



## "مقاله پژوهشی"

## بررسی روش‌های آماری و زمین‌آماري در تهیه نقشه هم‌بارش استان مازندران

علیرضا یوسفی کبریا<sup>۱</sup>، مهدی نادی<sup>۲</sup> و مؤده جامعی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسوول: mehdi.nadi@gmail.com)

۳- دکتری هواشناسی کشاورزی، سازمان آب و برق خوزستان

تاریخ ارسال: ۹۹/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۲۲

صفحه: ۲۱۲ تا ۲۲۳

## چکیده

تخمین بارش در حوضه‌های فاقد داده هواشناسی اهمیت زیادی در مطالعات هیدرولوژی و پیش‌بینی سیلاب دارد. با توجه به فقدان ایستگاه‌های هواشناسی با آمار بلندمدت در استان مازندران و همچنین ماهیت تصادفی بودن داده‌های بارش، استفاده از روش‌های آماری مبتنی بر متغیرهای کمکی و مقایسه آن‌ها با روش‌های زمین‌آماري برای درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه در این استان ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور در این تحقیق از داده‌های بارش ۲۱ ایستگاه هواشناسی طی دوره آماری ۱۳ ساله (۲۰۱۶-۲۰۰۴) استفاده شد و شش روش درون‌یابی شامل کریجینگ عمومی، کوکریجینگ، وزنی عکس فاصله، اسپیلین، رگرسیون کریجینگ و گرادیان خطی سه‌بعدی با یکدیگر مقایسه شدند. ارزیابی روش‌ها نیز بر اساس میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب و تحلیل رگرسیونی انجام گرفت. تحلیل واریوگرافی مدل‌های کروی و نمایی را به‌عنوان بهترین مدل نظری نیم تغییرنا نشان داد. نتایج تحلیل شاخص‌های خطا نشان داد روش اسپیلین دارای بیشترین خطای برآورد بارش بوده و روش گرادیان خطی سه‌بعدی مناسب‌ترین روش تهیه نقشه‌های هم‌بارش معرفی شد که توانست خطای تخمین بارش را نسبت به روش‌های زمین‌آماري بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و حدود ۴۰-۶۰ درصد کاهش دهد. البته دقت تخمین آن در ماه‌های گرم و کم بارش کاهش می‌یابد. بررسی نقشه‌های هم‌بارش به‌خوبی دقت روش‌های مبتنی بر متغیر کمکی در تشخیص حلقه‌های کم‌بارش و پر بارش استان را نشان می‌دهد به طوری که حلقه پر بارش استان در سواحل غربی وجود دارد و با حرکت به سمت شرق استان از حجم بارش کاسته می‌شود. با توجه به تبعیت نقشه هم‌بارش از نقشه پستی و بلندی، این نکته مورد توجه است که حجم بارش نزولی اختلاف زیادی با بارش ارتفاعات این استان دارد. نتایج این پژوهش اثبات کرد استفاده از متغیرهای کمکی منجر به افزایش قابل توجه دقت نقشه‌های هم‌بارش می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بارش، رگرسیون کریجینگ، زمین‌آمار، متغیر کمکی

## مقدمه

تیل (۲۴) در کتاب خود در مورد درون‌یابی موضوع را به‌عنوان هنر خواندن بین سطرها در یک جدول (عددی) توصیف کرد. روش‌های درون‌یابی داده‌های مکانی، برای تخمین یک متغیر در یک نقطه خاص از روی داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده در نقاط مجاور، به کار می‌روند (۲۰) که به‌طور کلی در دو دسته آماری و زمین‌آماري قرار می‌گیرند (۸). زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از نقاط نمونه‌برداری‌شده قادر به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهای آماری به‌منظور برآورد خصوصیت مورد نظر در نقاط نمونه‌برداری‌نشده، است. در روش‌های زمین‌آماري برای برآورد یک متغیر از مقدار معلوم نقاط اطراف آن استفاده می‌شود به طوری که به هر یک از نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده، وزنی را نسبت می‌دهد که در معادله شماره ۱ نشان داده شده است (۱۹).

$$Z = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{Vi} \quad (1)$$

در معادله فوق  $Z$  پارامتر تخمینی،  $\lambda_i$  وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه  $Z_{Vi}$  و  $Z_{Vi}$  پارامتر معلوم نمونه  $Z_{Vi}$  می‌باشد (۱۰). تفاوت روش‌های مختلف زمین‌آماري در نحوه تعیین ضرایب نقاط معلوم است. مثلاً روش وزنی عکس فاصله بر این فرض استوار است که تأثیر نقاط مجاور با افزایش مسافت

بارش حاصل اندرکنش‌های جوی است و در میان رویدادهای اقلیمی با توجه به نقش حیاتی آن اهمیت ویژه‌ای دارد و نسبت به پدیده‌های اقلیمی دیگر از پیچیدگی رفتاری چشم‌گیری برخوردار است (۴). توزیع مکانی بارش نقش مهمی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی سوانح و آبخیزداری دارد. اما این عنصر اقلیمی تغییرات تصادفی زیادی در مکان دارد که می‌توان آن را در زمره تغییرپذیرترین عناصر جوی به حساب آورد (۲۳). به طوری که تنها برای اندازه‌گیری این متغیر ایستگاه‌های خاص هواشناسی به نام ایستگاه‌های باران‌سنجی تأسیس می‌شود. بسیاری از عوامل نامشخص، از جمله توپوگرافی، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع و شیب دارای تأثیراتی در توزیع مکانی بارش هستند. بنابراین، برای بهبود صحت چنین تحلیل‌هایی، لازم است یک مطالعه دقیق انجام شود (۹). در بسیاری از مطالعات اقلیمی و مدیریت منابع آب، مدل‌های هیدرولوژیکی، پیش‌بینی سیلاب، برآورد بیابان آب و برنامه‌ریزی‌های آبیاری، وجود داده‌های بارندگی و به‌خصوص توزیع مکانی آن (نقشه هم‌بارش)، اهمیت ویژه‌ای دارند (۲۰). نقشه‌های هم‌بارش و خطوط هم‌باران را به کمک روش‌های درون‌یابی می‌توان استخراج کرد.

کاهش می‌یابد. در این روش از فاصله به‌عنوان وزن متغیر معلوم در پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود. از طرف دیگر تأثیر شدت وابستگی مکانی در داده‌ها را با استفاده از توان در معکوس فاصله می‌توان اعمال کرد (۴). مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش زمین‌آمارى درون‌یابی روش کریجینگ می‌باشد (۱۰). این تخمین‌گر کریجینگ در مرحله اول به شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر می‌پردازد که این کار را با تحلیل واریوگرافی و آنالیز نیم تغییرنا انجام می‌دهد. سپس در مرحله بعد ضرایب نقاط معلوم و تعداد نقاط همسایگی از روی نیم تغییرنا تعیین می‌گردد. در صورتی که به اندازه کافی از متغیر اصلی نمونه‌برداری نشده باشد و نتوان برآورد آماری را با دقت مورد نظر انجام داد از روش کوکریجینگ استفاده می‌شود. این روش بر مبنای همبستگی مکانی بین متغیر اصلی و یک متغیر کمکی که از آن به اندازه کافی نمونه‌برداری شده است، تخمین اصلی را اصلاح کرده و دقت آن را بالا می‌برد. این روش در مواقعی به‌کار می‌رود که ضریب همبستگی بین متغیر اصلی و کمکی، قوی و معنی‌دار باشد (۱۵).

در روش‌های آماری از توابع ریاضی و آماری برازش‌یافته بر داده‌های اندازه‌گیری شده برای درون‌یابی استفاده می‌کنند و مبنای ریاضی دارند. مانند روش اسپلاین که با برازش توابع چندجمله‌ای بر داده‌ها به تخمین آن در نقاط فاقد داده می‌پردازد. برای درون‌یابی بر اساس مدل اسپلاین از چندجمله‌ای‌ها استفاده می‌شود و از برازش یک تابع چندجمله‌ای بر اساس داده‌های نمونه، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شوند. ویژگی اساسی اسپلاین این است که در سطح تغییرات ناگهانی وجود ندارد. در معادلات درجه دوم و سوم این انحناها به حداقل خود رسیده و در نتیجه یک سطح نسبتاً همواری به‌دست می‌آید. با توجه به تأثیر درجه بر دقت داده‌ها در درون‌یابی، هرچه درجه بالاتری انتخاب شود شکل حاصل هموارتر خواهد بود ولی به‌میزان قابل‌توجهی از دقت مدل کاسته می‌شود (۲۲). اما روش‌های گرادیان خطی بر مبنای رابطه رگرسیون خطی بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی بنا شده که فرض بر آن است که در راستای طول و عرض و ارتفاع منطقه، روند خطی وجود دارد که در روش گرادیان خطی سه‌بعدی با برازش یک رابطه‌ی رگرسیون خطی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی، می‌توان در نقاط مجهول با مشخص‌بودن طول و عرض و ارتفاع آن، مقدار متغیر اصلی را برآورد کرد (۲۰).

