

جغرافیا و توسعه شماره ۲۷ تابستان ۱۳۹۱

وصول مقاله : ۱۳۹۰/۶/۱۲

تأیید نهایی : ۱۳۹۱/۲/۲۰

صفحات : ۶۳ - ۷۶

## ارزیابی روش‌های زمین‌آمار و رگرسیون خطی در تعیین توزیع مکانی بارش

مورد: استان بوشهر

دکتر غلامعلی مظفری<sup>۱</sup>، دکتر سیدحسین میرموسوی<sup>۲</sup>، یونس خسروی<sup>۳</sup>

### چکیده

یکی از مهمترین پارامترهای ورودی جهت محاسبات بیلان آب و تهیه‌ی مدل‌های هیدرولوژیکی، توزیع مکانی بارش می‌باشد. بنابراین خطای ناشی از آن آثار مستقیمی در برنامه‌ریزی منابع آب خواهد داشت. از طرفی دیگر به دلیل عدم پوشش کامل ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقطه‌ای باران، برآورد بارش منطقه‌ای و یا تخمین بارش در مناطق مابین ایستگاه‌ها امری ضروری به شمار می‌آید. برای این امر روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آن‌ها روش‌های میان‌یابی می‌باشد. در این مطالعه دو روش کریجینگ (ساده و معمولی) و رگرسیون خطی بر پایه مدل ارتفاعی رقومی زمین، جهت برآورد بارش سالانه با استفاده از آمار ۱۱ ساله (۱۹۹۷-۲۰۰۷) داده‌های بارش ۵۷ ایستگاه باران‌سنجی استان بوشهر، مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا به ازای هر مدل در روش کریجینگ، نیم‌تغییرنمای آن محاسبه و با استفاده از تکنیک ارزیابی متوالی، خطای نقشه‌ها برآورد شد و از میان ۱۴ نقشه، یک نقشه به عنوان نقشه‌ی بهینه اختیار شد. سپس داده‌های بارش و ارتفاع ایستگاه‌های مورد نظر با استفاده از مدل رگرسیون خطی در محیط نرم‌افزار Curve Expert فراخوانی گردید و با ۱۸ مدل برازش داده شد تا مدل بهینه مشخص شود. با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته مشخص گردید دو مدل نمایی از روش کریجینگ معمولی و تابع رگرسیونی چند جمله‌ای درجه چهارم نتایج بهتری را برای میان‌یابی بارش نسبت به دیگر روش‌ها از خود نشان می‌دهند. در نهایت به منظور تعیین بهترین مدل جهت توزیع مکانی بارش و انجام میان‌یابی، مدل‌های برتر هر دو روش با یکدیگر مقایسه شدند و مشخص گردید که مناسب‌ترین روش جهت میان‌یابی بارش سالانه در استان بوشهر، روش رگرسیون با تابع چند جمله‌ای درجه چهارم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌آمار، رگرسیون خطی، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، بارش، بوشهر.

1- Gmozafari@yazduni.ac.ir

2- H.mousavi@znu.ac.ir

3- Younes\_kh15@yahoo.com

۱- استادیار جغرافیا دانشگاه یزد (نویسنده مسؤول)

۲- استادیار جغرافیا دانشگاه زنجان

۳- کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی

## مقدمه

بارندگی از مهم‌ترین فرآیندهای چرخه هیدرولوژیکی است که تنها در صورت وقوع آن، فرآیندهایی نظیر سیلاب، فرسایش، رسوبگذاری، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی و... به‌وقوع می‌پیوندد. با این حال، تغییرات قابل ملاحظه بارندگی در زمان و مکان از یک سو، و کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی در ثبت میزان بارندگی روزانه از سوی دیگر، ضرورت تبیین مدل‌های تخمین بارندگی را امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. دستیابی به توزیع مکانی بارش بر اساس داده‌های نقطه‌ای بارش که از ایستگاه‌های باران‌سنجی به دست می‌آیند بر اساس یکی از دو روش درون‌یابی و برون‌یابی میسر می‌گردد. روش تخمین و برآورد میزان متغیر پیوسته، در مناطق نمونه‌گیری نشده در داخل ناحیه‌ای که مشاهدات نقطه‌ای پراکنده شده‌اند، درون‌یابی<sup>۱</sup> می‌گویند (قهرودی‌تالی، ۱۳۸۴: ۱۷۳).

تنوع زمانی بارش به عنوان یک عامل کلیدی مؤثر در ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها به شمار می‌آید، اما تأثیر آن از نظر مقیاس و بزرگی به مراتب کمتر از تنوع مکانی آن می‌باشد (Knapp and Smith, 2001: 291; Austin et al, 2004: 141; Collins et al, 2008: 96). تعیین مناسب‌ترین روش‌های درون‌یابی در سطح یک منطقه و چگونگی توزیع فضایی و مکانی آن، امری ضروری جهت توزیع مکانی بارش می‌باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد و تخمین متغیرهایی از این دست وجود دارد که به عنوان نمونه می‌توان به روش‌های کلاسیک، نظیر تیسسن<sup>۲</sup> و میانگین حسابی اشاره کرد. این روش‌ها گرچه همگی از نظر محاسبات سریع و آسان می‌باشند، ولی به دلایلی از جمله در نظر نگرفتن موقعیت، آرایش و همبستگی بین آن‌ها، از دقت خوبی برخوردار نمی‌باشند. روش‌های دیگری نیز وجود دارد

که به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار هستند که از آن جمله روش زمین‌آمار<sup>۳</sup> می‌باشد. در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. البته ممکن است نمونه‌های مجاور با فاصله‌ی معینی در قالب ساختار مکانی به هم وابسته باشند، در این حالت بدیهی است که میزان تشابه بین مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیکتر بیشتر است، زیرا در صورت وجود ساختار مکانی، تغییرات ایجاد شده در یک فضای معین شانس بیشتری برای تأثیرگذاری روی فضاهاى نزدیک به خود را نسبت به فضاهاى دورتر از خود دارند (شنى‌زند، ۱۳۸۱: ۱۲). با توجه به این توضیحات مشخص می‌شود که با استفاده از روش‌های زمین‌آمار می‌توان از داده‌های یک کمیت در مختصات معلوم، مقدار همان کمیت در نقطه‌ای با مختصات معلوم دیگر را تخمین زد. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی میان‌یابی داده‌های اقلیمی در جهان و ایران صورت گرفته است. دینگمن<sup>۴</sup> و همکاران (1998: 329) ضمن کاربرد روش کریجینگ در تخمین میانگین بارندگی سالانه در شهر ورمونت<sup>۵</sup> در شمال شرقی آمریکا، به این نتیجه رسیدند که با دقت اطمینان ۹۵ درصد می‌توان از این روش جهت میان‌یابی بارش در این شهر استفاده نمود. گوارتز<sup>۶</sup> (2000: 129) با استفاده از روش‌های عکس مجذور فاصله، رگرسیون خطی با ارتفاع، تیسسن و کریجینگ معمولی و ساده به میان‌یابی بارندگی و دمای سالانه منطقه‌ای به وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع از کشور پرتقال پرداختند، نتایج ایشان بیانگر مناسب بودن روش کریجینگ ساده نسبت به سایر روش‌های مذکور می‌باشد.

