

واژه‌های کلیدی: بارندگی، تحلیل مکانی، زمین‌آمار، سامانه اطلاعات جغرافیایی، کریجینگ معمولی

مقدمه

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجهی که در سال‌های اخیر در خصوص پیش‌بینی و اندازه‌گیری بارندگی انجام شده است، هنوز تعیین دقیق میزان بارندگی در یک منطقه امری مشکل می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل پراکندگی ایستگاه‌ها و تغییرات زیاد بارندگی، اهمیت در نظر گرفتن موقعیت ایستگاه‌ها در برآوردها دو چندان می‌شود در هر صورت ایجاد شبکه‌های مترکم باران‌سنجی و انجام محاسبات کلاسیک درون‌یابی امری اجتناب ناپذیر است. ازسوی دیگر به دلایل اقتصادی و اجرایی، محدودیت قابل توجهی جهت ایجاد تعداد ایستگاه‌های کافی در هر منطقه وجود دارد. این مشکل در مناطق نیمه کوهستانی نیمه خشک افزون‌تر می‌باشد [۳۰]. امروزه روش‌های مختلف زمین‌آمار برای تخمین متغیرهای مکانی منطقه‌ای، به دلیل در نظر گرفتن هم‌بستگی، موقعیت و ترتیب داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. با محاسبه‌ی مقادیر نقطه‌ای بارش برای هر ایستگاه هواشناسی و انتخاب روش مناسب می‌توان نقشه هم‌باران را به صورت ناحیه‌ای برای یک منطقه ترسیم کرد. برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های ناحیه‌ای می‌توان از روش‌های درون‌یابی استفاده کرد. روش‌های درون‌یابی شامل روش‌های آمارکلاسیک (عکس فاصله‌ی وزنی^۱ و توابع پایه شعاعی^۲، چند جمله‌ای عام^۳، چند جمله‌ای محلی^۴) و روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ معمولی^۵ و کوکریجینگ^۶) می‌باشد [۱۴، ۲۱]. روش‌های مختلف زمین‌آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را نشان می‌دهند. به طوری که برای برآورد بارندگی روزانه و ماهانه در حوزه آبخیز دریای خزر سه روش کریجینگ معمولی، میانگین متحرک وزنی و اسپلاین استفاده و روش اسپلاین مناسب‌ترین روش انتخاب شد [۲۸، ۶، ۵] و در ارزیابی دیگری در این منطقه روش‌های عکس فاصله وزنی، کریجینگ آستانه خطی، دایره‌ای و نمایی به عنوان روش‌های مناسب ارزیابی شد [۳۲]. هم‌چنین ارزیابی روش‌های درون‌یابی بارندگی در استان فارس نشان

ارزیابی مقایسه‌ای کارایی روش‌های درون‌یابی در برآورد بارندگی سالانه و ماهانه حوزه آبخیز دریاچه نمک

فریبا اسماعیلی^۱ و مهدی وفاخواه^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

چکیده

یکی از مشکلات مهم مطالعات منابع آب، تخمین توزیع مکانی بارندگی بر اساس مشاهدات نقطه‌ای می‌باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، ارزیابی روش‌های درون‌یابی شامل روش‌های آمارکلاسیک (عکس فاصله‌ی وزنی، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای عام، چند جمله‌ای محلی) و روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ و کوکریجینگ) به منظور تخمین بارندگی ماهانه و سالانه در حوزه آبخیز دریاچه نمک و بررسی تغییرات مکانی آن‌ها در محدوده زمانی سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا ۱۳۹۵-۱۳۹۶ انجام شد. در این پژوهش، به منظور مقایسه روش‌های درون‌یابی در تهیه نقشه هم‌باران حوزه آبخیز دریاچه نمک، از ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی در داخل حوزه آبخیز مذکور با طول دوره آماری ۳۰ ساله استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد به طور کلی در داده‌های سالانه با توجه به شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) روش‌های زمین‌آمار کوکریجینگ و کریجینگ به ترتیب در رتبه اول و دوم بهترین برآورد را از بارندگی به دست می‌دهند به طوری که در داده‌های سالانه روش کوکریجینگ با RMSE ۶۳/۶۸ میلی‌متر بهترین برآورد را داشته است. هم‌چنین در داده‌های ماهانه روش‌های توابع پایه شعاعی، کوکریجینگ و کریجینگ بهترین برآورد را از بارندگی داشتند. به طور کلی در اکثر موارد روش‌های زمین‌آمار در تخمین بارندگی ماهانه و سالانه حوزه آبخیز دریاچه نمک بیش تخمینی داشته‌اند.

3. Inverse Distance Weighting (IDW)
4. Radial Basis Functions (RBF)
5. Global Polynomial Interpolation (GPI)
6. Local Polynomial Interpolation (LPI)
7. Ordinary Kriging (OK)
8. CoKriging (OC)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی تربیت مدرس، نور، ایران
 ۲- استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی تربیت مدرس، مسئول نویسنده، ایران، نور
 Email: vafakhah@modares.ac.ir

روش پژوهش منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دریاچه نمک در دامنه جنوبی رشته کوه های البرز مرکزی بین مختصات جغرافیایی $48^{\circ} 08' 00''$ تا $52^{\circ} 08' 00''$ طول شرقی و $33^{\circ} 00' 00''$ تا $36^{\circ} 30' 00''$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت این حوضه در حدود ۹۱۵۲۷ کیلومتر مربع است که حدود ۴۷ درصد آن را مناطق کوهستانی و بقیه را کوهپایه ها و دشت ها تشکیل داده است. میانگین بارش سالانه از ۱۰۰ میلی متر در حاشیه دریاچه تا حدود ۷۰۰ میلی متر در مناطق مرتفع کوهستانی متغیر است. بالاترین ارتفاع در منطقه شمالی حوضه با ۴۳۷۵ متر در حوضه رودخانه کرج و پایین ترین ارتفاع در اطراف دریاچه نمک ۷۹۲ متر است و ارتفاع متوسط حوضه ۱۵۵۴ متر می باشد. میانگین سالانه دمای هوا از کمتر از پنج درجه سانتی گراد در مناطق مرتفع کوهستانی تا بیش از ۱۷/۵ درجه در اطراف دریاچه نمک متغیر است. مجموع ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک، کلیماتولوژی، تبخیرسنجی، باران سنج معمولی و باران سنج ذخیره ای در حوزه آبخیز دریاچه نمک حدود ۴۰۰ ایستگاه است که در این تحقیق از آمار ۱۱۰ ایستگاه با طول دوره آماری مشترک ۳۰ سال استفاده گردید. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز دریاچه نمک و ایستگاه های منتخب در شکل ۱ ارائه شده است.

