مجله علمی - پژوهشی
علوم و مهندسی آبخیـــزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering
سال چهارم - شماره ۱۲ - پاییز ۱۳۸۹
Vol. 4, No. 12, Fall 2010

بهینه سازی شبکه ایستگاه‌های باران سنجی برمبنای بارش ماهانه و سالانه

سیما رحیمی بندرآبادی[۱] بهرام ثقفیان[۲]

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۶/۳۰

چکیده

در بسیاری از مطالعات منابع آب و آب‌شناختی، برآورد توزیع مکانی بارندگی براساس داده‌های نقطه ای ثبت شده در ایستگاه‌های بارانسنجی اهمیت ویژه ای دارد. بررسی های اولیه نشان می دهد که ایستگاه‌های بارانسنجی موجود در کشور از توزیع مکانی مناسبی برخوردار نبوده و بسیاری از آنها در محدوده‌های جمعیتی متمرکز هستند. بهینه سازی شبکه ایستگاه‌های بارانسنجی می تواند در بهبود دقت نتیجه مطالعات منابع آب موثر باشد. روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد. کریگینگ یک روش زمین آماری است که می تواند توزیع واریانس خطای برآورد را براساس ویژگی‌های نیم تغییرنما و بدون داشتن آمار مشاهده ای تاریخی محاسبه نماید. بنابراین با استفاده از این روش می توان قبل از احداث ایستگاه و انجام نمونه برداری، میزان کاهش واریانس خطا را به ازای اضافه نمودن ایستگاه جدید و یا جابجایی یک ایستگاه محاسبه نمود. در این مقاله هدف بهینه سازی شبکه ایستگاه‌های بارانسنجی جنوب غرب کشور با توجه به واریانس برآورد کریگینگ و توپوگرافی منطقه و با هدف حفظ یا کاهش تعداد ایستگاه‌های موجود در منطقه (عدم ایجاد هزینه اضافی) می باشد. نتایج حاکی از آن است که تعداد و آرایش ایستگاه‌های موجود برای برآورد توزیع مکانی بارندگی در ماههای خشک سال کفایت می نماید. اما در مورد سایر ماه‌ها و بارندگی سالانه، نیاز به جابجایی برخی ایستگاه‌ها می باشد. نتایج نشان می دهد که جابجایی ۱۷ ایستگاه منطقه میزان میانگین واریانس خطا را حدود ۱۰ درصد کاهش می دهد. همچنین بررسی وضعیت برونیابی داده‌ها بیانگر خطای قابل توجهی در برآورد بارندگی در ارتفاعات می باشد.

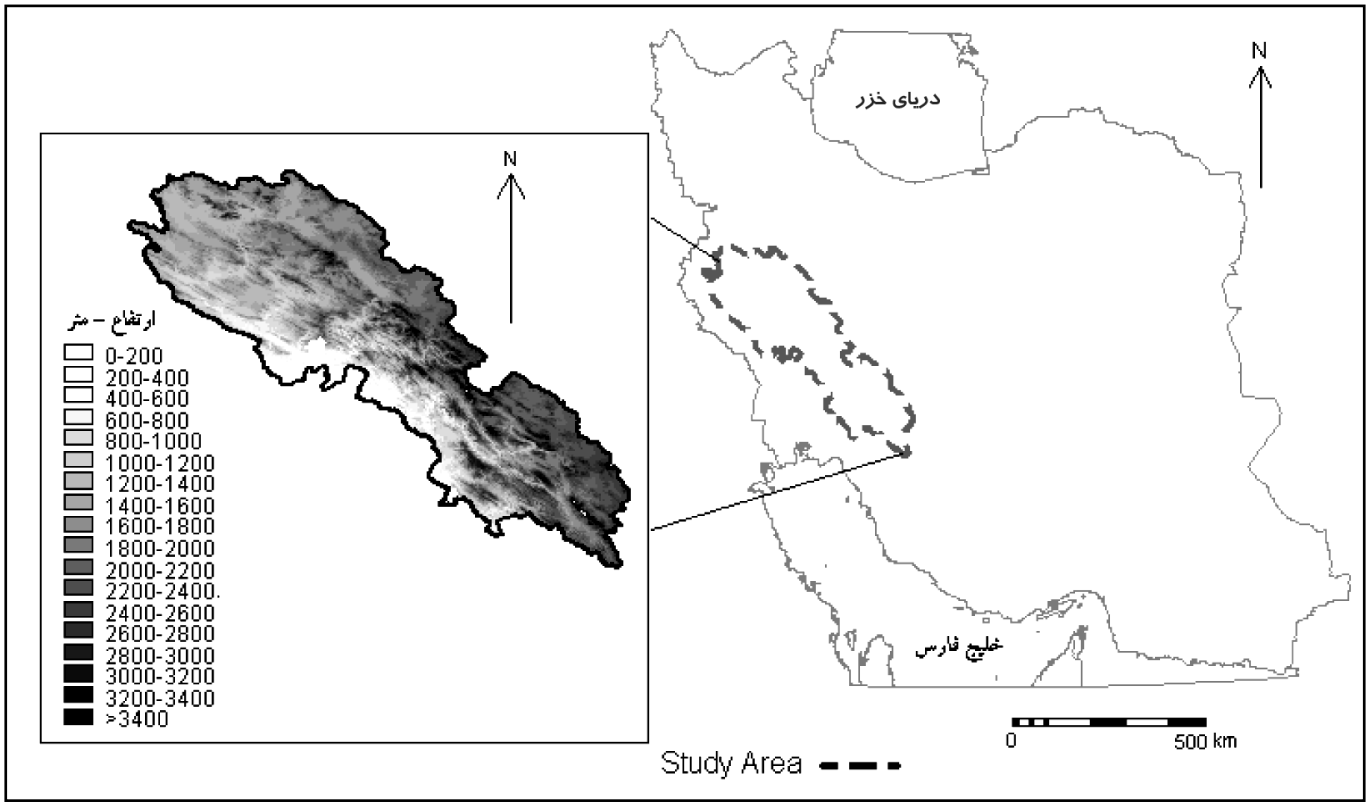
۱- مربی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور
rahimi-si@yahoo.com
۲- استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

واژه‌های کلیدی: برون‌یابی، بهینه‌سازی، شبکه ایستگاه باران‌سنجی، کریگینگ، واریانس برآورد.

مقدمه

آمار بارندگی در ایران توسط سازمان هواشناسی و وزارت نیرو جمع‌آوری می شود. بررسی توزیع مکانی ایستگاه‌ها نشان می دهد که ایستگاه‌ها از توزیع مناسبی برخوردار نبوده و به طور تجربی توسعه و تکمیل یافته‌اند. بسیاری از ایستگاه‌ها در اطراف شهرها و مراکز جمعیتی تاسیس شده‌اند. بهینه‌سازی موقعیت شبکه ایستگاه‌های هواشناسی می تواند در دقت برآوردهای بارندگی و در نتیجه در مطالعات آب‌شناختی بیلان آبی و مدیریت منابع آب موثر باشد. یکی از اهدافی که اخیرا برای تعیین مکان جدید و یا بهینه سازی شبکه ایستگاه‌ها مورد توجه قرار گرفته است، کاهش واریانس خطا در قالب روش کریگینگ می باشد. کریگینگ یک روش زمین آماری است که می تواند به ازای هر برآورد، خطای مرتبط با آن را محاسبه نماید. به این ترتیب می‌توان علاوه بر مقدار متوسط خطا، توزیع خطا یا واریانس برآورد را نیز در کل محدوده مورد نظر به دست آورد. از مهمترین ویژگی کریگینگ آن است که محاسبه خطا در این روش تابع ویژگی‌های نیم تغییرنمای (ساختار مکانی) متغیر مورد نظر می باشد و مقدار واقعی داده‌ها در توزیع خطا نقش مستقیمی ندارند. به همین دلیل قبل از احداث ایستگاه و آماربرداری، می‌توان میزان کاهش واریانس برآورد را به ازای اضافه نمودن ایستگاه جدید محاسبه نمود. از طرف دیگر با برآورد توزیع مکانی واریانس خطا می‌توان مناطقی که دارای خطای بیش از یک حد آستانه است را شناسایی نمود و تحت پوشش ایستگاه‌های جدید قرار داد.

