲۲)

$$A \equiv (\hat{z}_{s,t} - 1.96\sigma_{s,t}, \hat{z}_{s,t} + 1.96\sigma_{s,t})$$

۱. Stochastic process .

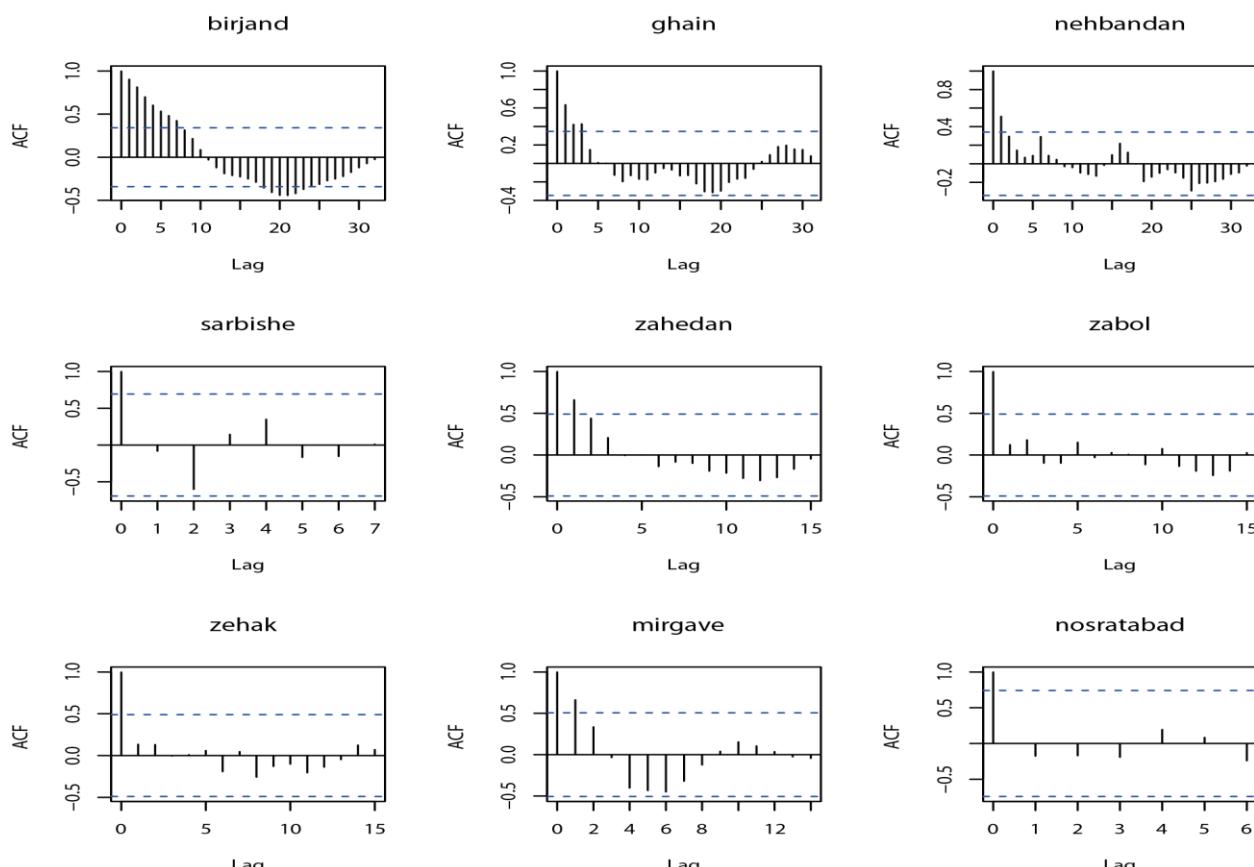
۲. Pebesma, ۲۰۱۷.

که در آن  $\sigma_{s,t}$  انحراف معیار  $\hat{z}_{s,t}$  است، که مقادیر خروجی آن به همراه کران بالا و پایین تا سال ۲۰۲۲ برای تک ایستگاه های مورد مطالعه پیش بینی شد. سپس داده های فضایی - زمانی با محدوده مورد مطالعه تلفیق شد (لوچر، ۲۰۱۶).