روش های درون یابی

برای اجرای مدل های زمین آماری در این پژوهش با استفاده از داده های بارش در محدوده زمانی سال آبی ۱۳۶۶-۱۳۹۶ تا ۱۳۹۵ در دوره های سالانه و ماهانه با طول دوره آماری مشترک ۳۰ سال مربوط به ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی از سازمان هواشناسی استخراج گردید، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه های باران سنجی نیز اخذ گردید. سپس برای ترسیم نقشه های هم بارش، داده ها به نرم افزار Arc GIS انتقال یافت. برای بررسی نرمال بودن داده های بارندگی از دو روش هیستوگرام فراوانی و نمودار 'QQplot' استفاده شد.

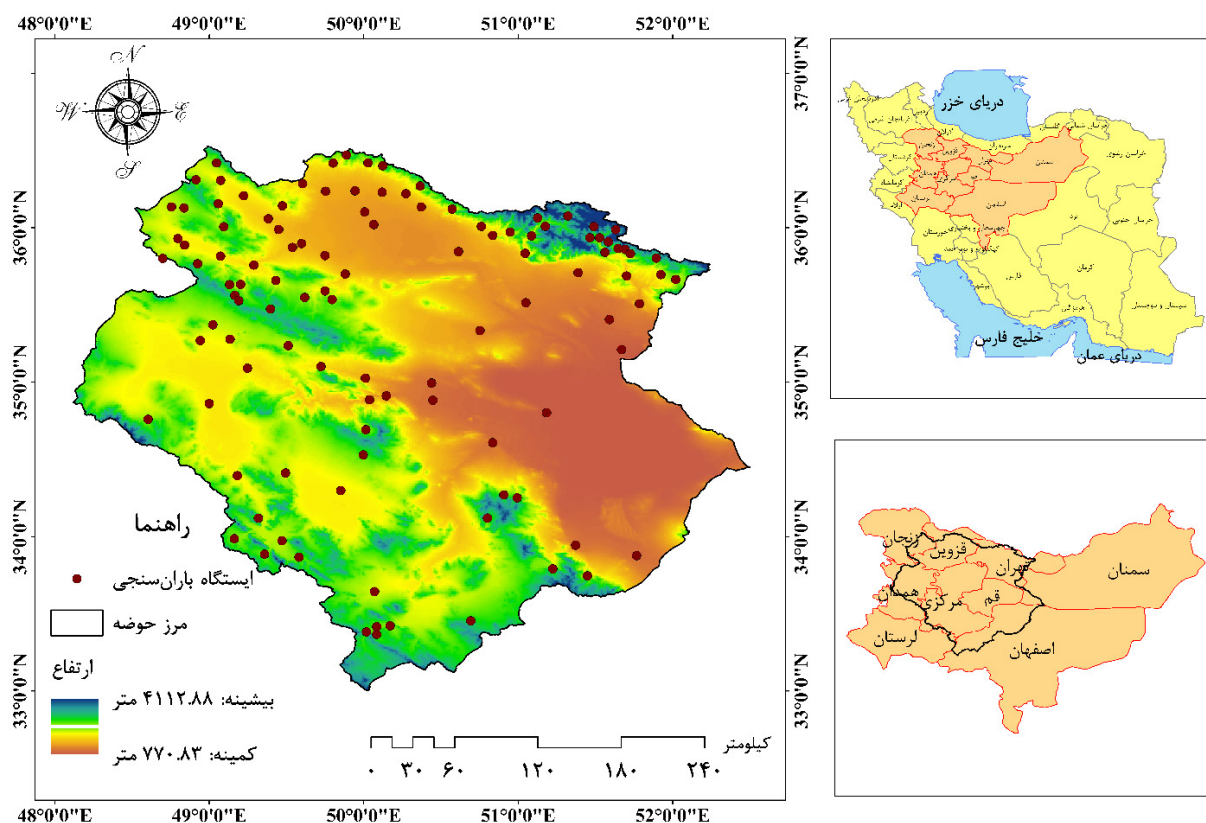
۲-۲-۱ روش عکس فاصله وزنی: این روش بر این اساس است که در تعیین مقادیر نقاط نامعلوم، نقاطی که به نقطه نامعلوم نزدیک تر هستند وزن بیشتری می گیرند که این روش از رابطه (۱) محاسبه می شود [۱۸].

$$Z = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i} \quad W_i = e^{-p d_i} \quad (1)$$

که در آن d_i فاصله بین نقطه مشاهداتی و محاسباتی، p توان (عدد صحیح)، می باشد.

روش توابع پایه شعاعی: روش تابع پایه ای شعاعی از جمله روش های درون یابی می باشد که در آن سطح تخمین از مقادیر مشاهده ای عبور می کند. از دیگر خصوصیات این روش این است که مقادیر بیش از ماکزیمم مقادیر مشاهده ای و یا کم تر از مینیمم