ماترون پژوهشگر فرانسوی با انتشار مقاله‌ای در سال ۱۹۶۲ پایه‌های نظری زمین آمار را بنا نهاد [۲]. کاربرد زمین آمار در علوم هواشناسی و آب‌شناختی برای برآورد توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی و آب‌شناختیکی آغاز گردید. به عنوان نمونه گوارتز [۴] روش‌های کریگینگ ساده، کریگینگ با روند خارجی و کوکریگینگ را برای بارندگی سالانه و دمای ۳۶ ایستگاه اقلیم‌شناسی در ناحیه‌ای به وسعت ۵۰۰۰ کیلومترمربع در کشور پرتغال بررسی کرد. در مقایسه این سه روش با روش‌های: عکس مجذور فاصله، معادله همبستگی خطی با ارتفاع، تیسن و کریگینگ معمولی با استفاده از تکنیک اعتبار سنجی تقاطعی، روش کریگینگ ساده مناسبترین روش شناخته شد. ثقفیان و همکاران [۱] چـــند روش مـــیان‌یـابی را



شکل ۱ - محدوده حوزه‌های آبخیز منطقه مورد بررسی و مدل رقومی ارتفاع در این منطقه

برای بارندگی روزانه در جنوب غرب ایران مورد آزمون قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش TPSS [1] با نمای ۲ بیشترین دقت را برای بارندگی روزانه ارایه می کند. رحیمی و مهدیان [۲] نیز بر روی توزیع مکانی بارندگی روزانه و ماهانه حوزه دریای خزر مطالعه نمودند. نتایج آنها در این حوزه نیز نشان داد که روش TPSS با توان ۲ برای برآورد بارندگی روزانه و ماهانه مناسب می باشد.

در زمینه طراحی شبکه های بارانسنجی، کازیم و کوتگودا [۵] از گریگینگ خطی و غیر خطی برای تعیین شبکه ایستگاه‌های ادازه گیری شدت رگبارها استفاده نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش کریگینگ غیر خطی مناسبتر می باشد. ضمن آنکه واریانس برآورد باید برای هر رگبار به طور جداگانه بررسی و نقاط جدید مشخص گردد و سپس یک شبکه بهینه شده از بین آنها استخراج گردد. پاپامیشل و همکاران [۶] با استفاده از روش کریگینگ به بهینه سازی شبکه ایستگاه‌های باران سنجی برای بارندگی ماهانه در شمال آلمان پرداختند. آنها نشان دادند که استفاده از ۱۰ ایستگاه در مقایسه با ۲۰ ایستگاه موجود نتایج مشابهی از لحاظ دقت برآورد دارد. انتخاب این ۱۰ ایستگاه با استفاده از توزیع واریانس خطا صورت گرفت. پردو [۷] برای انتخاب مناسب‌ترین محل و تعداد ایستگاه باران‌سنجی برای برآورد متوسط منطقه‌ای بارندگی از روش کریگینگ و با کمک داده‌های رادار، استفاده نمود. توزیع واریانس داده‌ها با استفاده از داده‌های رادار محاسبه گردید.

وی بهینه‌سازی را براساس کم‌ترین واریانس و هزینه انجام داد. سینتیکیدیس و همکاران [۸] برای طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوزه آبخیز فولسوم نیز از توزیع واریانس برآورد، روش کریگینگ برای بارندگی ساعتی استفاده نمودند. آنها نشان دادند که با اضافه نمودن ۷ ایستگاه دیگر خطای برآورد تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که آنها از بارش‌هایی استفاده کردند که ۷۵درصد ایستگاه‌های حوزه را پوشش می‌داد.

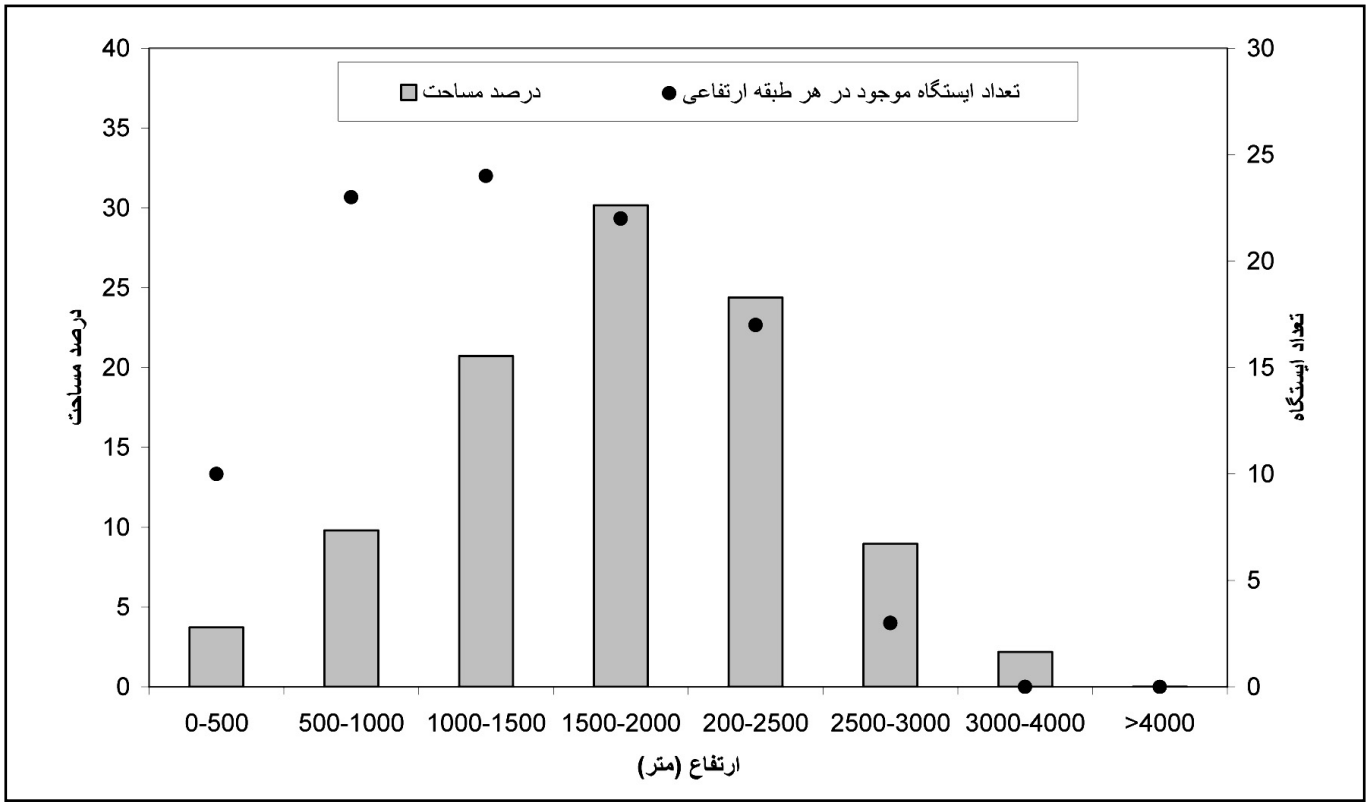
در این پژوهش، هدف اصلی چگونگی بهینه‌سازی شبکه مجموعه ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه با استفاده از واریانس برآورد کریگینگ و با توجه به توپوگرافی و وضعیت برونیابی داده‌ها در منطقه جنوب غرب ایران می‌باشد. تابع هدف حفظ سقف تعداد ایستگاه‌های موجود و یا به عبارتی دیگر تنها کاهش تعداد ایستگاه‌ها، مجاز می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱ - ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر در جنوب غربی ایران بین طول‌های جغرافیایی ۵۷َ و ۴۶° تا ۱۸َ و ۵۷° شرقی و عرض‌های ۲۴َ و ۲۶° تا ۳۴° شمالی واقع شده است(شکل ۱). حوزه‌های آبخیز کرخه تا محل سد کرخه، دز تا محل سد دز و کارون تا محل سد کارون ۱ در محدوده منطقه مورد مطالعه قرار دارند. ارتفاع منطقه متغیر و شامل قسمتی از رشته کوه‌های زاگرس می باشد به طوری که حداکثر ارتفاع

1-Thin Plate Smoothing Splines



شکل ۲ -منحنی هیپسومتری منطقه و پراکنش ارتفاعی ایستگاه‌های موجود در منطقه

حدود ۴۵۷۰ متر و حداقل آن حدود ۱۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه نیز از ۱۷۳ میلیمتر تا ۱۱۹۶ میلیمتر تغییر می‌کند. محدوده این سه حوزه آبخیز از نظر تامین منابع آب دارای اهمیت فوق‌العاده می‌باشد، به طوری که حدود ۲۵ درصد کل جریانات سطحی کشور را تشکیل می‌دهد. نقش استراتژیک این محدوده و مطالعات فراوانی که تاکنون برای این حوزه‌ها انجام گرفته‌اند، نیاز به بررسی دقیق‌تر عوامل ورودی بیلان آبی (بارندگی ماهانه و سالانه) را آشکار می‌سازد.