### شرح و تفسیر نتایج

#### بررسی خود همبستگی حداکثر سرعت باد سالیانه

تابع خود همبستگی میانگین سالیانه سرعت باد در اکثر ایستگاه ها نشان می دهد که این واپشتگی از دو روز شروع شده و تا ۱۰ روز ادامه دارد. لذا بررسی اولیه نشان می دهد داده ها قابلیت پیش بینی دارند. نمودار خود همبستگی داده های سرعت باد در ایستگاه سریش و نهbandan در تأخیر اول وابستگی بالایی را نشان می دهند اما در تأخیر دوم و سوم وابستگی آنها کاهش می یابد



شکل شماره (۵): خود همبستگی سرعت باد به تفکیک هریک از ایستگاه ها

### - ایستایی داده ها

نتایج نشان می دهد برای تمامی متغیرها  $P$ -مقدار از  $0/05$  کمتر بوده است. از این رو می توان ایستایی تمامی متغیرها را پذیرفت. نتایج آزمون ایستایی در جدول یک آمده است:

جدول شماره (۱): آزمون ایستایی داده ها

$y_s$	$x_s$	$z_{s,t-1}$	$z_{s,t}$	$z_{s_1,t-1}$	متغیر
$<2 \times 10^{-10}$	$P$ -مقدار آزمون				

### - نرمال بودن خطاهای رگرسیون

نرمال بودن خطاهای رگرسیون با آزمون جارک-برا را مورد بررسی قرار گرفت همان طور که از نتایج جدول دو پیداست با توجه به اینکه  $P$ -مقدار آزمون کمتر از  $0/05$  است در سطح اطمینان ۹۵٪ نرمال بودن خطاهای مورد تأیید نمی باشد.

جدول شماره (۲): آزمون جارک-برا بررسی نرمال بودن خطاهای داده های سرعت باد

نتیجه	$P$ -مقدار	درجه آزادی	آماره خی-دو
خطاهای نرمال نمی باشند.	۰/۰۰۰	۲	۳۳/۳۱۷

### - عدم همبستگی خطاهای رگرسیون

پیش فرض خودهمبستگی خطاهای رگرسیون با کمک آزمون دوربین واتسون نشان می دهد  $P$ -مقدار آزمون بیش از  $0/05$  است در نتیجه خطاهای خودهمبسته نیستند نتایج آن در جدول سه آمده است.

جدول شماره (۳): نتایج آزمون دوربین واتسون برای داده های سرعت باد

نتیجه	$P$ -مقدار	آماره دوربین واتسون
خطاهای خودهمبسته نیستند.	۰/۴۳۶	۱/۹۳

### - همسانی واریانس خطاهای رگرسیون

با توجه به پیش فرض همسانی واریانس خطاهای رگرسیون نتایج نشان می دهد، میزان  $P$ -مقدار آزمون بیش از  $0/05$  است، لذا همسانی واریانس خطاهای برقرار است. که مقدار آن در جدول شماره چهار آمده است از این رو می توان، از رگرسیون تعیین یافته برای تجزیه تحلیل و پیش بینی داده های میانگین سالیانه سرعت باد در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

جدول شماره (۴): نتایج آزمون بروش پاگن برای مدل سرعت باد

نتیجه	سطح معنی داری	درجه آزادی	آماره BP
همسانی واریانس های برقرار هست	۰/۲۱۸	۴	۵/۷۵۷

### - نتایج ضرایب رگرسیون فضایی-زمانی

نتایج ضرایب رگرسیون فضایی-زمانی در جدول شماره پنج نشان می دهد که تمامی متغیرها در مدل معنی دار هستند. زیرا P-مقدار برای تمامی متغیرها کمتر از ۰/۰۵ است بنا بر این می توان گفت متغیر سرعت باد از قابلیت خوبی برای پیش بینی برخودار خواهد بود.

جدول شماره (۵): نتایج ضرایب رگرسیون فضایی-زمانی داده های سرعت باد

$Z_{S,t} = \beta_0 + \beta_1 Z_{S,t-1} + \beta_2 Z_{S,t-1} + \beta_3 x_S + \beta_4 y_S + \varepsilon_{S,t}$					Mdl	
نتیجه	P-مقدار	t آماره	انحراف استاندارد خطای	ضرایب متغیر در مدل	VIF	متغیرها
معنی داری در مدل	۰/۰۰۰	-۱۲/۳۰	۰/۹۵۲	-۱۱/۷۱۷	-	عرض از مبدأ
معنی داری در مدل	۰/۰۰۰	-۱۹/۴۲	۰/۰۰۵۳	-۰/۱۰۳	۱/۹۷۶	$Z_{S,t-1}$
معنی داری در مدل	۰/۰۰۰	۱۷/۱۸	۰/۰۴۹۱	۰/۸۴۳	۲/۰۴	$Z_{S,t-1}$
معنی داری در مدل	۰/۰۲	۲/۳۶	۰/۱۳۹	۰/۳۲۷	۲/۸۱	$x_S$
معنی داری در مدل	۰/۰۴۶۶	۲/۰۰۹	۰/۰۹۰۲	-۰/۱۸۱	۲/۹۵	$y_S$
آزمون معنی داری مدل		ضریب تعیین				
P-مقدار	F آماره	۰/۸۶۰				
۰/۰۰۰	۲۰۵/۴	۰/۸۶۰				