3-Geostatistic  
4-Dingman  
5-Vermont  
6-Goovaerts

1-Interpolation  
2-Thissen

۱۳۷۶، به این نتیجه رسید که بهترین الگو جهت میان‌یابی بارش ایران زمین برای روز مذکور، مدل خطی از تکنیک کریجینگ می‌باشد.

رفتار بارش با توجه به ارتفاعات در هر منطقه متفاوت است. این رفتار یا در شکل روابط رگرسیونی در رابطه با ارتفاع و یا در رابطه با بعد فاصله توضیح داده می‌شود. از طرفی دیگر به دلیل اینکه هر منطقه دارای یکسری ویژگی‌های مکانی خاص خود می‌باشد، بنابراین از یک روش میان‌یابی خاص پیروی می‌کند و نمی‌توان نتایج یک منطقه را به منطقه دیگر نسبت داد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی رابطه بارش با ارتفاع بر پایه مدل ارتفاعی رقومی و سپس ارزیابی نتایج آن با مدل‌های زمین‌آمار کریجینگ معمولی و ساده به منظور میان‌یابی بارش سالانه استان بوشهر می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

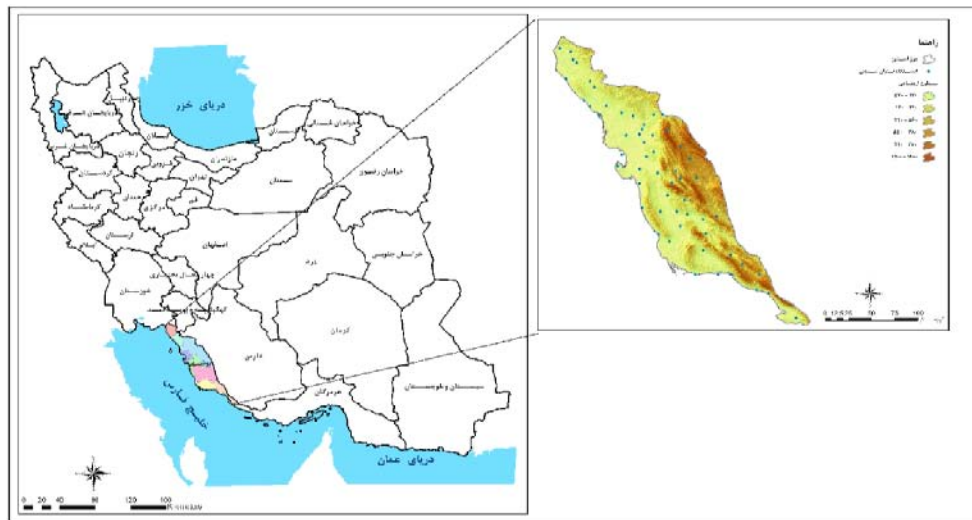
#### – مشخصات منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه پهنه‌ی جغرافیایی استان بوشهر می‌باشد. از ۱۰۱ ایستگاه باران‌سنجی موجود در منطقه، به دلیل دوره‌ی آماری کوتاه‌مدت و همچنین انتخاب ایستگاه‌های مناسب با پراکنش خوب، فقط از داده‌های بارش ۵۷ ایستگاه با دوره‌ی آماری ۱۱ ساله (۲۰۰۷-۱۹۹۷) استفاده شد. شکل (۱) موقعیت و نحوه‌ی پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پس از تعیین ایستگاه‌ها، بازسازی آمار ایستگاه‌ها از روش بیشترین همبستگی خطی با ایستگاه‌های مجاور استفاده شد. بدین صورت که خلاء آماری هر یک از ایستگاه‌ها به کمک نزدیکترین ایستگاهی که با آن همبستگی خطی معنی‌دار داشته باشد، تکمیل شد. در نهایت آزمون همگنی داده‌ها به روش ران‌تست برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و همچنین همگن بودن سری داده‌های ثبت شده انجام شد.

هارگرو<sup>۱</sup> (2001:122) جهت برآورد بارندگی در سوئیس از روش Spline<sup>۲</sup> استفاده کردند. لوکینبیل و اربان<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) جهت تخمین فضایی دمای نواحی کوهستانی، از مدل‌های رگرسیونی ساده و پیچیده و همچنین از جهات شیب استفاده نمودند.

زاکیریس و ونجلس<sup>۴</sup> (2004:12) به منظور پایش خشکسالی و تحلیل مکانی آن، با استفاده از روش عکس مجذور فاصله، نقشه بارندگی ماهانه و نقشه درصد نرمال متوسط بارندگی سالانه را ترسیم نمودند. شمس‌الدینی (۱۳۷۹:۶۹) با استفاده از روش کریجینگ تغییرات منطقه‌ای بارندگی را در استان‌های شمالی ایران انجام داد. صفری (۱۳۸۱:۱۲۳) از تخمین‌گرهای زمین‌آمار برای ایجاد شبکه‌ی بهینه پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت چمچمال استفاده کرد. در تحقیقی دیگر که توسط مهدی‌زاده انجام شد، روش‌های مختلف زمین‌آمار را برای برآورد دما و بارندگی در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، مورد ارزیابی قرار داد (مهدی‌زاده، ۱۳۸۱:۱۵۱). رحیمی و مهدیان (۱۳۸۲:۱۱۹) جهت تعیین روش مناسب برای مقادیر بارش ماهانه ایران مرکزی و شرقی، از روش TPSS<sup>۵</sup> با توان ۲ استفاده کردند. مسعودیان (۱۳۸۲:۱۵) برای تهیه‌ی نقشه‌ی هم‌دمای ایران، روش کریجینگ را مناسب دانستند. سلطانی و مدرس (۱۳۸۵:۳۴) فراوانی و شدت خشکسالی در استان اصفهان را در ۲۲ ایستگاه استان اصفهان تحلیل کردند و سپس با استفاده از روش کریجینگ معمولی نقشه‌ی دوره بازگشت خشکسالی استان اصفهان را ترسیم نمودند. تازه و همکاران (۱۳۸۷:۱۲۶) با استفاده از زمین‌آمار و GIS نمایه خشکی ترانسو را پهنه‌بندی کرده و روش‌های زمین‌آمار را جهت پهنه‌بندی این نمایه مورد بررسی قرار داده و روش کریجینگ معمولی را مناسب ارزیابی کردند. عساکره (۱۳۸۷:۲۵) با بررسی بارش ۲۶ اسفند

- 1-Hargrove
- 2-Spline
- 3-Lookingbill and Urban
- 4-Tsakiris and Vangelis
- 5-Thin Plate Smoothing Splines