در مجموع ۱۸۲ ایستگاه باران‌سنجی مربوط به وزارت نیرو و سازمان هواشناسی در منطقه قرار دارد. برای تحلیل شبکه ایستگاه‌ها از میانگین بارندگی سالانه و ماه‌های مختلف این ایستگاه‌ها و چند ایستگاه در اطراف منطقه، طی سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۸۰ استفاده گردید. لازم به ذکر است که پس از بررسی داده‌ها از لحاظ کمی و کیفی، آمار ایستگاه‌های ناقص در سال‌های محدود و با روش همبستگی بازسازی شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و اهمیت ارتفاعات در دریافت بارندگی‌ها، پراکنش ایستگاه‌ها در دامنه‌های مختلف ارتفاعی و درصد مساحت هر محدوده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۲) ارایه شده است.

۲- تحلیل نیم تغییرنما

تحلیل نیم تغییرنما برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود و بنابراین ابزار اساسی در زمین آمار می باشد. شرح چگونگی محاسبه و رسم نیم تغییرنما در منابع مختلفی از جمله [۱، ۲ و ۳] ارایه شده است. در این پژوهش از نیم تغییرنما برا ی تعیین توزیع مکانی واریانس خطای برآورد، روش کریگینگ استفاده خواهد شد.

۳- واریانس برآورد[1]

یکی از مهمترین نقاط قوت روشهای زمین آمار، توانائی آن در محاسبه‌ی واریانس برآورد و تعیین سطح اعتماد برآورد می باشد. واریانس برآورد که با نماد $E\sigma^2$ نمایش داده می شود نشانگر واریانس خطای بین مقدار حقیقی و مقدار برآوردی می باشد. مقدار واریانس خطا، با استفاده از مقادیر متوسط تغییرنما، که خود از طریق توابع کمکی قابل محاسبه هستند، بدست می آید. علاوه بر محاسبه‌ی سطح اعتماد، واریانس برآورد در حل بسیاری مسایل نظیر طراحی شبکه بهینه نمونه برداری، محاسبه میزان کاهش خطای برآورد در اثر افزایش نمونه برداری قبل از انجام عمل نمونه برداری، قضاوت درباره تأثیر شیوه‌های مختلف در نمونه برداری کاربرد دارد. محاسبه‌ی واریانس برآورد به صورت زیر می باشد:

$$E\sigma^2=2\sum_{i=1}^{n}\lambda_i.\gamma_{0i}-\gamma_0-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\lambda_i.\gamma_{ij} \qquad (۱)$$

که در آن، n : تعداد داده‌ها، λ_i : وزن داده در موقعیت i، γ_0 : مقدار نیم تغییرنما به ازای $h=0$ ، γ_{0i} : مقدار نیم تغییرنما بین i امین داده و

1- Estimation Variance

جدول۱ - ویژگی‌های نیم تغییرنمای بارندگی ماهانه و سالانه و نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع

ماه / سال	نیم تغییرنمای بارندگی				نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع			
	مدل	R^1 کیلومتر	$Sill^2$ میلی‌متر مربع	C_0^3 میلی‌متر مربع	مدل	R کیلومتر	Sill میلی‌متر مربع	C_0 میلی‌متر مربع
فروردین	گوسی	۱۴۰	۹۲۰	۳۳۰	گوسی	۱۵۵	۱۸۰۰۰	۲۵۳۰
اردیبهشت	گوسی	۱۵۵	۵۵۰	۸۰	گوسی	۱۴۵	۱۴۰۰۰	۲۰۰
خرداد	کروی	۵۵۰	۷/۱	۰/۵۵	گوسی	۱۴۵	۷۴۰	۹۲
تیر	گوسی	۱۹۹	۰/۱	۰/۰۶	گوسی	۱۷۰	۱۴۰	۰
مرداد	نمایی	۲۰۰	۰/۳۱	۰/۱۲	گوسی	۱۴۰	۱۹۰	۲۵/۱
شهریور	خطی	۱۶۶	۰/۱۵	۰/۱۱	گوسی	۱۷۰	۱۴۰	۱۰
مهر	گوسی	۱۹۷	۲۷/۷	۶/۱۷	گوسی	۱۵۵	۲۶۰۰	۲۵۰
آبان	کروی	۲۵۰	۴۲۰	۶۹	گوسی	۱۶۵	۹۶۰۰	۱۰۰۰
آذر	نمایی	۷۰	۴	۰/۳	گوسی	۱۸۰	۷۱۶	۱۲۰
دی	نمایی	۱۰۹	۵/۴	۱	گوسی	۱۸۰	۵۰۰	۱۰۰
بهمن	نمایی	۱۴۵	۲۳۰۰	۵۰۰	گوسی	۱۸۰	۱۶۷۵۰	۲۹۷۰
اسفند	نمایی	۱۰۹	۲۱۰۰	۴۰۲	گوسی	۱۶۰	۲۰۰۰۰	۳۴۲۰
سالانه	نمایی	۱۴۰	۶۲۳۱۰	۱۶۴۰۰	گوسی	۱۷۰	۱۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰

۱ شعاع همبستگی ۲آستانه ۳اثر قطعه ای

نقطه موردنظر، γ_{ij}: مقدار واریوگرام بین داده‌های i و j می‌باشد.

واریانس محاسبه شده تابع ویژگی‌های نیم تغییرنما که خود از مقادیر داده‌های مشاهده‌ای به دست می‌آید، می‌باشد و لذا غیرمستقیم با مقدار واقعی داده‌ها ارتباط دارد. ویژگی‌هایی مانند فاصله نمونه‌ها تا نقطه برآورد و نحوه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری حول نقطه برآورد در ساختار مکانی و در نتیجه در تغییرنما منعکس می‌شود. از طرفی چون تغییرنما روی خطای برآورد موثر است، لذا این ویژگی‌های روی خطای برآورد تاثیر می‌گذارند. بنابراین می‌توان مناطقی که در آن جا خطا زیاد و برای کاهش آن به نقاط بیشتری نیاز می‌باشد را مشخص کرده و تحت پوشش لازم قرارداد. همچنین می‌توان میزان کاهش واریانس خطا را به ازای یک نمونه اضافی قبل از نمونه‌برداری تعیین کرده و با استفاده از نقشه توزیع مکانی واریانس، بهترین نقاط نمونه‌برداری را پیشنهاد نمود.

در این مقاله برای بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی در منطقه، از واریانس برآورد کریگینگ استفاده گردید. ضمن آن که به نظر می‌رسد توزیع ارتفاعی ایستگاه‌های موجود در منطقه مناسب نیست به طوری که تراکم ایستگاه‌های موجود با ارتفاع کاهش می‌یابد. لذا باید میزان خطای برونیابی نیز در مناطق مرتفع بررسی گردد.