### • آزمون معنی دار بودن ضرایب رگرسیون (آماره t)

با توجه به نتایج، آماره t (۱۹/۴۲) نشان می دهد که متغیر مستقل  $Z_{S,t-1}$  در این مدل درسطح ۹۵٪ اطمینان، از لحاظ آماری معنادار است زیرا اولاً مقادیر قدر مطلق این آماره بیشتر از ۱/۹۶ بوده ثانیاً مقادیر P-مقدار (۰/۰۰۰) نیز کمتر از ۵ درصد می باشد. از این رو می توان گفت که متغیرها با همسایگی فضایی و با تأخیر یک واحد زمانی تأثیر معنی داری داشته است.

با توجه به نتایج، آماره t (۱۷/۱۸) نشان می دهد که متغیر مستقل  $Z_{S,t-1}$  در این مدل درسطح ۹۵٪ اطمینان، از لحاظ آماری معنادار است زیرا اولاً مقادیر قدر مطلق این آماره بیشتر از ۱/۹۶ بوده ثانیاً مقادیر P-مقدار (۰/۰۰۰) نیز کمتر از ۵ درصد است. از این رو می توان گفت که متغیرها با تأخیر یک واحد زمانی تأثیر معنی داری داشته است.

با توجه به نتایج، آماره  $t(2/36)$  نشان می‌دهد که متغیر مستقل  $\omega$  در این مدل درسطح ۹۵٪ اطمینان، از لحاظ آماری معنادار می‌باشد زیرا اولاً مقادیر قدر مطلق این آماره بیشتر از  $1/96$  بوده ثانیاً مقادیر  $P$ -مقدار( $0/02$ ) نیز کمتر از ۵ درصد است. از این‌رو می‌توان گفت که طول جغرافیایی تأثیر معنی داری داشته است.

با توجه به نتایج، آماره  $t(2/09)$  نشان می‌دهد که متغیر مستقل  $\omega$  در این مدل درسطح ۹۵٪ اطمینان، از لحاظ آماری معنادار است، زیرا اولاً مقادیر قدر مطلق این آماره بیشتر از  $1/96$  بوده، ثانیاً مقادیر  $P$ -مقدار( $0/0466$ ) نیز کمتر از ۵ درصد می‌باشد. از این‌رو می‌توان گفت که عرض جغرافیایی تأثیر معنی داری داشته است.

#### - آزمون معنادار بودن معادله خط رگرسیون(آماره $F$ )

نتایج آزمون  $F$  (آزمون معنی داری مدل) حاکی از آن است که متغیرهای مستقل قابلیت پیش‌بینی متغیر وابسته را دارند میزان آماره  $F$  برابر با  $20.5/4$  و  $P$ -مقدار آزمون کمتر از  $0/05$  بوده است.

#### - ضریب تعیین

ضریب تعیین برابر  $860/0$  محاسبه شد. این موضوع نشان می‌دهد که ۸۶ درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل تعیین می‌شود و مابقی توسط سایر فاکتورها کنترل می‌گردد. در نهایت ضریب تعیین بالا در آزمون معنی داری، مدل مناسب را تأیید می‌کند.

#### - بررسی هم خطی با استفاده از شاخص تورم واریانس ( $VIF$ )

نتایج شاخص تورم واریانس به منظور بررسی هم خطی بودن داده‌ها در جدول شماره ۵ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ماقسیموم مقادیر  $VIF$  نیز کمتر از  $10$  بوده است از این‌رو وجود تمامی متغیرها در نظر گرفته شده در مدل، آن را مخدوش نخواهد کرد. بدین ترتیب می‌توان گفت با توجه به ساختار ذاتی داده‌ها و با مدل رگرسیون فضایی-زمانی به کار گرفته شده در آن، می‌توان میانگین سالیانه حداکثر سرعت باد را در سالهای پیش رو در منطقه مورد نظر پیش‌بینی کرد.

#### • پیش‌بینی فضایی-زمانی میانگین حداکثرسرعت باد سالیانه

بررسیون فضایی-زمانی دادها نشان می‌دهد که کمترین میانگین سالیانه سرعت باد طی سال‌های  $2019$  تا  $2022$  به ترتیب با میزان  $5/3$ ،  $5/2$ ،  $5/1$ ،  $5/1$  متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه قاین است که روند پیش‌بینی آن نشان می‌دهد تا سال  $2022$  از میانگین سالیانه سرعت باد کاسته می‌شود. پس از آن ایستگاه سربیشه به ترتیب با میزان  $6/2$ ،  $6/3$ ،  $6/4$ ،  $6/5$  متر بر ثانیه قرار دارد که روند پیش‌بینی این ایستگاه مشخص می‌کند میزان میانگین سرعت باد طی سال‌های پیش رو افزایش می‌یابد. بیشترین میزان میانگین سالیانه سرعت باد مربوط به ایستگاه زابل به ترتیب با  $15/9$ ،  $15/9$ ،  $14/7$ ،  $13/7$  متر بر ثانیه است که روند پیش‌بینی این ایستگاه نشان می‌دهد از میانگین سالیانه سرعت باد تا  $2022$  کاسته می‌شود.