داد از بین روش های آماری کلاسیک و زمین آماری، روش کریجینگ در مقایسه با روش عکس فاصله وزنی از دقت بالایی برخوردار است [۱]. در استان اصفهان نیز روش کریجینگ معمولی با مدل دایره ای، مناسب ترین روش برای درون یابی اطلاعات مقادیر میانگین بارندگی سالانه تعیین شد [۳۱]. نتایج ارزیابی تخمین بارندگی با استفاده از روش های بیشینه آنتروپی بیزی مکانی و کریجینگ در حالت تک متغیره و بیشینه آنتروپی بیزی و کوکریجینگ در حالت دو متغیره با استفاده از الگوی تغییرات ارتفاعی حاکی از دقت بالای روش کریجینگ بود [۴، ۱۲، ۲۷]. در مقایسه ی صورت گرفته بین هفت روش درون یابی جهت تخمین بارندگی ماهانه و سالانه در استان خوزستان، روش رگرسیون کریجینگ، به عنوان مناسب ترین روش درون یابی داده های بارندگی ماهانه و سالانه تشخیص داده شد [۲۴]. در ارزیابی روش های مختلف درون یابی کریجینگ شامل کریجینگ معمولی، ساده و عام، کریجینگ عام بهترین نتایج را جهت پهنه بندی بارش سالیانه استان ایلام ارزیابی شد [۱۷]. مطالعات صورت گرفته نشان داده است که روش کریجینگ معمولی و برای بارش ماه های مختلف و هم چنین حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته، روش معکوس فاصله وزنی با توان پنج مناسب ترین روش و در رابطه با مدل نیم تغییر نما، مدل گوسی و دایره ای برای تحلیل داده های ماهانه و سالانه و حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته مناسب تشخیص داده شد [۳، ۸، ۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۳]. در مطالعه ای جهت درون یابی بارندگی سالانه در آفریقای جنوبی از روش های درون یابی استفاده شد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل نشان داد که بهترین عملکرد را روش کریجینگ معمولی دارد [۱۰]. پژوهش انجام شده در کشور پرتغال و اسپانیا نشان داد از بین روش های درون یابی روش های تیسن، عکس مجذور فاصله، رگرسیون خطی با ارتفاع و کریجینگ مناسب ترین روش برای درون یابی بارندگی می باشد [۹، ۲۲، ۳۴]. در مطالعه ای روش های مختلف درون یابی برای تخمین بارندگی در جنوب ایتالیا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش های زمین آمار خطای کمتری را نسبت به روش عکس فاصله وزنی نشان می دهد و روش کریجینگ به عنوان بهترین روش معرفی شد [۲۶]. در برخی مطالعات روش نزدیک ترین همسایه بهترین روش به منظور تخمین بارندگی عنوان شده است [۱۱] اما در اکثر پژوهش ها، روش های زمین آماری شامل کریجینگ و کوکریجینگ از دقت بالاتری برخوردار بوده است [۷، ۲۹]. جمع بندی سوابق پژوهش، ضرورت ارزیابی روش های زمین آماری برای اهداف مختلف از جمله بارندگی با مقیاس های زمانی مختلف و انتخاب روش مناسب برای پهنه بندی را نشان می دهد. لذا در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت حوزه آبخیز دریاچه نمک به منظور برآورد مقادیر مکانی بارندگی سالیانه و ماهانه از روش های قطعی عکس فاصله وزنی، توابع پایه شعاعی، چند جمله ای عام، چند جمله ای محلی و از روش های زمین آماری کریجینگ معمولی و کوکریجینگ در این حوضه استفاده شده است.



شکل ۱: حوزه آبخیز دریاچه نمک و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

روش مقادیر نقطه مجهول از مقادیر نقطه معلوم ایستگاه‌های اطراف و از یک مدل تغییرنا به دست می‌آید.

روش کوکریجینگ: این روش مانند روش کریجینگ می‌باشد؛ با این تفاوت که روش کوکریجینگ با در نظر گرفتن رابطه فضایی بین این متغیر و متغیر دیگری که از آن به خوبی نمونه‌گیری شده باشد، مقادیر مجهول را تخمین می‌زند. وقتی رابطه مناسب و هم‌بستگی‌های خوبی بین این متغیرها وجود داشته باشد، روش کوکریجینگ نتایج خوبی را ارائه خواهد کرد [۱۵].

شاخص‌های ارزیابی روش‌های درونیابی

به منظور انتخاب بهترین روش تحلیل مکانی و بررسی دقت روش‌های مذکور از روش اعتبارسنجی حذفی استفاده شد. به منظور مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی از معیار مجذور میانگین مربع خطا^۱ و نیز خطای میانگین^۲ استفاده شد. لازم به ذکر است هر کدام از روش‌های مذکور کمترین مقدار از هر مولفه را بر اساس RMSE انتخاب کرده و در نهایت روش‌های با رتبه پایین به عنوان مناسب‌ترین روش درونیابی بارندگی ماهانه و سالانه انتخاب شد.

مقادیر مشاهده‌ای در سطح تخمین وجود دارد این روش بر مبنای حداقل خمیدگی می‌باشد که هموارسازی یا نرم شدن تغییرات از ویژگی‌های آن است [۱۳].

۲-۳ روش چندجمله‌ای عام: در این مدل ساختارهای محلی و روندها شناسایی و مدل‌سازی می‌شود. درواقع یک سطح صاف را به نقاط نمونه برداری برازش می‌دهد که آگه از توان ۱ استفاده شود سطح خواهد بود و در صورتی که از توان ۲ استفاده شود یک جهت انحنا وجود دارد و در صورتی که از توان ۳ استفاده شود در دو جهت انحنا وجود خواهد داشت (در این پژوهش از توان ۳ استفاده شده است).

۲-۴ روش چند جمله ای محلی: این روش زمانی استفاده می‌شود که چندین چند جمله‌ای به یک سطح برازش داده شود و از نمونه‌های مجاور در سطح نیز استفاده می‌شود.

۲-۵ روش کریجینگ: روش کریجینگ برای برآورد نقطه ناشناخته به هر یک از نمونه‌های اندازه‌گیری شده، وزنی را نسبت می‌دهد. این روش از چهار نوع مختلف کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ تعمیم یافته و کریجینگ جدا تشکیل شده است [۲۵].

***کریجینگ معمولی:** یکی از روش‌های کریجینگ است که نسبت به دیگر روش‌های کریجینگ بیش‌تر استفاده می‌شود. در این

۱. Root Mean Square Error
۲. Mean Error

نتایج

خصوصیات آماری بارندگی

در جدول ۱ برخی شاخص‌های آماری داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در طول دوره آماری ایستگاه‌ها محاسبه شد. ضریب چولگی و هیستوگرام فراوانی داده‌ها در برخی ماه‌ها و داده‌های سالانه حاکی از پراکندگی داده‌ها می‌باشد لذا برای نرمال کردن آن‌ها از روش لگاریتم‌گیری استفاده شد هم‌چنین وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها بررسی شد و در داده‌هایی که روند وجود داشت با روش‌های موجود در افزونه Arc GIS حذف شد.

نتایج درونیابی بارندگی ماهانه و سالانه

ارزیابی نتایج درونیابی بارش ماه‌های فصل بهار

در جدول ۲ نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی بارش ماه‌های فصل بهار آورده شده است. میزان ریشه میانگین مربعات

خطا بین ۲۴/۷۵ و ۴/۹۳ میلی‌متر به‌ترتیب در ماه فروردین در روش کوکریجینگ و در ماه خرداد در روش توابع پایه شعاعی متغیر می‌باشد. نتایج میانگین خطا نشان داد که به جز ماه فروردین در سایر ماه‌ها تخمین بارندگی توسط برخی روش‌های درونیابی کم‌تخمین است. در تمام ماه‌های فصل بهار روش درونیابی توابع پایه شعاعی بهترین تخمین را از بارندگی نشان داد. هم‌چنین در شکل ۲ نقشه توزیع مکانی بارندگی ماهانه بر اساس بهترین روش درونیابی آورده شده است.