۴- روش کریگینگ

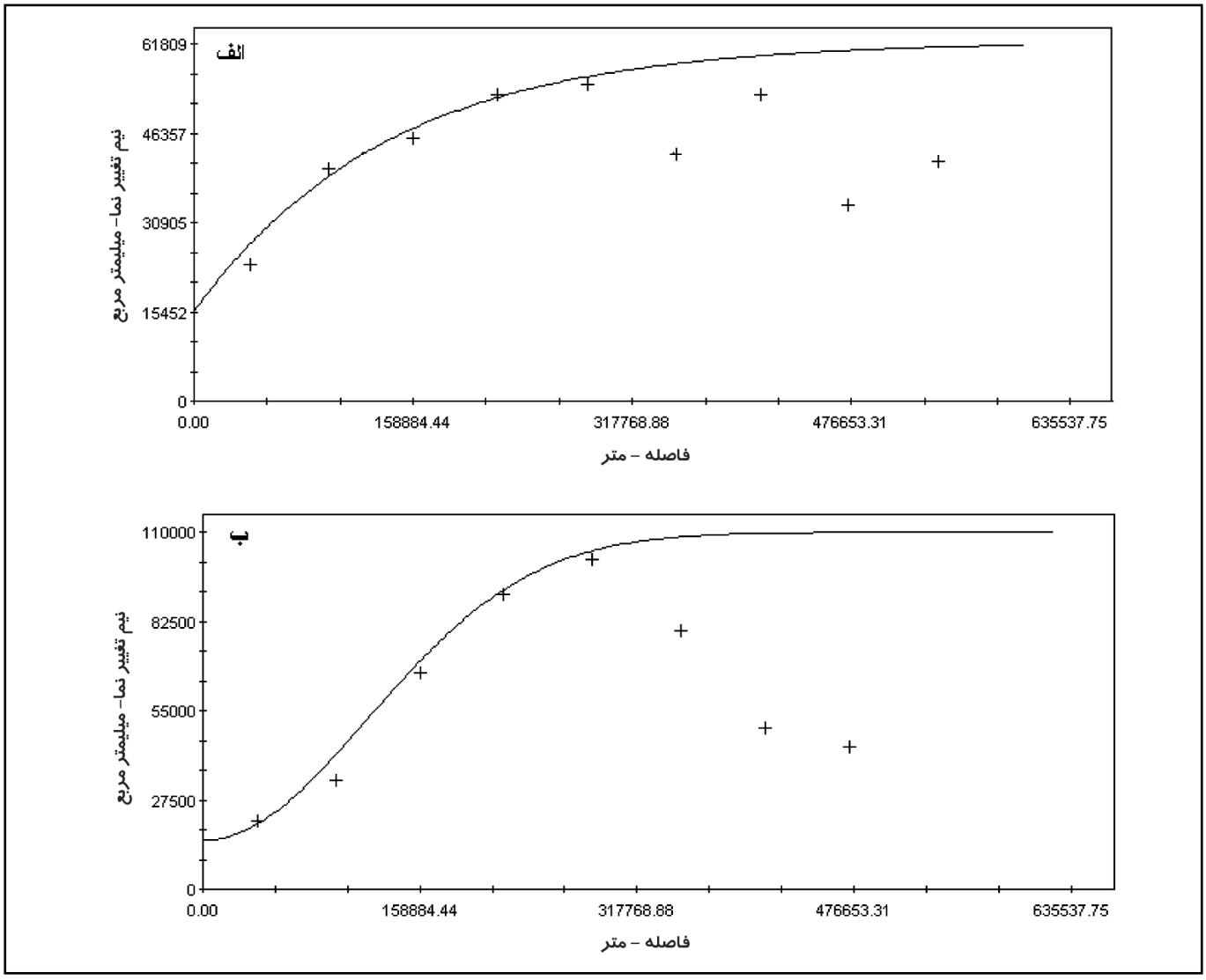
فرمول کلی برآوردکننده‌ها به صورت زیر تعریف می شود :

$$z^*(x_i)=\sum_{j=1}^{n}\lambda_i.z(x_i) \qquad (۲)$$

که در آن: $z^*(x_i)$ مقدار برآوردی متغیر در موقعیت x_i ، λ_i: وزن یا اهمیت نمونه‌ی i ام ، n : تعداد مشاهدات، $z(x_i)$: مقدار مشاهده شده متغیر در موقعیت x_i

در روش کریگینگ، برای محاسبه عامل وزن نیاز به نیم تغییرنمای تجربی می‌باشد که در قسمت تحلیل واریوگرامی محاسبه می‌شود [۲ و ۳]. همان طور که در آمار کلاسیک روش‌های چند متغیره وجود دارد، در زمین آمار نیز می‌توان با روش کوکریگینگ که براساس همبستگی بین متغیرهای مختلف استوار است به برآورد متغیرها پرداخت. برای برآورد با این روش و برای محاسبه اوزان مربوطه، نیاز به محاسبه‌ی تغییر نمای متقابل[1] می‌باشد [۳]. در این مقاله از روش کوکریگینگ برای محاسبه واریانس برآورد و برآورد توزیع مکانی بارندگی استفاده شده است. جزییات روش کوکریجینگ در

1- Cross Variogram



شکل ۳- نیم تغییر نمای بارندگی سالانه در منطقه الف) نیم تغییر نمای بارندگی ب) نیم تغییر نمای متقابل بارندگی و ارتفاع

منابع [۲ و ۳] به تفضیل ارایه شده است. نرم‌افزار مورد استفاده نیز Gs^{+} می باشد.

نتایج و بحث

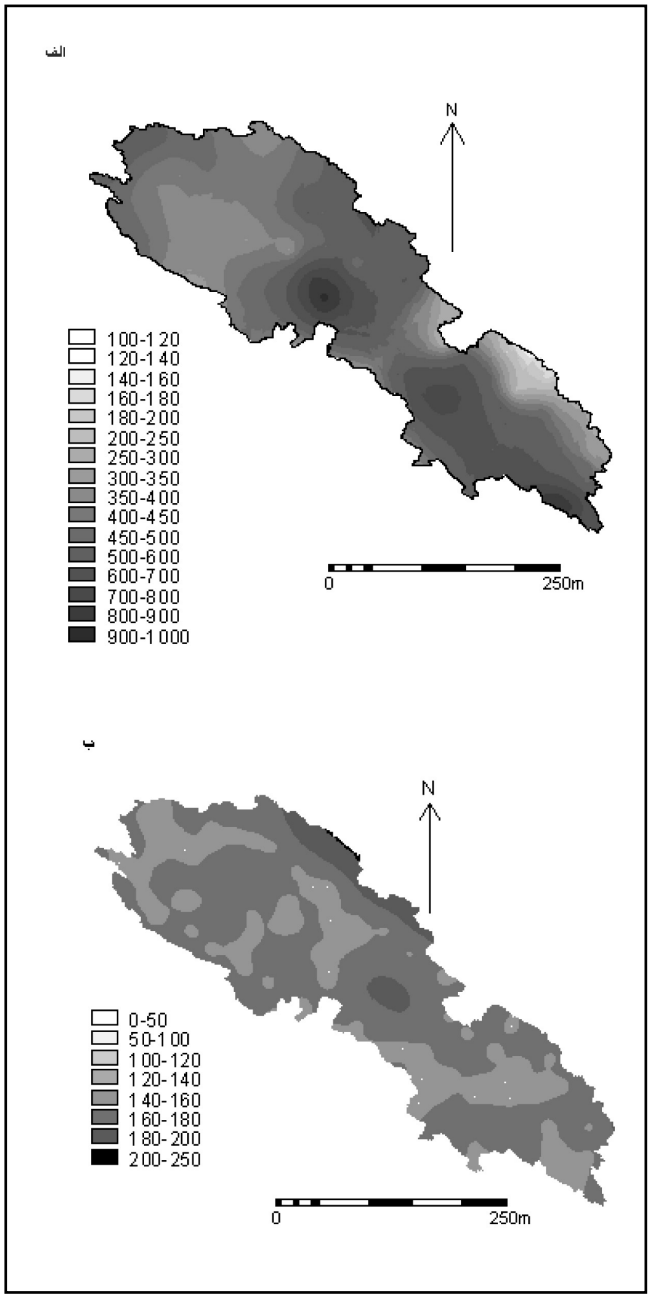
برای برآورد توزیع واریانس خطا نیاز به تحلیل نیم تغییرنما می باشد. برای این منظور ابتدا نمودار ستونی فراوانی داده‌ها رسم گردید و سپس آزمون فرض نرمال بودن برای آنها انجام شد. یکی از شروط اصلی برای استفاده از روش‌های معمول زمین آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها می باشد. بررسی‌ها نشان داد که به جز ماه‌های مرداد، شهریور، آذر و دی در بقیه ماه‌ها فرض، نرمال بودن با سطح اعتماد ۹۵ درصد رد نمی شود. در ماه‌های فوق الذکر نیز توزیع ریشه دوم داده‌ها با همان سطح اعتماد به توزیع نرمال نزدیک گردیده است. بنابراین در تحلیل نیم تغییرنمای بارندگی این ماه‌ها، از ریشه دوم داده‌ها استفاده خواهد شد. در مرحله بعد نیم تغییرنمای بارندگی پس از بهینه سازی فاکتورهایی نظیر گام حداقل، گام فعال، فاصله حداکثر برای هر یک از ماه‌ها و میانگین سالانه، محاسبه و رسم گردید. جدول (۱) ویژگی‌های نیم تغییرنماها را نشان می دهد. در شکل (۳) نیز به عنوان نمونه نیم تغییرنمای بارندگی سالانه ارایه شده است. بررسی واریوگرام‌ها نشان می دهد که همسانگردی وجود ندارد. لذا برای رفع این مشکل از واریوگرام بدون راستا که دارای دامنه همبستگی کمتر از راستای ناهمسانگرد می باشد استفاده شد. با استفاده از تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع، تاثیر ارتفاع در بارندگی منطقه مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱). نتایج نشان می دهد که بارندگی ماهانه و سالانه در این منطقه با ارتفاع همبستگی مکانی تا حدودی مناسب است. بررسی نیم تغییرنماها نشان می دهد که شعاع همبستگی مکانی بارندگی ماهانه بین ۱۴۰ تا ۱۸۰ و برای بارندگی سالانه ۱۷۰ کیلومتر می باشد. با مقایسه نیم تغییرنماهای بارندگی و نیم تغییرنماهای متقابل بارندگی و ارتفاع می توان گفت که شعاع همبستگی در ماه‌های سرد سال با ارتفاع افزایش یافته و در ماه‌های تابستان و بهار تا حدودی کاهش یافته است (جدول ۱). از