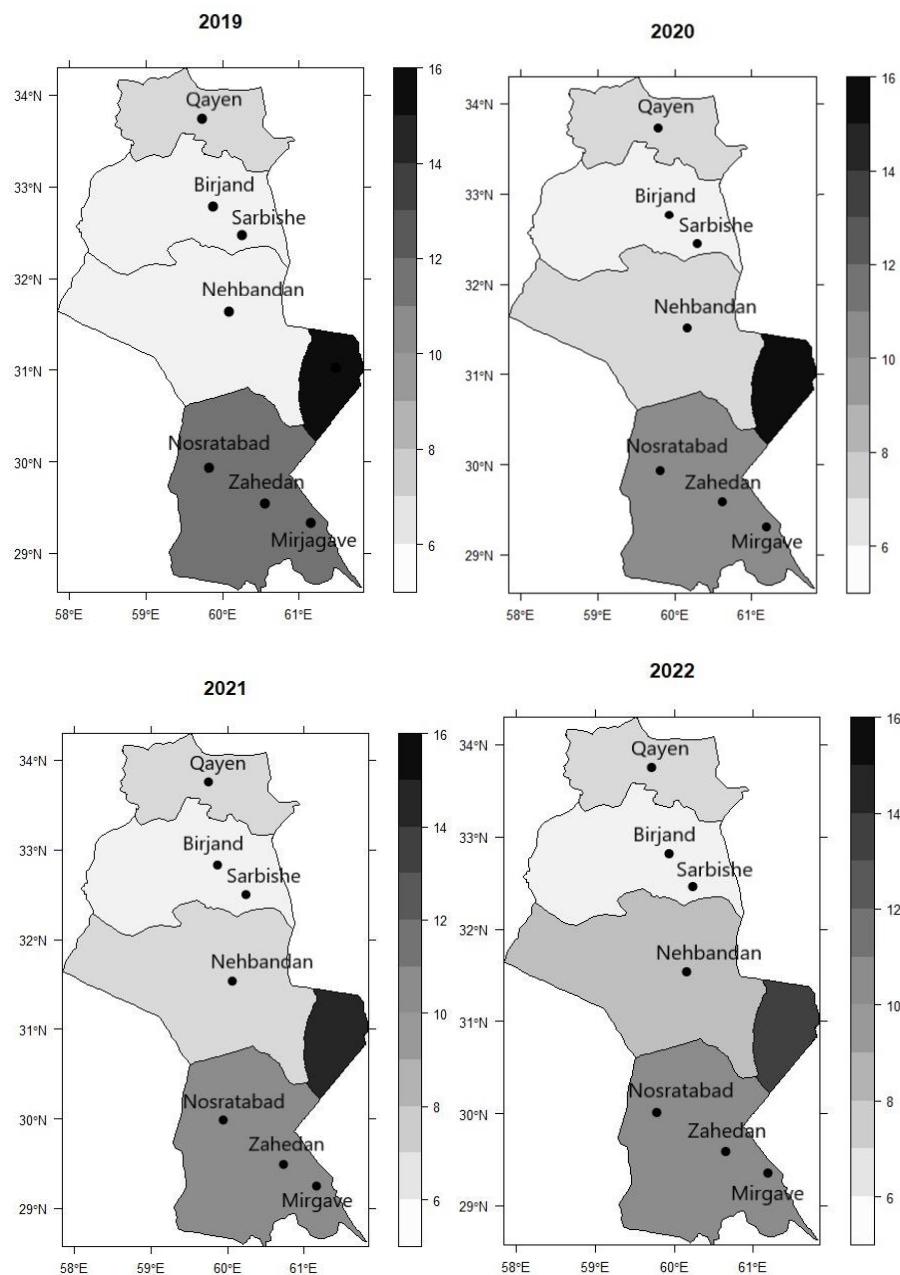
نتایج نشان می‌دهد که فقط ایستگاه‌های نهبدان، سربیشه و میرجاوه میانگین سالیانه سرعت باد آن‌ها تا سال  $2022$  افزایش می‌یابد که در ایستگاه نهبدان از  $6/7$  به میزان  $8$  متر بر ثانیه می‌رسد و در ایستگاه میرجاوه میانگین سالیانه سرعت باد از  $11/2$  به  $11/2$  متر در ثانیه افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان میانگین سالیانه در ایستگاه سربیشه از سال  $2019$  تا سال  $2022$  به مقدار  $6/2$  بر ثانیه ثابت است و تغییری در روند افزایشی یا کاهشی آن دیده نمی‌شود. در سایر ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه میزان میانگین سالیانه سرعت باد تا سال  $2022$  کاهش می‌یابد که