ارزیابی نتایج درونیابی بارش ماه‌های فصل تابستان

طبق جدول ۳ نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی بارش ماه‌های فصل تابستان نشان می‌دهد که میزان ریشه میانگین مربعات خطا بین ۸/۷۱ و ۲/۴۷ میلی‌متر به‌ترتیب در ماه مرداد در روش کوکریجینگ و در ماه شهریور در روش توابع پایه شعاعی متغیر می‌باشد. نتایج میانگین خطا نشان داد که در همه ماه‌های این فصل

جدول ۱: خصوصیات آماری متغیرهای بارندگی سالانه و ماهانه (میلی‌متر)

ماه	میانگین	میانه	چولگی	کشیدگی	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
مهر	۹/۸۳	۹/۱۲	۱/۰۵	۴/۲۷	۴/۲۹	۲/۳۵	۲۳/۹
آبان	۴۵/۲۶	۴۲/۰۴	۰/۶۷۱	۰/۴۳۳	۱۷/۸۳	۱۰/۶۴	۹۴/۲۰
آذر	۴۲/۲۹	۳۷/۹۴	۱/۰۰۲	۳/۷۰	۱۶/۴۰	۱۳/۹۳	۹۴/۰۳
دی	۳۴/۶۲	۳۱/۵۷	۱/۰۶	۱/۱	۱۲/۲۷	۱۲/۶۳	۷۵/۱۱
بهمن	۴۲/۹۶	۳۷/۷۹	۱/۲۳	۱/۴۵	۱۷/۸۸	۱۴/۰۲	۱۰۰/۱۲
اسفند	۴۳/۹۴	۳۸/۴۰	۱/۲۵	۱/۳۱	۱۷/۸	۱۶/۲۲	۱۰۲/۹۰
فروردین	۵۴/۹۱	۵۰/۳۳	۰/۷۹۸	۰/۷۴۰	۲۱/۵۷	۷/۳۵	۱۲۶/۹۷
اردیبهشت	۴۱/۸۸	۳۹/۹۴	۰/۷۷۴	۰/۶۰۰	۱۶/۶	۱۰/۹۹	۹۳/۴۰
خرداد	۱۰/۷۴	۹/۵۲	۲/۶۵	۱۳/۴۹	۷/۰۲	۲/۲۹	۴۹/۴۸
تیر	۵/۵	۴/۰۲	۴/۸۰	۳۳/۸۵	۶/۰۴	۰/۳۸	۵۲/۶۴
مرداد	۲/۷۸	۱/۹۱	۴/۶۵	۳۰/۴۳	۳/۴	۰/۰۹	۲۸/۴۶
شهریور	۳/۷۶	۲/۴۹	۲/۴۵	۶/۳۰	۳/۸۶	۰/۳۱	۲۲/۰۴
سالانه	۳۳۴/۴۲	۲۹۷/۳۹	۱/۰۷	۱/۱۵	۱۲۹/۰۲	۱۱۵/۶۵	۷۲۳/۸۱

جدول ۲: نتایج نهایی ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی بارش ماه‌های فصل بهار

ماه	روش درونیابی	RMSE	ME	رتبه بر اساس RMSE
فروردین	عکس فاصله وزنی	۱۶/۰۴	۲/۴۷	۳
	توابع پایه شعاعی	۱۴/۴۴	۰/۶۹	۱
	چند جمله ای عام	۱۶/۲۳	۰/۰۲	۴
	چند جمله ای محلی	۱۴/۴۴	۰/۱۹	۱
	کریجینگ	۱۴/۴۸	۲/۱۲	۲
اردیبهشت	کوکریجینگ	۲۴/۷۵	۴/۴۸	۵
	عکس فاصله وزنی	۱۱/۹۱	۱/۹۵	۶
	توابع پایه شعاعی	۹/۶۷	۰/۱۷	۱
	چند جمله ای عام	۱۱/۵۸	۰/۰۱	۵
	چند جمله ای محلی	۹/۷۵	۰/۱۵	۲
خرداد	کریجینگ	۱۱/۱۴	-۰/۳۸	۴
	کوکریجینگ	۱۰/۰۸	-۰/۵۵	۳
	عکس فاصله وزنی	۵/۱۵	۰/۱۹	۲
	توابع پایه شعاعی	۴/۹۳	-۰/۰۴	۱
	چند جمله ای عام	۵/۶۸	-۰/۲۳	۵
	چند جمله ای محلی	۵/۳۴	-۰/۰۷	۳
	کریجینگ	۵/۴۲	-۰/۰۰۹	۴
	کوکریجینگ	۵/۷۲	۰/۵۱	۶

جدول ۳: نتایج نهایی ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی بارش ماه‌های فصل تابستان

ماه	روش درون‌یابی	RMSE	ME	رتبه بر اساس RMSE
تیر	عکس فاصله وزنی	۴/۹۸	۰/۴۵	۶
	توابع پایه شعاعی	۴/۶۹	۰/۱۲	۴
	چند جمله ای عام	۴/۸۰	-۰/۰۰۰۸	۵
	چند جمله ای محلی	۴/۵۳	-۰/۰۰۰۷	۳
	کریجینگ	۴/۳۶	-۰/۱۲	۲
	کوکریدجینگ	۴/۱۷	۰/۰۳	۱
مرداد	عکس فاصله وزنی	۲/۸۱	۰/۲۷	۵
	توابع پایه شعاعی	۲/۶۴	۰/۰۷	۳
	چند جمله ای عام	۲/۸۳	-۰/۰۰۰۵	۴
	چند جمله ای محلی	۲/۵۵	-۰/۰۵	۲
	کریجینگ	۲/۵۳	-۰/۱۶	۱
	کوکریدجینگ	۸/۷۱	۲/۹۲	۶
شهریور	عکس فاصله وزنی	۲/۷۲	۰/۳۵	۵
	توابع پایه شعاعی	۲/۴۷	۰/۰۸	۲
	چند جمله ای عام	۲/۷۴	-۰/۰۰۴	۶
	چند جمله ای محلی	۲/۵۱	-۰/۰۲	۳
	کریجینگ	۲/۷۱	۰/۰۶	۴
	کوکریدجینگ	۲/۲۷	۰/۰۰۷	۱

جدول ۴: نتایج نهایی ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی بارش ماه‌های فصل پاییز