این رو بارندگی‌های زمستانی بیشتر تحت تاثیر ارتفاع می‌باشند. لذا به نظر می‌رسد استفاده از روش کوکریگینگ برای بررسی شبکه ایستگاه‌ها مناسب‌تر باشد.

لازم به ذکر است که تغییرپذیری بارندگی با تاثیر ارتفاع (نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع) در همه مقیاس‌های زمانی از مدل گوسی تبعیت می‌کند. بعد از تحلیل نیم تغییرنما، توزیع مکانی بارندگی و واریانس خطا با استفاده از روش کوکریگینگ (به واسطه تاثیر ارتفاع در بارندگی) برای هریک از ماه‌ها و متوسط سالانه محاسبه گردید. شکل (۴) توزیع مکانی بارندگی سالانه و واریانس برآورد آن را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نیز مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین واریانس برآورد سالانه و هر یک از ماه‌ها ارایه شده است.

برای تعیین اولویت نقاطی که باید در آنها ایستگاه تاسیس شود از واریانس داده‌ها و نقاطی که در آنها واریانس خطا حداکثر می‌باشد استفاده گردید. به این ترتیب که با توجه به فرض نرمال بودن توزیع خطای برآورد و با توجه به این که واریانس خطا باید کم‌تر از واریانس داده‌های مشاهده‌ای باشد [۳]، نقاطی که در آنها واریانس خطا مساوی و یا بزرگ‌تر از مقدار واریانس داده‌ها بود به عنوان اولویت اول و نقاطی که در آنها واریانس خطا بین واریانس داده‌ها و یک دوم واریانس داده‌ها قرار داشت به عنوان اولویت دوم انتخاب گردید. اولویت سوم نقاطی تعیین گردید که واریانس خطای آنها بین یک دوم و یک چهارم واریانس داده‌ها قرار داشت. براساس این تقسیم بندی، همه ماه‌ها به جز ماه‌های آذر و دی و بارندگی سالانه فاقد مناطق دارای اولویت اول می‌باشند. همچنین در تمام موارد، کل منطقه در اولویت سوم قرار می‌گیرد. بنابراین برای همه مقیاس‌های زمانی به جز ماه‌های آذر و دی مناطق با اولویت دوم مورد بررسی قرار گرفت. بررسی توزیع واریانس خطا در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور نشان می‌دهد که این ماه‌ها فاقد مناطق دارای اولویت اول و دوم بوده و از لحاظ تعداد ایستگاه مشکلی ندارند.

لازم به ذکر است که توزیع واریانس خطا در محدوده اولویت دوم، در اکثر ماه‌ها و بارش سالانه متفاوت می‌باشد (شکل ۵). بنابراین نقاط انتخابی برای هر مقیاس زمانی تا حدودی متفاوت می‌باشد. به طوری که به عنوان مثال، برای ماه فروردین انتخاب چند نقطه در حاشیه شمالی حوزه کافی می‌باشد. در صورتی که برای بارش اسفند ماه علاوه بر آن نقاط، انتخاب چند نقطه دیگر در داخل حوزه می‌تواند مفید واقع گردد. شکل (۵) توزیع واریانس خطا (در محدوده اولویت دوم) را برای این دو ماه نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به توزیع و مقدار واریانس خطا در ماه‌های آذر و دی، تعداد نقاط پیشنهادی (نقاطی که واریانس خطا در آنها بالا است) بیشتر از سایر ماه‌ها می‌باشد. در نهایت با توجه به ارتفاع منطقه و شعاع همبستگی برای هر مقیاس زمانی، نقاطی پیشنهاد و از مجموع آنها تعداد ۱۷ ایستگاه جدید انتخاب گردید (شکل ۶). سپس بار دیگر توزیع واریانس برای مجموعه ایستگاه‌های موجود و نقاط جدید محاسبه گردید. لازم به ذکر است



شکل ۴- نقشه توزیع مکانی بارندگی و واریانس خطا الف) توزیع مکانی بارندگی سالانه (میلیمتر) ب) توزیع واریانس خطای برآورد سالانه (میلیمتر مربع)

که در هر مقیاس زمانی سناریوهای متعددی به لحاظ ارتفاع، خطا، دردسترس بودن محل و قابلیت نصب داشتن، در آرایش جدید شبکه در نظر گرفته شد و از بین آنها آرایشی را که کم‌ترین خطا را ایجاد می‌نمود انتخاب گردید. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که اضافه نمودن این ایستگاه‌ها باعث کاهش میانگین واریانس در حدود ۱۰ درصد می‌گردد. این بدان معناست که پراکنش ایستگاه‌های اولیه کمبود زیادی ندارد و اضافه کردن چند ایستگاه در محدوده حداکثر خطا کفایت می‌کند. لازم به ذکر است که هر چند مقدار میانگین واریانس خطا پس از اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید کاهش زیادی

جدول۲- مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین واریانس خطا (به میلیمتر) در سه حالت : ۱- ایستگاه‌های موجود ۲- ایستگاه‌های موجود با اضافه کردن نقاط پیشنهادی ۳- حذف تعدادی از ایستگاه‌ها از حالت دوم

ماه/ سال	حالت ۱			حالت ۲			حالت ۳		
	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین
فروردین	۱۷/۶۲	۵/۹	۱۰/۴	۱۵/۹	۵/۷۰	۹/۶۰	۱۵/۸۰	۵/۷۰	۹/۶۰
اردیبهشت	۱۴/۶۴	۴/۹۰	۸/۶۴	۱۳/۲	۴/۷۱	۷/۹۷	۱۳/۲۰	۳/۸۰	۸/۰۲
خرداد	۰/۷۵	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۸۰	۰/۳۰	۰/۴۹	۰/۸۰	۰/۲۰	۰/۴۹
تیر	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۷
مرداد	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲
شهریور	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱
مهر	۲/۹۰	۰/۹۵	۱/۶۸	۲/۵۷	۰/۹۲	۱/۵۵	۲/۶۰	۰/۷۰	۱/۵۶
آبان	۱۰/۴۵	۳/۵۰	۶/۱۶	۹/۴۱	۳/۴۰	۵/۶۹	۹/۴۵	۲/۷۳	۵/۷۰
آذر	۴/۱۰	۰/۵۰	۱/۴۵	۳/۴۳	۰/۴۶	۱/۲۳	۳/۴۵	۰/۳۶	۱/۲۴
دی	۳/۴۴	۰/۴۰	۱/۲۱	۲/۸۶	۰/۳۹	۱/۰۲	۲/۸۷	۰/۳۰	۱/۰۳
بهمن	۲۹/۶۵	۹/۹۰	۱۷/۵۰	۲۶/۷۱	۹/۵۴	۱۶/۱۵	۲۶/۸۳	۷/۷۶	۱۶/۲۴
اسفند	۳۴/۱۰	۱۱/۴۰	۲۰/۱۱	۳۰/۶۹	۱۱/۰۰	۱۸/۵۶	۳۰/۸۳	۸/۹۰	۱۸/۶۶
سالانه	۱۵۵/۴۰	۵۲/۰۰	۹۱/۷۲	۱۴۰/۰۰	۴۹/۹۸	۸۴/۶۶	۱۴۰/۶۲	۴۰/۷۰	۸۵/۱۲