بیشترین میزان کاهش مربوط به ایستگاه زابل بوده که مقدار آن از ۱۶ به ۱۳/۷ متر بر ثانیه می‌رسد که مقدار ۲/۳ متر بر ثانیه در سال ۲۰۲۲ از سال ۲۰۱۹ کمتر خواهد بود (جدول شش).

جدول شماره (۶): مقدار پیش‌بینی و فاصله اطمینان میانگین سالانه سرعت باد از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲

۲۰۲۲		۲۰۲۱		۲۰۲۰		۲۰۱۹		مقدار پیش‌بینی فاصله اطمینان ۹۵٪	بیرجند
۷/۴	۷/۵	۷/۶	۷/۷	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین		
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین
۷/۱	۷/۷	۷/۲	۷/۸	۷/۳	۷/۹	۷/۵	۸		
۵/۱		۵/۱		۵/۲		۵/۳		مقدار پیش‌بینی	قاین
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۴/۸	۵/۴	۴/۸	۵/۴	۴/۹	۵/۵	۵	۵/۶		
۸		۷/۷		۷/۲		۶/۷		مقدار پیش‌بینی	نهبندان
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۷/۷	۸/۴	۷/۳	۸	۶/۹	۷/۳	۶/۳	۷/۱		
۶/۵		۶/۴		۶/۹		۶/۲		مقدار پیش‌بینی	سرپیشه
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۶/۳	۶/۷	۶/۱	۶/۶	۶/۱	۶/۵	۶	۶/۵		
۱۰/۷		۱۰/۸		۱۱		۱۱		مقدار پیش‌بینی	زاهدان
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۱۰	۱۱	۱۰/۴	۱۱/۲	۱۰/۵	۱۱/۳	۱۰/۷	۱۱/۴		
۱۳/۸		۱۴		۱۵		۱۶		مقدار پیش‌بینی	زابل
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۱۳/۲	۱۴/۳	۱۴	۱۵	۱۴/۴	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۶/۸		
۹/۸		۱۰		۱۰/۳		۱۰/۸		مقدار پیش‌بینی	زهک
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۹/۲	۱۰/۳	۹/۴	۱۰/۶	۹/۷	۱۱	۱۰	۱۱/۷		
۱۱/۷		۱۱/۵		۱۱/۴		۱۱/۲		مقدار پیش‌بینی	میرجاوه
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۱۱/۴	۱۲	۱۱/۳	۱۱/۸	۱۱/۱	۱۱/۶	۱۰	۱۱/۵		
۱۰/۲		۱۰/۶		۱۱		۱۱/۵		مقدار پیش‌بینی	نصرت‌آباد
کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	فاصله اطمینان ۹۵٪	
۹/۷	۱۰/۷	۱۰	۱۱/۱	۱۰/۴	۱۱/۶	۱۰/۹	۱۲/۱		

تحلیل فضایی - زمانی میانگین سالیانه سرعت باد نشان می دهد که تمامی ایستگاه های ناحیه سیستان در طی سال های پیش رو بیشترین میزان سرعت باد را دارند که میزان آن بین ۱۴ تا ۱۶ متر بر ثانیه می رسد و پس از آن ناحیه زاهدان بین ۱۰ تا ۱۲ متر بر ثانیه و ایستگاه های واقع در ناحیه قاینات بین ۷ تا ۸ متر بر ثانیه و ناحیه بیرجند با میانگین سرعت باد سالیانه ۶ تا ۷ متر بر ثانیه کمترین میزان سرعت باد را تا سال ۲۰۲۲ خواهند داشت که این موضوع نشانگر آن است که ناحیه بیرجند از بیشترین میزان هوای پاک و سالم برخوردار خواهد بود. تنها ناحیه ای که میزان میانگین سرعت سالیانه باد افزایش چشم گیری از نظر فضایی - زمانی خواهد داشت منطقه نهبندان است که میزان میانگین سالیانه سرعت باد در سال ۲۰۱۹ بین ۶ تا ۷ متر بر ثانیه و در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ بین ۷ تا ۸ و در سال ۲۰۲۲ به ۱۰ متر بر ثانیه خواهد رسید. لذا بر میزان تعداد روز های گرد و غباری آن افزوده خواهد شد.