شکل ۱: موقعیت و نحوه پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه  
مأخذ: نگارندگان

که در آن  $Z^*$  مقدار متغیر مکانی برآورد شده،  $Z(x_i)$  مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه  $x_i$ ،  $W_i$  وزن آماری که به نمونه  $X_i$  نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه  $i$  ام در برآورد است. از مهمترین بارزترین ویژگی‌های کریجینگ این است که به ازای هر تخمینی، خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه نمود، در حالی که در روش‌های کلاسیک معمولاً چنین نیست. شرط استفاده از این تخمین‌گر این است که متغیر توزیع نرمال داشته باشد. در صورتی که متغیر مورد نظر از توزیع نرمال برخوردار نباشد باید از کریجینگ غیرخطی استفاده نمود و یا اینکه داده‌ها را با تبدیل‌های مناسب به توزیع نرمال نزدیک یا تبدیل کرد (دهقانی، ۱۳۸۷: ۶۴). همانطور که گفته شد کریجینگ بهترین تخمین‌گر ناریب است، بنابراین باید عاری از خطای سیستماتیک باشد. همچنین واریانس تخمین نیز باید حداقل باشد. بنابراین برای شرط عاری از خطا بودن، باید میانگین خطای تخمین صفر باشد، یعنی:

$$E[Z(x_i) - Z^*(x_i)] = 0 \quad \text{رابطه ۲:}$$

### روش‌های میان‌یابی - روش زمین‌آمار<sup>۱</sup>

تخمین زمین‌آمار، فرآیندی است که طی آن، مقدار یک کمیت مجهول در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار معلوم همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات مشخص به دست می‌آید. این تخمین‌گر زمین‌آمار به افتخار یکی از پیشگامان علم زمین‌آمار به نام Krige که یک مهندس معدن آفریقای جنوبی بود، به نام کریجینگ نام‌گذاری شده است. کریجینگ به عنوان یک روش زمین‌آمار است که مقبولیت خود را به عنوان ابزاری جهت میان‌یابی انواع داده‌ها از جمله بارش‌ها به دست آورده است (Dingman et al, 1998: 11) و به عنوان روشی برای پیش‌بینی ارزش یک فرآیند تصادفی در یک محل به حساب می‌آید (Ronald & Jey, 2009: 297) در مورد کریجینگ می‌توان گفت که بهترین تخمین‌گر خطی ناریب<sup>۲</sup> است که به شکل زیر می‌باشد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰: ۳۱۴):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad \text{رابطه ۱:}$$

فاصله معلوم  $h$  از یکدیگر قرار دارند محاسبه و در مقابل  $h$  رسم گردد. از مشخصات واریانس می‌توان به سقف آستانه<sup>۲</sup> واریوگرام و اثر قطعه‌ای<sup>۳</sup> اشاره کرد. به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر به آن می‌رسد، آستانه گفته می‌شود. در روش کریجینگ واریوگرام‌های که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیت بیشتری دارند (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰: ۳۱۴). در مجموع کریجینگ از نیم تغییرنا استفاده می‌کند تا روابط فضایی را بین دو نقطه نشان دهد (Wang, 2006:84).

#### - روش و معیار ارزیابی

روش‌های مختلف میان‌یابی بر اساس روش ارزیابی متقابل<sup>۴</sup> مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش یک نقطه به صورت موقتی حذف شده و با اعمال میان‌یابی مورد نظر برای آن نقطه مقداری برآورد می‌گردد. سپس مقدار حذف‌شده به جای خود برگردانده شده و برای بقیه‌ی نقاط به صورت مجزا این برآورد صورت می‌گیرد. به طوری که در پایان یک جدول با دو ستون که نشان‌دهنده‌ی مقادیر واقعی و برآورد شده می‌باشند، حاصل می‌گردد. با داشتن این دو مقدار می‌توان دقت (MAE)<sup>۵</sup> و انحراف (MBE)<sup>۶</sup> مدل را برآورد نمود. هرچه دو مقدار فوق‌الذکر به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی بالا بودن دقت مدل می‌باشد. از روش‌های دیگر جهت ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی می‌توان به روش ریشه‌ی دوم مربع خطا (RMS)<sup>۷</sup> و مقدار استاندارد شده آن (RMSS)<sup>۸</sup> و ضریب همبستگی همبستگی بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده‌ای ( $R^2$ ) اشاره کرد که هر چه مقدار RMS و RMSS کمتر باشد و میزان  $R^2$  بیشتر باشد، مدل اعمال شده دارای دقت آماری بالاتری خواهد بود. معادلات محاسبه‌ی روش‌های فوق به قرار زیر است (Isaaks & Srivastava, 1989:33).

که در آن:  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه  $I$  با مختصات معلوم،  $Z^*(x_i)$  مقدار تخمینی در همان نقطه  $i$  و  $E$  امید ریاضی می‌باشد.

#### آنالیز واریوگرام

واریانس مقدار عناصر بین نقاطی به فاصله  $h$  از یکدیگر می‌تواند همبستگی متقابل مقدار دو نقطه به فاصله  $h$  را بیان کند. در صورت وجود ساختار فضایی، طبیعی است که وابستگی مقادیر نقاط نزدیک به هم بیشتر از وابستگی مقادیر نقاط دور از هم می‌باشد. بنابراین چنین واریانسی می‌تواند معیاری برای نمایش تأثیرگذاری و یا تأثیرپذیری مقدار یک نمونه روی مقادیر محیط مجاور خود باشد. این واریانس وابسته به فاصله را تغییرنگار می‌نامند و با نماد  $2\gamma(h)$  نشان می‌دهند. با تقسیم تغییرنگار بر عدد ۲، نیم‌تغییرنگار به دست می‌آید. با استفاده از رابطه‌ی عددی زیر می‌توان مقدار تغییرنگار را محاسبه نمود (مدنی، ۱۳۷۷: ۶۵۹).

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2$$

رابطه ۳:

که در رابطه‌ی فوق:  $h$ : فاصله در جهت مشخص بین موقعیت  $x+h, x$ ،  $N(h)$ : تعداد جفت نمونه‌ها به فاصله  $h$  از یکدیگر،  $\gamma(h)$ : مقدار تغییرنگار برای فاصله  $h$ :  $Z(x)$  مقدار نمونه در نقطه  $x$ ،  $Z(x+h)$  مقدار نمونه در نقطه  $x+h$  می‌باشد. از آنجا که نیم‌تغییرنگار بر اساس تعدادی نقاط نمونه حاصل می‌شود، می‌بایست آن را با یک تابع نظری تقریب زد به طوری که در هر فاصله نیم‌تغییرنگار به وسیله‌ی این تابع برآورد گردد. این تابع به مدل نیم‌تغییرنگار<sup>۱</sup> موسوم است (عساکره، ۱۳۸۷: ۲۵).

مؤلفه‌ی اصلی و ابتدایی میان‌یابی به روش کریجینگ، ارائه‌ی مدلی مناسب بر نیم‌تغییرنگار است تا بتوان بهترین میان‌یابی را انجام داد. هدف اصلی از محاسبه واریوگرام این است که بتوان تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله‌ی مکانی یا زمانی شناخت. برای این کار لازم است مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به

2-Sill  
3-Nugget Effect  
4-Cross-Validation  
5-Mean Bias Error  
6-Mean Absolute Error  
7-Root Mean Square  
8-Root Mean Square Standard

1-Semivariogram

تعیین مقادیر عددی بسیاری از شاخص‌ها در نقاط فاقد ایستگاه، برای ایجاد و توسعه مدل‌هایی که در مقیاس وسیع اقدام به پیش‌بینی یک مشخصه یا فرآیند اکولوژیکی می‌نماید، حائز اهمیت می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل‌های انتخابی، فقط برای همان منطقه مورد اعتماد هستند. اما چنانچه یک مدل خاص برای چندین محل مناسب تشخیص داده شد، می‌توان نتیجه گرفت که آن مدل می‌تواند با اطمینان زیادی برای شرایط مشابه دیگر نیز مورد استفاده واقع شود.

- تحلیل مدل میان‌یابی کریجینگ در میان‌یابی بارش - جهت تحلیل مکانی داده‌ها از نیم‌تغییرنگار<sup>۱</sup> استفاده گردید که با استفاده از نرم‌افزار GIS محاسبه شد. برای انجام بهترین میان‌یابی مهمترین گام ارایه مدلی مناسب بر نیم‌تغییرنگار است. مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش جهت برازش شامل: مدل کروی<sup>۲</sup>، مدل نمایی<sup>۳</sup>، نمایی<sup>۳</sup>، مدل گوسی<sup>۴</sup>، مدل دایره‌ای<sup>۵</sup>، درجه دو منطقی<sup>۶</sup>، منطقی<sup>۶</sup>، کروی چهاروجهی<sup>۷</sup> و کروی پنج‌وجهی<sup>۸</sup> می‌باشد که با دو تکنیک کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی صورت گرفته است. از آنجایی که از شرط‌های اساسی در استفاده از روش کریجینگ، نرمال بودن داده‌ها است، بنابراین به منظور محاسبه‌ی نقشه‌ی هم-بارش به روش مذکور ابتدا داده‌های بارش با استفاده از تبدیلات خودکار BOX-COX با پارامتر ۰/۱ مجدداً نرمال گردید (Krishna&Abbaiah, 2004: 14). برای تعیین مدل بهینه جهت تخمین توزیع بارندگی، با اعمال هر کدام از مدل‌های مذکور بر روی داده‌های میانگین بارندگی، ۱۴ نقشه به دست آمد. سپس جهت ارزیابی و تعیین بهترین مدل، صحت و دقت هر یک از

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - z(x_i)) \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2} \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$RMSS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(z^*(x_i) - z(x_i))^2}{S^2}} = \frac{RMS}{S}$$

که در آن:  $Z^*(x_i)$ : مقدار برآورد شده‌ی متغیر مورد نظر،  $Z(x_i)$ : مقدار اندازه‌گیری شده‌ی متغیر مورد نظر،  $N$ : تعداد داده‌ها،  $S$ : واریانس خطا،  $MAE$ : میانگین مطلق خطا،  $MBE$ : میانگین خطای انحراف، می‌باشد.

#### - رگرسیون خطی

تحلیل رگرسیون این امکان را فراهم می‌آورد تا تغییرات متغیر وابسته را از طریق متغیرهای مستقل پیش‌بینی و سهم هر یک از متغیرهای مستقل را در تبیین متغیر وابسته تعیین کند (کلانتری، ۱۳۸۵: ۱۷۶). رگرسیون رابطه‌ی نزدیکی با ضریب همبستگی دارد. بدین معنا که برای انجام رگرسیون، باید ضریب همبستگی را محاسبه کرد. هرچه ضریب همبستگی بین متغیرها قوی‌تر باشد، پیش‌بینی نیز دقیق‌تر خواهد بود. جهت انجام میان‌یابی، معادلات رگرسیونی مختلفی وجود دارد که با توجه به مقدار همبستگی متغیر اصلی و ثانویه انتخاب می‌شود. بدین منظور با استفاده از مدل رگرسیون خطی ابتدا داده‌های بارش و ارتفاع ایستگاه‌های مورد بررسی در محیط نرم‌افزار Curve Expert Ver4.1 فراخوانی شده و سپس داده‌های مورد نظر با بهترین توابع نظری رگرسیونی برازش داده می‌شوند.

بحث

- 1-Semivariogram
- 2-Spherical model
- 3-Exponential model
- 4-Gaussian Model
- 5-Circular Model
- 6-Rational Quadratic
- 7-Tetraspherical
- 8-Pentaspheical

نقشه‌های تولید شده محاسبه گردید که نتایج آن در جدول شماره‌ی (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱: نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی جهت برآورد میانگین سالانه بارندگی

Number of Lags: 12					Neighborhoods: 5		مدل - تابع	روش
خطای روش ارزیابی متقابل					مشخصات مدل			
R2	RMSS	RMS	MAE	MBE	Nugget	Sill		
۰/۶۲۰	۰/۸۹۸	۳۶/۳۲	۲۵/۹۷	۰/۶۱	۱۲۹۹/۸	۱۴۰۰/۴	کروی	OK
۰/۶۱۹	۰/۸۹۴	۳۶/۳۵	۲۵/۹۲	۰/۵۷	۱۳۳۶/۹	۱۳۸۷/۱	دایره‌ای	
۰/۶۴۱	۰/۸۹۶	۳۵/۶۲	۲۵/۶۷	۰/۴۶	۱۱۰۱/۹	۱۷۳۶/۴	نمایی	
۰/۵۹۶	۰/۹۱۷	۳۶/۹۶	۲۶/۴۷	۰/۵۷	۱۴۵۱/۵	۱۱۴۶	گوسی	
۰/۶۲۲	۰/۹۱۷	۳۶/۲۲	۲۶/۲۴	۰/۵۲	۱۲۹۷/۸	۱۳۹۹/۱	درجه دو منطقی	
۰/۶۱۹	۰/۹۰۰	۳۶/۳۴	۲۶/۰۱	۰/۶۱	۱۲۸۱/۲	۱۴۱۳/۱	کروی چهاروجهی	
۰/۶۱۹	۰/۹۰۲	۳۶/۳۶	۲۶/۰۳	۰/۵۷	۱۲۷۰/۹	۱۴۲۴/۹	کروی پنج‌وجهی	
۰/۶۱۶	۰/۹۰۷	۳۶/۵	۲۶/۱۲	۰/۹۲	۱۲۷۰/۹	۱۳۸۸/۴	کروی	SK
۰/۶۲۱	۰/۹۰۴	۳۶/۶۵	۲۶/۱۳	۰/۸۹	۱۳۱۹/۲	۱۳۸۸/۲	دایره‌ای	
۰/۶۵۰	۰/۹۰۲	۳۵/۳۲	۲۵/۴۷	۰/۸۶	۹۹۱/۸	۱۷۲۲/۵	نمایی	
۰/۵۸۷	۰/۹۳۷	۳۷/۳۵	۲۷/۰۲	۰/۸۴	۱۳۹۵/۲	۱۱۲۱	گوسین	
۰/۶۴۱	۰/۹۱۷	۳۵/۶۱	۲۵/۷۳	۰/۹۲	۱۱۹۵/۸	۱۴۰۹/۴	درجه دو منطقی	
۰/۶۱۸	۰/۹۱۰	۳۶/۴۳	۲۶/۱۹	۰/۷۸	۱۲۴۰/۱	۱۳۹۶/۳	کروی چهار وجهی	
۰/۶۲۱	۰/۹۱۱	۳۶/۳۴	۲۶/۱۵	۰/۸	۱۲۱۹/۵	۱۴۰۷/۸	کروی پنج وجهی	