جدول۳- نتایج بررسی وضعیت برونیابی و درون‌یابی داده‌های بارندگی سالانه (به میلیمتر)

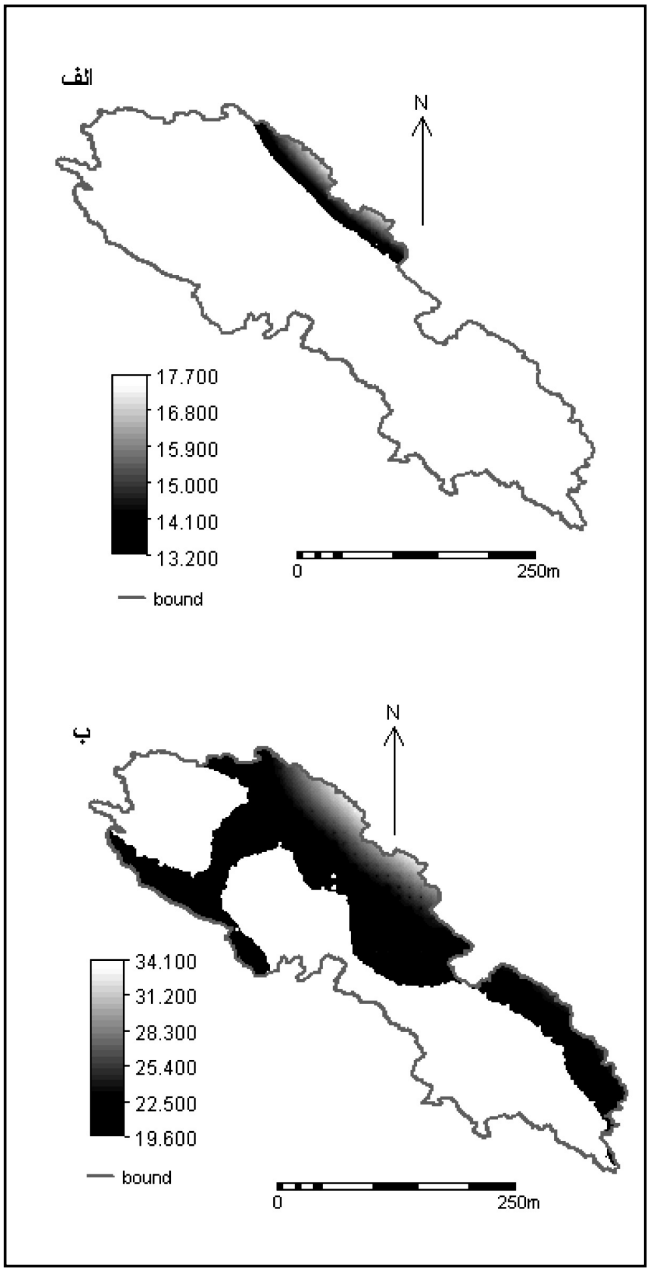
موارد	MAE	میانگین	حداکثر	حداقل
درونیابی دادهای مشاهده ای	۸۴/۱	۴۹۸/۱	۱۱۹۶	۱۱۴/۷
برونیابی (ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر)	۱۵۵/۸	۶۲۱/۶	۶۵۶	۳۳۴/۵
بارندگی اندازه گیری شده در ایستگاه‌های بالاتر از ۱۵۰۰ متر	------	۶۱۵/۵	۱۱۸۳/۱	۲۲۹/۵

نداشته است، ولی توزیع خطا در منطقه کاهش قابل توجهی را نشان می دهد (شکل ۷).

برای بررسی بیشتر تعداد ۱۶ نقطه به صورت تصادفی در سراسر منطقه استخراج گردید و به عنوان شاهد برای بررسی وضعیت توزیع واریانس خطا در نظر گرفته شد. شکل (۷) توزیع واریانس خطای بارندگی سالانه در این نقاط را به عنوان نمونه نشان می دهد. همان طور که در شکل نیز مشخص است در حالت دوم پس از اضافه کردن ایستگاه‌های جدید واریانس خطا کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. برای بقیه مقیاس های زمانی نیز روند مشابه می باشد.

از طرف دیگر بررسی تراکم و پراکنش داده ها نشان می دهد که در برخی نقاط، تراکم ایستگاه‌ها بیشتر از حد نیاز است و برخی ایستگاه ها حتی با ارتفاع مشابه، به هم نزدیک می باشند (در مقایسه با شعاع همیستگی). بنابراین ۱۷ ایستگاه که از لحاظ فاصله به هم نزدیک بوده و از لحاظ ارتفاع نیز تفاوتی نداشتند، حذف گردید (شکل ۶). برای این حالت نیز دوباره واریانس برآورد، محاسبه گردید که برخی از عامل های آن در جدول (۲) ارایه شده است. شکل (۷) نمودار توزیع خطا در نقاط شاهد وشکل (۸) نیز توزیع مکانی واریانس خطا را دراین حالت و برای بارندگی سالانه به عنوان نمونه نشان می دهد. همان طور که در شکل های (۷) و (۸) مشخص است توزیع با کاهش خطا همراه بوده و جدول (۲) نیز گویای عدم تغییر قابل توجه میانگین خطا می باشد.

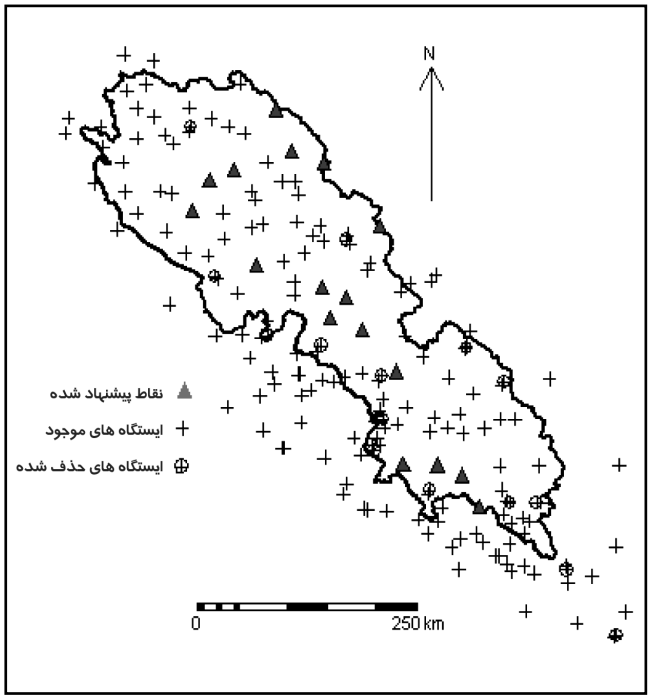
نکته قابل توجه دیگر، نحوه پراکنش ارتفاعی ایستگاه های منطقه



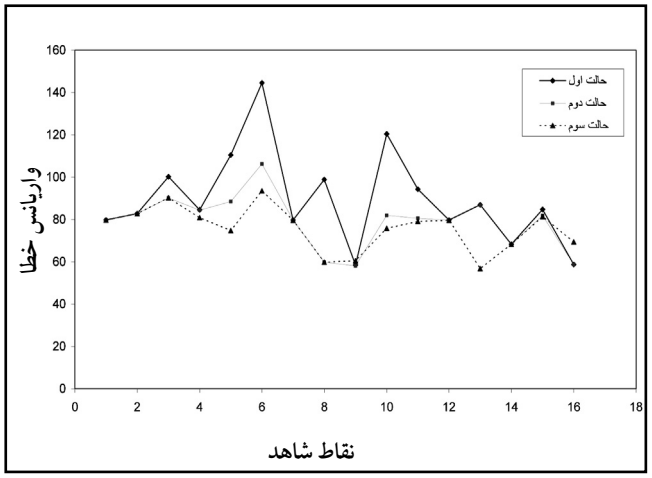
شکل ۵- توزیع مکانی واریانس خطا (به میلیمترمربع) در محدوده اولویت دوم الف) فروردین ماه ب) اسفندماه