ماه	روش درون‌یابی	RMSE	ME	رتبه بر اساس RMSE
مهر	عکس فاصله وزنی	۳/۰۸	۰/۴۱	۶
	توابع پایه شعاعی	۲/۳۸	۰/۰۱	۲
	چند جمله ای عام	۳/۰۲	-۰/۰۰۹	۵
	چند جمله ای محلی	۲/۵۸	-۰/۰۰۷	۴
	کریجینگ	۲/۵۷	-۰/۰۶	۳
	کوکریدجینگ	۲/۴۲	-۰/۰۷	۱
آبان	عکس فاصله وزنی	۱۲/۶۰	۲/۰۵	۵
	توابع پایه شعاعی	۱۰/۰۰	۰/۳۱	۱
	چند جمله ای عام	۱۲/۷۸	-۰/۰۰۷	۶
	چند جمله ای محلی	۱۰/۹۶	۰/۲۳	۴
	کریجینگ	۱۰/۱۰	۰/۱۹	۲
	کوکریدجینگ	۱۰/۷۵	۰/۰۵	۳
آذر	عکس فاصله وزنی	۱۲/۵۴	۱/۸۵	۴
	توابع پایه شعاعی	۱۰/۸۶	۰/۳۵	۲
	چند جمله ای عام	۱۲/۶۱	-۰/۰۱	۵
	چند جمله ای محلی	۱۱/۳۷	۰/۲۱	۳
	کریجینگ	۱۰/۷۴	۰/۱۱	۱
	کوکریدجینگ	۱۵/۶۰	۱/۴۵	۶

پاییز (جدول ۴) نشان می‌دهد که میزان ریشه میانگین مربعات خطا بین ۱۵/۶۰ و ۲/۳۸ میلی‌متر به ترتیب در ماه آذر در روش کوکریدجینگ و در ماه مهر در روش توابع پایه شعاعی متغیر می‌باشد. نتایج میانگین خطا نشان داد که در همه ماه‌های این فصل در تخمین بارندگی، برخی روش‌ها بیش تخمین و برخی کم تخمین بودند اما

در تخمین بارندگی، برخی روش‌ها بیش تخمین و برخی کم تخمین بودند. در تمام ماه‌های فصل تابستان روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ و کوکریدجینگ) درون‌یابی بهترین تخمین را از بارندگی نشان داد.

ارزیابی نتایج درون‌یابی بارش ماه‌های فصل پاییز
نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی بارش ماه‌های فصل

کم تخمینی روش های درون یابی در ماه مهر قابل توجه می باشد. در ماه های مهر و آذر روش کوکریجینگ و در ماه آبان روش توابع پایه شعاعی بهترین تخمین را از بارندگی نشان داد.

ارزیابی نتایج درون یابی بارش ماه های فصل زمستان

بررسی نتایج ارزیابی روش های مختلف درون یابی بارش ماه های فصل زمستان (جدول ۵) نشان می دهد که میزان ریشه میانگین مربعات خطا بین ۱۴/۴۴ و ۸/۹۸ میلی متر به ترتیب در ماه اسفند و دی در روش توابع پایه شعاعی متغیر می باشد. نتایج میانگین خطا نشان داد که در اکثر ماه های این فصل و در تخمین بارندگی، بیش تر روش های درون یابی دارای بیش تخمینی بودند. در ماه های دی و بهمن و اسفند به ترتیب روش توابع پایه شعاعی، کوکریجینگ و

کریجینگ بهترین تخمین را از بارندگی نشان داد.

ارزیابی نتایج درون یابی بارش سالانه

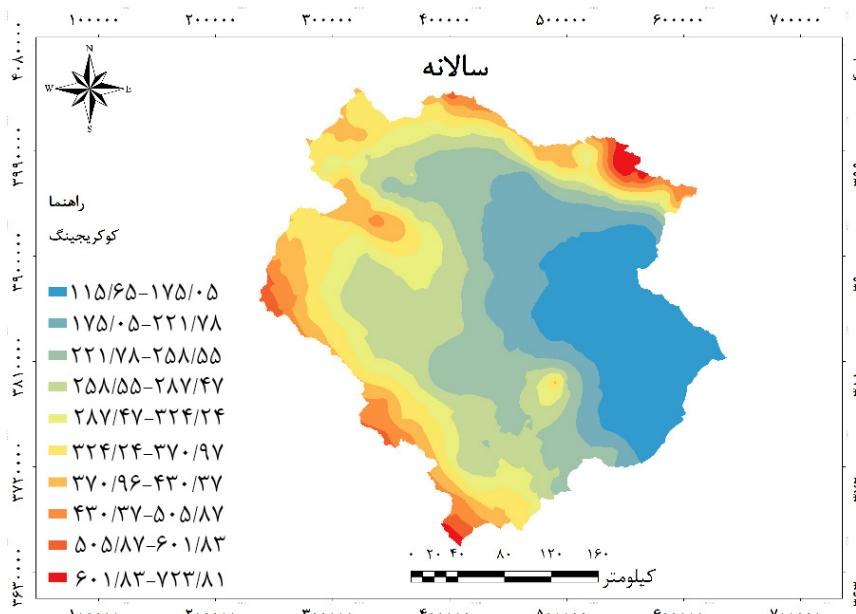
بررسی نتایج ارزیابی روش های مختلف درون یابی بارندگی سالانه (جدول ۶) نشان می دهد که میزان ریشه میانگین مربعات خطا بین ۹۱/۸۵ و ۶۳/۶۸ میلی متر به ترتیب در روش چند جمله ای عام و کوکریجینگ متغیر می باشد. نتایج میانگین خطا نشان داد که اکثر روش های درون یابی بارندگی، دارای بیش تخمینی بودند و روش کوکریجینگ بهترین تخمین را از بارندگی نشان داد. در شکل ۳ نقشه پراکنش بارندگی سالانه بر اساس بهترین روش درون یابی نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج نهایی ارزیابی روش های مختلف درون یابی بارش ماه های فصل زمستان

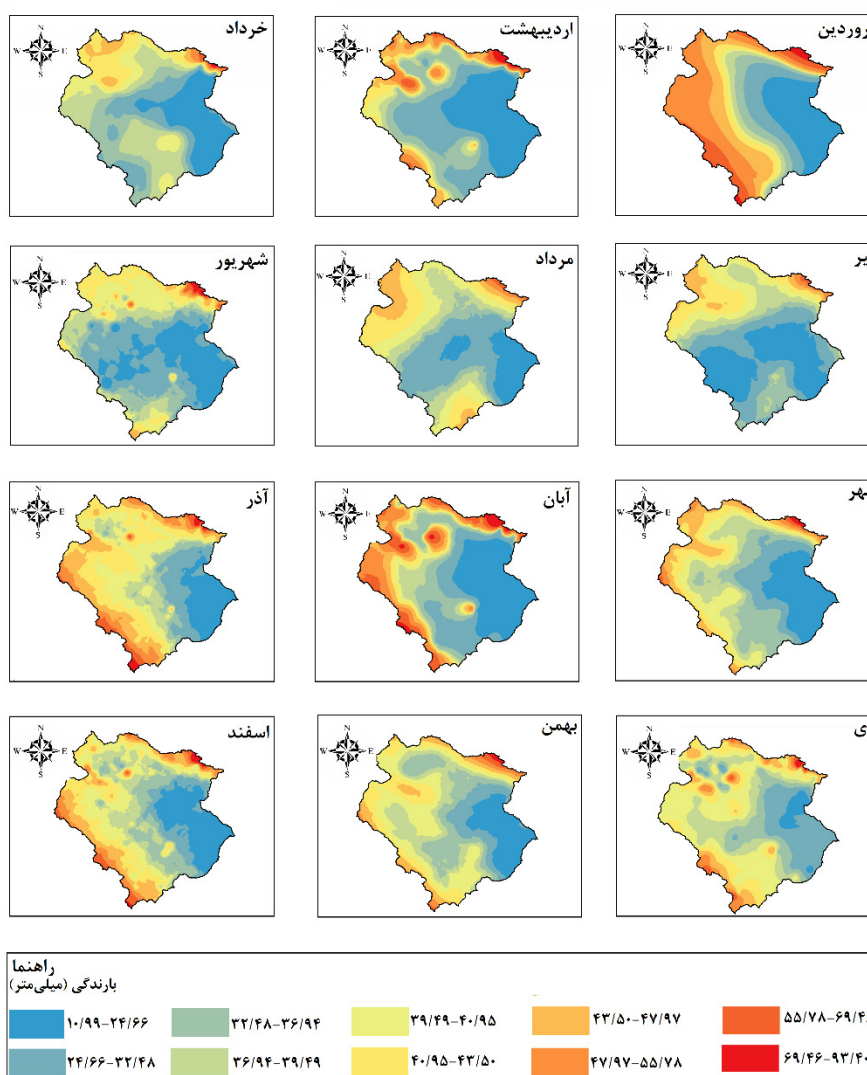
ماه	روش درون یابی	RMSE	ME	رتبه بر اساس RMSE
دی	عکس فاصله وزنی	۱۰/۰۴	۱/۴۲	۵
	توابع پایه شعاعی	۸/۹۸	۰/۴۲	۱
	چند جمله ای عام	۱۰/۱۲	۰/۰۰۵	۶
	چند جمله ای محلی	۹/۱۹	۰/۴۵	۲
	کریجینگ	۹/۲۴	-۰/۰۷	۳
	کوکریجینگ	۹/۳۸	-۰/۰۷	۴
بهمن	عکس فاصله وزنی	۱۴/۰۶	۲/۰۷	۶
	توابع پایه شعاعی	۱۲/۶۶	۰/۵۸	۲
	چند جمله ای عام	۱۴/۱۰	-۰/۰۳	۵
	چند جمله ای محلی	۱۲/۸۷	۰/۵۰	۴
	کریجینگ	۱۲/۷۳	-۰/۱۳	۳
	کوکریجینگ	۱۲/۱۴	-۰/۲۱	۱
اسفند	عکس فاصله وزنی	۱۲/۸۳	۲/۰۸	۴
	توابع پایه شعاعی	۱۴/۴۴	۰/۶۹	۶
	چند جمله ای عام	۱۳/۴۴	۰/۰۱	۵
	چند جمله ای محلی	۱۱/۷۹	۰/۲۲	۳
	کریجینگ	۱۰/۵۵	۰/۳۹	۱
	کوکریجینگ	۱۱/۴۴	-۰/۳۹	۲

جدول ۶: نتایج نهایی ارزیابی روش های مختلف درون یابی بارندگی سالانه

متغیر	روش درون یابی	RMSE	ME	رتبه بر اساس RMSE
سالانه	عکس فاصله وزنی	۸۵/۰۱	۱۸/۹۵	۵
	توابع پایه شعاعی	۶۶/۵۴	۳/۷۲	۳
	چند جمله ای عام	۹۱/۸۵	۰/۳۳	۶
	چند جمله ای محلی	۷۹/۴۴	۰/۹۰	۴
	کریجینگ	۶۴/۴۰	۴/۴۱	۲
	کوکریجینگ	۶۳/۶۸	۵/۱۷	۱



شکل ۲: نقشه توزیع مکانی بارندگی ماهانه بر اساس بهترین روش درون‌یابی



شکل ۳: نقشه توزیع مکانی بارندگی سالانه بر اساس بهترین روش درون‌یابی

در پژوهش حاضر به منظور تعیین بهترین روش درونیابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در حوزه آبخیز دریاچه نمک، شش روش درونیابی شامل عکس فاصله وزنی، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای عام، چند جمله‌ای محلی و از روش‌های زمین‌آمار، کریجینگ معمولی و کوکریجینگ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اولین گام در اجرای روش‌های درونیابی بررسی آماری داده‌ها و نرمال‌سازی آن‌ها در صورت نرمال نبودن است. محاسبه‌ی آماره‌های مختلف برای داده‌های ماهانه و سالانه نشان داد انحراف معیار و چولگی در برخی از ماه‌ها به نحوی است که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند به‌طوری‌که در ماه‌های تابستان به خصوص ماه تیر، ضریب چولگی به بیش از ۴/۵ رسیده است این درحالی است که در ماه آبان میزان ضریب چولگی به کم‌ترین مقدار خود رسیده و برابر ۰/۶۷ بوده است. بنابراین برای اجرای روش‌های درونیابی، ماه‌هایی که داده‌های آن نرمال نبود با روش‌های معمول مثل لگاریتم‌گیری نرمال شد. در اجرای روش عکس فاصله وزنی توان‌های ۱ تا ۵ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که توان ۲ در داده‌های ماهانه و سالانه کمترین خطا را دارد که به‌عنوان توان بهینه در این روش انتخاب شد این در حالی است که در مطالعه‌ی ناد و همکاران [۲۴] در استان خوزستان توان ۳ به‌عنوان توان بهینه استفاده شده بود. همچنین نتایج اجرای روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ نشان داد که بهترین مدل نیم‌تغییرنمای برازش داده شده مدل گوسی است. پژوهش‌های لی و همکاران [۱۹] و هائو و همکاران [۱۶] نتایج مشابه را ارائه دادند. نتایج نهایی ارزیابی مختلف روش‌های درونیابی برای ماه‌های فصول سال در جداول ۲ تا ۶ نشان داد در فصل بهار بر اساس خطای RMSE روش‌های ریاضی درونیابی شامل عکس فاصله وزنی و توابع پایه شعاعی بهترین عملکرد را به دست داده‌اند به‌طوری‌که میزان RMSE در این فصل کمتر از ۱۵ میلی‌متر بوده است. پژوهش دایی‌چینی و وفاخواه [۱۳] نیز موارد مشابه را بیان کردند این در حالی است که در ماه‌های فصل تابستان دو روش زمین‌آمار کریجینگ و کوکریجینگ با برازش مدل گوسی عملکرد مناسب را با حداکثر RMSE کمتر از ۵ میلی‌متر داشته است، در این مورد لی و همکاران [۱۹] به نتایج مشابه دست یافته‌اند در حالی که میرموسوی و همکاران [۳۱] کریجینگ با مدل دایره‌ای را بهترین روش معرفی کرده بودند. در ماه‌های فصل پاییز و زمستان نیز براساس RMSE روش ریاضی توابع پایه شعاعی، کریجینگ و کوکریجینگ بهترین تخمین را به دست دادند در مقیاس سالانه نیز بر خلاف نتایج نی‌پور و همکاران [۲۳] روش کوکریجینگ رتبه اول را در تخمین بارندگی بر اساس شاخص RMSE داشته‌است. این نشان می‌دهد که استفاده از متغیر کمکی ارتفاع سبب افزایش دقت برآوردهای مکانی داده‌های بارندگی در این منطقه می‌شود. در اکثر ماه‌ها مقدار ME برای روش‌های زمین‌آمار شامل کریجینگ و کوکریجینگ منفی برآورد شده است بنابراین می‌توان گفت این

دو روش در تخمین بارندگی ماهانه حوزه آبخیز دریاچه نمک بیش تخمینی داشته است این در حالی است که تمام روش‌های درونیابی مورد استفاده در پژوهش حاضر، در مقیاس سالانه دارای کم تخمینی است به‌طوری‌که روش عکس فاصله وزنی با مقدار ME ۱۸/۹۵ میلی‌متر بیش‌ترین کم تخمینی را داشته است. با توجه به موارد ذکر شده یکی از قابلیت‌ها و استفاده‌های روش‌های زمین‌آمار در خصوص داده‌های مربوط به بارش می‌تواند ارزیابی کفایت شبکه‌های باران‌سنجی در منطقه باشد بدین منظور می‌توان مناطقی را که به هر دلیلی فاقد ایستگاه باران‌سنجی است را تشخیص داده و پوشش و توزیع مناسب این ایستگاه‌ها را مشخص نمود. با توجه به پژوهش صورت گرفته و اهمیت استفاده از زمین‌آمار در تجزیه و تحلیل بارندگی پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌های زمین‌آمار مانند اسپلین و هم‌چنین رگرسیون کریجینگ در حوزه‌های آبخیز مختلف استفاده و نتایج آن با نتایج پژوهش حاضر مقایسه شود. هم‌چنین به دلیل اهمیت حوزه آبخیز دریاچه نمک پیشنهاد می‌شود به‌منظور مطالعات اقلیمی و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی از نتایج پژوهش حاضر به‌عنوان نقشه راهی در جهت بهبود شرایط اقلیمی-هیدرولوژیکی این حوضه استفاده شود.

سپاسگزاری

مولفین مقاله بدینوسیله از شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه ایستگاه‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- Adhikary, S. K., Muttill, N., and Yilmaz, A. G. 2017. Cokriging for enhanced spatial interpolation of rainfall in two Australian catchments. *Hydrological Processes*, 31(12): 2143-2161.
- Asadzadeh, F., Malahat, E., and Shakiba, S. 2018. Prediction of the spatial distribution pattern of precipitation using geostatistical methods in Urmia region, *Journal of New Findings in Applied Geology*, 11(22): 87-95.
- Bargaoui, Z. K., and Chebbi, A. 2009. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. *Journal of Hydrology*, 365(1-2): 56-73.
- Basistha, A., Arya, D. S., and Goel, N. K. 2008. Spatial distribution of rainfall in Indian Himalayas—a case study of Uttarakhand region: *Water Resources Management*, 22, 1325-1346.
- Bayat, B., Zahraie, B., Taghavi, F., and Nasseri, M. 2012. Evaluating the efficiency of spatial geostatistical methods for identifying the spatial patterns of precipitation:

15. Hao, W., and Chang, X. 2013. Comparison of spatial interpolation methods for precipitation in Ningxia, China. *International Journal of Science and Research, India*, 2(8): 181-184.
16. Keblouti, M., Ouerdachi, L., and Boutaghane, H. 2012. Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria-comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia*, 18, 468-475.
17. Ly, S., Charles, C., and Degre, A. 2011. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium, *Hydrology and Earth System Sciences*. 15(7): 2259-2274.
18. Marofi, S. Golmohammadi, G., Mohammadi, K., Zare Abyaneh, H. 2010. Evaluation of Geostatistical Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall Using GIS Media in Hamedan Province, Iran, 19(2): 147 (In Persian).
19. Matkan, A., Shakiba, A., and Yazdani, A. 2007. Evaluation of different interpolation methods on daily rainfall estimation, Case study: Fars Province, Territory, 4(13): 54-68 (In Persian).
20. Mehdizadeh, M., Mahdian, M., and Hajjam, S. 2006. Application of geostatistical methods for climatic classification (A case study, Ourmieh lake basin). *Journal of the Earth and Space Physics*, 32(1): 103-116.
21. Mir Mousavi, S.H., Mazidi, A., and Khosravi, Y. 2010. The Determination of Optimum Geo-statistics Method for Estimating Precipitation Distribution Using GIS (Case Study of Esfahan Province) *Geographic Space*, 10(30): 105.
22. Moral, F. J. 2010. Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: Application to precipitation, *Int. J. Climatol.*, 30(4): 620-631
23. Nabipour, Y., and Vatakhah, M. 2016. Comparison of Different Geostatistical Methods for Estimating Rainfall in Hajighoshan Watershed. *Journal of Range and Watershed Managment*, 69(2): 487-502 (In Persian).
24. nadi, M., Jamei, M., Bazrafshan, J., and Janatrostami, S. 2012. Evaluation of Different Methods for Interpolation of Mean Monthly and Annual Precipitation Data (Case Study: Khuzestan Province). *Physical Geography Research Quarterly*, 44(4): 117-130.
25. Nikolopoulos, E. I., Borga, M., Creutin, J. D., and Marra, F. 2015. Estimation of debris flow triggering rainfall: a case study of Namak lake watershed, *Iranian Journal of Geophysics*, 5(4): 89 (In Persian).
6. Ceron, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., and Souza, R. A. 2021. Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93.
7. Cho, H. L., and Jeong, J. C. 2006. Application of spatial interpolation to rainfall data. *Spatial Information Research*, 14(1): 29-41.
8. Correa, C. C. G., Teodoro, P. E., Cunha, E. D., Oliveira-Júnior, J. D., Gois, G., Ribeiro, L. P., and Torres, F. E. 2014. Spatial interpolation of annual rainfall in the State Mato Grosso do Sul (Brazil) using different transitive theoretical mathematical models. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(10): 16618-16625.
9. Coulibaly, M., and Becker, S. 2007. Spatial interpolation of annual precipitation in South Africa-Comparison and evaluation of methods. *Water International*, 32(3): 494-502.
10. Da Silva, A. S. A., Stosic, B., Menezes, R. S. C., and Singh, V. P. 2019. Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of Pernambuco, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(3): 04018068.
11. Daechini, F., Vafakhah, M., and Zabihi Silabi, M. 2021. Performance Evaluation of Geostatistics Methods for Rainfall Estimation in Haraz Watershed, *Journal of Extension and Development of Watershed Management*, 8(31): 27-41 (In Persian).
12. Fathizad, H., Karimi, H., and Tazeh, M. 2015. Study on different geostatistical algorithms for annual rainfall zoning in Ilam province, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 14(35): 139-154.
13. Frazier, A. G., Giambelluca, T. W., Diaz, H. F., and Needham, H. L. 2016. Comparison of geostatistical approaches to spatially interpolate month-year rainfall for the Hawaiian Islands, *International Journal of Climatology*. 36(3): 1459-1470.
14. Gundogdu, I. B. 2017. Usage of multivariate geostatistics in interpolation processes for meteorological precipitation maps, *Theoretical and applied climatology*. 127: 81-86.

32. Wentz, E. A., Peuquet, D. J. and Anderson, S. 2010. An ensemble approach to space-time interpolation, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24(9): 1309–1325.
33. Zandkarimi, A., and Mokhtari, D. 2018. Analysis of the accuracy of the various interpolation methods in estimating the rainfall distribution in order to select the most optimal algorithm (Case Study: Kurdistan Province): *Physical Geography Research Quarterly*, 50(104): 323-338 (In Persian).
34. Zoraghein H.R., Alesheikh A.A., Alimohammadi A., Vahidnia M.H. 2012. A New Approach for Interpolation of Precipitation Data by Soft Indicator Kriging and Genetic Algorithm, *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 3(3): 15 (In Persian).
- Influence of rain gauge density and interpolation methods. *Geomorphology*, 243, 40-50.
26. Pellicone G, Caloiero T, Modica G Guagliardi I. 2018. Application of several spatial interpolation techniques to monthly rainfall data in the Calabria region (southern Italy). *Int J Climatol* 38: 3651-3666.
27. Peng, S. H. I., & Xiao-fang, R. U. I. 2005. Comparison and improvement of spatial rainfall interpolation methods [J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*: 4(001).
28. Rahimi Bandarabadi, S., and Mahdian, M. H. 2005. Study of spatial distribution methods of daily and monthly rainfall in the Caspian Sea basin, *Journal of Research and Construction*, 69: 72-63.
29. Raoof, M., and Mirzaei, S. 2019. Determination of the Most Appropriate Geostatistical Method of Spatial Interpolation for Maximum Daily Rainfalls in Atashgah Basin in the Ardabil Province, 29(3): 13-25.
30. Rata, M., Douaoui, A., Larid, M., and Douaïk, A. 2020. Comparison of geostatistical interpolation methods to map annual rainfall in the Chélif watershed, Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1009-1024.
31. Sobhanei, B., sareisara, B., azadei, M., and hoseinei, A. 2014. Modeling Rainfall in the West and Southwest of Caspian Sea in GIS Environment, with using Spatial Interpolation Methods Dr. Behrooz Sobhani Assistant Professor of Climatology University of Mohaghegh Ardabili Dr. Behrooz Sari Sarraf Professor of Climatology University of Tabriz Mohammad Azadi Mobaraki M. Sc of Climatology University of Mohaghegh Ardabili Seyyed Asad Hosseini Ph.D Student of Climatology University of Mohaghegh Ardabili. *Geography and Development Iranian Journal*, 11(30): 23-34 (In Persian).



Abstract

A Comparative Performance Evaluation of Interpolation Methods for Estimating Annual and Monthly Rainfall in the Namak Lake Watershed, IranF. Esmacili¹ and M. Vafakhah^{2*}

Received: 2021/07/27 Accepted: 2022/02/23

One of the important problems of water resources studies is estimating the spatial distribution of rainfall based on point rainfall observations. In the present study, interpolation methods including definitive mathematical methods including Inverse Distance Weighting (IDW) and Radial Basis Functions (RBF), Global polynomials, and local polynomials, and Kriging and Cokriging geostatistical methods using Geographic Information System (GIS) to estimate monthly and annual rainfall in the Namak lake watershed were evaluated. Spatial distribution analysis was carried out in the period 1988-1999 to 2006-2007 water year. In this study, in order to compare interpolation methods in iso-rainfall of the Namak lake watershed, 110 meteorological stations into the mentioned watershed with the statistical period of 30 years were used. The results showed that overall in annual rainfall according to Root Mean Square (RMSE) index, Cokriging and Kriging geostatistical methods in rank one and two, respectively have the best rainfall estimation. Therefore, Cokriging method with RMSE of 63.68mm had the best estimation. RBF, Cokriging and Kriging methods had also in the best estimation for monthly rainfall data. In general, geostatistical methods have been overestimated in monthly and annual rainfall estimation in the Namak lake watershed.

Keywords: Rainfall, Spatial analysis, Geostatistics, Geographic information system, Ordinary Kriging

1. M.Sc Student of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2*. Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, (*Corresponding Author). Email: vafakhah@modares.ac.ir