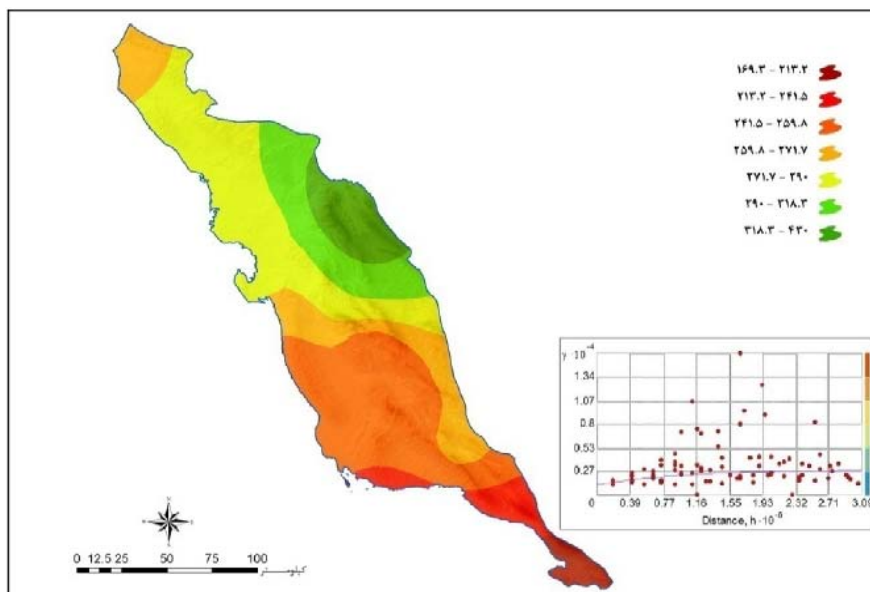
*k*: Ordinary Kriging

*SK*: Simple Kriging

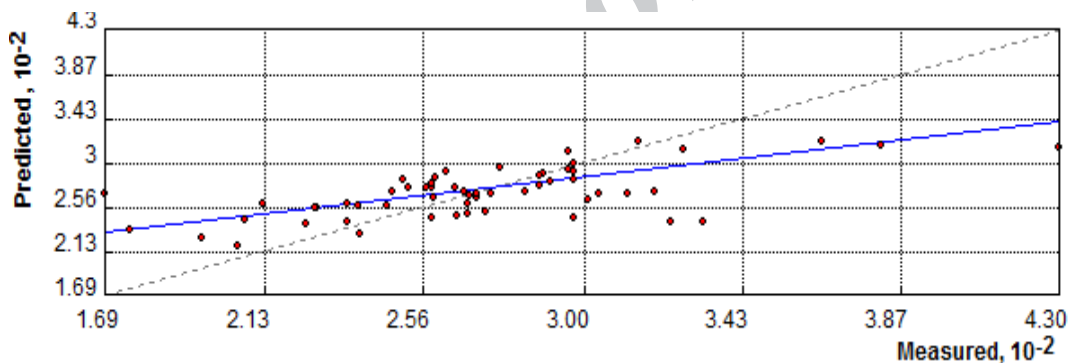
مأخذ: نگارندگان

بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با روش فوق در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. بنابراین با اطمینان زیادی می‌توان این مدل را جهت برازش و تخمین پارامترهای دیگر بارندگی در منطقه استفاده کرد.

با توجه به این جدول مشخص شد بهترین مدلی که قادر به توجیه مکانی توزیع بارندگی می‌باشد، مدل نمایی از روش کریجینگ معمولی است. نقشه‌ی پهنه‌بندی بارش به همراه نیم‌تغییر نمای آن به عنوان مدل برتر و نمودار مربوط به همبستگی



شکل ۲: نقشه‌ی تخمین سطح میانگین سالانه بارندگی استان بوشهر طی دوره‌ی آماری ۱۱ساله (۱۹۹۷-۲۰۰۷) با استفاده از تکنیک کریجینگ معمولی به روش نمایی به همراه نیم‌تغییرنما آن  
مأخذ: نگارندگان



شکل ۳: رابطه بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده بارندگی با استفاده از تکنیک کریجینگ معمولی به روش نمایی  
مأخذ: نگارندگان

می‌باشد. بدین منظور ابتدا داده‌های بارش و ارتفاع ایستگاه‌های مورد بررسی با استفاده از مدل رگرسیون خطی در محیط نرم‌افزار Expert Curve ver1.4 فراخوانی گردید، سپس داده‌های مورد نظر با ۱۸ مدل برازش داده شد. نتایج محاسبات در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج تحلیل باقیمانده‌ها مناسب بودن دو تابع رگرسیونی چندجمله‌ای درجه چهارم<sup>۱</sup> و درجه دوم<sup>۲</sup> را نشان داد (شکل‌های ۴ و ۵).

– ارزیابی رگرسیون خطی بر پایه‌ی مدل ارتفاعی رقومی جهت میان‌یابی بارش

با استفاده از روش‌های رگرسیون هدف محقق آن است که بعضی از مشخصات از روی آگاهی در مورد سایر مشخصات برآورد یا پیش‌بینی شود که این امر از طریق مدل‌سازی رگرسیون صورت می‌پذیرد. جهت انجام میان‌یابی به وسیله‌ی تحلیل‌های رگرسیونی، معادلات گسترده‌ای وجود دارد که انتخاب معادله مناسب منوط به مقدار همبستگی متغیر ثانویه و اصلی

1-Polynomial Fit  
2-Quadratic Fit



جدول ۲: میزان خطا و ضریب همبستگی ترسیم نقشه برای مدل‌های برازش‌یافته بر نیم‌تغییرنما

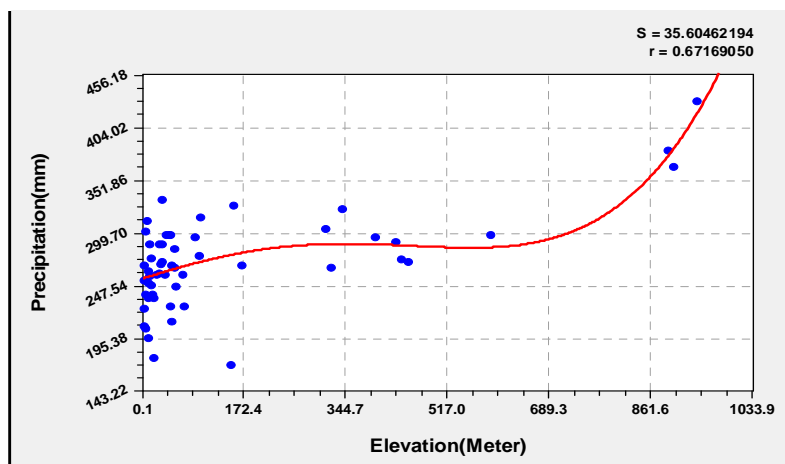
ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> )	خطای استاندارد (SE)	مدل برازش‌یافته	تابع تغییرنما
۰/۶۷	۳۵/۶۰	$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	Polynomial Fit
۰/۶۵	۳۵/۷۴	$y=a+bx+cx^2$	Quadratic Fit
۰/۶۴	۳۶/۱۱	$y = a + bx + \frac{c}{x^2}$	Heat Capacity Model
۰/۶۳	۳۶/۲۸	$y=a+bx$	Linear Fit
۰/۶۳	۳۶/۶۳	$y = \frac{a}{(1 + \ell^{b \cdot cx})^{\frac{1}{d}}}$	Richards Model
۰/۶۳	۳۶/۹۲	$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	MMF Model
۰/۶۰	۳۷/۴۴	$y = a(x - b)^c$	Shifted Power Fit
۰/۶۱	۳۷/۷۰	$y = a - b\ell^{-cx^d}$	Weibull Model
۰/۵۶	۳۸/۸۱	$y = ab^{\frac{1}{x}} x^c$	Modified Hoerl
۰/۵۶	۳۸/۸۱	$y = \ell^{\frac{a+b}{x} + c \ln x}$	Vapor Pressure
۰/۴۹	۴۰/۵۹	$y = \frac{1}{a + b \ln x}$	Reciprocal Logarithm
۰/۴۷	۴۱/۰۶	$y = ax^b$	Power Fit
۰/۴۵	۴۱/۴۹	$y = a + b \ln x$	Logarithm Fit
۰/۴۳	۴۱/۰۸	$y = ax^{\frac{b}{x}}$	Modified Geometric Fit
۰/۲۳	۴۱/۷۹	$y = a(b - \ell^{-cx})$	Exp.Association(3)
۰/۰۸	۴۶/۵۴	$y = \frac{ax}{b + x}$	Saturation Groth-Rate
۰/۰۸	۴۶/۵۶	$y = ab^{\frac{1}{x}}$	Root Fit
۰/۰۸	۴۶/۵۷	$y = a \ell^{\frac{b}{x}}$	Modified Exponential

مأخذ: نگارندگان

تابع چند جمله‌ای درجه چهارم محاسبه شده:

$$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$$

a= 2.54902063394E+002      b= 1.82606982797E-001  
 c= -8.79971603618E-005      d=-7.48984104534E-007  
 e=8.87293540994E-010      x=DEM

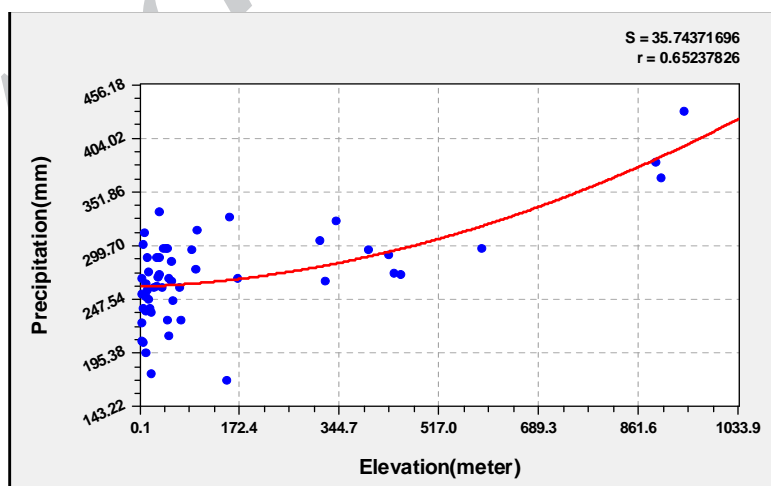


شکل ۴: مدل رگرسیون خطی بارش سالانه و ارتفاع با تابع چند جمله‌ای درجه چهارم  
 مأخذ: نگارندگان

تابع درجه دوم محاسبه شده:

$$y=a+bx+cx^2$$

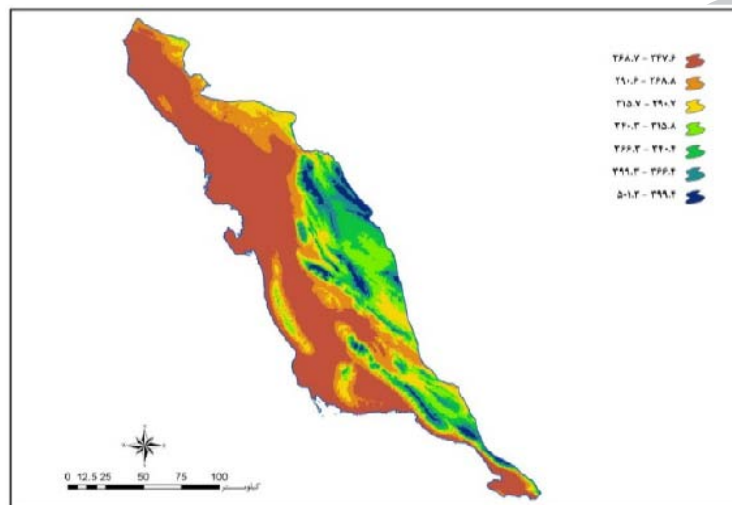
a= 2.59798330042E+002      b= 2.31977141699E-002  
 c= 1.30455262365E      x=DEM



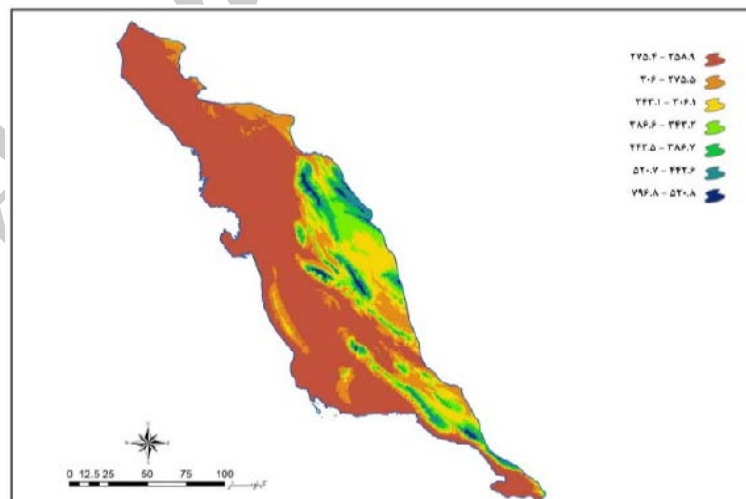
شکل ۵: مدل رگرسیون خطی بارش سالانه و ارتفاع با تابع درجه دوم  
 مأخذ: نگارندگان

لایه‌ها را از طریق ترکیب یا همپوشانی‌های وزن‌دار فراهم می‌سازد. جهت تهیه نقشه‌ی هم‌بارش برپایه‌ی مدل ارتفاعی رقومی ابتدا به کمک سطوح ارتفاعی محدوده مطالعاتی، مدل رقومی ارتفاعی زمین تهیه شد. سپس با استفاده از آنالیز مکانی و قرار دادن مدل رقومی ارتفاعی در دو تابع رگرسیونی برتر، نقشه‌ی هم‌باران منطقه ترسیم شد (شکل ۶ و ۷).

یکی از مزایای کلیدی سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)، توانایی آن در به کارگیری توابع مکانی روی داده‌های GIS، جهت گرفتن اطلاعات جدید می‌باشد. از میان داده‌های موجود در GIS، ساختار داده‌های رستری جهت آنالیزهای مکانی قوی‌تر و مناسب‌تر می‌باشد. یکی از ابزارهای موجود برای این کار، Spatial Analyst می‌باشد که در حقیقت ارتباط میان



شکل ۶: نقشه توزیع بارش سالانه به روش رگرسیون تابع چند جمله‌ای درجه چهارم  
مأخذ: نگارندگان



شکل ۷: نقشه توزیع بارش سالانه به روش رگرسیون تابع درجه دوم  
مأخذ: نگارندگان

با توجه به نتایج بالا به وضوح می‌توان دید که روش چندجمله‌ای درجه چهارم نسبت به دیگر روش‌ها از نظر دقت و انحراف، نتایج بهتری را جهت میان‌یابی بارش در استان بوشهر را از خود نشان می‌دهد. حال با مشخص شدن مدل بهینه و با استفاده از آنالیز مکانی، به راحتی می‌توان از طریق تفاضل‌گیری هر نقشه با نقشه بهینه، میزان خطای نقشه‌ی مورد نظر را محاسبه کرد که در اینجا به عنوان نمونه نقشه محاسبه شده از تفاضل بین روش رگرسیون خطی با تابع چند جمله‌ای درجه چهارم به عنوان روش بهینه و روش کریجینگ معمولی با مدل نمایی آورده شده است (شکل ۸).

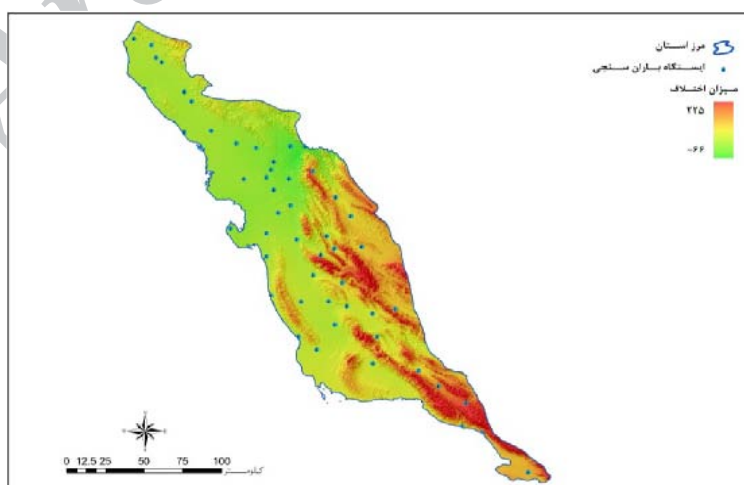
همانطور که در این نقشه مشاهده می‌شود، میزان اختلاف دو نقشه‌ی فوق در مناطقی که ارتفاعات وجود دارد، بیشتر است و در همین مناطق است که ایستگاه‌های کمتری برای اندازه‌گیری میزان نزولات جوی جهت میان‌یابی وجود دارد. بنابراین باید این نکته را در نظر گرفت که وجود ایستگاه‌های سنجش و اندازه‌گیری به تعداد کافی و مناسب و همچنین پراکنش صحیح و اصولی آن‌ها، در عملیات میان‌یابی نقش تعیین‌کننده‌ای در صحت نقشه‌های تولید شده دارد.

با توجه به نتایج فوق، برای انتخاب بهترین روش جهت میان‌یابی داده‌های بارش، از تکنیک ارزیابی متقابل و ضریب تبیین استفاده شد. نتایج این محاسبات در جدول شماره‌ی (۳) آمده است. مقادیر همبستگی مکانی بین توپوگرافی و روش‌های میان‌یابی نشان‌دهنده این است که بیشترین همبستگی به ترتیب در روش چند جمله‌ای درجه چهارم، تابع درجه دوم و کریجینگ معمولی با مدل نمایی می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی مدل نمایی با توپوگرافی نشان‌دهنده وجود یک رابطه‌ی مثبت بین مقادیر بارش با ارتفاع است اما این رابطه نسبت به دو روش دیگر ضعیف‌تر است. که این امر خود به نوعی رابطه بارش و ارتفاع را در میان‌یابی بارش آشکار می‌سازد.

جدول ۳: ماتریس همبستگی مکانی مقادیر میان‌یابی با توپوگرافی

روش میان‌یابی	خطای روش ارزیابی متقابل		ضریب تعیین ( $R^2$ )
	MAE	MBE	
روش کریجینگ معمولی با مدل نمایی	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۶۴
روش رگرسیون خطی با تابع چندجمله‌ای درجه چهارم	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸	۰/۶۷
روش رگرسیون خطی درجه دوم	۳۸/۱۷	۳۸/۱۷	۰/۶۵

مأخذ: نگارندگان



شکل ۸: نقشه تفاضل بین روش رگرسیون خطی با تابع چندجمله‌ای درجه چهارم و روش کریجینگ معمولی با مدل نمایی

مأخذ: نگارندگان

## نتیجه

با بررسی‌های فوق نتیجه گرفته می‌شود که:

- ۱- مناسب‌ترین روش جهت میان‌یابی بارش سالانه در استان بوشهر با توجه به ۵۷ ایستگاه مورد بررسی و با بازه زمانی ۱۱ ساله، روش رگرسیون با تابع چند جمله‌ای درجه چهارم تشخیص داده شد.
- ۲- استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و اعمال آن در مدل ارتفاعی رقومی زمین، رفتار بارش را در مکان‌هایی که با فقدان و یا کمبود ایستگاه مواجه هستند، بهتر نشان می‌دهد که این خود ارزشمندی این روش را در مطالعات محیطی بهتر مشخص می‌کند.
- ۳- یکی از اصول میان‌یابی به روش کریجینگ، وجود اطلاعات نقطه‌ای پایه می‌باشد که حاوی ارزش‌های مربوط به یک پارامتر است که این امر با توجه به نحوه‌ی پراکندگی مناسب و کافی ایستگاه‌های هواشناسی موجب کاهش خطا و افزایش دقت در میان‌یابی می‌شود.
- ۴- جهت میان‌یابی باید به این نکته توجه شود که تعداد کافی و مناسب و همچنین پراکنش صحیح و اصولی ایستگاه‌های سنجش و اندازه‌گیری، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملیات میان‌یابی ایفا می‌کنند. در نتیجه نواحی که از توزیع مناسب و یا تعداد کافی ایستگاه‌ها برخوردار نمی‌باشند، نسبت به نواحی دیگر در زمان ساخت ایستگاه‌های جدید در اولویت قرار می‌گیرند.
- ۵- با استفاده از تحلیل خوشه‌ای می‌توان صحت همگنی داده‌های انتخاب شده در پهنه‌های مختلف را تشخیص داد. چرا که تحلیل خوشه‌ای این امکان را به وجود می‌آورد که داده‌های همسان در یک گروه قرار بگیرند و این درحالی‌است که داده‌های درون یک گروه شباهت زیادی باهمدیگر داشته، اما تفاوت قابل توجهی با گروه‌های دیگر دارند.
- ۶- هدف نهایی از بررسی تغییرات مکانی بارش، شبیه‌سازی مطمئن تغییرات داده‌های بارش در بُعد مکان می‌باشد، به نحوی که جهت اهداف بعدی از جمله پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت بارش در هر منطقه فراهم شود.

## منابع

- ۱- تازه، مهدی؛ محمدرضا کوثری؛ مهسا بخشایی؛ یونس خسروی (۱۳۸۷). پهنه‌بندی خشکی بر اساس نمایه ترانسو با استفاده از زمین‌آمار و GIS (مطالعه موردی: بخش غربی استان اصفهان)، کنفرانس بین‌المللی گیاه‌شناسی درختی و تغییر اقلیم در اکوسیستم‌های خزری. پژوهشکده اکوسیستم‌های خزری ساری.
- ۲- حسنی‌پاک، علی‌اصغر (۱۳۸۰). تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۳- دهقانی، مصطفی (۱۳۸۷). کاربرد و بررسی انواع تخمین‌گر کریجینگ، سمینار کارشناسی ارشد. دانشگاه یزد
- ۴- رحیمی‌بندرآبادی، سیما؛ محمدحسین مهدیان (۱۳۸۲). بررسی تغییرات مکانی بارندگی ماهانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جنوب‌شرق ایران، سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم. دانشگاه اصفهان.
- ۵- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۸). سالنامه هواشناسی کشور.
- ۶- سلطانی، سعید؛ رضا مدرس (۱۳۸۵). تحلیل فراوانی و شدت خشکسالی هواشناسی استان اصفهان، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۱.
- ۷- شمس‌الدینی، علی (۱۳۷۹). تغییرات منطقه‌ای بارندگی با استفاده از روش کریجینگ در استان‌های شمالی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه شیراز.
- ۸- صفری، مجید (۱۳۸۱). تعیین شبکه بهینه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی با کمک روش‌های زمین‌آماری مطالعه موردی دشت چمچال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۹- عساکره، حسین (۱۳۸۷). کاربرد روش کریجینگ در میان‌یابی بارش (مطالعه موردی: میان‌یابی بارش ۱۳۷۶/۱۲/۲۶ در ایران زمین)، جغرافیا و توسعه. سال ششم. شماره ۱۲.
- ۱۰- قهرودی‌تالی، منیژه (۱۳۸۴). سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط سه بُعدی، تهران. انتشارات جهاد دانشگاهی. واحد تربیت معلم.

- 19- Donald L Phillips L,D. Jayne Dolph J and Marks, D (1992). A Comparison of Geostatistical Procedures for Spatial Analysis of Precipitation in Ountainous Terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58.
- 20- Isaaks, E.H, Srivastava, R.M (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford University Press: New York.
- 21- Goovaerts, P (2000). Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation Rainfall. *Journal of Hydrology*, Amsterdam. 228(1-2).
- 22- Hargrove, W (2001). Interpolation of rainfall in Switzerland using a regularized spline with tension. *Geographic Information and Spatial Technologies Group*, book Ridge National laboratory.
- 23- Knapp, A.K. Smith, M, D (2001). Variation among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production, *Journal of Science*, 291.
- 24- Krishna murthy, B.R and SAbbaiah, G (2007). Geostatistical Analysis for Estimation of Mean Rainfalls in Andhra Pradesh, India, *International of Journal of geology*, 3(1).
- 25- Lookingbill, T.R and Urban, D.L (2003). Spatial estimation of air temperature differences for landscape- scale studies in montane environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114.
- 26- Ronald, P.B, and jay, M.V.H (2009). Blackbox Kriging: Spatial Prediction without Specifying Variogram Models, *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 1(2).
- 27- Tsakiris G, Vangelis H (2004). towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resour Manag* 18 (1).
- 28- Wang, F (2006). *Quantitative methods and applications in GIS*. CRC Press.
- ۱۱- کلانتری، خلیل (۱۳۸۵). پردازش و تحلیل داده‌ها در تحقیقات اجتماعی- اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار SPSS، نشر شریف.
- ۱۲- لشنی‌زند، مهران (۱۳۸۱). بررسی اقلیم خشکسالی‌های ایران و راهکارهای مقابله با آن (مطالعه موردی شش حوضه واقع در غرب و شمال غرب ایران)، پایان‌نامه دکتری. دانشگاه اصفهان.
- ۱۳- مدنی، حسن (۱۳۷۷). مبانی زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۱۴- مسعودیان، سیدابوالفضل (۱۳۸۲). تحلیل ساختار دمای ماهانه ایران، مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان.
- ۱۵- مهدی‌زاده، محمد (۱۳۸۱). ارزیابی زمین‌آماری برای برآورد دما و بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تهران.
- 16- Austin, A. T., L. Yahdjian, J. M. Stark, J. Belnap, A. Porporato, U. Norton, D. A. Ravetta, and S. M. Schaeffer (2004). Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia* 141.
- 17- Collins, S.L. Sinsabaugh, R.L. Crenshaw, C. Green, L. Porras Alfaro, A. Stursova, M. Zeglin, L. H (2008). Pulse dynamics and microbial processes in aridland ecosystems, *Journal of Ecology*, 96.
- 18- Dingman, S. L., Seely-Reynolds, D.M., and Reynolds, R.C (1998). Application of Kriging to Estimating Mean Anual Precipitation in a Region of Orographic Influence. *Journal of the American Water Resources Association*, 24.