می باشد. به طوری که حداکثر ارتفاع ایستگاه‌ها حدود ۲۶۵۰ متر می باشد در حالی که بیش از ۸ درصد منطقه در ارتفاعی بالاتر از ۲۶۰۰ متر قرار دارد (شکل ۲). حداکثر ارتفاع منطقه بیش از ۴۰۰۰ متر می باشد. مساحت ۸ درصد هر چند نسبت به کل منطقه زیاد نیست، ولی یکی از اصلی‌ترین مناطق دریافت بارندگی‌ها و تامین آب منطقه به ویژه در تاسیسات به صورت ذوب برف می باشد. عدم وجود ایستگاه در ارتفاع بالاتر از ۲۶۰۰ متر باعث می شود که برای برآورد توزیع مکانی بارندگی نیاز به برونیابی داده‌ها باشد که معمولا با خطای بسیار بیشتری نسبت به درونیابی داده‌ها همراه است.

برای بررسی وضعیت برونیابی، داده‌های بارندگی سالانه

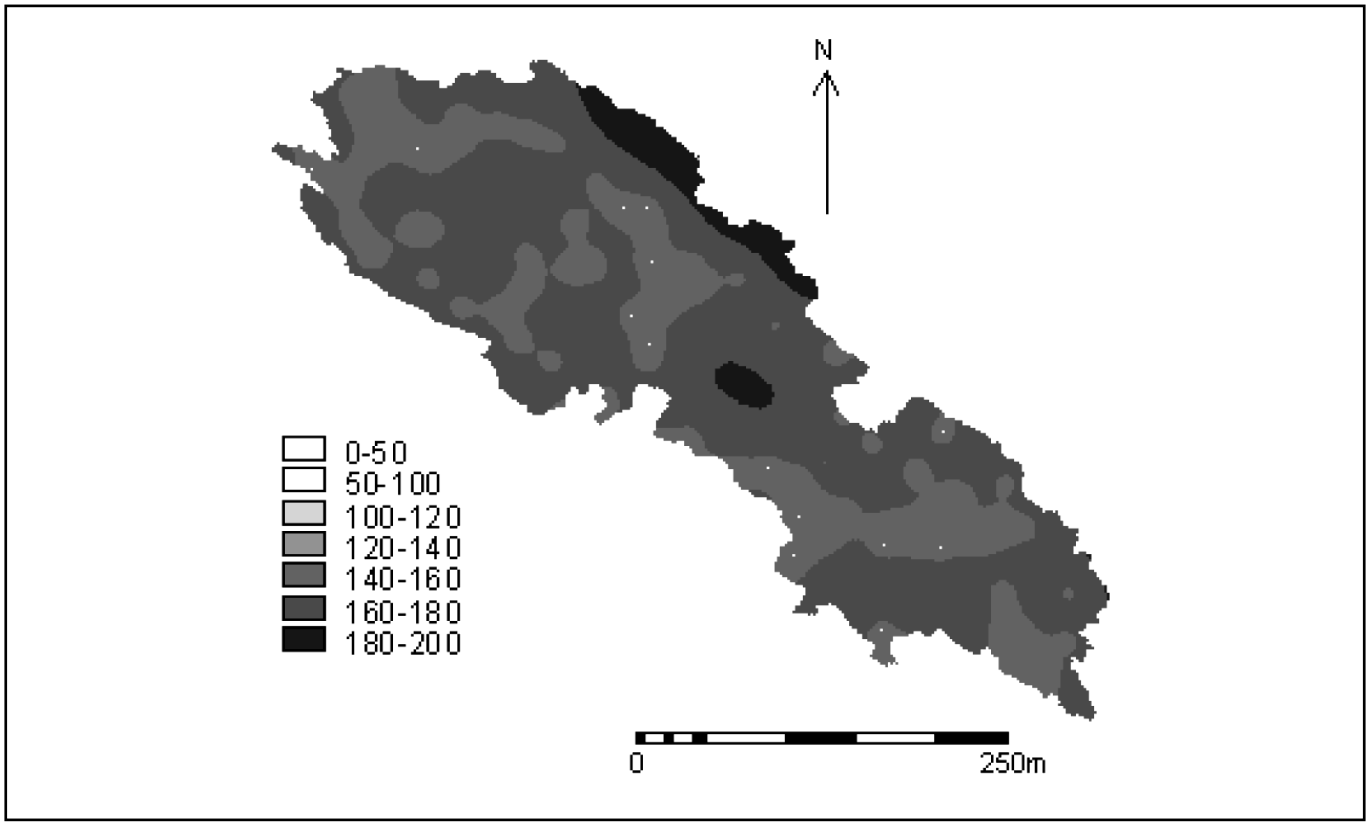


شکل ۶- موقعیت ایستگاه‌های پیشنهاد شده

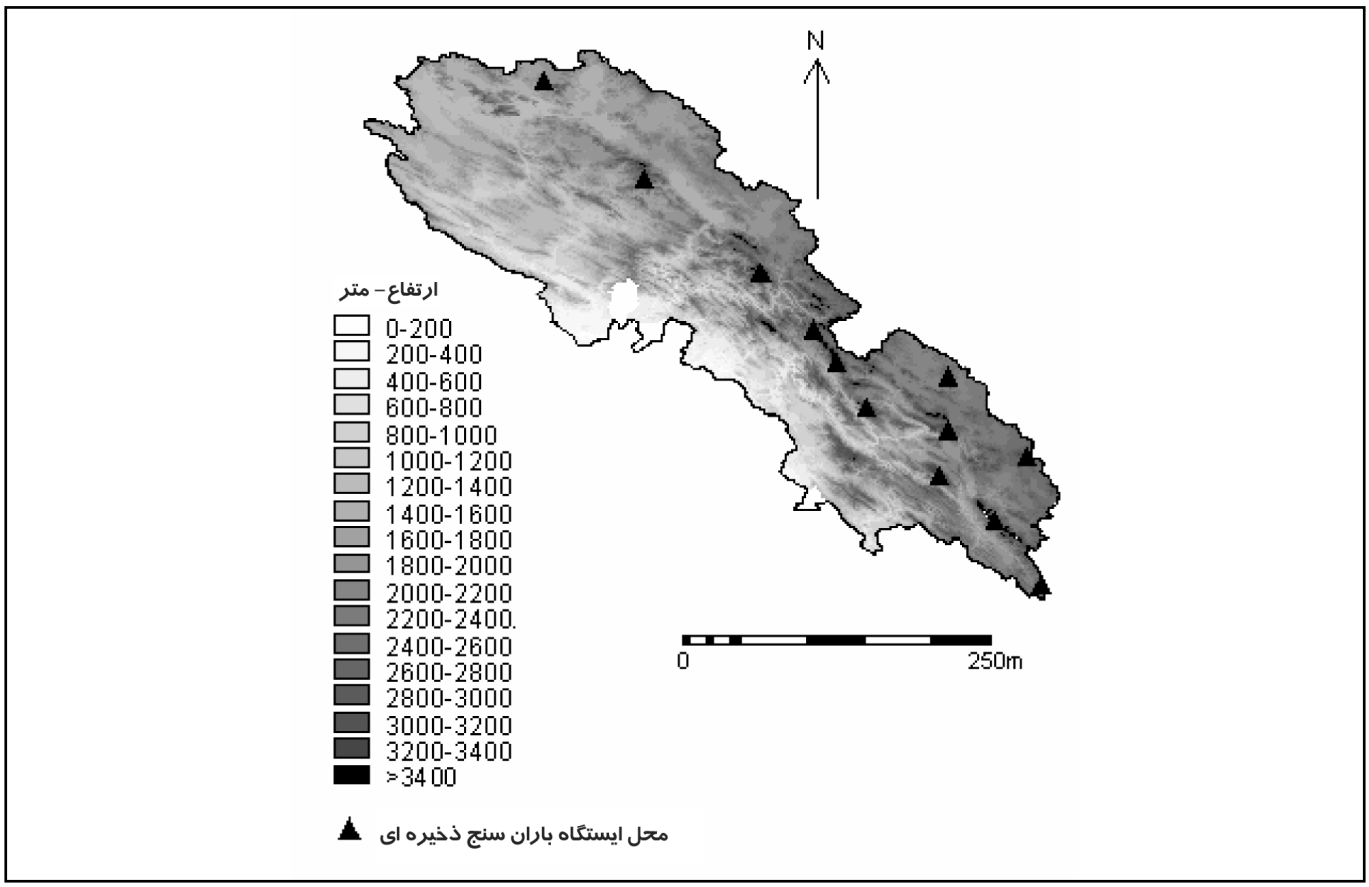


شکل ۷- نمودار توزیع واریانس خطا (میلیمترمربع) در نقاط شاهد برای بارش سالانه

ایستگاه‌هایی که بالاتر از ۱۵۰۰ متر ارتفاع داشتند، حذف گردید و برآورد بارندگی با استفاده از بقیه داده‌ها با روش کوکریگینگ صورت گرفت. سپس مقدار MAE ایستگاه‌های حذف شده محاسبه گردید. برای مقایسه چگونگی خطای برونیابی، مقدار MAE برای حالت میانیابی داده‌ها نیز محاسبه گردید (جدول ۳). بررسی وضعیت برونیابی داده‌ها با روش کوکریگینگ، نشان می دهد که خطای برآورد در ارتفاعات بالاتر از ۱۵۰۰ متر در مقایسه با اصل داده‌ها و خطای درونیابی قابل توجه می باشد. بنابراین برای کاهش خطای برآورد در بعد ارتفاع و با توجه به اینکه ایستگاهی در ارتفاعات وجود ندارد، توصیه می گردد که چند ایستگاه در ارتفاعات بالاتر از ۳۰۰۰ متر (برای ارتفاع ۲۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در مرحله



شکل ۸- توزیع مکانی واریانس خطا برای بارندگی سالانه در حالت سوم



شکل ۹- موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنج ذخیره‌ای پیشنهاد شده

اول چند ایستگاه پیشنهاد شد) به صورت باران سنج ذخیره ای نصب گردیده و در فاصله های زمانی چند ماهه و در تاریخ های یکسان برای همه ایستگاه ها، مقدار بارندگی اندازه گیری شود. این کار علاوه بر کاهش خطای برآورد، چگونگی تاثیر ارتفاع بر بارندگی در ارتفاعات بالا را نیز نشان می دهد. شکل (۹) موقعیت ایستگاه های پیشنهادی در ارتفاع بالاتر از ۳۰۰۰ متر را نشان می دهد.

نتیجه گیری

- بررسی نتایج تحلیل نیم تغییرنمای بارندگی سالانه و ماهانه نشان می دهد که بارندگی در همه ماه ها و همچنین میانگین سالانه دارای همبستگی مکانی بالنسبه مناسبی می باشد. ضمن آن که همبستگی مکانی متقابل بارندگی و ارتفاع نیز وجود دارد و در ماه های سرد سال باعث افزایش شعاع همبستگی گردیده است.

- بررسی توزیع مکانی واریانس خطای روش کریگینگ نشان می دهد که به جز بارندگی ماه های آذر و دی، در بقیه ماه ها مقدار واریانس خطا کم تر از واریانس داده های مشاهده ای می باشد و لذا منطقه برای برآورد بارندگی به جز در این دو ماه، در اولویت اول نیازی به اضافه نمودن ایستگاه جدید ندارند.

- توزیع واریانس خطا همچنین نشان می دهد که ایستگاه های موجود در برآورد توزیع مکانی بارندگی ماه های خرداد، تیر، مرداد و شهریور (ماه های خشک سال) کفایت می کنند.

- مقایسه توزیع واریانس خطا در ماه های مختلف نشان می دهد که مساحت مناطقی که دارای اولویت یکسان از لحاظ اضافه نمودن ایستگاه جدید هستند، متفاوت می باشد.

- نتایج حاکی از آن است که جابه جایی ۱۷ ایستگاه موجود در منطقه، میزان میانگین واریانس خطا را تا حدود ۱۰ درصد کاهش می دهد.

- بررسی پراکنش ارتفاعی ایستگاه ها نشان می دهد که حدود ۸درصد منطقه در ارتفاعی بین ۲۶۰۰ تا ۴۰۰۰ متر (اختلاف ارتفاعی حدود ۱۴۰۰ متر) فاقد ایستگاه باران سنجی در این منطقه است.

- بررسی وضعیت برون یابی داده ها نشان می دهد که خطای برآورد در ارتفاعات بالاتر از ۱۵۰۰ متر در مقایسه با داده ها و خطای برون یابی قابل توجه می باشد. لذا توصیه می شود که در ارتفاعات بالاتر از ۳۰۰۰ متر چند ایستگاه باران سنج ذخیره ای نصب گردد.