در شرایطی که در منطقه متغیر اصلی دارای روند باشد، می‌توان از روش رگرسیون کریجینگ استفاده کرد. در این روش، نخست یک تخمین اولیه از داده اصلی با استفاده از یک رابطه آماری انجام می‌شود سپس این تخمین اولیه از داده‌های اصلی اندازه‌گیری شده کم شده که بخش باقیمانده به‌دست می‌آید. سپس باقی‌مانده‌ها با یک روش زمین‌آمارى درون‌یابی شده و به مقادیر تخمینی از معادله رگرسیونی اضافه می‌شود. اصولاً استفاده از روش فوق زمانی توصیه می‌شود که اولاً یک یا چند متغیر کمکی مستقل به تعداد زیاد در منطقه موجود باشد و ثانیاً بین متغیر وابسته و متغیرهای کمکی

همبستگی خوبی وجود داشته باشد. البته موفقیت این روش مستلزم آن است که بخش باقیمانده قابلیت خوبی برای درون‌یابی داشته باشد. روش‌های درون‌یابی داده‌های بارش در ایران و جهان استفاده زیادی داشته است به‌عنوان مثال دلاوری و همکاران (۱۰) برای نقشه بارندگی استان ایلام از سه روش کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و کریجینگ فراگیر استفاده کردند که دریافتند روش کریجینگ فراگیر دقیق‌تر از روش‌های دیگر است. عثمان و همکاران (۲۵)، با استفاده از روش رگرسیون وزنی جغرافیایی برای پیدا کردن رابطه فضایی بین ارتفاع و آب و هوا (بارش، دما) در شمال نیجریه به این نتایج دست پیدا کردند که بین ارتفاع و متغیرهای اقلیمی مورد مطالعه رابطه معنی‌داری وجود دارد. آن‌ها دریافتند که در مدل‌سازی مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مشاهده شد که اثر ارتفاع بر متغیرهای اقلیمی به‌لحاظ جغرافیایی متفاوت است. نادى و همکاران (۲۰) روش‌های مختلف پهنه‌بندی داده‌های اقلیمی در چهارباغ گرگان را مقایسه نمودند و روش هیبرید خطی و غیرخطی را به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی داده‌های بارندگی ماهانه معرفی کردند. در این روش برای اولین بار تغییرات بارش با ارتفاع به‌صورت درجه سه در نظر گرفته شده است. اکبری و همکاران (۳) برای داده‌های سالانه متوسط دما و بارش در یک ناحیه آب و هوایی سرد و مرطوب شامل پنج استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان برای دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۰ میلادی، روش‌های درون‌یابی وزنی عکس فاصله و اسپلاین و کریجینگ، اعمال و مورد بررسی قرار گرفتند، که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش و مقایسه روش‌ها برای منطقه‌ی مورد مطالعه روش‌های کریجینگ و وزنی عکس فاصله به‌ترتیب برای داده‌های بارش و دما نتیجه مطلوبی نشان دادند. آروولو و همکاران (۵)، برای برآورد دما و بارندگی ماهانه در نیجریه از روش‌های کریجینگ رونددار و اسپلاین استفاده کردند، نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه روش‌های خانواده اسپلاین نسبت به روش کریجینگ رونددار مناسب‌تر هستند. کوماری و همکاران (۱۷)، با استفاده از معکوس وزنی و روش‌های خانواده کریجینگ، به میان‌یابی بارش در کوه‌های هیمالیا پرداختند. نتایج نشان داد، روش کریجینگ ساده در برآورد بارش سالانه در مقایسه با بارش فصلی عملکرد بهتری دارد. ابومناصر و همکاران (۲)، روش کوکریجینگ را نسبت به روش‌های کریجینگ ساده و معکوس وزنی فاصله برای توزیع بارش در جنوب غرب کشور عربستان مناسب‌تر تشخیص دادند. قربانی (۱۳) تغییرات مکانی بارش سالانه استان گیلان را مورد بررسی قرار داد که روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با روش‌های معمول درون‌یابی شامل چندجمله‌ای سراسری و موضعی، اسپلاین، وزن عکس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی دارای کمترین خطا بوده و روش کریجینگ در رتبه دوم قرار گرفته است. امینی و همکاران (۴) با استفاده از شش روش درون‌یابی شامل مربع عکس فاصله، وایزش خطی چندگانه، گرادیان سه‌بعدی به‌علاوه عکس

در روش‌های آماری از توابع ریاضی و آماری برازش‌یافته بر داده‌های اندازه‌گیری شده برای درون‌یابی استفاده می‌کنند و مبنای ریاضی دارند. مانند روش اسپلاین که با برازش توابع چندجمله‌ای بر داده‌ها به تخمین آن در نقاط فاقد داده می‌پردازد. برای درون‌یابی بر اساس مدل اسپلاین از چندجمله‌ای‌ها استفاده می‌شود و از برازش یک تابع چندجمله‌ای بر اساس داده‌های نمونه، مقادیر نقاط نامعلوم برآورد می‌شوند. ویژگی اساسی اسپلاین این است که در سطح تغییرات ناگهانی وجود ندارد. در معادلات درجه دوم و سوم این انحناها به حداقل خود رسیده و در نتیجه یک سطح نسبتاً همواری به‌دست می‌آید. با توجه به تأثیر درجه بر دقت داده‌ها در درون‌یابی، هرچه درجه بالاتری انتخاب شود شکل حاصل هموارتر خواهد بود ولی به‌میزان قابل‌توجهی از دقت مدل کاسته می‌شود (۲۲). اما روش‌های گرادیان خطی بر مبنای رابطه رگرسیون خطی بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی بنا شده که فرض بر آن است که در راستای طول و عرض و ارتفاع منطقه، روند خطی وجود دارد که در روش گرادیان خطی سه‌بعدی با برازش یک رابطه‌ی رگرسیون خطی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی، می‌توان در نقاط مجهول با مشخص‌بودن طول و عرض و ارتفاع آن، مقدار متغیر اصلی را برآورد کرد (۲۰).

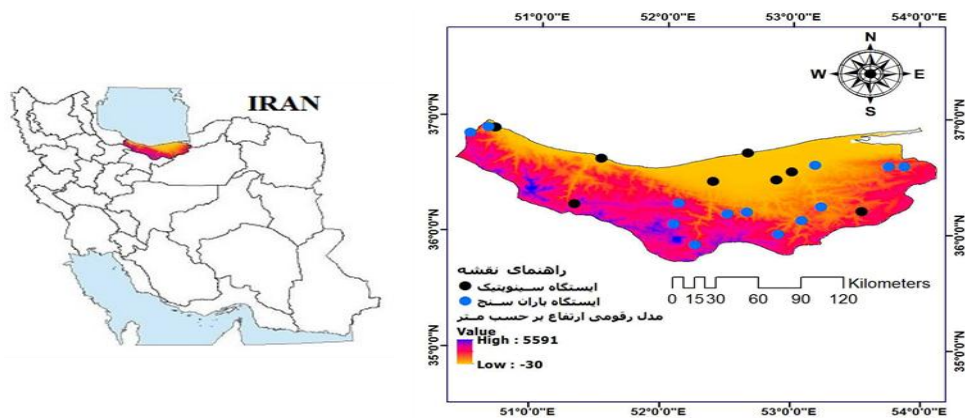
در شرایطی که در منطقه متغیر اصلی دارای روند باشد، می‌توان از روش رگرسیون کریجینگ استفاده کرد. در این روش، نخست یک تخمین اولیه از داده اصلی با استفاده از یک رابطه آماری انجام می‌شود سپس این تخمین اولیه از داده‌های اصلی اندازه‌گیری شده کم شده که بخش باقیمانده به‌دست می‌آید. سپس باقی‌مانده‌ها با یک روش زمین‌آمارى درون‌یابی شده و به مقادیر تخمینی از معادله رگرسیونی اضافه می‌شود. اصولاً استفاده از روش فوق زمانی توصیه می‌شود که اولاً یک یا چند متغیر کمکی مستقل به تعداد زیاد در منطقه موجود باشد و ثانیاً بین متغیر وابسته و متغیرهای کمکی

محدوده پستى و بلندى در استان مازندران بين ۲۸- تا ۵۶۱۰ متر نوسان مى‌کند که باعث ايجاد اقليم‌هاى گوناگون در اين استان مى‌شود. از سويى ديگر وجود دريائى خزر در شمال و رشته کوه البرز در جنوب استان باعث پيچيدگى بيشتري تغييرات مکانى بارش در اين استان مى‌شود به طوري که تخمين بارش در مناطق فاقد ايستگاه هواشناسى به خصوص در ارتفاعات صعب‌العبور استان که منبع تغذيه رودخانه‌هاى بزرگى است، با خطاى بيشتري همراه مى‌شود (۲۰). با توجه به اينکه ارتفاع ايستگاه‌هاى موجود در استان بين ۲۱- تا ۲۳۰۰ متر است و از طرفى نقش مهم بارش ارتفاعات، بر دى رودخانه‌ها و ايجاد سيلاب و عدم وجود اطلاعات و داده‌هاى بارش بالاتر از ارتفاع ۲۳۰۰ متر به همين منظور در اين پژوهش سعى شد روش مناسب تهيه نقشه‌هاى هم‌بارش با مقايسه روش‌هاى مختلف درون‌يابى معرفى گردد. همچنين نقش متغيرهاى کمكى در برآورد بارش در استان مورد بررسى قرار گيرد.

### مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

استان مازندران با داشتن  $۲۳۷۵۶/۴$  كيلومتر مربع مساحت، بين طول جغرافيايى  $۳۴^{\circ} ۵۰'$  و  $۵۴^{\circ} ۱۰'$  و عرض جغرافيايى  $۳۵^{\circ} ۳۵'$  و  $۳۵^{\circ} ۳۵'$  در جنوب دريائى خزر و در شمال رشته کوه البرز قرار دارد. عوامل مؤثر در آب و هواى اين منطقه را مى‌توان به وجود کوه‌هاى البرز، جهت قرا گرفتن آن‌ها، ارتفاع، نزديكى به دريا، پوشش گياهى، بادهائى محلى، عرض جغرافيايى متوسط و پيش‌آمدن توده هواى شمالى و غربى نسبت داد (۷). سواحل جنوبى دريائى خزر هميشه از نظر ويژگى‌هاى طبيعى و فعاليت‌هاى اقتصادى به خصوص در يك سده اخير جزء نواحى استراتژيکى در سياست‌گذارى خرد و کلان کشور محسوب شده است. اين ناحيه با قرار داشتن بين دو عارضه تعديل‌کننده (دريائى خزر) و محدودکننده (سلسله جبال البرز) توده‌هاى هوا، ارتباط اقليمى مستقيمى با مناطق خشک پيرامون خود ندارد (۱). در اين پژوهش و در راستاى ارزيايى روش‌هاى مختلف درون‌يابى بارش استان مازندران از داده‌هاى ۲۱ ايستگاه سينوپتيک و باران‌سنجى سازمان هواشناسى استفاده شد که در شکل ۱ موقعيت مکانى ايستگاه‌ها نشان داده شده است.

مجذور فاصله، کريجينگ ساده، کريجينگ معمولى و کريجينگ جهانى، پهنه‌بندى بارش‌هاى ميانگين ماهانه، فصلى و سالانه، کشور ايران را ارائه دادند، که با مقايسه اين شش روش درون‌يابى، گراديان به علاوه عکس مجذور فاصله نسبت به روش‌هاى ديگر دقت بالاترى در برآورد بارشى کشور ايران برخوردار بود. نادى و همکاران (۲۰) هفت روش درون‌يابى، شامل کريجينگ عمومى، کوکريجينگ، کريجينگ با روند خارجى، رگرسيون کريجينگ، وزنى عکس فاصله، اسپلاين و گراديان خط سه‌بعدى را براى داده‌هاى بارش سالانه و ماهانه استان خوزستان را مورد بررسى قرار دادند. نتايج نشان داد، تمامى روش‌ها به جز روش گراديان کريجينگ در برآورد مقادير زياد بارندگى دچار خطاى کم برآوردى هستند. نى‌پور و همکاران (۱۹) روش‌هاى زمين‌آمار شامل کريجينگ ساده و معمولى، کوکريجينگ ساده و معمولى و کوکريجينگ معمولى استاندارد شده و ميانگين متحرک وزنى به صورت عکس فاصله با توان يك تا پنج به منظور برآورد مکانى بارندگى ماهانه، سالانه و حداکثر بارندگى ۲۴ ساعته در حوضه قوشان، شمال شرقى ايران را مورد بررسى قرار دادند، که نتايج حاصل نشان داد بارش ساليانه در منطقه مورد نظر، روش کريجينگ معمولى و براى بارش ماه‌هاى مختلف و همچنين بارش ۲۴ ساعته، روش معکوس فاصله‌ى وزنى با توان پنج مناسب‌ترين روش مى‌باشد. زندکريمى و همکاران (۲۷) به ارزيايى دقت ۱۰ روش مختلف درون‌يابى در تخمين بارش استان کردستان پرداخته‌اند که روش اوردينارى کريجينگ مناسب‌ترين روش انتخاب گرديد. اسلامى (۱۱)، به منظور تهيه نقشه تغييرات مکانى بارش استان خوزستان، اطلاعات نقطه‌اى شاخص‌ها را با استفاده از روش‌هاى مختلف قطعى و زمين‌آمارى به اطلاعات ناحيه‌اى تبديل کرد که نتايج نشان داد، روش گريجينگ معمولى با نوع گوسى، بيشتريين دقت را براى ميان‌يابى شاخص تمرکز بارندگى دارد. يوسفى کبريا و همکاران (۲۶) به مقايسه چهار روش درون‌يابى، کريجينگ، کوکريجينگ، وزنى عکس فاصله و گراديان خطى سه بعدى به منظور تخمين بارش استان مازندران پرداختند که بهترين روش مورد بررسى روش گراديان خطى سه‌بعدى انتخاب شد. همچنين نتايج پژوهش آن‌ها نشان داد، روش‌هاى که از متغير ارتفاع به عنوان متغير کمكى استفاده مى‌کنند، نسبت به روش‌هاى ديگر از دقت بالاترى برخوردارند.



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در استان مازندران  
Figure 1. Location of meteorological stations used in Mazandaran province

که در آن  $Y$  مقدار برآوردی و  $X$  مقدار واقعی،  $a$  عرض از مبدأ و  $b$  شیب خط می‌باشد. هر چه مقدار  $a$  به صفر و  $b$  به یک نزدیک‌تر باشد نتایج مدل دقیق‌تر است. در این پژوهش از نرم‌افزار  $GS+$  و  $Mini tab$  و  $Arc Gis$  و  $Excel$  استفاده شده است.

### نتایج و بحث

#### بررسی نیم تغییرنمای داده‌های بارش

در تحلیل واریوگرافی در این تحقیق پنج نوع مدل نیم‌تغییرنما شامل مدل‌های کروی، گوسی، نمایی، خطی و خطی دارای حد آستانه<sup>۵</sup> بر داده‌ها برازش داده شد.

برای انتخاب بهترین نیم‌تغییرنما از ضریب تعیین و نسبت تغییرات ساختاردار به تغییرات کل استفاده شد، به گونه‌ای که هر چه این نسبت و همچنین ضریب تعیین به یک نزدیک‌تر باشد، مدل انتخابی بهتر است. نتایج بهترین مدل نیم‌تغییرنما در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. با توجه به این جداول ضریب تعیین در تمامی ماه‌ها هم در میانگین دوره ۱۳ ساله و هم دوره یک‌ساله مناسب بوده، همچنین به جز ماه می، بقیه ماه‌ها نسبت تغییرات ساختاردار به تغییرات کل مناسبی دارند، با توجه به این جدول بهترین مدل‌ها در این پژوهش مدل‌های نمایی و کروی بوده است. علاوه بر این بررسی نتایج جدول شماره ۱ نشان می‌دهد که دامنه تاثیر داده‌های بارش در این استان در میانگین دوره ۱۳ ساله حدود ۱۸ کیلومتر و در دوره یک‌ساله (۲۰۱۵) حدود ۶ کیلومتر می‌باشد.

با بررسی دوره آماری ایستگاه‌ها (۲۰۱۸-۱۹۹۱) از میانگین دوره ۱۳ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۶) و داده‌های سال ۲۰۱۵، برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی استفاده شد. با توجه به نقش ارتفاع در پراکنش بارش و همچنین تغییرات عرضی و طولی بارش در استان مازندران در این پژوهش از متغیرهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع به‌عنوان متغیرهای کمکی استفاده شد که بتوان تخمین دقیق‌تری از نوسانات بارش داشت. در این تحقیق شش روش درون‌یابی شامل کریجینگ عمومی، کوکریجینگ، وزنی عکس فاصله، اسپلاین، رگرسیون کریجینگ و گرادیان خطی سه‌بعدی برای تعیین روش مناسب درون‌یابی داده‌های بارش با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

#### معیارهای ارزیابی روش‌ها

برای انتخاب بهترین روش درون‌یابی و محاسبه مقدار خطا در این پژوهش از تحلیل رگرسیونی و میانگین مربعات خطا و خطای اریب استفاده شد، که به‌صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2}{N}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)] \quad (3)$$

که در آن،  $\hat{Z}(x_i)$  مقدار برآوردشده و  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده‌شده و  $N$  تعداد داده‌ها هستند. از تحلیل رگرسیونی برای درک میزان هم‌خوانی داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی استفاده می‌شود که فرمول آن به‌صورت رابطه ۴ آورده شده است.

$$Y = a + bX \quad (4)$$

جدول ۱- پارامترهاى نيم تغييرنما بارندگى استان مازندران

Table 1. Semivariogram analysis parameters of rainfall in Mazandaran province

مدل منتخب	اثر قطعه‌اى (c0)	آستانه (c+c0)	دامنه تأثیر (deg)	C/(C+C0)	r <sup>2</sup>	ماه	میانگین سال
نمابى	-/۰.۲	۰/۴	۱۱/۴	۰/۹	۰/۹	ژانويه	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۶	۰/۸	۶	۰/۹	۰/۹		سال ۲۰۱۵
كروى	۰/۰.۰۸	-/۰.۰۶	۴	۰/۸	۰/۸	فوريه	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۱	۰/۴	۶	۰/۹	۰/۷		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۱	-/۰.۱۵	۵/۶	۰/۹	۰/۹	مارس	میانگین ۱۳ سال
كروى	۰/۰.۰۷	-/۰.۳	۶	۰/۹	۰/۹		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۲	-/۰.۵	۱۸	۰/۹	۰/۹	آوريل	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۵	-/۰.۱	۶	۰/۶	۰/۸		سال ۲۰۱۵
نمابى	-/۰.۱	-/۰.۲	۶	۰/۵	۰/۷	مى	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۷	-/۰.۱	۶	۰/۵	۰/۷		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۸	-/۰.۳	۴	۰/۷	۰/۹	ژوئن	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۵	-/۰.۱	۶	۰/۶	۰/۸		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۱	-/۰.۳	۴	۰/۷	۰/۹	ژوئيه	میانگین ۱۳ سال
نمابى	-/۰.۰۴	-/۰.۳	۱	۰/۸	۰/۸		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۱	-/۰.۴	۴	۰/۶	۰/۷	اگوست	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۰۱	-/۰.۰۶	-/۰.۷	۰/۹	۰/۸		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۸	-/۰.۷۳	۴/۶	۰/۸	۰/۸	سپتامبر	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۸	-/۰.۹	۴	۰/۹	۰/۶		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۹	-/۰.۴	۱/۷	۰/۷	۰/۹	اكتبر	میانگین ۱۳ سال
كروى	۰/۰.۰۰۱	-/۰.۲	۶	۱	۰/۹		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۳	-/۰.۲	۲	۰/۸	۰/۹	نوامبر	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۹	-/۰.۶	۵	۰/۸	۰/۹		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۲	-/۰.۱۲	۱	۰/۷	۰/۸	دسامبر	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۵	-/۰.۴	۶	۰/۸	۰/۹		سال ۲۰۱۵
كروى	-/۰.۰۱	-/۰.۱۱	۱/۷	۰/۸	۰/۸	سالانه	میانگین ۱۳ سال
كروى	-/۰.۰۳	-/۰.۲	۱	۰/۸	۰/۸		سال ۲۰۱۵

گرادىان سه‌بعدى از متغیرهاى طول و عرض جغرافىيى و ارتفاع استفاده شد که معادلات ماهانه برآورد میانگین بارش در جدول ۲ نشان داده شده است. با مشاهده این جدول مشخص می‌شود که ضریب تعیین معادلات گرادىانى در ماه‌هاى سرد بیشتر از ماه‌هاى گرم است که نشان‌دهنده کارایی بهتر این معادلات در ماه‌هاى پربارش است. همچنین در میانگین دوره ۱۳ساله، ماه‌هاى ژوئن، ژوئيه و اگوست (ماه‌هاى گرم) و در دوره یک‌ساله علاوه‌بر ماه‌هاى ذکرشده، ماه‌هاى مارس و سپتامبر نیز، کمتر می‌شود که ممکن است به علت افزایش اثرات محلى و کاهش اثرات سیستمى در ماه‌هاى خشک باشد.

**بررسى رابطه گرادىان خطى بارش با متغیرهاى كمكى**  
با توجه به اینکه در روش‌هاى آمارى باید از متغیرهاى كمكى استفاده نمود در این تحقیق همبستگی داده‌هاى بارش با متغیرهاى ارتفاع و طول و عرض جغرافىيى محاسبه شد که نتایج نشان داد پارامتر كمكى ارتفاع نسبت به طول و عرض جغرافىيى دارای همبستگی معنادارترى است، به‌علاوه طول جغرافىيى نسبت به عرض جغرافىيى همبستگی بیشتری دارد. همچنین ضریب همبستگی طول جغرافىيى و ارتفاع با داده‌هاى بارش منفى و معنادار است به‌عبارتى با افزایش ارتفاع و همچنین با حرکت از سمت غرب به شرق استان از مقدار بارش کاسته می‌شود. بنابراین برای استفاده در معادله

جدول ۲- معادله گرادیان خطی سه بعدی بارش استان مازندران

Table 2. Equation of three-dimensional linear gradient of precipitation in Mazandaran province

ماه	معادله رگرسیونى گرادیان سه بعدی	ضریب تعیین
میانگین ۱۳ سال	$p = 5 - 4/85 \text{ LONG} + 1/8 \text{ LAT} - 0/109 z$	۰/۲۹
سال ۲۰۱۵	$p = 28 - 21/4 \text{ LONG} + 31/7 \text{ LAT} - 0/151 z$	۰/۵
میانگین ۱۳ سال	$p = 173 - 5/48 \text{ LONG} + 5/1 \text{ LAT} - 0/0472 z$	۰/۳
سال ۲۰۱۵	$p = 680 - 17/9 \text{ LONG} + 9/3 \text{ LAT} - 0/102 z$	۰/۴
میانگین ۱۳ سال	$p = 1093 - 12/1 \text{ LONG} - 10/5 \text{ LAT} - 0/107 z$	۰/۵
سال ۲۰۱۵	$p = 1280 - 9/72 \text{ LONG} - 27/4 \text{ LAT} - 0/144 z$	۰/۱
میانگین ۱۳ سال	$p = 1095 - 13/9 \text{ LONG} - 8/7 \text{ LAT} + 0/0217 z$	۰/۶
سال ۲۰۱۵	$p = 1266 - 17/5 \text{ LONG} - 8/8 \text{ LAT} + 0/0816 z$	۰/۴
میانگین ۱۳ سال	$p = 1127 - 9 \text{ LONG} - 17/1 \text{ LAT} + 0/0495 z$	۰/۴۴
سال ۲۰۱۵	$p = 849 - 8/35 \text{ LONG} - 10/8 \text{ LAT} + 0/0262 z$	۰/۳
میانگین ۱۳ سال	$p = 1587 - 9/28 \text{ LONG} - 29 \text{ LAT} - 0/0581 z$	۰/۱۶
سال ۲۰۱۵	$p = 1238 - 3/34 \text{ LONG} - 28/6 \text{ LAT} + 0/0226 z$	۰/۰۳
میانگین ۱۳ سال	$p = 1775 - 10/6 \text{ LONG} - 32/2 \text{ LAT} - 0/0259 z$	۰/۱۹
سال ۲۰۱۵	$p = 1470 - 10/8 \text{ LONG} - 22/2 \text{ LAT} - 0/390 z$	۰/۲
میانگین ۱۳ سال	$p = 889 - 8/3 \text{ LONG} - 11/4 \text{ LAT} - 0/0882 z$	۰/۰۱
سال ۲۰۱۵	$p = -3452 + 13/1 \text{ LONG} + 78 \text{ LAT} - 0/369 z$	۰/۰۵
میانگین ۱۳ سال	$p = 988 - 14/2 \text{ LONG} - 4/3 \text{ LAT} - 0/0209 z$	۰/۳۲
سال ۲۰۱۵	$p = 1270 - 15/3 \text{ LONG} - 10/4 \text{ LAT} - 0/041 z$	۰/۰۵
میانگین ۱۳ سال	$p = 1015 - 25/2 \text{ LONG} + 12 \text{ LAT} - 0/432 z$	۰/۵
سال ۲۰۱۵	$p = 2342 - 78 \text{ LONG} + 53/7 \text{ LAT} - 0/0781 z$	۰/۵
میانگین ۱۳ سال	$p = 432 - 19/3 \text{ LONG} + 19/2 \text{ LAT} - 0/272 z$	۰/۶۳
سال ۲۰۱۵	$p = 493 - 27/9 \text{ LONG} + 29/5 \text{ LAT} - 0/236 z$	۰/۶
میانگین ۱۳ سال	$p = -318 - 6 \text{ LONG} + 19/7 \text{ LAT} - 0/138 z$	۰/۴
سال ۲۰۱۵	$p = -1230 - 6/27 \text{ LONG} + 46/9 \text{ LAT} + 0/0839 z$	۰/۲
میانگین ۱۳ سال	$p = 9860 - 138 \text{ LONG} - 48 \text{ LAT} - 0/142 z$	۰/۴۳
سال ۲۰۱۵	$p = 6244 - 203 \text{ LONG} + 147 \text{ LAT} - 0/193 z$	۰/۵

## مقایسه روش‌های درون‌یابی

برای مقایسه روش‌های درون‌یابی مورد بررسی از میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب استفاده شد. بررسی میانگین مربعات خطای روش‌های درون‌یابی در این تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین خطای برآورد تخمین میانگین بارش در میانگین دوره ۱۳ ساله مربوط به ماه اکتبر و بیشترین خطا برآورد تخمین بارش یک‌ساله مربوط به ماه‌های آگوست و اکتبر، می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد خطای روش اسپلاین نسبت به روش‌های کوکریجینگ، کریجینگ و وزنی عکس فاصله بیشتر است. مقایسه روش‌های مورد بررسی در ماه‌های مختلف با یکدیگر نشان داد که در بین ۶ روش درون‌یابی روش‌های رگرسیون کریجینگ و گرادیان خطی سه‌بعدی در همه ماه‌های سال دارای کمترین خطای برآورد داده‌های بارش می‌باشند و به‌نظر می‌رسد دیگر روش‌های درون‌یابی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند، همچنین روش گرادیان سه‌بعدی خطای تخمین بارش روش‌های اسپلاین، کریجینگ، کوکریجینگ و وزنی عکس فاصله را در برخی از ماه ۵۰ درصد کاهش داده است که نشان از برتری این روش در استان مازندران نسبت به سایر روش‌ها دارد. در مورد مجموع میانگین بارش دوره ۱۳ ساله و مجموع بارش یک‌ساله (۲۰۱۵)، نیز نتایج نشان داد روش گرادیان خطی تخمین را

در مقایسه با روش کوکریجینگ بیش از ۴۰ درصد کاهش داده و در مقایسه با روش‌های وزنی عکس فاصله و کریجینگ بیش از ۳۵ درصد کاهش داده و در مقایسه با روش اسپلاین ۵۷ درصد کاهش داده است. همچنین روش رگرسیون کریجینگ نیز به‌طور متوسط خطای تخمین را در مقایسه با روش‌های کوکریجینگ، کریجینگ و وزنی عکس فاصله بیشتر از ۲۷ درصد کاهش داده و در مقایسه با روش اسپلاین ۴۶ درصد کاهش داده است. با توجه به توضیحات فوق و جداول ۴ و ۵ و بهترین روش درون‌یابی برای استان مازندران طبق شاخص میانگین مربعات خطا، روش گرادیان سه‌بعدی دارا می‌باشد. به‌علاوه بررسی میانگین خطای اریب روش‌های درون‌یابی این پژوهش نشان داد که بیشترین خطا را روش اسپلاین و کوکریجینگ دارا هستند و خطای روش‌های وزنی عکس فاصله و کریجینگ تفاوت چندانی ندارد. کمترین میزان اریب خطا در بین روش‌های مورد بررسی مربوط به روش‌های رگرسیون کریجینگ و گرادیان خطی سه‌بعدی دارا می‌باشد، که در جداول شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است. همچنین با توجه به جداول زیر روش گرادیان سه‌بعدی دارای کمترین خطا می‌باشد، که تقریباً برابر صفر می‌باشد.

جدول ۳- مقادير RMSE و MBE روش‌هاى درون يابى براى ميانگين دوره ۱۳ساله بارندگى ماهانه و سالانه  
 Table 3. RMSE and MBE values of induction methods for the average 13-year period of monthly and annual rainfall

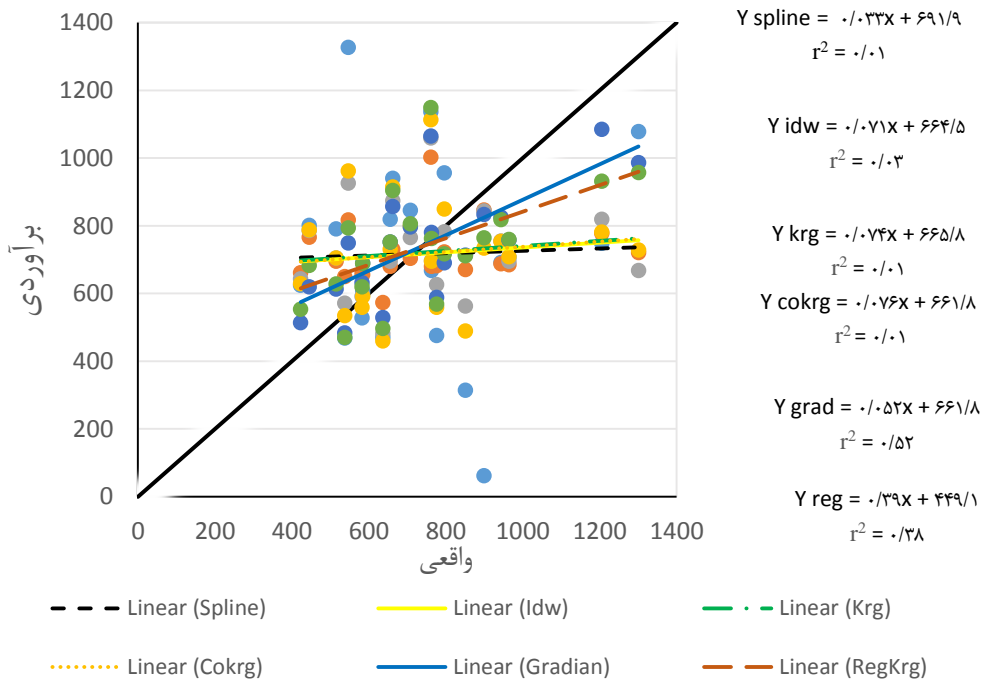
ماه	گراديان سه بعدى		کو-کريجينگ		وزنى عكس فاصله		کريجينگ		رگرسيون کريجينگ		اسپلاين	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
ژانويه	۱۴/۲	۰	۱۸/۶	-۲	۱۸/۷	-۱/۷	۱۸/۲	-۱/۹	۱۵/۱	۰/۲۸	۱۸/۵	-۳/۴
فوريه	۸/۹	۰	۱۲/۳	-۰/۴	۱۱/۱	-۰/۸	۱۲/۲	-۰/۵	۱۰/۱	۰/۱	۱۲/۳	-۰/۳
مارس	۱۰/۷	۰	۱۶/۷	-۱/۳	۱۵/۹	-۱/۸	۱۵	-۱/۲	۱۳/۳	-۰/۵۶	۲۵/۵	-۰/۹
آوريل	۹/۵	۰	۱۳/۱	-۱/۲	۱۳/۳	-۳	۱۲/۱	-۱/۲	۱۰/۷	-۰/۲۸	۱۶/۵	-۰/۵
مى	۹/۹	۰	۱۳/۸	-۰/۹	۱۴	-۳	۱۳/۴	-۲/۶	۱۱/۲	۰/۱۱	۱۷/۶	-۰/۲
ژوئن	۱۳	۰	۱۸	-۱/۱	۱۵/۸	-۱/۷	۱۵/۸	-۱/۹	۱۴/۵	-۰/۴	۲۴/۴	-۰/۴
ژوئيه	۱۴/۷	۰	۲۰/۶	-۱	۱۷/۷	-۲/۵	۱۷/۴	-۲/۴	۱۶/۳	۰/۶۳	۲۶/۸	-۰/۳
اگوست	۱۹/۲	۰	۲۵/۹	-۳/۳	۲۲	-۳/۶	۲۲/۵	-۳/۶	۲۰/۸	۰/۰۱	۳۲/۶	-۳
سپتامبر	۲۳/۷	۰	۴۰/۲	-۴/۶	۳۳/۹	-۵	۳۶/۸	-۵/۱	۲۸	۰/۰۹	۴۸/۴	-۲/۵
اکتبر	۳۶/۹	۰	۶۲/۲	-۸/۳	۶۱/۶	-۱۰/۶	۶۱/۵	-۹/۳	۴۸/۵	-۱/۰۱	۷۳/۲	۱۱/۷
نوامبر	۲۱/۵	۰	۳۵/۹	-۴	۳۸	-۵/۵	۳۵/۷	-۴	۲۷/۶	-۰/۶۱	۴۲/۸	-۰/۳
دسامبر	۱۶/۴	۰	۲۴/۲	-۳/۴	۲۴/۴	-۳/۱	۲۴/۸	-۲/۶	۱۸/۷	-۰/۴۱	۳۱/۹	-۳/۹
سالانه	۱۵۵	۰	۲۶۰/۵	-۲۲/۸	۲۲۶/۵	-۲۳/۷	۲۴۷	-۱۹/۸	۱۸۹/۲	-۱/۲۸	۳۵۵/۷	-۲۴

جدول ۴- مقادير RMSE و MBE روش‌هاى درون يابى براى داده‌هاى بارندگى ماهانه و سالانه سال ۲۰۱۵  
 Table 4. RMSE and MBE values of interpolation method for monthly and annual rainfall data for 2015

ماه	گراديان سه بعدى		کو-کريجينگ		وزنى عكس فاصله		کريجينگ		رگرسيون کريجينگ		اسپلاين	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
ژانويه	۲۶/۳	۰	۴۶/۴	-۴/۸	۴۰/۸	-۶/۶	۴۰	-۴/۸	۳۷/۹	-۰/۲	۶۲/۷	۱۱/۹
فوريه	۲۱/۶	۰	۲۸/۳	-۰/۵	۲۷	-۳/۱	۲۷/۸	-۰/۷	۲۷/۳	۰/۷	۳۸/۹	۶/۵
مارس	۱۸/۸	۰	۲۱/۲	-۲/۸	۲۲/۷	-۳/۶	۲۰/۱	-۲/۳	۲۰/۵	-۱/۷	۳۰/۱	-۱/۶
آوريل	۱۹	۰	۲۹/۴	۱	۲۶/۵	-۲/۲	۲۷/۷	۰/۴	۲۳/۳	-۰/۶	۴۳/۳	۱/۳
مى	۱۰/۷	۰	۱۴/۳	۱/۴	۱۳/۲	۰/۱	۱۲/۵	-۰/۲	۹/۶	۱/۳	۲۲/۱	۶/۶
ژوئن	۱۹/۱	۰	۲۶/۱	۱/۷	۲۳/۴	۱/۲	۲۲/۳	-۰/۲	۲۱/۹	۱	۳۵/۴	۱۳/۸
ژوئيه	۳۱/۱	۰	۴۷/۸	-۸/۸	۴۳/۶	-۸/۷	۴۶/۶	-۷/۶	۳۷	-۲/۳	۶۲/۱	۱۵
اگوست	۲۶/۵	۰	۳۶/۳	-۱۲/۷	۳۱/۱	۱/۳	۳۰/۶	-۳/۲	۴۳/۶	-۰/۹	۴۴/۱	-۰/۸
سپتامبر	۴۱/۲	۰	۵۳/۷	-۶/۹	۴۶/۷	-۷/۳	۵۰/۳	-۷/۵	۴۶	۱/۹	۶۵/۴	-۶/۵
اکتبر	۸۵	۰	۱۴۶/۲	-۵/۴	۱۴۳	-۴	۱۴۶/۱	-۵/۱	۱۱۸/۱	-۰/۱	۱۸۸/۶	۵۱/۳
نوامبر	۲۴/۲	۰	۴۰/۳	-۳/۲	۳۷/۷	-۸/۱	۳۶/۵	-۵/۳	۲۹/۹	۰	۵۴	-۰/۲
دسامبر	۲۲/۴	۰	۳۹/۴	-۶/۵	۳۲/۲	-۵/۶	۳۳/۱	-۴/۳	۲۸/۱	-۰/۶	۴۷/۷	-۰/۱
سالانه	۱۸۹/۹	۰	۳۳۹/۶	-۱۵/۳	۲۹۱/۴	-۸/۶	۳۳۹/۱	-۱۴/۶	۲۳۸/۲	۰/۲۵	۵۲۱/۷	-۳/۲

عملکرد روش‌هاى مورد بررسى در برآورد بارش ماهانه و سالانه استان مازندران، نقشه‌هاى هم بارش سالانه ميانگين دوره ۱۳ساله با شش روش مورد بررسى در اين پژوهش رسم شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. نقشه‌هاى موجود در نرم‌افزار ArcMap ترسيم شد که براى ترسيم نقشه گراديان سه‌بعدى، از معادلات جدول شماره ۲ استفاده شد. همچنين براى ترسيم نقشه هم بارش با روش رگرسيون کريجينگ، پس از محاسبه باقيمانده‌هاى حاصل از معادله رگرسيونى، نقشه باقيمانده‌ها با استفاده از روش کريجينگ رسم شد، سپس با تركيب اين نقشه و نقشه گراديان سه‌بعدى، نقشه نهايى ترسيم گرديد.

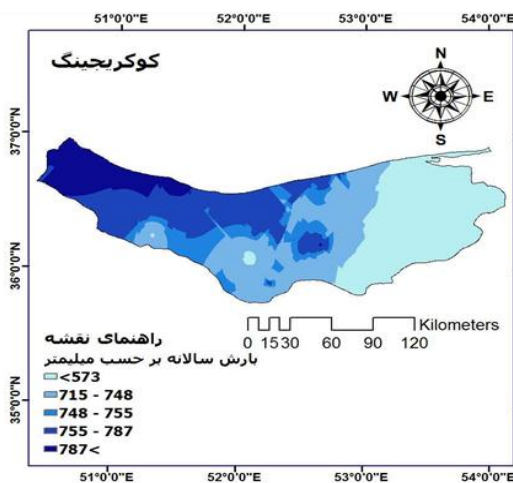
علاوه بر شاخص‌هاى خطا تحليل رگرسيونى نتايج نيز انجام شد که باى داده‌هاى ميانگين دوره ۱۳ساله در شکل ۲ قابل مشاهده است. نمودار برآورد و مقدار واقعى بارش در مقابل يکديگر ترسيم شد به علاوه، معادله خط براى روش‌هاى مختلف درون يابى نيز بر داده‌ها برازش يافت. با توجه به معادلات و نمودار حاصل، بهترين معادله خط مربوط به روش گراديان سه‌بعدى مى‌باشد که نزديک‌ترين خط نسبت به ديگر روش‌ها به خط ۱:۱ مى‌باشد. همچنين روش رگرسيون کريجينگ نيز نسبت به ديگر روش‌ها (به جز گراديان سه بعدى) معادله خط بهترى ارائه داد. تحليل نتايج شاخص‌هاى خطا و تحليل رگرسيونى روش گراديان سه‌بعدى را به عنوان روش برتر معرفى نمود اما به منظور مقايسه و درک بهتر



شکل ۲- تحلیل رگرسیون روش‌های مختلف مکانی کردن داده‌های میانگین بارش دوره ۱۳ ساله  
 Figure 2. Regression analysis of different methods of locating the mean rainfall data of the 13-year period

که به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده، نیز تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و با بررسی هر دو شکل می‌توان به این نتیجه رسید که این دو روش پراکندگی بارش را با توجه به اقلیم خاص و متنوع استان مازندران، به خوبی نشان داده‌اند.

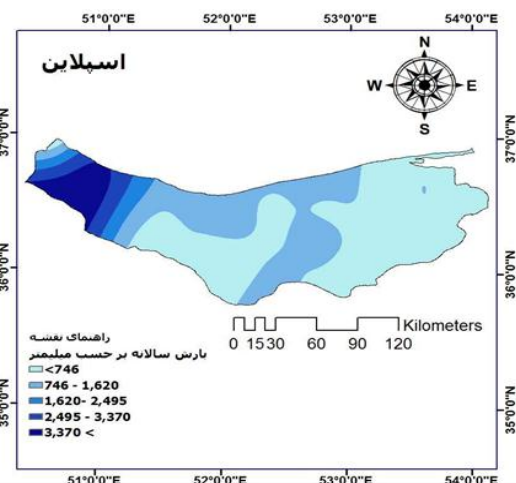
بررسی نقشه هم‌بارش با روش اسپلاین در شکل ۳، نشان می‌دهد این روش برآورد مناسبی از بارش سالانه در استان نشان نداده است به گونه‌ای که بیشترین بارش استان را بیش از ۳۰۰۰ میلی‌متر برآورد کرده به علاوه تفکیک بارشی خوبی برای سواحل و ارتفاعات استان در نظر نگرفته است. همچنین نقشه هم‌بارش روش‌های وزنی عکس فاصله و کوکریجینگ



شکل ۴- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش کوکریجینگ

Figure 4. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the studied co kriging methods

و کوکریجینگ بهتر بوده و پراکندگی بارش را در سواحل به خوبی نشان داده است، همچنین هرچه از غرب به شرق



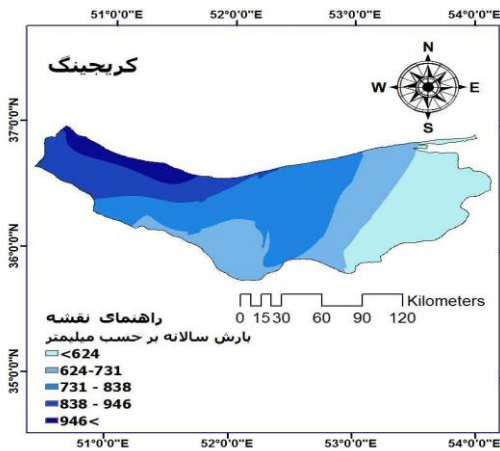
شکل ۳- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش اسپلاین

Figure 3. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the spline methods

نقشه هم‌بارش به دست آمده از روش کریجینگ که در شکل ۶ قابل مشاهده است، نسبت به نقشه‌های عکس فاصله

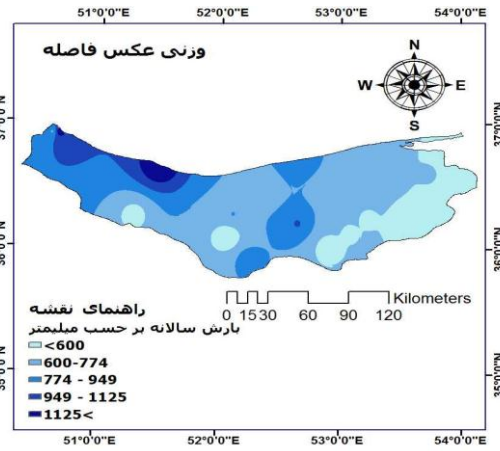
به‌خصوص ارتفاعات غربى استان در نظر نگرفته است.

استان پيش مى‌رويم ميزان بارش استان کاهش مى‌يابد، اما اين روش تفكيك بارشى مناسبى براى ارتفاعات استان



شکل ۶- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش کریجینگ

Figure 6. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the studied co kriging methods

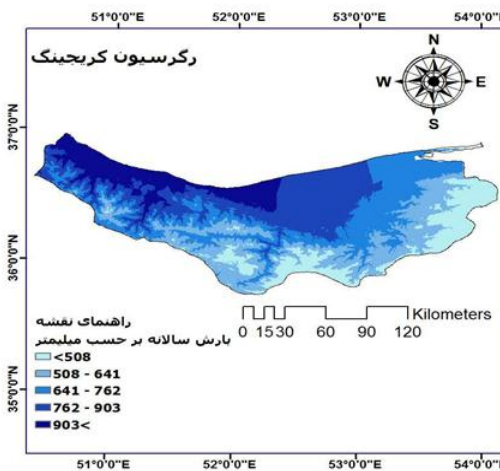


شکل ۵- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش وزنى عكس فاصله

Figure 5. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the idw methods

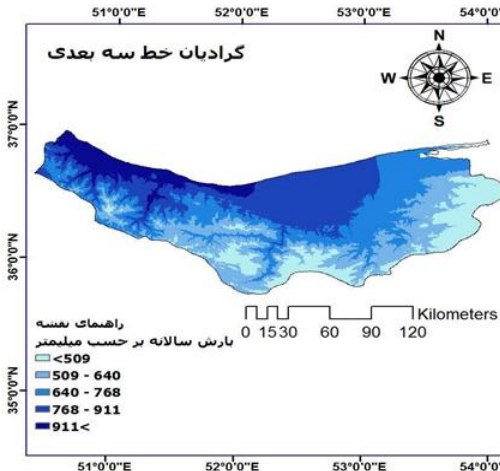
بارش-ارتفاع در غرب استان بیشتر از شرق مى‌باشد که دليل آن توپوگرافى خاص و پيچيده غرب استان مازندران است. به‌علاوه بخش غربى استان را به چند بخش بارشى تفكيك کرده، همچنين با بررسى نقشه‌ها مى‌توان به اين نتيجه دست يافت که بارش نزولى در دره‌ها و نقاط پست اطراف کوه‌هاى غرب استان، بیشتر از ۹۰۰ ميلى متر است، اما در مرکز استان و دره‌ها و نقاط پست تر اطراف قله دماوند اين حجم بارش کاهش يافته و تقريباً بيش تر از ۶۰۰ ميلى متر مى‌باشد و هر چه به شرق مى‌رويم از حجم بارش کاسته مى‌شود.

نقشه حاصل از روش‌هاى گراديان سه‌بعدى و رگرسيون کريجينگ که در شکل‌هاى ۷ و ۸ آمده است، تفاوت چندانى با يکديگر ندارند و نسبت به ساير روش‌ها نقشه هم‌بارش بهتري را براى استان رسم کرده است. نقشه‌هاى حاصل از اين دو روش به‌خوبى نشان مى‌دهند که حلقه پر بارش استان از امتداد انتهاي سواحل غربى استان تا سواحل مرکزى استان تا شهرستان سرخورد و فريدون کنار تشکيل مى‌شود. همچنين هرچه از ساحل دور مى‌شويم و به ارتفاعات پيش مى‌رويم مقدار بارش کاهش مى‌يابد. به‌علاوه شيب تغييرات



شکل ۸- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش رگرسيون کريجينگ

Figure 8. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the studied Reg-krig methods



شکل ۷- نقشه هم‌بارش میانگین دوره ۱۳ ساله استان مازندران با روش گراديان خط سه بعدى

Figure 7. Map of the average rainfall of 13 years of Mazandaran province with the Gradian3D methods

آمارى شامل میانگین بارش ۱۳ ساله و مجموع بارش یک‌ساله ۲۰۱۵ استفاده شد و شش روش درون‌يابى شامل اسپلاين،

در اين پژوهش به‌منظور تعيين بهترين روش درون‌يابى داده‌هاى بارش ماهانه و سالانه استان مازندران، از دو دوره

سه‌بعدی تخمین منطقی‌تری از تغییرات مکانی بارش در استان دارند. به‌طوریکه در ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر مقدار بارش بین ۹۰۰-۴۰۰ میلی‌متر در نوسان است که نشان از توپوگرافی پیچیده و خاص استان دارد. از بررسی نقشه هم‌بارش سالانه با روش منتخب می‌توان دریافت که تنها سواحل غربی استان بارش بیش از ۹۰۰ میلی‌متر در سال را در استان تجربه می‌کنند. به‌علاوه شیب تغییرات بارش با ارتفاع در غرب استان بیشتر از شرق بوده و به‌دلیل توپوگرافی پیچیده غرب استان، سواحل غربی دارای بارش بیشتری نسبت به ارتفاعات غرب می‌باشد. همچنین به‌نظر میزان بارش نزولی در کف دره‌های استان برابر بارش مناطق کم ارتفاع می‌باشد که این مطلب نقش مهمی در دبی رودخانه‌های جاری در دره‌های استان دارد. به‌علاوه در این پژوهش از دو دوره میانگین ۱۳ساله و کوتاه‌مدت یک‌ساله استفاده شد و نشان داده شد که روش‌های به‌کار برده شده هم در دوره ۱۳ساله و هم دوره کوتاه‌مدت نتایج مشابهی داده است و روش گرادیان خط سه‌بعدی با متغیر کمکی ارتفاع، هم برای دوره درازمدت و هم برای دوره کوتاه‌مدت کاربرد مناسبی دارند. مطالعات انجام شده در تهیه نقشه هم‌بارش استان مازندران نشان داد که اغلب به بررسی روش‌های زمین‌آمارى پرداخته‌اند. این پژوهش با مقایسه روش‌های آماری و زمین‌آمارى نشان داد اولاً روش‌های آماری دقت بالاتری در تخمین بارش دارند و همچنین استفاده از متغیرهای کمکی باعث افزایش دقت تخمین خواهد شد. بنابراین روش گرادیان خط سه‌بعدی به‌عنوان روش برگزیده معرفی می‌گردد که خطای تخمین بارش را تا بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش داده است.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق برگرفته از نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد. از اداره کل هواشناسی استان مازندران به جهت در اختیار نهادن داده‌های هواشناسی استان تشکر و قدردانی می‌گردد.

وزنی عکس فاصله، کریجینگ، کوکریجینگ، گرادیان خطی سه‌بعدی و رگرسیون کریجینگ با یکدیگر مقایسه شدند. به‌نظر می‌رسد در ماه‌های گرم مؤلفه غیر ساختاردار بزرگتر شده و ساختار مکانی داده‌های بارش ۲۰ الی ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که ممکن است به‌دلیل ماهیت محلی سیستم‌های بارش‌زا باشد. البته این مطلب قبلاً نیز توسط نادى و همکاران (۲۰) گزارش شده است. بر اساس نمودار تغییرات بارش-ارتفاع به‌نظر می‌رسد در این استان با افزایش ارتفاع از حجم بارش سالانه کاسته می‌شود، بررسی میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب نشان داد. بهترین روش درون‌یابی برای بارش‌های درازمدت و کوتاه مدت ماهانه روش گرادیان خطی سه‌بعدی است که انتظار می‌رفت روش رگرسیون کریجینگ تخمین دقیق‌تری نسبت به روش گرادیانی داشته باشد چرا که این روش در واقع منشعب از روش گرادیانی است با این تفاوت که به لایه رگرسیونی یک لایه برای کاهش خطای معادله گرادیانی اضافه می‌شود. اما این گونه به‌نظر می‌رسد که لایه خطا اصلاً دقت مناسبی در تشخیص خطای روش گرادیانی ندارد. به‌عبارتی نتایج نشان داد لزوماً افزایش یک لایه منجر به کاهش خطا نمی‌شود و ممکن است نتیجه عکس همراه داشته باشد.

علاوه‌بر شاخص‌های خطا، تحلیل رگرسیونی نیز نشان داد که روش گرادیان سه‌بعدی مناسب‌ترین روش درون‌یابی داده‌های بارش در استان مازندران است. نقش مؤثر متغیرهای کمکی قبلاً توسط عثمان و همکاران (۲۵) نیز گزارش شده است ایشان در تحلیل رابطه فضایی بین ارتفاع و دما و بارش در شمال نیجریه دریافتند که در مدل‌سازی مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی اثر ارتفاع بر متغیرهای اقلیمی بسیار حائز اهمیت است. همچنین حکیم دوست و همکاران (۱۴) نیز دریافتند که ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی، بیشترین تأثیر را در توزیع بارش مازندران دارند. البته در بین روش‌های زمین‌آمارى نیز کلاه‌چی و همکاران (۱۶) در مازندران و مظفری و همکاران (۱۸) در بوشهر روش کریجینگ را نسبت به سایر روش توصیه کردند.

تحلیل نقشه‌های هم‌بارش با روش‌های مختلف نیز نشان داد که روش‌های رگرسیون کریجینگ و گرادیان خطی

### منابع

1. Abdollahi, P., M. Habibnejad and K. Solaimani. 2015. Investigation of Precipitation and Temperature Changes in Caspian Sea Southern Coasts and Its Comparison with Changes in Northern Hemisphere and Global Scales. *Journal of Watershed Management Research*, 6(11): 90-100.
2. Abo-Monasar, A. and M.A. Al-Zahrani. 2014. Estimation of rainfall distribution for the southwestern region of Saudi Arabia. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2): 420-431.
3. Akbari, M., H. Mostafaie and T. Mohammadzadeh. 2015. Error assessment and measurement, interpolation efficiency in estimating northwestern Iran temperature and precipitation data. *International Conference on Geographical Sciences (ICG 2015)*, Kharazmi Institute of Higher Science and Technology, Shiraz, Iran, (In Persian).
4. Amini, M., A. Hedayati and M. Azadi. 2019. A Case study of comparing some interpolation methods for precipitation analysis over Iran. *Nivar*, (100-101): 67-74.
5. Arowolo, A.O., A.K. Bhowmik and W. Qi and X. Deng. 2017. Comparison of spatial interpolation techniques to generate high-resolution climate surfaces for Nigeria. *International Journal of Climatology*, 37(1): 179-192.

6. Arzumandi, L. and F. Tirgar Fakhri. 2013. Synoptic analysis of heavy rainfall in Mazandaran province (Case study Novber 11, 1996). International Conference on Geography, Urban Planning and Sustainable Development, Tehran (In Persian).
7. Ataei, H., M. Tavana. and L. Parsa. 2014. Climate Analysis of Mazandaran Province and Mazandaran Province's Climate Zoning Using Gis. The Second national conference of Tourism, Geography and Stable Environment, (In Persian).
8. Carratal A., A. Gomez and J. Bellot. 1998. Mapping Rain Compostion in the East of Spain by Applying Kriging. Water, Air and soil Pollution, 104(12): 9-27.
9. Chen, T., L. Yan, F. Yang, X. Jiang, S.H. Tang, T. Liu, Y. Zaho and C.H. Zhang. 2017. Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. Water, 9(342); doi:10.3390-9050342.
10. Dellavari, D., M. Mirzai zade and M. Tarek. 2014. Evaluation of Different Kriging Methods in Ilam Province Rain Zone. Second National Conference on Architecture, Civil and Urban Environment, Hamadan, Martyr Mofteh Callege, (In Persian).
11. Eslami, H. 2019. Investigation of Spatial Variability of Precipitation Concentration and Rainfall Erosivity Indices in Khuzestan Province. Journal of Watershed Management, 9(17): 109-118. (In Persian).
12. Ghahroudi Tali, M. and Sh. Mohammadi. 2002. Relief Management and Necessity of Domain Instability Zoning in Sanandaj. 1st Conference on Search and Rescue Management, Iran Crescent Applied Higher Education Institute, Tehran, (In Persian).
13. Ghorbani, Kh. 2011. Geographically Weighted Regression: A Method for Mapping Isohyets in Gilan Province. Journal of Water and Soil, 3(66): 743-752.
14. Hakim Doost, Y., A. Mohammad Pour zidi and M.S. Gerami. 2015. Spatial analysis of rainfall in Mazandaran province, in the environment of geographic information system. Journal of Geographical Information Scientific Quarterly, 26(102):191-203.
15. Jamei, M. and M. Mousavi Baigi. 2013. Spatial and zoning estimation of reference evapotranspiration in Khuzestan province. Journal of Geography and Regional Development (Research Journal), 11(21): 23-43.
16. Kolahchi, A., B. Nazari and B. Karimi. 2007. Study of Monthly Rainfall in Mazandaran Province and Comparison of GIS Statistical Methods with Gis. 4th National Conference on Iranian Watershed Management Science and Engineering, Karaj, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, (In Persian).
17. Kumari, M., A. Basistha, O. Bakimchandra and C.K. Singh. 2016. Comparison of spatial interpolation methods for mapping rainfall in Indian Himalayas of Uttarakhand region. In: Raju N. (Ed.), Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. Springer, Cham, Switzerland, PP. 159-168.
18. Mozafari, G., S. Shafiee and R. Behnoosh. 2014. Statistical Spatial Analysis of the Precipitated Rainfall of Iran by the atmosphere-Ocean HADCM3 General Cycle Round. Agricultural Meteorological Journal, 2(2): 45-36.
19. NabiPur, Y. and M. VafaKhah. 2017. Comparison of Different Geostatistical Methods for Estimating Rainfall in Haji Ghoshan Watershed. Journal of Range and Watershed Management, 2(69): 487-502.
20. Nadi, M., A. Khalili, K. Pour Tahmasi and J. Bazrafshan. 2013. Comparison of different climatological zoning techniques to determine the most important factors affecting the growth of Chahar Bagh area trees, Journal of Forest and Wood Products. Iranian journal of natural recources, 1(66): 95-83 (In Persian).
21. Nadi, M., M. Jamei. J. Bazrafshan and S. Janat Rostami. 2012. Evaluation of Different Methods for Interpolation of Mean Monthly and Annual Precipitation Data (Case Study: Khuzestan Province). Physical Geography Research, 4(44): 130-117 (In Persian).
22. Niknejad, M., A. Mahdavi and A. Karimi. 2013. Evaluation of drop rate of different interpolation methods in preparing rainfall map of Khorramabad city. The first national conference of Tourism, Geography and Stable Environment, Venue of Shahid Mofteh Faculty of Hamadan, (In Persian).
23. Rasooli, A., T. Jalali, F. Serafrouz and M. Ismail Pour. 2015. Investigation of temporal and spatial variations of precipitation and its prediction in East Azarbaijan province. Journal of geography and planning, (51): 171-191.
24. Thiele, T.N. 1909. Interpolationsrechnung, B.G. Teubner, Leipzig.
25. Usman, U., M.L. Aliyu and M.K. Aminu. 2015. Study of the Geographically Weighted Regression Application on Climate Data. Mathematical Theory and Modeling, 5(8): 62-66.
26. Yousefi Kabria, A., M. Nadi and Sh. Sheikh Arjanki. 2019. Increasing the accuracy of monthly and annual precipitation maps using covariates in Mazandaran province. 3th Iranian National Conference on Hydrology, University of Tabriz, (In Persian).
27. Zand Karimi, A. and D. Mokhtari. 2015. Evaluating the accuracy of different interpolation methods in estimating precipitation values for selecting the best algorithm in Kurdistan province. Physical Geography Research, 2(50): 323-338.

## Investigation of Statistical and Geostatistical Methods in Preparing The Rainfall Map of Mazandaran Province

Alireza Yousefi Kebriya<sup>1</sup>, Mehdi Nadi<sup>2</sup> and Mozhdeh Jamei<sup>3</sup>

---

1- M.Sc Student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
2- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
(corresponding author: mehdi.nadi@gmail.com)  
3- Ph.D, Khuzestan Water and Power Organization  
Received: 19 June, 2020                      Accepted: 12 July, 2020

---

### Abstract

Precipitation estimation in areas without recorded meteorological data is of great importance in hydrological studies and flood forecasting. Due to the lack of high-altitude meteorological stations with long-term recorded data in Mazandaran province as well as stochastic attribute of rainfall data, using statistical methods based on covariates and comparison with geostatistical methods for interpolating monthly and annual rainfall data in this province is inevitable. For this purpose, precipitation data from 21 meteorological stations over a 13-years recorded period (2004-2013) were used. In order to determination of appropriate interpolation method of rainfall data, six models including Ordinary Kriging, Cokriging, Inverse Distance Weighting, spline, three-dimensional linear gradient and regression-kriging were investigated. Evaluation of the methods was also performed on the basis of root mean square error, mean bias error and regression analysis. Variography analysis showed spherical and exponential models as the best theoretical semivariogram models. The results of error indices analysis showed the Spline model has the lowest efficiency and the three-dimensional linear gradient was found as the most appropriate interpolation model of rainfall data which in comparison with other models reduced the rainfall estimation error from 100 to 200 mm (about 40 to 60 percent). However, its accuracy is reduced in hot and humid months. Investigation of rainfall maps illustrates the accuracy of covariate based interpolation methods in detecting low rainfall and high rainfall points of the province. So that high rainfall district is located on the west coast of the province and by moving east the amount of rainfall decrease. Due to the similarity of the rainfall map and the digital elevation model, it is noted that the amount of precipitation in valleys is very different from precipitation in the highlands of this province. The results of this study showed that in areas with complex topography, the use of covariates leads to a significant increase in the accuracy of rainfall maps.

**Keywords:** Covariate, Geostatistic, Precipitation, Regression-Kriging