شکل (۶) مقدار پیش‌بینی برای سرعت باد از سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹

### نتیجه گیری

بررسی سری زمانی میانگین سالیانه سرعت باد در طی دوره آمای در منطقه مورد مطالعه نشان داد که از سال ۱۹۸۶ از رقم ۸/۲ به ۱۰ متر در ثانیه در سال ۲۰۱۸ رسیده است که میزان افزایش آن ۱/۸ متر در ثانیه در طی ۳۳ سال رقم قابل توجهی است همچنین بررسی میانگین حداکثر سرعت باد سالیانه در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که ایستگاه قاین با میانگین سالیانه ۶ متر بر ثانیه و ایستگاه زابل با ۱۲ متر بر ثانیه بترتیب کمترین و بیشترین میزان تغییرات سرعت باد را نسبت به میانگین منطقه مورد مطالعه داشته اند.

تابع خودهمبستگی میانگین سالیانه سرعت باد، در اکثر ایستگاه ها نشان می دهد که وابستگی داده ها از دو روز شروع شده و تا ۱۰ روز ادامه دارد و بررسی اولیه نشان می دهد داده ها قابلیت پیش بینی دارند بررسی ایستایی تمامی متغیرها نشان داد که داده ها ایستا هستند کلیه پیش فرض ها در تغیین نوع رگرسیون نشان داد که می توان، از رگرسیون تعمیم یافته برای تجزیه تحلیل و پیش بینی داده های میانگین سالیانه سرعت باد در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد. نتایج ضرایب رگرسیون فضایی-زمانی نشان می دهد که تمامی متغیرها در مدل معنی دار هستند. بنا بر این می توان گفت متغیر سرعت باد از قابلیت خوبی برای پیش بینی برخودار خواهد بود آزمون معنی دار بودن ضرایب رگرسیون (آماره t) نشان می دهد متغیرها با همسایگی فضایی و با تأخیر یک واحد زمانی تأثیر معنی داری داشته است یعنی ایستگاههای مجاور با یک تاخیر زمانی قابلیت خوبی برای پیش بینی داده های سرعت باد دارند همچنین نتایج آماره t نشان داد که طول و عرض جغرافیایی تأثیر معنی داری در پیش بینی سرعت باد دارند آزمون معنادار بودن معادله خط رگرسیون (آماره F) مشخص کرد متغیرهای مستقل قابلیت پیش بینی متغیر وابسته یعنی سرعت باد را دارند بررسی هم خطی بودن داده ها با استفاده از شاخص تورم واریانس (VIF) نیز نشان داد که این میزان کمتر از ۱۰ بوده است از این رو وجود تمامی متغیرها در نظر گرفته شده در مدل، با توجه به ساختار ذاتی داده ها و با مدل رگرسیون فضایی-زمانی به کار گرفته شده نشان می دهد که می توان میانگین سالیانه حداکثر سرعت باد را در سالهای پیش رو در منطقه مورد نظر پیش بینی کرد.

بر این اساس، تحلیل فضایی-زمانی داده ها نشان داد که کمترین میانگین سالیانه سرعت باد طی سال های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ به ترتیب با میزان ۵/۳، ۵/۲، ۵/۱، ۵/۱ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه قاین است که روند پیش بینی آن نشان می دهد تا سال ۲۰۲۲ از میانگین سالیانه سرعت باد کاسته می شود. پس از آن ایستگاه سربیشه به ترتیب با میزان ۶/۲، ۶/۴، ۶/۵ متر بر ثانیه قرار دارد که روند پیش بینی این ایستگاه مشخص می کند که میزان میانگین سرعت باد طی سال های پیش رو افزایش می یابد. بیشترین میزان میانگین سالیانه سرعت باد مربوط به ایستگاه زابل به ترتیب با ۱۵/۹، ۱۵، ۱۴/۳، ۱۴/۳، ۱۳/۷ متر بر ثانیه است که روند پیش بینی این ایستگاه نشان می دهد از میانگین سالیانه سرعت باد تا ۲۰۲۲ کاسته می شود.

نتایج نشان می دهد که فقط ایستگاه های نهبدان، سربیشه و میرجاوه میانگین سالیانه سرعت باد آن ها تا سال ۲۰۲۲ افزایش می یابند که در ایستگاه نهبدان از ۶/۷ به میزان ۸ متر بر ثانیه می رسد. در ایستگاه میرجاوه میانگین سالیانه سرعت باد از ۱۱/۲ به ۱۱/۷ متر در ثانیه افزایش می یابد. بررسی ها نشان می دهد که میزان میانگین سالیانه در ایستگاه سربیشه نیز از سال ۲۰۱۹ تا سال ۲۰۲۲ از میزان ۶/۲ به ۶/۵ متر بر ثانیه می رسد که روندی افزایشی دارد.

در سایر ایستگاه های منطقه مورد مطالعه میزان میانگین سالیانه سرعت باد تا سال ۲۰۲۲ کاهش می یابد که بیشترین میزان کاهش مربوط به ایستگاه زابل است و مقدار آن از ۱۶ به ۱۳/۷ متر بر ثانیه می رسد که مقدار ۲/۳ متر بر ثانیه در سال ۲۰۲۲ از سال ۲۰۱۹ کمتر خواهد بود.

بررسی تحلیل فضایی - زمانی میانگین سالیانه سرعت باد نشان می دهد که در تمامی ایستگاه های ناحیه سیستان در طی سال های پیش رو بیشترین میزان سرعت باد را دارند که میزان آن بین ۱۴ تا ۱۶ متر بر ثانیه می رسد و پس از آن ناحیه زاهدان بین ۱۰ تا ۱۲ متر بر ثانیه و ایستگاه های واقع در ناحیه قاینات بین ۷ تا ۸ متر بر ثانیه و ناحیه بیرجند با میانگین سرعت باد سالیانه ۶ تا ۷ متر بر ثانیه کمترین میزان سرعت باد را تا سال ۲۰۲۲ خواهد داشت که این موضوع نشانگر آن است که ناحیه بیرجند از بیشترین میزان هوای پاک و سالم برخوردار خواهد بود. تنها ناحیه ای که میزان میانگین سرعت سالیانه باد افزایش چشم گیری از نظر فضایی-زمانی خواهد داشت منطقه نهیندان است که میزان میانگین سرعت باد در سال ۲۰۱۹ بین ۶ تا ۷ متر بر ثانیه و در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ بین ۷ تا ۸ و در سال ۲۰۲۲ به ۱۰ متر بر ثانیه خواهد رسید لذا برミزان تعداد روز های گرد و غباری آن افزوده خواهد شد که این مسئله باید در برنامه های منطقه ای و ناحیه ای محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شود.

## منابع

- اجلایی، فرید. ۱۳۸۷. هوا و اقلیم شناسی، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه پیام نور ایران.
- ایرانمنش، فاضل؛ محمود عرب خدری، و مجتبی اکرم. ۱۳۸۴. بررسی مناطق برداشت ذرات گرد و غبار و ویژگی های انتشار آن ها در طوفان های منطقه ای سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره ای، *فصلنامه پژوهش و سازندگی*، ۶۷: ۲۵-۳۳.
- حسین زاده، سید رضا. ۱۳۷۶. بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۴۶: ۱۰۲-۱۲۷.
- حمدیان پور، محسن. ۱۳۹۲. بررسی نحوه شکل گیری باد ۱۲۰ روزه سیستان با ریزگردانی دینامیکی جریانهای تراز زیرین در شرق فلات ایران، رساله دکتری، دانشگاه خوارزمی، دانشکده جغرافیا گروه اقلیم شناسی، تهران.
- خسروی، محمود. ۱۳۸۹. بررسی توزیع عمودی گرد و غبار ناشی از طوفان در خاورمیانه با استفاده از NAAPS در منطقه سیستان ایران، *مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین المللی جغرافی دانان جهان اسلام*، زاهدان، ایران.
- راشکی، علیرضا؛ هدایت الله زرین، ۱۳۸۶، پیامدهای بادهای ۱۲۰ روزه در خشکسالی های اخیر دشت سیستان، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند.
- سازمان هواشناسی کشور، آمار سرعت باد از ۱۹۸۶/۱/۱ لغایت ۱۹۸۶/۱۱/۱، <https://www.irimo.ir/far/wd/۲۷۰۳>، قابل دسترس: ۲۰۱۸/۱۲/۳۱.
- سالاری محمود. ۱۳۷۵. طرح بررسی و شناخت مواد آلوده کننده هوا، سازمان محیط زیست، تهران.
- علیجانی بهلول. ۱۳۷۶. آب و هوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور ایران.
- فرج زاده منوچهر؛ خاطره علیزاده، ۱۳۹۰، تحلیل زمانی و مکانی طوفانهای گرد و خاک در ایران، برنامه ریزی و آمیش فضا، ۱۵، ۸۴-۶۵.
- محمدزاده، محسن. ۱۳۹۴. آمار فضایی و کاربردهای آن. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- مهرشahi داریوش؛ زری نکونام. ۱۳۸۸. بررسی آماری پدیده های گرد و غبار و تحلیل الگوی وزش بادهای گرد و غبارزا در شهرستان سبزوار، *نشریه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیایی ایران*، ۲۲، ۸۳-۱۰۴.
- ولایتی سعد الله، ۱۳۸۵. هیدرولوژی کاربردی، چاپ دوم، انتشارات پیام نور، تهران.
- یوسفی نصر الله؛ داریوش فامیلی. ۱۳۸۷. هوا و اقلیم شناسی، چاپ اول، انتشارات دانش بهبد، تهران.
- Anselin, L. ۲۰۰۳. An introduction to spatial regression analysis in R. University of Illinois, *Urbana-Champaign, R Development Core Team*. <http://sal.agecon.uiuc.edu>.
- Anselin, L. I, Syabri & Kho, Y. ۲۰۱۰. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. In *Handbook of applied spatial analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Bivand, R. M, Altman & L, Anselin. ۲۰۲۰. Spatial Dependence Weighting Schemes statistics and Model. Package 'spdep'. *R Core Development Team*. Version ۱.۷-۶. URL: <http://github.com/r-spatial/spdep/>.
- Cressie, N. ۱۹۹۳. Statistics for Spatial Data, Revised Edition. *Johan Wiley*. New York.
- Cryer, J. K, SD, Chan. ۲۰۰۸. Time series analysis: with applications in R. *Springer Science & Business Media*.
- Hengl, T.; P, Roudier, D, Beaudette & E. Pebesma. ۲۰۱۵. Plot KML: Scientific Visualization of Spatio-Temporal Data. *Journal of Statistical Software*. ۶۳, ۰. <http://www.jstatsoft.org/> Institute for Geoinformatics University of Munster, Germany.
- Jarque, Carlos M.; Bera, Anil K. ۱۹۸۰. "A test for normality of observations and regression residuals". *International Statistical Review*. ۵۵(۲): ۱۶۲–۱۷۲.
- Kurosaki, Y.; M, Mikami, ۲۰۰۰, Regional Difference in The Characteristics of Dust Event in East Asia: Relationship among Dust Outbreak, Surface Wind, and land Surface Condition, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. ۸۳ A: ۱-۱۸.
- Loecher, M. ۲۰۱۷. Overlays on Static Maps. Package R Google Maps. *R Development Core Team*. Version ۱.۰.۴. ۱.
- McMahon, H. ۱۹۰۶. Recent Survey and Exploration in Sistan, *The Geographical Journal*, ۲۸ (۳): ۲۰۹-۲۲۸.
- Montgomery, D. C. E, A, Peck & G. G. Vining ۲۰۱۲. Introduction to linear regression analysis. *John Wiley & Sons*. Vol. ۸۲۱:۲۳, ۲۵, ۲۷, ۳۵, ۱۱۸.
- Middleton, N.J. ۱۹۸۶. Dust Storms in The Middle East. *Arid Environ*. ۱۰: ۸۳-۹۶.
- Prospero, JM.; P. Ginoux, O. Torres, SE. Nicholson & TE. Gill. ۲۰۰۲. Environmental caracterisation of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus<sup>V</sup> total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev. Geophys.*. 40: ۲-۳۱.
- R Development Core Team*. ۲۰۱۸. a language and environment for statistical computing computer program. version ۴.۰. ۰.
- Studenmund, A. H. ۲۰۰۷. Using Econometrics: A Practical Guide (۰th ed.). *Pearson International*.
- Pebesma, E.; B, Gräler. ۲۰۱۷. Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modelling, Prediction, and Simulation. *R Development Core Team*. Version ۱.۱-۰. URL <https://github.com/edzer/gstat/>
- Verbeek, M. ۲۰۱۲. A Guide to Modern Econometrics (۴th ed.). *Chichester: John Wiley & Sons*.
- Washington, R.; M. Tood. N.J Middleton. & A.S. ۲۰۰۰. Goudie total ozone monitoring spectrometer and ground observations. *School of geography and the environment University of Oxford*.: ۲۹۷-۳۱۳.
- Wikle, C. K., Zammit-Mangion, A., & Cressie, N. ۲۰۱۹. *Spatio-temporal Statistics with R*. Chapman and Hall/CRC۴, ۹۹, ۱۰۰, ۱۰۱.
- Maddala, G. S.; Lahiri, K. ۲۰۰۹. Introduction to Econometrics (Fourth ed.). *Chichester: Wiley*.
- Miri, A.; H, Ahmadi. A, Ghanbari & A, Moghaddamnia. ۲۰۰۷. Dust Storms Impact on Air Pollution and Public Health under Hot and Dry Climate, *International Journal of Energy and Environment*. ۱(۲): ۱۰۱-۱۰۰.
- Mang-Mang Gou<sup>۱</sup>; Li Gang-Tie<sup>۱</sup>. Li Xing & Zuo He-Jun. ۲۰۱۰. Temporal-Spatial Distribution of Sand Storms in the Xilin Gol Area of Inner Mongolia. *polish journal of Environmental studies* ۱۹(۲): ۳۰۹-۳۱۴.