منابع

۱- ثقفیان، ب.، رحیمی بندرآبادی، س.، طاهری، ح. و غیومیان، ج. ۱۳۸۳. اثر تراکم ایستگاه و تفکیک منطقه ای در برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه (مطالعه موردی بر روی بارندگی جنوب غرب ایران). مجله استقلال، دانشگاه اصفهان، شماره ۱، جلد اول، ۷۵-۵۹.

۲- رحیمی بندرآبادی، س. و مهدیان، م.ح. ۱۳۸۴. بررسی روشهای توزیع مکانی بارندگی روزانه و ماهانه در حوزه دریای خزر. نشریه پژوهش و سازندگی، جهاد کشاورزی، (زمستان)۶۹.

۳- مدنی، ح. ۱۳۷۳. مبانی زمین آمار. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

4- Goovaerts, P. 2000. Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall. Journal of Hydrology. 228(1-2):113-129.

5- Kassim, A.H.M. and Kottegoda, N.T. 1991. Rainfall Network Design Through Comparative Kriging Methods. Hydrological Sciences. 36(3): 223-240.

6- Papamichail, D.M. and Metaxa, I.G. 1996. Geostatistical Analysis of Spatial Variability of Rainfall and Optimal Design of A Raingauge Network. Water Resources Management. 10: 107-127.

7- Pardo, E. 1998. Optimal Selection of Number and Location of Rainfall Gauges for Areal Rainfall Estimation Using Geostatistics and Simulated Annealing. Journal of Hydrology. 210: 206-220.

8- Tsintikidis, D., Georgakakos, K.P., Sperfslag, J.A., Smith, D.E. and Carpenter, T.M. 2002. Precipitation Uncertainty and Raingage Network Design Within Folsum Lake watershed. Journal of Hydrologic Engineering. 7(2) : 175-184.

مجله علمی - پژوهشی
علوم و مهندسی آبخیـــزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering

Vol. 4, No. 12, Fall 2010
سال چهارم - شماره ۱۲ - پاییز ۱۳۸۹

Abstract

Optimized Site Selection for Rain Gage Networks Based on Annual and Monthly Rainfall

S. Rahimi Bondarabadi[1] and B. Saghafian[2]

Estimation of rainfall spatial distribution is an important step in water resources studies. Preliminary assessment of existing rain gage networks show that the spatial distribution of the gages is not suitable as many are just located in populated areas. Optimization of rain gage locations can improve the accuracy of water balance studies. Several methods have been proposed for such tasks. Kriging is a geostatistical method which can estimate the variance error based on a pre-determined semivariogram with no reliance on historical record. One can therefore apply Kriging method to estimate the reduction in error variance due to any change in the network such as addition of a new gage or moving an existing gage. In this paper, the objective is to optimize gage locations based on error variance and topography of the region. This is done such that no extra cost is incurred; i.e. only omission or moving the stations is allowed. The results indicated that the number and the network structure is sufficient for estimation of rainfall distribution in dry months. However, in case of wet months and the annual rainfall, moving some of the stations is necessary. In all, 17 stations may be moved to reduce the average error by 10 percent. It must be noted that the error is quite high in extrapolation regions, as expected.

Keywords: Optimization, Site Selection, Rain Gage Network, Kriging, Estimation Variance and Extrapolation.

1- Research Scientist, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
2- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute