

جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)
دوره جدید، سال چهاردهم، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۵

آنالیز خطا در ارزیابی شاخص خشکسالی SPI با استفاده از زمین‌آمار

مطالعه موردی: استان بوشهر

یونس خسروی^۱ و غلامعلی مظفری^۲

تاریخ وصول: ۱۳۹۴/۹/۲۴، تاریخ تایید: ۱۳۹۴/۱۲/۲۹

چکیده

چگونگی توزیع فضایی شاخص‌های خشکسالی و از همه مهمتر، صحت مدل‌سازی آن‌ها، امری مهم جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان در تحلیل فضایی این شاخص‌ها به‌شمار می‌آید. رویکردهای مدیریتی در زمینه مبارزه با پدیده خشکسالی نه تنها نیازمند اطلاعات کمی در این رابطه است، بلکه دانستن احتمال و ریسک رخداد این پدیده کمک شایانی در اتخاذ تدابیر مناسب مدیریتی می‌نماید. سیستم پایش خشکسالی از سیستم‌های بسیار مفید در مدیریت خشکسالی محسوب می‌گردد. در راستای طراحی چنین سیستم‌هایی، پس از محاسبه شاخص‌های خشکسالی، تحلیل مکانی آن‌ها اهمیت تعیین‌کننده‌ای دارد. روش‌های زمین‌آمار از جمله تکنیک‌هایی هستند که می‌تواند بدین منظور مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، از داده‌های بارش ۲۷ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان بوشهر با دوره آماری ۱۹ ساله (سال زراعی ۱۳۷۵-۱۳۷۴ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲) جهت محاسبه شاخص بارندگی استاندارد (SPI) استفاده شد. با توجه به محاسبات صورت گرفته، سال زراعی ۷۹-۱۳۷۸ به عنوان خشکترین سال انتخاب شد و تمامی محاسبات فقط بر روی این سال صورت گرفت. در مرحله بعد محاسبات متغیر مکانی بودن شاخص SPI مورد بررسی قرار گرفت. بعد از احراز این شرط، از روش‌های زمین‌آمار شامل کریجینگ معمولی، وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) و TPSS برای تحلیل مکانی این شاخص و رسم نقشه‌های فصلی و سالانه خشکسالی استفاده و عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق ضمن تأیید متغیر مکانی بودن شاخص SPI نشان داد که روش IDW با توان ۲ جهت تحلیل فضایی شاخص SPI مناسب‌تر می‌باشد.

کلیدواژگان: خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده، زمین‌آمار، تغییرپذیری فضایی، بوشهر.

۱. استادیار گروه علوم محیط زیست، دانشگاه زنجان (نویسنده مسئول)

۲. دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد

مقدمه

قرارگیری ایران در قلمرو اقلیمی خشک و نیمه‌خشک سبب شده است که بسیاری از مناطق کشور همواره بارش کمی دریافت کنند و دائماً با کمبود آب مواجه باشند. توجه به مسأله پیشگیری و کاهش پیامدهای خشکسالی در مناطق مختلف، نیازمند برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات پیشگیرانه در مقابله با پدیده خشکسالی می‌باشد که خود مستلزم به‌کارگیری دانش کافی در پیش‌بینی خشکسالی است (خزایی، ۱۳۸۰). در برخورد با هر بلیه طبیعی از جمله خشکسالی دو نوع مدیریت وجود دارد، یکی مدیریت بحران و دیگری مدیریت ریسک. در مدیریت بحران اقدامات درمانی بعد از وقوع حادثه انجام می‌گیرد، اما در مدیریت ریسک جنبه‌های مختلف بلایای طبیعی مطالعه و بررسی شده و برنامه‌ریزی جهت پیشگیری و کاهش میزان خسارت قبل از وقوع پدیده انجام می‌شود (نوریان و همکاران، ۱۳۸۱). یکی از مؤلفه‌های اساسی مدیریت ریسک خشکسالی، پایش دقیق شرایط خشکسالی جهت کاهش اثرات مخرب این بلای اقلیمی است. توزیع فضایی خشکسالی از جمله ویژگی‌های مهم این پدیده است و بر همین اساس تحلیل فضایی وضعیت خشکسالی نسبت به بررسی ایستگاهی آن، سبب شناخت کاملتری از این پدیده می‌شود. بدین ترتیب لازم است پدیده خشکسالی و شاخص‌های تعیین‌کننده آن را شناخت و با اعمال مدیریت صحیح و با نگرش سیستمی و داشتن تصویری واقعی از نقش مدیریت جامع منابع آب و خاک در جهت توسعه پایدار، گام‌های مدیریت صحیح را با اتکا بر نتایج حاصل از تحقیقات و مطالعات دامنه‌دار، مطمئن برداشت (لشنی‌زند، ۱۳۸۱).

برای بیان کمی پدیده خشکسالی و همچنین ارزیابی آن در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌گردد که برای محاسبه آن‌ها وجود داده‌های مناسب و طولانی مدت پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی بسیار ضروری است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص‌های DI^1 ، PN^2 ، SPI^3 ، CZI^4 ، $MCZI^5$ ، EDI^6 و ZSI^7 اشاره کرد.

-
1. Deciles Index
 2. Present of Normal Index
 3. Standardized Precipitation Index
 4. China Z Index
 5. Modified CZI Index
 6. Effective Drought Index
 7. Z-Score Index

تعیین مناسب‌ترین روش درونیابی در سطح یک منطقه و تبیین چگونگی توزیع فضایی و مکانی آن، امری ضروری برای تحلیل فضایی شاخص‌های خشکسالی به‌شمار می‌آید. اما آن دسته از روش‌ها دارای بیشترین دقت هستند که موقعیت، همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها را در نظر می‌گیرند. از آن جمله می‌توان به روش‌های زمین‌آمار^۱ اشاره داشت. 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 (حسینی پاک، ۱۳۸۰). محققان بسیاری به مقایسه و ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آمار^۲ پرداخته‌اند که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع در تحلیل فضایی داده‌های اقلیمی می‌باشد. کولینز و بولستاد^۳ (۱۹۹۴) روش‌های مختلفی برای درونیابی داده‌های درجه حرارت حداقل و حداکثر در آمریکا مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که انتخاب بهترین تکنیک برای درونیابی تحت‌تأثیر مستقیم دامنه تغییرات درجه حرارت، واریانس آن‌ها و میزان همبستگی درجه حرارت با ارتفاع منطقه است. مقیاس مورد مطالعه، تراکم نسبی نقاط و توزیع مکانی ایستگاه‌ها بر روی انتخاب بهترین روش تأثیر زیادی دارد. چبوک^۴ (۱۹۹۵) کوشید تا با روش میان‌یابی کریجینگ الگوی زمانی - مکانی خشکسالی‌های مراکش را شناسایی کند. وی پس از کشف ساختار زمانی - مکانی خشکسالی‌ها تلاش نمود تا این الگوها را با سیستم‌های سینوپتیک توضیح دهد. گووارتز^۵ (۲۰۰۰) با استفاده از روش‌های موجود در زمین‌آمار نظیر کریجینگ و کوکریجینگ مشخص نمود که این روش‌ها نسبت به روش‌های دیگر مانند عکس مجذور فاصله جهت تخمین داده‌های بارندگی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. زاکیریس و ونجلس^۶ (۲۰۰۴) به منظور پایش خشکسالی و تحلیل مکانی آن، نقشه بارندگی ماهانه و نقشه درصد نرمال متوسط بارندگی سالانه با کمک روش عکس مجذور فاصله ترسیم نموده و سپس با استفاده از این اطلاعات، نقشه توزیع مکانی شاخص SPI را برای دوره آماری یکساله ۶۵-۱۹۶۴ تهیه کردند. ناوم و سانیس^۶ (۲۰۰۴) در

-
1. Geostatistics
 2. Collins and Bolstad
 3. Chbouk
 4. Goovaerts
 5. Tsakiris and Vangelis
 6. Naoum and Tsanis

کشور سوئیس دوازده تکنیک مختلف زمین‌آماری را برای تهیه نقشه هم‌باران مورد مقایسه قرار دادند و در نهایت، بهترین مدل را برای درون‌یابی داده‌های بارندگی سالانه آن منطقه، مدل‌های کریجینگ نمایی^۱ و کریجینگ عمومی^۲ معرفی نمودند. مهدیان و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقی که در ایستگاه‌های موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران و بر روی داده‌های درجه حرارت ماهانه و سالانه و تبخیر و تعرق انجام داده‌اند، بهترین روش برای درون‌یابی این داده‌ها را TPSS^۳ معرفی نمودند. درون‌یابی در سایر شاخه‌های محیطی از جمله خاکشناسی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و غیره صورت گرفته است. لاسلت و همکاران^۴ (۱۹۷۸) به مقایسه مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در تخمین اسیدیته خاک سطحی پرداخته‌اند و بهترین روش که منجر به ارائه نتایج بهتری می‌شود را گزارش کرده‌اند. همچنین ولتز و گولارد^۵ (۱۹۹۴) سه روش مختلف درون‌یابی را برای تعیین منحنی رطوبتی خاک مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌اند. حسینی و همکاران (۱۹۹۳) چندین روش درون‌یابی را برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک مورد مقایسه قرار دادند تا خطوط هم‌میزان را برای منطقه جنوب غربی ایران ترسیم کنند.

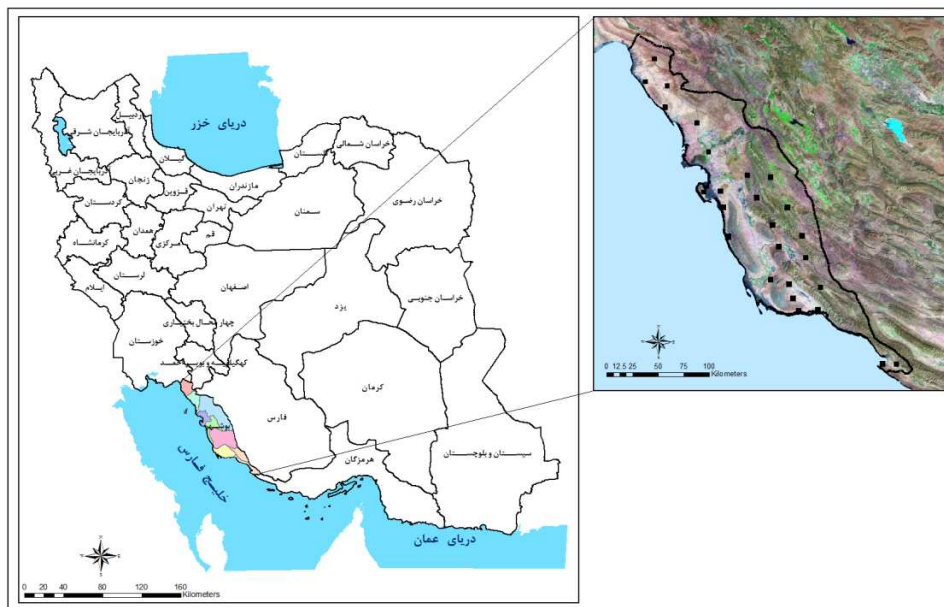
تحقیق حاضر، تلاشی است برای تحلیل فضایی شاخص خشکسالی SPI^۱ و تهیه نقشه‌های مربوط که در آن سعی شده است تا با توجه به استاندارد شدن بارندگی، ابتدا متغیر مکانی بودن آن مورد بررسی قرار گیرد و پس از احراز این شرط، از روش‌های زمین‌آماری شامل کریجینگ معمولی^۶، وزن‌دهی عکس فاصله^۸ و TPSS^۹ برای تحلیل مکانی و رسم نقشه‌های فصلی و سالانه خشکسالی استفاده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

-
1. Exponential Kriging
 2. Universal Kriging
 3. Thin Plate Smoothing Spline
 4. Laslett and Mcbratney
 5. Voltz and Goulard
 6. Standardized Precipitation Index
 7. Ordinary Kriging
 8. Inverse Distance Weighting
 9. Thin Plate Smoothing Splines

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پهنه جغرافیایی استان بوشهر می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های بارش ۲۷ ایستگاه سینوپتیک با طول دوره آماری ۱۹ ساله (سال زراعی ۷۵-۷۴ تا ۹۳-۹۲) واقع در استان بوشهر استفاده شده است. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

شاخص خشکسالی SPI

برای ارزیابی و پایش خشکسالی‌های اقلیمی روش‌های متعددی توسط محققان مختلف در سراسر دنیا به کار گرفته شده است که در همه مکان‌ها دسترسی به آن مقدور نبوده و گاهی برای سایر مناطق نیز از کارآمدی کافی برخوردار نیستند. در این بین، شاخص SPI به جهت استفاده آن از مقیاس زمانی برای پایش دوره‌های خشک به عنوان شاخص مناسب و با کارایی بالا مدنظر قرار گرفته است (ثنایی‌نژاد، ۱۳۸۲). از جمله دلایل استفاده از این شاخص می‌توان به استاندارد بودن این شاخص اشاره داشت چرا که می‌توان از آن در مطالعات منطقه‌ای و ایجاد ارتباط زمانی بین رخداد‌های خشکسالی، در بخش‌های مختلف یک پهنه استفاده کرد (لشنی‌زند، ۱۳۸۳). از

دلایل دیگر می‌توان به قابلیت انعطاف‌پذیری این روش نسبت به مقیاس‌های زمانی و مکانی اشاره کرد. ویژگی دیگر این شاخص این است که، امکان مقایسه آن با شاخص‌های اقلیمی که استاندارد و نرمال هستند آسانتر می‌باشد (فاتحی مرج و همکاران، ۱۳۸۴). شاخص SPI بدون بعد بوده و از بی‌نظمی داده‌های گسسته و تبدیل شده بارش که بر انحراف معیار بارندگی تقسیم شده است، محاسبه می‌شود. این شاخص از معادله زیر بدست می‌آید:

$$SPI = \frac{X_{ik} - \bar{X}_i}{\delta_i} \quad (1)$$

که در آن: δ_i انحراف از معیار داده‌های ایستگاه شماره i ، X_{ik} مقادیر بارندگی برای ایستگاه k و i مشاهده و \bar{X}_i : متوسط بارندگی ایستگاه i می‌باشد (Agnew, 2006).

تحلیل مکانی

در مطالعات جغرافیایی برداشت اطلاعات اغلب به صورت نقطه‌ای انجام می‌پذیرد، بنابراین ضروری است تا این داده‌های نقطه‌ای به سطوح تعمیم داده شوند. از طرف دیگر با گسترش و تعمیم این داده‌ها و با مشخص نمودن تغییرات زمانی و مکانی هر متغیر، می‌توان رفتار آن را در نقاط مجهول تخمین زد. فرآیند برآورد مقادیر اطلاعاتی برای مکان‌هایی که اطلاعاتی برای آن‌ها وجود ندارد بر اساس اطلاعات مناطق نمونه، درون‌یابی فضایی گفته می‌شود (فرجی سبکبار و عزیز، ۱۳۸۵). برای انجام این کار روش‌های مختلفی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها روش‌های زمین‌آماري کریجینگ، عکس مجذور فاصله و TPSS می‌باشد. برتری این روش‌ها نسبت به روش‌های دیگر نظیر تیسن، وارد کردن اطلاعات و موقعیت مکانی داده‌ها می‌باشد که از این طریق می‌توان ارتباط و همبستگی بین داده‌ها را به خوبی شبیه‌سازی نمود. جهت بررسی همبستگی مکانی بین داده‌ها می‌توان به‌عنوان نمونه به تغییرنما^۱ اشاره نمود (Issaks & Srivastava, 1989).

تغییر نما

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، نیم تغییرنگار به دست می‌آید. با استفاده از رابطه عددی زیر می‌توان مقدار تغییرنگار را محاسبه نمود (مدنی، ۱۳۷۷).

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

که در رابطه 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 و $Z(x+h)$ 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^۱ موسوم است (عساکره، ۱۳۸۷).

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 فاصله معلوم h از یکدیگر قرار دارند محاسبه و در مقابل h رسم گردد. از مشخصات واریانس می‌توان به سقف آستانه^۲ واریوگرام و اثر قطعه‌ای^۳ اشاره کرد. به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر به آن می‌رسد، آستانه گفته می‌شود. مقدار آستانه برابر واریانس کل تمام نمونه‌هایی است که در محاسبه تغییرنما به کار رفته‌اند. در روش کریجینگ واریوگرام‌های که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیت

1. Semivariogram

2. Sill

3. Nugget Effect

بیشتری دارند. مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات یعنی به ازای $h=0$ ، اثر قطعه‌ای (C_0) می‌باشد. در حالت ایده‌آل مقدار C_0 باید صفر باشد. اما در بیشتر مواقع بزرگتر از صفر است. در این حالت جزء تصادفی و یا غیرساختاردار متغیر ظاهر می‌شود (حسینی پاک، ۱۳۸۰). در این تحقیق جهت مشخص نمودن بیشترین همبستگی مکانی بین داده‌ها، تغییرنا برای راستاهای اصلی صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه ترسیم گردید. همچنین به دلیل وجود ناهمسانگردی که در نتیجه متفاوت بودن آستانه و شعاع تأثیر در راستاهای مختلف بوجود آمده است، از تغییرناهای همه‌جانبه^۱ که بیانگر متوسط تغییرات متغیر در تمام راستاها می‌باشد، برای تشریح پیوستگی مکانی استفاده شده است.

روش‌های میان‌یابی زمین آمار

روش‌های زمین‌آماری یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین است. مبنای این روش‌ها محاسبه میانگین وزن‌دار مقادیر واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین، بر اساس ارتباط فضایی بین آنها، شعاع تأثیر و ناهمسانگردی محاسبه شده توسط تغییرنا است که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (3)$$

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 روش‌های زمین‌آماری مورد استفاده در این تحقیق می‌توان به روش‌های کریجینگ، عکس مجذور فاصله و TPSS اشاره کرد.

روش کریجینگ

یکی از روش‌های بسیار مناسب و پیشرفته جهت تحلیل فضایی و توزیع منطقه‌ای داده‌های مکانی، روش کریجینگ می‌باشد. در این تکنیک، از یک روش میانگین وزنی برای توزیع متغیرها استفاده می‌شود، بدین صورت که هر چه متغیر به مبدا نزدیکتر باشد، وزن آن بیشتر و

هر چه فاصله نقاط دورتر باشد، وزن کمتر خواهد بود. مطلق بودن تخمین در درون‌یابی از ویژگی‌های عمده روش کریجینگ است. بدین مفهوم که مقدار تخمین کمیت در نقاط نمونه‌برداری با مقدار اندازه‌گیری شده برابر می‌باشد و واریانس تخمین صفر می‌گردد. این ویژگی سبب می‌شود که تخمین‌گر کریجینگ در رسم خطوط هم‌ارزش از حداکثر نقاط نمونه‌برداری عبور نموده و تمایلی به بسته شدن و دور زدن نداشته باشد و از مرز محدوده مورد مطالعه فراتر رود.

روش عکس مجذور فاصله

کلیه روش‌های درون‌یابی بر مبنای این فرضیه توسعه یافته‌اند که نقاط نزدیک‌تر به یکدیگر نسبت به نقاط دورتر همبستگی و تشابه بیشتری دارند. در روش وزن‌دهی عکس فاصله، فرض اساسی بر این است که میزان همبستگی و تشابه بین همسایه‌ها با فاصله بین آن‌ها متناسب است که می‌توان آن را به صورت تابعی با توان معکوس از فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد. لازم به یادآوری است که تعریف شعاع همسایگی و توان مربوط به تابع عکس فاصله از مسائل مهم در این روش محسوب می‌شود.

در روش عکس فاصله، مقدار فاکتور وزنی (λ_i) با استفاده از روش زیر محاسبه می‌شود:
در رابطه فوق، D_i فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه i ، α توان معادله و n تعداد نقاط مشاهده شده می‌باشد.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (4)$$

روش TPSS

TPSS یک نوع روش میان‌یابی از نوع اسپلاین^۱ است اما ثابت شده است که نوعی کریجینگ است (واتسون، ۱۹۸۴). برای درون‌یابی بر اساس مدل اسپلاین از چند جمله‌ای‌ها استفاده می‌شود. از برازش یک تابع جمله‌ای بر اساس داده‌های نمونه، مقادیر نامعلوم برآورد می‌شوند.

1. Spline

ویژگی اساسی اسپلاین این است که در سطح تغییرات ناگهانی وجود ندارد. در معادلات درجه دوم و سوم این تغییرات و انحنایها به حداقل خود رسیده و در نتیجه یک سطح نسبتاً همواری به دست می آید.

معیارهای ارزیابی

روش‌های مختلف میان‌یابی بر اساس روش ارزیابی متقابل^۱ مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش یک نقطه به صورت موقتی حذف شده و با اعمال میان‌یابی موردنظر برای آن نقطه مقداری برآورد می‌گردد. سپس مقدار حذف شده بجای خود برگردانده شده و برای بقیه 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^2) و انحراف (MBE^3) مدل را برآورد نمود. هر چه دو مقدار فوق‌الذکر به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی بالا بودن دقت مدل می‌باشد. روش محاسبه این روش‌ها به شرح زیر است:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (5)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (6)$$

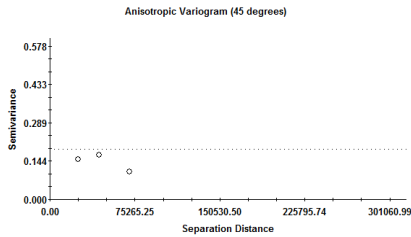
که در آن‌ها $Z^*(x_i)$ مقدار برآورد شده‌ی متغیر مورد نظر؛ $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده‌ی متغیر مورد نظر؛ N تعداد داده‌ها؛ MAE میانگین مطلق خطا و MBE میانگین خطای انحراف می‌باشد.

یافته‌های تحقیق

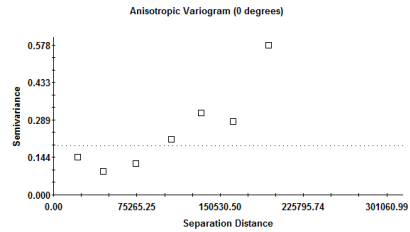
تحلیل مکانی، در واقع مطالعه‌ی کمی پدیده‌ها و فرآیندهایی است که در فضای چند بعدی^۴ به وقوع می‌پیوندند. روش‌های تجزیه و تحلیل مکانی در قلمروی آمار مکانی واقع می‌گردند. این

1. Cross-Validation
2. Mean Absolute Error
3. Mean Bias Error
4. Multi-Dimensional Space

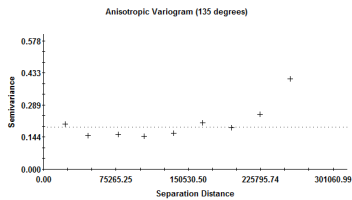
روش‌ها، مجموعه‌ای بسیار وسیع و متنوع از ابزارهای پردازشی را تشکیل می‌دهند. برای مشخص شدن این موضوع که آیا شاخص خشکسالی SPI متغیر مکانی می‌باشد یا نه، باید از تحلیل واریوگرام استفاده کرد. با توجه به تعدد ماه‌ها در اینجا به‌عنوان نمونه واریوگرام تجربی شاخص SPI برای مهرماه سال آبی ۱۳۷۸-۷۹ ترسیم گردید. واریوگرام در چهار راستای اصلی ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه برای زوج نقاط موجود ترسیم شد (شکل ۲). همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، این شاخص در راستاهای مختلف دارای آستانه و شعاع تأثیر متفاوت است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در پیوستگی مکانی این پارامتر ناهمسانگردی وجود دارد. بنابراین در چنین حالتی باید از واریوگرام همه‌جانبه که بیانگر متوسط تغییرات SPI در تمام راستاها می‌باشد، استفاده کرد (شکل ۳). با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با افزایش فاصله، واریانس نیز زیاد می‌شود. که این روند نشان از وجود پیوستگی مکانی در این شاخص می‌باشد. این روند در اکثر ماه‌ها نیز مشاهده شد. با توجه به این مشخصه که استاندارد شدن بارندگی برای محاسبه این شاخص نتوانسته است هیچ تغییری در متغیر مکانی بودن آن ایجاد کند لذا با اطمینان می‌توان از روش‌های زمین‌آماري برای تحلیل مکانی شاخص خشکسالی SPI استفاده نمود.



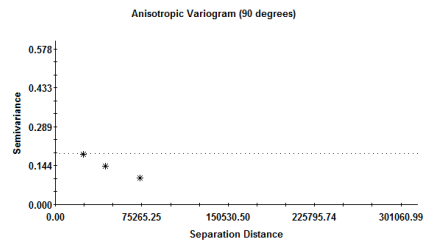
ب: واریوگرام در راستای شمال شرقی - جنوب غربی



الف: واریوگرام در راستای شرقی - غربی

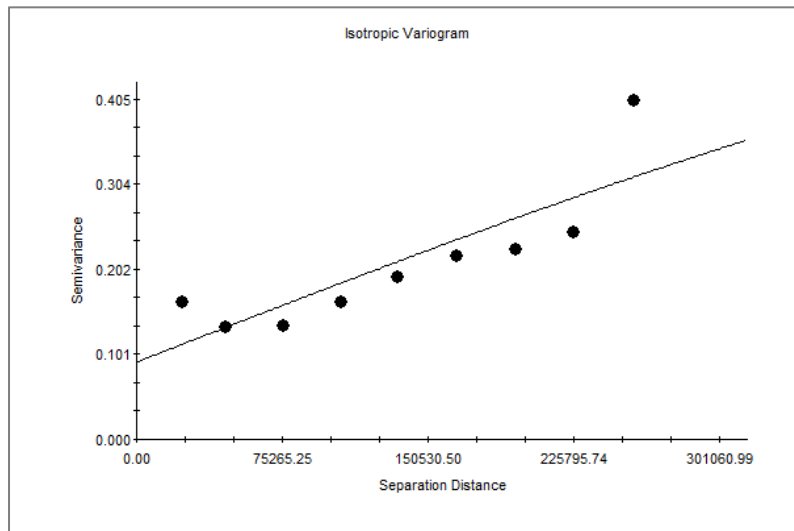


د: واریوگرام در راستای شمال غربی - جنوب شرقی



ج: واریوگرام شمالی - جنوبی

شکل ۲. واریوگرام تجربی شاخص SPI در مهرماه ۷۹ - ۱۳۷۸ در چهار راستای اصلی (الف تا د)



شکل ۳. واریوگرام تجربی همه جانبه شاخص SPI در مهرماه ۷۹ - ۱۳۷۸

یکی از ویژگی‌های مهم واریوگرام، تعیین تعداد زوج نقاط تشکیل‌دهنده هر یک از نقاط واریوگرام می‌باشد. جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که هر یک از نقاط واریوگرام از چه تعداد زوج نقاط تشکیل شده است. به عنوان مثال، نقطه اول در برگزیده ۲۶ زوج و نقطه دوم ۵۵ زوج را شامل می‌شود و همچنین فاصله و واریانس مندرج در آن به ترتیب نشان‌دهنده متوسط فواصل زوج‌ها از یکدیگر و میانگین واریانس مقادیر شاخص زوج‌ها می‌باشد. بنابراین به راحتی می‌توان مشخص کرد که چه ایستگاه‌هایی و با چه مشخصاتی با یکدیگر زوج شده‌اند. همانطور که در این جدول ذکر شده است نقطه شماره ۹ دارای بیشترین میزان واریانس می‌باشد. بنابراین قابل تشخیص است که کدام یک از ایستگاه‌ها با یکدیگر زوج شده‌اند تا افزایش واریانس در نقطه ۹ از واریوگرام رخ دهد. جدول شماره ۲ اطلاعات مربوط به نقطه ۹ واریوگرام را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان گفت که ایستگاه‌های کنگان، گناوه، بساتین و بوشهر موجب افزایش ناگهانی واریانس این نقطه شده‌اند.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نقاط واریوگرام تجربی مهرماه ۷۹-۱۳۷۸

طبقه (Lag Class)	تعداد جفت نقاط	متوسط فاصله (متر)	متوسط واریانس
۱	۲۶	۲۳۰۳۹/۰۵	۰/۱۶۵
۲	۵۵	۴۵۱۷۶/۴۸	۰/۱۳۶
۳	۶۲	۷۵۶۲۱/۸۱	۰/۱۳۶
۴	۴۵	۱۰۵۱۵۵/۷	۰/۱۶۵
۵	۴۳	۱۳۴۵۸۸/۳	۰/۱۹۵
۶	۳۱	۱۶۴۹۰۴/۲	۰/۲۱۹
۷	۱۹	۱۹۵۵۷۱/۷	۰/۲۲۷
۸	۱۹	۲۲۴۹۸۳/۱	۰/۲۴۸
۹	۱۲	۲۵۶۷۰۰/۲	۰/۴۰۵

جدول ۲: زوج نقاط طبقه نهم واریوگرام تجربی شاخص SPI مهرماه ۷۹ - ۱۳۷۸

جفت نقاط	زوج اول	زوج دوم	فاصله (متر)	واریانس
۱	انارستان	شول	۲۵۰۱۸۴/۶	۰
۲	آبدان	مظفری	۲۵۴۵۰۵/۴	۰/۱۷۶
۳	بساتین	بوشهر	۲۵۰۱۴۷/۸	۱/۶۱۳
۴	بساتین	تونل دریاقلی	۲۶۵۲۲۴/۷	۱/۴۱۶
۵	بساتین	کره بند	۲۶۸۱۴۱	۰/۷۴
۶	بوشهر	چاه مبارک	۲۶۱۶۱۷/۷	۰/۹۶
۷	چاه مبارک	سمل جنوبی	۲۴۶۹۳۰/۱	۰/۳۲۵
۸	دوراهک	شول	۲۴۱۹۸۱/۱	۰/۳۲۵
۹	دوراهک	مظفری	۲۶۷۴۸۸/۲	۰/۳۲۵
۱۰	دیر	شول	۲۶۰۸۰۳/۳	۰/۱۰۹
۱۱	شول	کنگان	۲۶۸۲۵۹/۴	۱/۴۱۶
۱۲	کنگان	گناوه	۲۴۵۱۱۸/۹	۲/۳۱

برای ترسیم تغییرنمای شاخص SPI، لازم است ابتدا مدل تئوریک آنها تهیه شود و سپس با استفاده از تکنیک ارزیابی متقابل^۱ و معیارهای خطای MAE و MBE، از میان مدل‌های موجود، مدل مناسب انتخاب گردد. برای انجام تحلیل مکانی، پس از برازش مدل‌ها و تغییر پارامترهای مختلف، از روش کریجینگ استفاده شد. سپس معیارهای خطاگیری با استفاده از تکنیک ارزیابی متقابل محاسبه شد. در نهایت با مقایسه مقادیر خطا بهترین مدل برگزیده شد. در جدول شماره ۳ مدل‌های مناسب برای سایر ماه‌ها و همچنین پارامترهای تغییرنما برای شاخص SPI ارائه شده است.

1. Cross -Validation

جدول ۳. آنالیز واریوگرام (مشخصات واریوگرام‌های تنوری ماهانه) شاخص SPI سال آماری ۱۳۷۸-۷۹

SPI					شاخص
ضریب همبستگی	دامنه تأثیر (کیلومتر)	آستانه	اثر قطعه‌ای	مدل	مشخصات ماه
۰/۸۹	۱۱۵	۱/۹	۰/۱۲۹	کروی	مهر
۰/۰۱۷	۷۳	۰/۲۱	۰/۰۹۶	کروی	آبان
۰/۰۶۲	۳۳	۰/۳۳	۰/۱۶	نمایی	آذر
۰/۰۵۳	۲۳	۰/۱۴	۰/۰۷۱	گوسی	دی
۰/۶۷	۳۱۰	۰/۵۹	۰/۰۵	نمایی	بهمن
۰/۴۳	۶۰	۱/۷۹	۰/۱۱	کروی	اسفند
۰/۱۶	۸۰	۰/۲۶	۰/۰۸	گوسی	فروردین
۰/۱۴	۱۷۷	۰/۲۵	۰/۰۴	نمایی	اردیبهشت
۰/۲۰	۲۵	۰/۴	۰/۰۴	کروی	خرداد
۰/۲۱	۲۳۱	۲/۲۴	۰/۰۹۱	گوسی	تیر
۰/۱۴	۴۸۶	۱/۹۹	۰/۱۷	گوسی	مرداد
۰/۱۲	۱۲۲	۱/۲۹	۰/۱۱	گوسی	شهریور

پس از مشخص شدن مکانی بودن شاخص خشکسالی، با استفاده از روش‌های زمین‌آماری ذکر شده می‌توان به تحلیل مکانی این شاخص پرداخت. از شرط‌های اساسی در استفاده از روش کریجینگ، نرمال بودن داده‌ها است، بنابراین با استفاده از پارامتر چولگی ابتدا وضعیت نرمال بودن داده‌ها مشخص گردید، سپس با استفاده از روش‌های مختلف نظیر روش‌های موجود در نرم‌افزار GS+ و همچنین با استفاده از تبدیلات خودکار BOX-COX با پارامتر ۰/۱ موجود در نرم‌افزار ArcGis 10.2 سعی در نرمال نمودن داده‌ها گردید. روش TPSS با توان‌های ۲ و ۳ با و بدون متغیر کمکی (ارتفاع) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در اکثر ماه‌ها توان ۲ موجب حداقل خطا (MAE) و انحراف (MBE) در تخمین شده است (جدول ۴). در روش IDW برای بهینه کردن دو پارامتر نقاط همسایگی و توان متغیر، به ترتیب از مجموعه {۱۷، ۱۵، ۵} و {۲۱} ایستگاه و از اعداد ۲ و ۳ برای توان استفاده شد تا مقادیر بهینه با استفاده از معیارهای خطاگیری انتخاب گردند. دلیل انتخاب این مجموعه اعداد به عنوان نقاط همسایگی، ارتباط فضایی موجود بین ایستگاه‌ها و همچنین شعاع تأثیر می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که توان ۲ با نقاط همسایگی ۱۷ از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد (جدول ۵). البته در ماه‌های مهر، مرداد و شهریور به ترتیب تعداد

نقاط همسایگی ۲۱، ۱۵ و ۵ دارای کمترین انحراف می‌باشد. پس از تحلیل مکانی روش‌های زمین‌آمار ارزیابی روش‌ها به دو صورت انجام گرفت. در روش اول، ملاک ارزیابی، معیارهای خطاگیری MAE و MBE می‌باشد. جدول شماره ۶ میزان خطا و انحراف مقادیر تخمینی روش‌ها را نسبت به مقادیر واقعی نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، کمترین خطا (MAE) مربوط به روش IDW می‌باشد (شکل ۴)، این در حالی است که از نظر انحراف (MBE) در رتبه دوم می‌باشد (شکل ۵). همچنین این روش به جز ماه‌های مهر، مرداد و شهریور در سایر ماه‌ها توانسته است، دقت بهتری را در محاسبات خود داشته باشد. از طرف دیگر کمترین نوسانات MBE مربوط به روش کریجینگ می‌باشد. حال اگر MAE را به عنوان فاکتور اصلی در انتخاب روش‌ها در نظر گرفته شود، می‌توان روش IDW را به عنوان گزینه برتر شناخت، حتی اگر توأمآ هر دو معیار خطا را جهت روش بهینه مدنظر بگیریم، بازهم روش IDW به عنوان روش برتر شناخته می‌شود (شکل ۶).

جدول ۴. نتایج بدست آمده از ارزیابی شاخص SPI با استفاده از روش TPSS در سال آماری ۷۹-۱۳۷۸

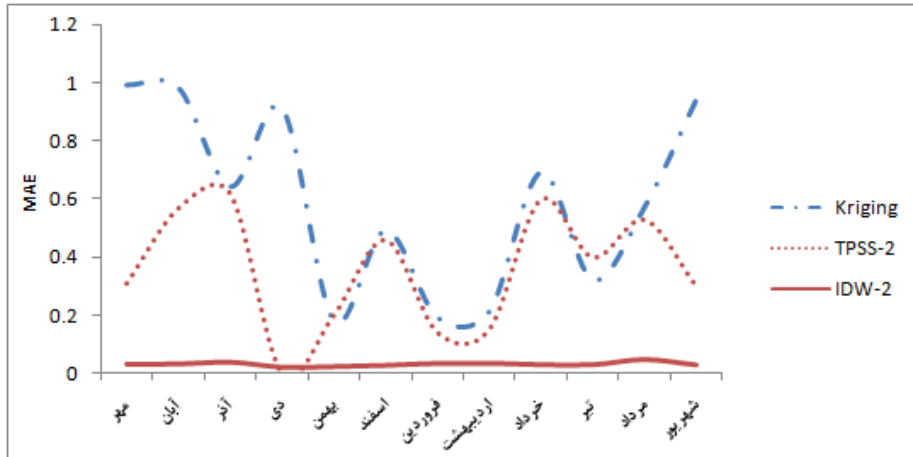
SPI				شاخص
MBE	MAE	MBE	MAE	معیار خطاگیری
TPSS-3	TPSS-3	TPSS-2	TPSS-2	ماه روش
-۰/۰۲۲	۰/۴۷	-۰/۰۰۸	۰/۳۱	مهر
۰/۰۱	۰/۶۳	۰/۰۰۷	۰/۵۷	آبان
۰/۰۰۵	۰/۶۸	۰/۰۰۷	۰/۶۲	آذر
-۰/۰۰۱	۰/۹۳	-۰/۰۰۱	۰/۸۹	دی
-۰/۰۰۲	۰/۱۷	-۰/۰۰۶	۰/۲	بهمن
-۰/۰۲۲	۰/۵۷	۰/۰۱۸-	۰/۴۶	اسفند
-۰/۰۳۷	۰/۳۳	۰/۰۲۶-	۰/۱۴	فروردین
-۰/۰۳۶	۰/۳۴	-۰/۰۲۵	۰/۱۵	اردیبهشت
-۰/۰۲۱	۰/۶۷	۰/۰۱۷-	۰/۶	خرداد
-۰/۰۲۹	۰/۴۲	۰/۰۲۲-	۰/۴	تیر
-۰/۰۲۸	۰/۴۶	-۰/۰۱۳	۰/۵۳	مرداد
۰/۰۰۵	۰/۵۱	۰/۰۰۷	۰/۳	شهریور

جدول ۵. تأثیر نقاط همسایگی در مقادیر MAE و MBE در روش IDW با توان ۲

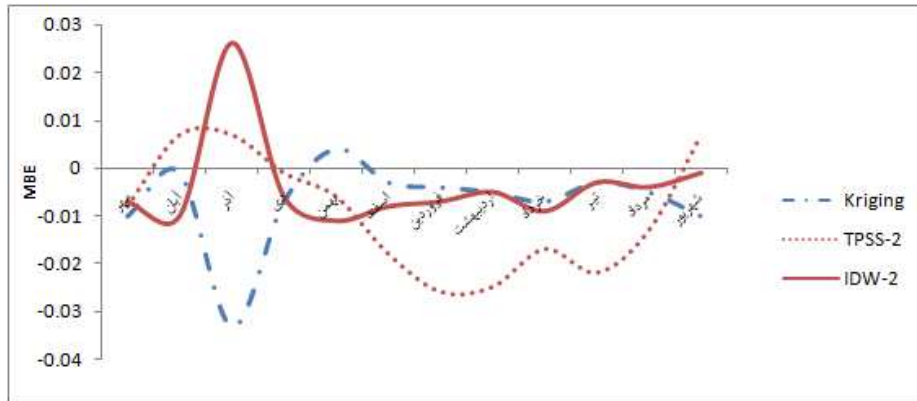
N ^۵ :5		N:15		N:17		N:21		ماهها
MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	
-۰/۰۰۹	۰/۰۳۱	-۰/۰۰۸	۰/۰۳	-۰/۰۰۷	۰/۰۹۷	۰/۰۰۷-	۰/۰۲۵۴	مهر
-۰/۰۰۱	۰/۰۳۰۵	-۰/۰۰۱	۰/۰۳۰۵	-۰/۰۱	۰/۰۳۰۲	۰/۰۰۱-	۰/۰۳۱۳	آبان
۰/۰۲۳	۰/۰۳۶۷	۰/۰۲۴	۰/۰۳۶۸	۰/۰۲۶	۰/۰۳۶۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳۶۷	آذر
-۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۹۷	-۰/۰۲۲	۰/۰۱۹۷	-۰/۰۰۶	۰/۰۱۹۴	-۰/۱۴۷	۰/۰۲۰۷	دی
-۰/۰۱۲	۰/۰۲۱۴	۰/۰۱۱-	۰/۰۲۱۵	-۰/۰۱۱	۰/۰۲۱۲	-۰/۰۱۱	۰/۰۲۲۳	بهمن
-۰/۰۰۰۴	۰/۰۲۵۷	۰	۰/۰۲۵۸	-۰/۰۰۸	۰/۰۲۵۵	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۶۷	اسفند
-۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۸	-۰/۰۱۸	۰/۰۳۳۶	-۰/۰۰۷	۰/۰۳۳۳	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۳۵	فروردین
-۰/۰۱۹	۰/۰۳۲۹	-۰/۰۱۸	۰/۰۳۳۱	-۰/۰۰۵	۰/۰۳۲۸	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۴۴	اردیبهشت
-۰/۰۰۲	۰/۰۲۹۱	-۰/۰۰۲	۰/۰۲۸۱	-۰/۰۰۹	۰/۰۲۷۸	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۹۱	خرداد
-۰/۰۰۲	۰/۰۲۸۲	۰/۰۰۳-	۰/۰۲۸۱	-۰/۰۰۳	۰/۰۲۷۸	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۹	تیر
-۰/۰۰۱	۰/۰۴۶۳	-۰/۰۰۲	۰/۰۴۵۸	-۰/۰۰۴	۰/۰۴۵۵	-۰/۰۰۱	۰/۰۴۴۷	مرداد
-۰/۰۰۲	۰/۰۲۷۸	-۰/۰۰۴	۰/۰۲۳۴	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۷۱	-۰/۰۰۱	۰/۰۲۸۳	شهریور

جدول ۶. ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در برآورد شاخص خشکسالی SPI طی دوره آماری ۷۹-۱۳۷۸

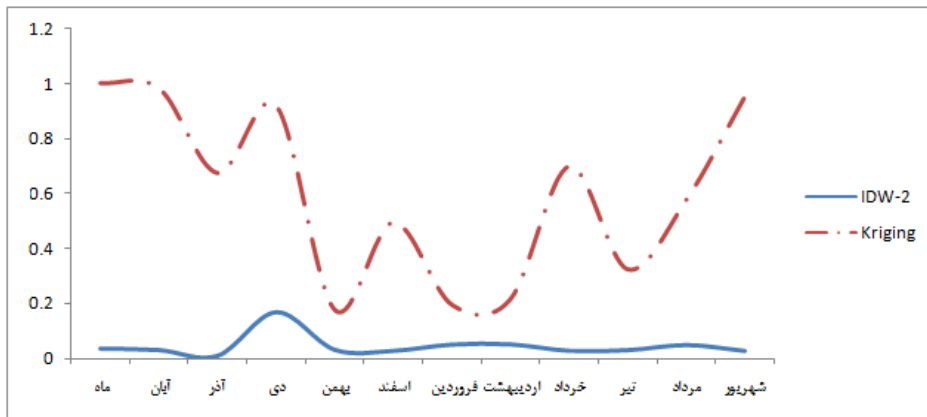
SPI						شاخص
MBE			MAE			معیار خط‌گیری
IDW2	TPSS2	Kriging	IDW2	TPSS2	Kriging	ماهها
-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸	-۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۹۹	مهر
-۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۱	۰/۰۳۰۵	۰/۵۷	۰/۹۸	آبان
۰/۰۲۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۳۳	۰/۰۳۶۸	۰/۶۲	۰/۶۴	آذر
-۰/۰۲۲	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۷	۰/۰۱۹۷	۰/۸۹	۰/۹۱	دی
۰/۰۱۱-	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۱۵	۰/۲	۰/۱۸	بهمن
۰	۰/۰۱۸-	-۰/۰۰۳	۰/۰۲۵۸	۰/۴۶	۰/۴۹	اسفند
-۰/۰۱۸	۰/۰۲۶-	-۰/۰۰۴	۰/۰۳۲۶	۰/۱۴	۰/۱۹	فروردین
-۰/۰۱۸	-۰/۰۲۵	-۰/۰۰۵	۰/۰۳۳۱	۰/۱۵	۰/۲۱	اردیبهشت
-۰/۰۰۲	۰/۰۱۷-	-۰/۰۰۷	۰/۰۲۸۱	۰/۶	۰/۶۹	خرداد
۰/۰۰۳-	۰/۰۲۲-	-۰/۰۰۳	۰/۰۲۸۱	۰/۴	۰/۳۲	تیر
-۰/۰۰۲	-۰/۰۱۳	-۰/۰۰۵	۰/۰۴۵۸	۰/۵۳	۰/۵۷	مرداد
-۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۱	۰/۰۲۳۴	۰/۳	۰/۹۴	شهریور



شکل ۴. ارزیابی روش‌ها بر اساس معیار خطا (MAE) در تحلیل فضایی شاخص SPI طی دوره آماری ۱۳۷۸-۷۹

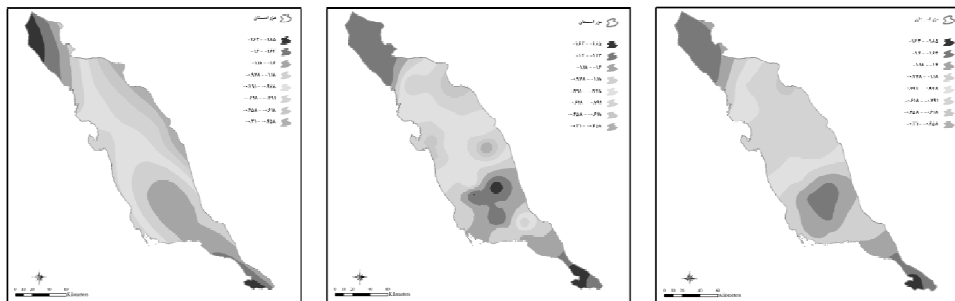


شکل ۵. ارزیابی روش‌ها بر اساس معیار انحراف (MBE) در تحلیل فضایی شاخص SPI طی دوره آماری ۱۳۷۸-۷۹

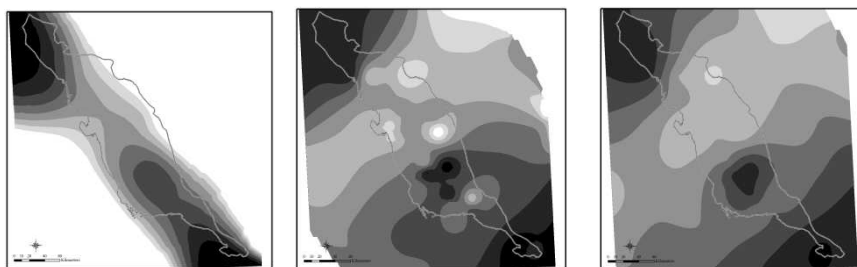


شکل ۶. انتخاب روش بهینه بر اساس معیارهای خطا (MAE) و انحراف (MBE)

در روش دوم، نقشه‌های شاخص خشکسالی SPI با روش‌های مختلف ترسیم شد تا از لحاظ کیفی مقایسه صورت گیرد. شکل شماره ۷ نقشه شاخص SPI با روش‌های زمین‌آماری برای مهرماه ۱۳۷۹ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود روش‌های کریجینگ (شکل ۷ الف) و عکس مجذور فاصله (شکل ۷ ب) تقریباً شرایط مشابهی را از نظر خشکسالی نشان می‌دهند. این در حالی است که روش TPSS (شکل ۷-ج و ۸-ج) شرایط کاملاً متفاوتی را ارائه داده است. روش TPSS علیرغم نتایج مثبت در مقادیر MAE و قرار گرفتن در رتبه ۲ به عنوان روش برتر، نقشه‌هایی ارائه داده است که از روند و تغییرات منطقی پیروی نمی‌کند و ناهماهنگی‌هایی بخصوص در مرزهای شمالی و جنوبی منطقه بوجود آورده است. در توجیه این وضعیت می‌توان این گونه متذکر شد که این روش بخوبی نتوانسته برون‌یابی مناسبی را انجام دهد، به گونه‌ای که بخش‌هایی از منطقه بخصوص شمال و جنوب منطقه که از تراکم ایستگاه کمتری برخوردار می‌باشد، تغییرات شدیدی در برآورد طبقات خشکسالی دیده می‌شود. با مقایسه نقشه‌های شاخص SPI حاصل از برون‌یابی روش TPSS (شکل ۸-ج) و روش کریجینگ (شکل ۸-الف)، مشخص می‌شود که جاهایی از منطقه که از پراکنش خوب ایستگاه‌ها برخوردار می‌باشد، برون‌یابی مشابهی صورت گرفته است. این درحالی است که برون‌یابی بسیار متفاوتی حاصل از این دو روش انجام پذیرفته است. با توجه به این نقشه‌ها شباهت برون‌یابی حاصل از روش IDW (شکل ۸-ب) و روش کریجینگ بخوبی قابل مشاهده است.



الف: روش کریجینگ ب: روش IDW ج: روش TPSS
 شکل ۷. نقشه شاخص SPI اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۹ با استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آمار



الف: روش کریجینگ ب: روش IDW ج: روش TPSS
 شکل ۸. وضعیت برون‌یابی شاخص SPI اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۹ با استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آمار

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از تکنیک‌های زمین‌آمار کربجینگ معمولی، وزن‌دهی عکس فاصله و TPSS جهت تحلیل فضایی شاخص خشکسالی SPI استفاده گردید تا بر این اساس بهترین تکنیک برای پهنه‌بندی این شاخص در استان بوشهر انتخاب شود. برای انتخاب بهترین روش زمین‌آمار جهت پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SPI از تکنیک Cross-validation با معیارهای خطاگیری MAE و MBE استفاده شد. یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در مقادیر MAE و MBE، تعداد نقاط همسایگی می‌باشد که در روش‌های IDW و TPSS به‌کار برده می‌شود. به‌گونه‌ای که با اعمال نقاط همسایگی مختلف نتایج ارزیابی نیز تغییر پیدا خواهد کرد.

نتایج نشان داد که از بین روش‌های کریجینگ معمولی، عکس مجذور فاصله و TPSS، روش عکس مجذور فاصله با توان ۲ کمترین خطا (MAE) را به خود اختصاص داده است و این در حالی است که کمترین نوسانات انحراف (MBE) مربوط به روش کریجینگ می‌باشد. اگر MAE را به‌عنوان فاکتور اصلی در انتخاب روش‌ها در نظر گرفته شود، روش IDW را به‌عنوان گزینه برتر می‌توان شناخت، از طرف دیگر اگر تماماً هر دو معیار MAE و MBE جهت روش بهینه مدنظر بگیریم، باز هم روش IDW به‌عنوان روش برتر شناخته می‌شود. جهت میان‌یابی باید به این نکته توجه شود که تعداد کافی و مناسب و همچنین پراکنش صحیح و اصولی ایستگاه‌های هواشناسی سنجش و اندازه‌گیری، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملیات میان‌یابی ایفا می‌کنند. در نتیجه نواحی‌ای که از توزیع مناسب و یا تعداد کافی ایستگاه برخوردار نمی‌باشند، نسبت به نواحی دیگر در زمان ساخت ایستگاه‌های جدید باید در اولویت قرار گیرند. از جمله نتایج مهم این تحقیق این بود که جهت اعلام وضعیت خشکسالی مناطق تنها محاسبه شاخص خشکسالی موردنظر مهم نمی‌باشد بلکه به موازات آن روشی که برای تحلیل فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز نقش به‌سزائی دارد.

کتابشناسی

۱. اختری، روح‌انگیز؛ مهدیان، محمدحسین و مرید، سعید (۱۳۸۵)، تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی SPI و EDI در استان تهران. تحقیقات منابع آب، ۲(۳)، صص ۳۸-۲۷؛
۲. ثنایی‌نژاد، سیدحسین؛ انصاری، حسین؛ داوری، کامران و مرید، سعید (۱۳۸۲)، پایش و ارزیابی شدت دوره‌های خشک مشهد در مقیاس‌های زمانی متفاوت با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش. مجله علوم خاک و آب، ۱۷(۲)، ص ۲۷؛
۳. حسنی پاک، علی‌اصغر (۱۳۸۰)، تحلیل داده‌های اکتشافی، تهران، دانشگاه تهران؛
۴. خزائی، محمدرضا (۱۳۸۰)، پیش‌بینی شدت خشکسالی و کمبود جریان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه علم و صنعت ایران؛
۵. عساکره، حسین (۱۳۸۷)، کاربرد روش کریجینگ در میان‌یابی بارش (مطالعه موردی: میان‌یابی بارش ۱۳۷۶/۱۲/۲۶ در ایران زمین). جغرافیا و توسعه، ۱۲(۱)، صص ۲۵-۴۲؛
۶. فاتحی مرچ، احمد؛ برهانی داریان، علیرضا و مهدیان، محمدحسین (۱۳۸۵)، پیش‌بینی بارش فصلی با استفاده از پیوند دور (مطالعه موردی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰(۳)، ص ۱۹۹؛
۷. فرجی سبکبار، حسنعلی و عزیزی، قاسم (۱۳۸۵)، ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی (مطالعه موردی: الگوسازی باندگی حوضه کارده مشهد). پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۸(۵)، ص ۱؛
۸. لشنی زند، 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؛
۹. لشنی زند، مهران (۱۳۸۳)، بررسی شدت و فراوانی خشکسالی‌های اقلیمی در شش حوضه واقع در غرب و شمال غرب کشور. مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان (علوم انسانی)، ۱۶(۱)؛
۱۰. مدنی، حسن (۱۳۷۷)، مبانی زمین‌آمار، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛
۱۱. نوریان، علی‌محمد؛ بدائی‌جمالی، جواد و جوانمرد، سهیلا (۱۳۸۱)، گزارش ملی ریسک بلایای طبیعی، سازمان هواشناسی کشور؛
12. Agnew, C. T. (2000), Using SPI to identify drought, *Network News*, 12, pp 6-11.
13. Byun H. R., and D. A. Wilhite. (1999), Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate*, 12, pp 2747-2756;
14. Collins, Jr. F. C. and Bolstad, P. V (1994), A Comparison of Spatial Interpolation Techniques in Temperature Estimation;
15. Chbouk, N. (1995), Spatial-temporal Patterns of Drought in Morocco, *Journal of Climatology*, 15, pp 187-207;

16. Goovaerts, P. (2000), Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation into the Spatial Interpolation of Rainfall: *Journal of Hydrology*, 228, pp 113-129;
17. Hosseini, E., Gallichand, J. and Caron, J. (1993), Comparison of Several Interpolators for Smoothing Hydraulic Conductivity Data in South West Iran. *Transactions of the ASAE* 37(6), pp 1799-1807;
18. Issaks. E. H. and Srivastava, R.M. (1989), *Applied Geostatistics*, New York, Oxford University Press;
19. Laslett, G.M., Mcbratney, A.B., Phal, P.I. and Hutchinson , M.F. (1987), Comparison of several Spatial PrEDiCtion Methods for Soil PH. *Journal of Soil Science*, 38, pp 325-341;
20. Mahdian, M.H, Hosseini, E and Matin, M. (2001), Investigation of Spatial Interpolation Methods to Determine the Minimum Error of Estimation: Case study, Temperature and Evaporation, ProceDIng of the 6th International Conference on Geocomputation, University of Queensland, Brisbane, Australia;
21. Naoum, S. and Tsanis, I.K. (2004), Ranking Spatial Interpolation Techniques Using a Gis-based DSS, *Global Nest: the Int. J.* 6, pp 1-20;
22. Tsakiris G, Vangelis H. (2004), towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resour Manag*, 18, pp 1-12;
23. Voltz, M. and Goulard, M, (1994), Spatial Interpolation of Soil Moisture Retention Curves, *Geoderma*, 62, pp 109-123;
24. Watson, G.S. (1984), Smoothing and Interpolation by Kriging and with Splines, *Mathematical Geology*, 16, pp 601-615;
25. Wilhite, DA. (2000), *Drought: A Global Assessment*. Rutledge Publishers, London.