

کاربرد رهیافت احتمال پذیرش در تعیین تراکم بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان خراسان

جنوبی

محسن پوررضا بیلندی^{۱*}، مجتبی شفیع^۲، فاطمه شهابی فرد^۳، هدی موسی زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

چکیده

تخمین مقدار بارندگی به عنوان یک مؤلفه کلیدی در مطالعات کشاورزی و بیان آب نیازمند یک شبکه باران‌سنجی با تراکم بهینه می‌باشد. روش‌های مختلفی مبتنی بر زمین آمار برای بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی تاکنون ارائه شده‌اند که اکثراً دارای نقاط ضعف می‌باشند. هدف از این تحقیق کاربست یک روش نوین توسعه یافته بر پایه مفهوم احتمال پذیرش در زمین آمار، جهت طراحی بهینه شبکه باران‌سنجی استان خراسان جنوبی با کمترین خطا می‌باشد. پس از آزمون همگنی شبکه فعلی متشکل از ۶۳ ایستگاه منطقه به روش گشتاورهای خطی، با کمک واریوگرام مناسب ایستگاه‌های منتخب، احتمال پذیرش در سطح منطقه محاسبه گردید. بر اساس الگوی مکانی تغییرات بارندگی سالانه در منطقه و الگوریتم روش آماری به کار رفته، احتمال پذیرش در نقاط مختلف استان محاسبه و سپس دقت پذیرش در سطوح احتمال مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد، ۲۰ ایستگاه از شبکه موجود تأثیر زیادی در تخمین بارندگی استان نداشته و جا به جایی آن‌ها در حصول به شبکه بهینه، پیشنهاد می‌شود. همچنین ۴۳ ایستگاه باقی‌مانده نیز مانند شبکه اولیه (با ۶۳ ایستگاه) می‌توانند ۳۶ درصد از مساحت استان را با سطح احتمال پذیرش ۸۰ درصد، پوشش دهند. در انتها مشخص شد با افزودن ۲۷ باران‌سنج به مکان‌های مشخص شده در شبکه بهینه کارایی پوشش شبکه به حدود دو برابر حالت فعلی یعنی ۶۵ درصد سطح منطقه می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: واریوگرام اقلیمی، واریانس کریجینگ، دقت پذیرش، تراکم، باران‌سنج

مقدمه

جانبی رطوبت هوا در یک مقیاس بزرگ نقش اصلی را در توزیع بارش در یک منطقه دارد به طوری که میزان بارش در یک طوفان عظیم چندین برابر میانگین آب موجود در یک ستون از آتمسفر است. میزان بارندگی نقش مهمی در تولیدات کشاورزی، آبدی قنات و دبی رودخانه‌های منطقه دارد. کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک در دنیا به شمار می‌آید. متوسط بارش سالانه آن حدود ۲۳۰ میلی‌متر است (Shafiei et al., 2014). در بین مناطق مختلف کشور استان خراسان جنوبی با متوسط بارش ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر جز مناطق خشک است (بین ۵۰ در مناطق حاشیه کویر تا حدود ۲۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات استان). با توجه به محدودیت‌های فنی و اقتصادی نصب، اندازه‌گیری و نگهداری ایستگاه‌های بارندگی همواره ترکیب مناسب و بهینه از ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد توجه بوده است. حتی با به وجود آمدن تکنولوژی‌های سنسجش از دور و رادار وجود شبکه باران‌سنجی مناسب ضروری است زیرا این تکنولوژی‌ها

بارندگی مهم‌ترین عاملی است که به طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت دارد. کاهش باران موجب خشکسالی و افزایش شدت و مقدار آن موجب سیلاب می‌شود. الگوی بارش در فضا و توزیع زمانی و مکانی آن در زمین اساس اطلاعات هیدرولوژی است به طوری که رطوبت خاک، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و جریان آب در آبراهه‌ها متأثر از این بردار ورودی می‌باشد. حرکت

^۱ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

(*نویسنده مسئول: mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)

DOI: 10.22125/agmj.2018.141606.1023

^۲ استادیار پژوهش، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق (EWERI)، مشهد، ایران

^۳ دفتر مطالعات، شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، بیرجند

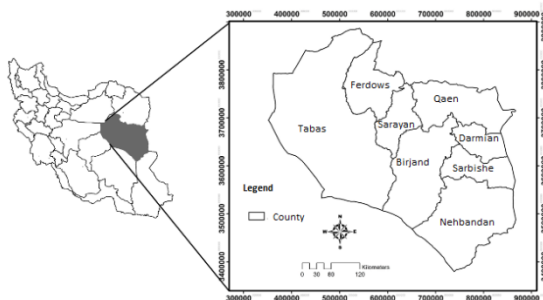
^۴ دانشجوی دکتری رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، واحد بین‌الملل دانشگاه فردوسی مشهد و مدیر محیط زیست و کیفیت منابع آب شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی

شامل حداقل کردن تابع هدفی است که هم در برگیرنده دقت تخمین بارندگی ناحیه‌ای (یعنی از طریق تخمین واریانس کریجینگ) و هم هزینه اقتصادی جمع‌آوری داده‌ها باشد. به طوری که روش شناخته شده کاهش واریانس زمین آماری در ترکیب با شبیه‌سازی تبرید^۱ به عنوان الگوریتم حداقل‌سازی اقتصادی را به کار برده‌اند، و تابع هدف آن‌ها برابر مجموع تابع هدف افزایش دقت و تابع هدف اقتصادی می‌باشد. مبنای تصمیم‌گیری ایشان بر اساس دقت مناسب برآورد بارندگی ناحیه‌ای با حداقل هزینه اقتصادی است. چند روش کاهش واریانس کریجینگ و یا سایر روش‌های موجود بهینه‌یابی باران‌سنج‌ها از چند حیث مورد انتقاد جدی قرار گرفته است که برخی از مهم‌ترین معایب مورد بحث این روش‌ها به این شرح می‌باشد: زمان بر بودن آن، عدم امکان در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر بر طراحی شبکه بهینه از جمله عوامل محیطی و اقتصادی، مشکل بودن مدل‌سازی واریوگرام که برای هر واقعه بارندگی ممکن است متفاوت به دست آید و در نهایت اینکه هدف اکثر روش‌ها و کاربردهای آن‌ها در بهینه‌سازی شبکه باران‌سنج‌ها فراهم آوردن تخمین دقیق بارندگی در سطح می‌باشد. در چنین کاربردهایی ارزیابی عملکرد یک شبکه بر کاهش واریانس تخمین بارندگی در سطح متمرکز شده است، اما این واریانس از بارندگی‌های نقطه‌ای منطقه مورد مطالعه محاسبه نمی‌شود (Kassim and Kottegoda, 1991; Cheng et al., 2008; Shafiei et al., 2014). اخیراً (Cheng et al., 2008) روشی را بر مبنای مفاهیم زمین آماری و ویژگی‌های تابع توزیع نرمال ارائه کرده‌اند که توانسته ضعف‌های ذکر شده را تا حد قابل توجهی پوشش دهد. این روش توسط Cheng et al., (2008) در حوضه‌ای به مساحت ۲۲۰۰ کیلومتر مربع در کشور تایوان با تعداد ۲۷ ایستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع آن‌ها با تعریف مفهومی به نام احتمال پذیرش^۲ بر مبنای مدل زمین آماری کریجینگ معمولی، روشی نوین را معرفی کرده‌اند و از آن در ارزیابی و تقویت شبکه باران‌سنجی استفاده کرده‌اند و نتیجه گرفتند که می‌توان با استفاده از مفهوم ارائه شده معیاری را جهت سنجش عملکرد شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی در نظر گرفت. در تحقیقی دیگر (Shafiei et al., 2014) این روش

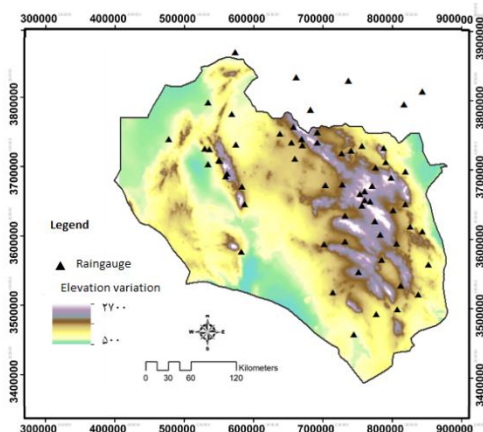
نیازمند واسنجی و ارزیابی با باران‌سنج‌های زمینی می‌باشند (Beren and Krajewski, 2013) و البته هنوز در بسیاری از مناطق قابل اجرا نمی‌باشند. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه‌های باران‌سنج استفاده و معرفی شده‌اند. ساده‌ترین آن‌ها توسط سازمان جهانی هواشناسی است که در مناطق مسطح به ازای هر ۵۰۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه و در حوضه‌های کوهستانی کوچک با بارش‌های نامنظم در هر ۲۵ کیلومتر مربع یک ایستگاه پیشنهاد کرده است (World Meteorological Organization; WMO, 1994). در این مورد Hershfield (۱۹۶۵) برای اولین بار، با استفاده از همبستگی داده‌ها در شبکه داده‌های بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال و همچنین بارش ۱ ساعته با همین دوره بازگشت، به منظور طراحی شبکه باران‌سنجی استفاده نمود. افراد دیگری نیز در زمینه بررسی همبستگی مکانی شبکه داده‌های بارش تحقیقاتی انجام داده‌اند (Rodriguez and Mejia, 1974; Bras and Rodriguez and Colon, 1978). روش‌های مختلف بهینه‌سازی فراکوشی و روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار از جمله ابزارهایی می‌باشند که در مبحث طراحی بهینه شبکه‌های باران‌سنجی به وفور مورد توجه بوده است. در این بین محبوبیت و قابلیت روش‌های مبتنی بر زمین آماری و تخمین‌گر کریجینگ بیشتر بوده است و این به سبب قابلیت نارایب بودن آن در تعمیم داده‌های نقطه‌ای و ارائه ساختار تغییرات مکانی می‌باشد. روش‌های کاهش واریانس کریجینگ به عنوان ابتدایی‌ترین آن‌ها شامل جستجوی تعداد مناسب ایستگاه و موقعیت آن‌ها با حداقل کردن واریانس تخمین کریجینگ می‌باشد. تاکنون نیز گزارشات و مقالات محققان متعددی در این مورد انجام شده است (Hughes and Lettenmaier, 1981; Bastin et al., 1984; Bogardi and Bardossy, 1985). در این میان همچنین برخی تحقیقات با اضافه کردن بهینه‌سازی اقتصادی نیز سعی در ارائه یک شبکه بهینه داشته‌اند. به طوری که نصب باران‌سنج جدید در شبکه نیازمند هزینه‌هایی می‌باشد که توازن بین دقت مورد نیاز و تعداد ایستگاه‌های پیشنهادی برقرار کند، در این مورد (Pardo-Iguzqiza, 1998) از یک روش برای بهینه‌یابی طراحی شبکه باران‌سنج‌ها جهت افزایش دقت تخمین بارندگی ناحیه‌ای استفاده کرده‌اند که مسئله

¹ Simulating Annealing

² Acceptance Probability



شکل ۱- موقعیت استان خراسان جنوبی در ایران
Figure 1- Location of South Khorasan Province in Iran



شکل ۲- پراکنش مکانی و ارتفاعی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان خراسان جنوبی
Figure 2- Location and elevation of rain gauges in South Khorasan Province

آزمون همگنی به روش گشتاورهای خطی

برای بررسی همگنی منطقه از نظر هیدرومتئورولوژی و تولید بارش، ابتدا فرض می‌شود که منطقه همگن می‌باشد و سپس این فرض توسط این روش آزمون می‌شود. اگر تغییرپذیری ایستگاه‌ها یا فضای پراکنش ایستگاه‌ها در یک مجموعه انتخابی بزرگ باشد، احتمال تعلق این ایستگاه‌ها به این مجموعه واحد را می‌توان به وسیله آزمون همگنی گشتاورهای خطی بررسی کرد. برای محاسبه پراکنش نسبت‌های گشتاورهای خطی ناحیه‌ای اقدام به شبیه‌سازی داده‌های ناحیه‌ای معادل می‌شود. برای این منظور می‌بایست تابع توزیع مناسبی را در نظر گرفته و با استفاده از آمار واقعی ناحیه‌ای، پارامترهای تابع انتخابی در هر ناحیه تعیین گردد. برای پرهیز از انتخاب یک تابع توزیع دو یا سه پارامتری خاص، تابع چهار پارامتری کاپا جهت اجرای شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود (Hosking and Wallis, 1997). پس از محاسبه پارامترهای تابع توزیع کاپا برای ناحیه مورد نظر، اقدام به شبیه‌سازی داده‌های منطقه‌ای

را توسعه داده و روابط ساده‌ای برای محاسبات آن ارائه کرده‌اند و نتایج کاربرد آن را در حوضه گرگان‌رود مورد ارزیابی قرار داده‌اند. تحقیق حاضر در نظر دارد به بررسی و ارزیابی شبکه ایستگاه‌های هواشناسی در استان خراسان جنوبی بپردازد. این تحقیق به دنبال یافتن اهداف ذیل در مطالعات منابع آب می‌باشد. (۱) به کمیت در آوردن عملکرد (راندمان) شبکه سنجش بارندگی موجود در استان، (۲) بررسی موقعیت و تراکم ایستگاه‌های موجود از لحاظ تأثیر در دقت برآوردهای مکانی (بارندگی ناحیه‌ای)، (۳) ارائه شبکه مناسب سنجش بارندگی در استان با حذف یا افزودن ایستگاه جدید. مقاله حاضر بر مبنای کاربرد روش احتمال پذیرش و استفاده از روش‌های گشتاور خطی جهت بررسی همگنی ایستگاه‌های منطقه می‌باشد که تاکنون این رویکرد مورد استفاده نبوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی در شرق ایران و با مساحت حدود ۱۵۰۷۹۷ کیلومتر مربع در یک اقلیم خشک با تعداد ۱۱ شهرستان، ۲۲ بخش و ۵۱ دهستان واقع شده است. تراکم و تمرکز مناطق روستایی استان خراسان جنوبی بیشتر در مناطق کوهستانی و مرکز استان واقع شده است. از نظر هیدرولوژیکی و تقسیمات تمام این استان در ۲ زیرحوضه درجه یک به نام‌های فلات مرکزی و مرزی شرقی کشور و بر اساس زیرحوضه‌های درجه ۲ در ۴ زیرحوضه کویر مرکزی، نمکزار خواف، کویرلوت و هامون هیرمند همچنین بر اساس تقسیم‌بندی درجه سه استان خراسان جنوبی شامل ۳۸ محدوده می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت استان در کشور به همراه شهرستان‌های آن نشان داده شده است. در شکل ۲ نیز تغییرات ارتفاعی استان نشان داده شده است. ارتفاعات بلند استان در شرق آن قرار دارد و بخش‌های جنوبی و غربی کم‌ترین ارتفاع را دارا می‌باشد. آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد نیاز این تحقیق از ایستگاه‌های وزارت نیرو (باران‌سنجی و تبخیرسنجی) و ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور (سینوپتیک و کلیماتولوژی) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین ایستگاه‌های باران‌سنجی که در استان‌های مجاور نیز می‌باشند مد نظر قرار گرفته‌اند. در مجموع تعداد ۶۳ ایستگاه شناسایی شده است (شکل ۲).

که در آن پارامترها به ترتیب $N, m_i, L_{cv}^{(i)}$ و $L_{cv}^{(R)}$ تعداد ایستگاه‌های حوضه، طول دوره آماری ایستگاه m_i ، ضریب تغییرات خطی هر یک از ایستگاه‌های یک حوضه، میانگین ضریب تغییرات خطی ایستگاه‌های یک حوضه (مجموع ضریب تغییرات خطی هر ایستگاه در یک حوضه و تقسیم آن بر تعداد ایستگاه حاصل می‌شود). تابع تجمعی توزیع کاپا به صورت معادله ۵ می‌باشد.

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right] \frac{1}{k} \right\}^{\frac{1}{h}} \quad (5)$$

که در آن α, ξ, k و h پارامترهای توزیع کاپا، x مقدار واقعه و $F(x)$ تابع توزیع تجمعی می‌باشد و مقدار تابع از معادله ۶ قابل محاسبه است.

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(\frac{1 - F^h}{h} \right)^k \right] \quad (6)$$

برای محاسبه پارامترهای توزیع کاپا، از معادلات ارائه شده توسط (Hosking, 1994) استفاده می‌شود. در نهایت با محاسبه پارامترهای توزیع کاپای حوضه و با به دست آوردن مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده داده‌های منطقه‌ای معادل، آماره آزمون همگنی از معادله ۱۳ قابل محاسبه است. اگر $|H_i|$ (که از معادله ۱ به دست می‌آید) به اندازه کافی بزرگ باشد، ناحیه ناهمگن خواهد بود. در این مورد (Hosking and Wallis, 1997) پیشنهاد کردند که یک ناحیه، وقتی می‌تواند ناحیه همگن قابل قبول باشد اگر $|H_i| < 1$ ، و می‌تواند ناحیه نسبتاً همگن باشد اگر $1 < |H_i| < 2$ و به عنوان ناحیه مشخصاً ناهمگن خواهد بود اگر $|H_i| > 2$ باشد. در عمل عنوان می‌شود که معیار H_1 به منظور بررسی این آزمون مناسب‌تر است. همچنین (Hosking and Wallis, 1997) آماره D را جهت شناسایی مکان‌های ناجور^۱ نسبت به کل گروه را معرفی کردند به طوری که اگر مقدار D بزرگ‌تر از ۳ باشد ایستگاه ناجور بوده و از گروه حذف می‌شود.

$$D_i = \frac{1}{3} (u_i - \bar{u})^T S^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (7)$$

$$S = (NS - 1)^{-1} \sum_{i=1}^{NS} (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (8)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} u_i \quad (9)$$

که $u_i = [t_1^i, t_3^i, t_4^i]^T$ ماتریس ترانهاده گشتاورهای خطی در ایستگاه i ، N تعداد ایستگاه و S ماتریس کوواریانس

معادل به روش مونت کارلو می‌شود. به این منظور در هر ایستگاه به تعداد طول دوره آماری آن ایستگاه، اعدادی تصادفی (معمولاً به تعداد ۵۰۰ عدد) به عنوان مقادیر احتمال وقوع در بازه (۱،۰) در نظر گرفته شده و با استفاده از تابع چندک توزیع کاپا و پارامترهای برآورد شده آن در ناحیه مربوطه اقدام به برآورد آمار حداکثر بارندگی روزانه معادل می‌گردد. سپس ضرایب گشتاورهای خطی (ضریب تغییرات، ضریب چولگی و کشیدگی) مربوط به آمار برآورد شده محاسبه خواهد شد. پس از محاسبه این ضرایب با استفاده از آمار شبیه‌سازی شده در تمامی ایستگاه‌های واقع در ناحیه مفروض، مقادیر V_i ($i=1, 2, 3$) با استفاده از معادله‌های ۱ تا ۹ محاسبه می‌شوند. فرایند شبیه‌سازی آمار در هر ایستگاه و محاسبه ضرایب گشتاورهای خطی و آماره‌های V_i ، ۵۰۰ بار تکرار شده و در نتیجه ۵۰۰ مقدار V_i حاصل خواهد شد. میانگین μ_v و انحراف معیار σ_v مربوط به مقادیر شبیه‌سازی شده V_i ها تعیین می‌شود. پارامتر دیگر آزمون همگنی، V_{obs} با استفاده از معادله‌های ۲ تا ۴ برای مقادیر واقعی حداکثر بارش ثبت شده ایستگاه‌های حوضه محاسبه می‌شوند. با به دست آوردن این سه پارامتر آماره آزمون همگنی (H_i) قابل محاسبه است. سه آماره همگنی این آزمون یعنی H_1 برای بررسی ضریب تغییرات خطی L_{cv} ، آماره H_2 برای ترکیبی از ضریب تغییرات خطی و ضریب چولگی خطی و L_{SK} ، آماره H_3 برای ترکیبی از ضریب چولگی خطی و ضریب کشیدگی خطی L_{ku} به کار برده می‌شود که شکل عمومی هر یک به صورت معادله ۱ می‌باشد.

$$H_i = \frac{(V_{obs} - \mu_v)}{\delta_v} \quad (1)$$

به طوری که μ_v و σ_v به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده (حاصل از توزیع کاپا) و پارامتر V_{obs} را با استفاده از داده‌های هر حوضه محاسبه نموده که برای هر یک از آماره‌های H_i (به ترتیب H_1, H_2 و H_3)، به صورت معادله‌های ۲ تا ۴ تعریف می‌شوند (Hosking, 1994).

$$V_1 = \sum_{i=1}^N \left(n_i (L_{cv}^{(i)} - L_{cv}^{(R)})^2 \right) / \sum_{i=1}^N n_i \quad (2)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^N \left(n_i (L_{cv}^{(i)} - L_{cv}^{(R)})^2 \right) / \sum_{i=1}^N n_i \quad (3)$$

$$V_3 = \sum_{i=1}^N \left(n_i (t_3^{(i)} - t_3^{(R)})^2 + (t_4^{(i)} - t_4^{(R)})^2 \right)^{1/2} / \sum_{i=1}^N n_i \quad (4)$$

^۱ Discordancy

نظر $(-\sigma_z, \sigma_z)$ قرار گیرد را می‌توان به سادگی با استفاده از احتمال تجمعی توزیع نرمال استاندارد تعیین کرد.

$$P[|\tilde{z}(x_0)| < \sigma_z] = P\left[\frac{|\tilde{z}(x_0)|}{\sigma_k(x_0)} < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] \quad (13)$$

$$= P\left[|\tilde{z}(x_0)| < \frac{\sigma_z}{\sigma_k(x_0)}\right] = p_A(x_0)$$

که در آن $\tilde{Z}^*(x_0)$ خطای تخمین استاندارد بوده و از توزیع نرمال استاندارد پیروی می‌کند یا به عبارتی $\tilde{Z}^*(x_0) \sim N(0,1)$ ، σ_z انحراف معیار داده‌های بارندگی مقیاس شده می‌باشد که معادل سقف واریوگرام بدون بعد در نظر گرفته می‌شود و $\sigma_k(x_0)$ جذر واریانس تخمین کریجینگ می‌باشد و $p_A(x_0)$ احتمال پذیرش^۲ در نقطه x_0 نامیده می‌شود که نشان‌گر احتمال آن است که خطای تخمین در x_0 کمتر از σ_z است. بنابراین می‌توان گفت که دقت برآورد در یک نقطه فاقد آمار قابل قبول است تنها اگر احتمال پذیرش مربوط به آن بزرگتر یا مساوی α باشد. در نتیجه برآورد در آن نقطه از دقت پذیرش^۳ برخوردار است. به بیان دیگر نقاطی که واریانس‌های کریجینگ بزرگتر دارند احتمال‌های پذیرش در آن‌ها کم‌تر می‌باشد (Cheng et al., 2008; Shafiei et al., 2014). از آنجا که در محاسبه $p_A(x_0)$ (معادله ۱۳) نیاز به مراجعه به جدول توزیع نرمال استاندارد می‌باشد، لذا در این پژوهش از فرم تقریب زده شده آن توسط Shafiei et al., (2014) استفاده شده است.

$$P_A(x_0) = 1 - \left[1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{\frac{4}{\pi} + 0.14\tau^2}{1 + 0.14\tau^2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}, \tau = \frac{\sigma_z}{\sqrt{2}\sigma_k(x_0)} \quad (14)$$

همچنین در این مطالعه قبل از ورود به محاسبات بررسی واریوگرام بارندگی منطقه و احتمال پذیرش از مفهوم واریوگرام بدون بعد (اقليمی) جهت بررسی ساختار مکانی بارندگی استفاده شده است (Bastin et al., 1984). طبق پیشنهاد Cheng et al., (2008) ابتدا داده‌های بارندگی با معادله ۱۵ استاندارد (بدون بعد) شده و سپس از آن‌ها جهت تحلیل واریوگرام یا ساختار مکانی استفاده می‌شود.

$$\frac{R_i(j) - R_{m,j}}{S(j)} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

که $R_i(j)$ و $R_{m,j}$ به ترتیب نشان دهنده بارندگی سالانه سال j ام و متوسط بارندگی سالانه ایستگاه m ام است، $S(j)$ انحراف معیار بارندگی سالانه در سال j ام است و $R_i^*(j)$ داده‌های

نمونه است. جهت انجام محاسبات برنامه کلیه مراحل ذکر شده در محیط نرم افزار متلب^۱ نوشته شده است.

معرفی الگوریتم احتمال پذیرش

مفهوم احتمال پذیرش و تعریف دقت پذیرش

دقت تخمین بارندگی نقطه‌ای در هر منطقه‌ای متفاوت است و به تعداد و موقعیت قرارگیری باران‌سنج‌ها بستگی دارد. از نظر کاربردی، یک شبکه باران‌سنجی خوب بایستی منجر به دقت قابل قبول برای اکثر نقاط در منطقه شود. برآورد در نقطه x_0 قابل قبول خواهد بود اگر مقدار برآورد شده در دامنه‌ای از مقدار واقعی قرار گیرد.

$$|\tilde{z}(x_0)| = |\hat{z}(x_0) - z(x_0)| < r \quad (10)$$

که $r > 0$ است. هر چند که در نقطه مشخص x_0 ، دقت برآورد ساعت به ساعت و واقعه به واقعه تغییر می‌کند؛ از این رو ارزیابی باید بر مبنای یک مفهوم در برگیرنده تمامی وقایع صورت پذیرد. همچنین تعیین دامنه (r) باید با در نظر گرفتن واریانس بارندگی $Z(x)$ (یعنی σ_z^2) صورت پذیرد. بنابراین معیار تجدید نظر شده و دقیق‌تر با معادله ۱۱ می‌توان بیان کرد (Cheng et al., 2008).

$$P[|\hat{z}(x_0) - z(x_0)| < k\sigma_z] \geq \alpha \quad (11)$$

که در این معادله دامنه قابل قبول برای خطای برآورد برحسب انحراف معیار متغیر تصادفی $Z(x)$ است، ضریب k و حداقل احتمال α بر اساس عواملی مانند بودجه در دسترس برای تأسیس و نگهداری ایستگاه و دقت برآورد مورد نظر انتخاب می‌شوند. در صورتی که محدودیتی وجود نداشته باشد، $k=1$ و α برابر 0.8 در نظر گرفته می‌شود (Cheng et al., 2008). Webster and Oliver (2001) خطای تخمین (واریانس کریجینگ) روش کریجینگ معمولی واریانس را از معادله ۱۲ محاسبه کردند.

$$\sigma_k^2(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} \quad (12)$$

که λ_i وزن‌های در نظر گرفته شده برای تخمین‌ها، μ ضریب لاگرانژ و γ_{i0} مقدار واریوگرام بین نقاط معلوم $Z(x_i)$ و مجهول $Z(x_0)$ است. چون تخمین‌گر کریجینگ معمولی نارایب است، میانگین خطای برآورد در x_0 صفر و واریانس آن $\sigma_k^2(x_0)$ است. اگر فرض شود که توزیع خطای برآورد نرمال باشد، احتمال این که خطای برآورد $\tilde{Z}(x_0)$ در داخل دامنه مورد

² Acceptance Probability

³ Acceptable Accuracy

¹ Matlab

نتایج و بحث

تحلیل همگنی داده‌های ایستگاه‌های بارندگی

با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده از ۶۳ ایستگاه تا سال آبی ۹۳-۱۳۹۲، تنها ۱۷ ایستگاه آمار بالای ۲۵ سال دارند. لذا جهت مشخص کردن ایستگاه‌های انتخابی برای تحلیل‌ها آماری همگنی و زمین آماری برای مراحل بعد ایستگاه‌های دارای آمار بیشتر از ۱۵ سال در نظر گرفته شدند؛ به این سبب که سال‌های آماری کمتر از این دوره اعتماد به نتایج به دست آمده در تحلیل‌های بعدی بسیار کاهش خواهد یافت (Sun and Petreson, 2006). در نهایت یک دوره مشترک ۱۷ ساله (شروع از سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۳-۱۳۹۲) در نظر گرفته شد. بر این اساس شبکه‌ای متشکل از ۳۴ ایستگاه انتخاب شد. همانطور که قبلاً ذکر شد در این مطالعه از آزمون گشتاورهای خطی برای بررسی همگنی ایستگاه‌های منطقه استفاده شده است. نتایج آزمون نشان داد قدر مطلق آماره H_1 برای منطقه برابر $1/5$ می‌باشد، بنابراین منطقه مورد نظر (شبکه ایستگاه‌ها) نسبتاً همگن می‌باشد (زیرا مقدار آماره بین ۱ و ۲ به دست آمده است) و یا به عبارتی رفتار بارندگی سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبتاً مشابه است. بنابراین، لزومی به تقسیم منطقه به واحدهای همگن نمی‌باشد و می‌توان تحلیل‌های زمین آماری و سایر تحلیل‌های مکانی (مانند پهنه‌بندی) را برای یک واحد همگن یعنی کل استان (به همراه ایستگاه‌های مجاور در خراسان رضوی) انجام داد. همچنین محاسبه آماره ناجوری (D) نشان داد که یکی از ایستگاه‌های منطقه (ایستگاه نیاز طبس) ایستگاه ناجور^۱ (ناهمگون) نسبت به سایر ایستگاه‌های منطقه می‌باشند و لذا این ایستگاه در تحلیل‌های بعدی کنار گذاشته شد. بنابراین تعداد ایستگاه‌های منتخب شبکه به ۳۳ عدد کاهش می‌یابد.

نتایج تحلیل ساختار مکانی (واریوگرام) تغییرات

بارندگی سالانه

در این پژوهش داده‌های بلند مدت بارندگی سالانه در حوضه مورد استفاده قرار گرفته است. قبل از انجام تحلیل زمین‌آماری و برازش واریوگرام برای ایستگاه‌های منطقه، بر اساس مفهوم واریوگرام بدون بعد یا به عبارتی واریوگرام

مقیاس شده می‌باشد که در ساخت واریوگرام اقلیمی بدون بعد از آن استفاده می‌شود. برای تحلیل واریوگرام از نرم‌افزار Variowin2.2 استفاده شده است (Pannatier, 1996).

الگوریتم ارزیابی و تقویت شبکه باران‌سنجی

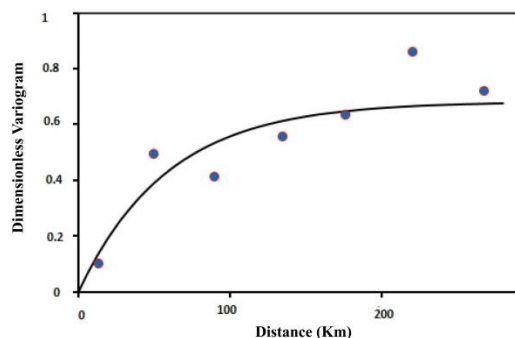
با توجه به مطالب مذکور در بخش قبل، ارزیابی کارایی یک شبکه باران‌سنجی را می‌توان بر اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (A_p) انجام داد. بنابراین احتمال پذیرش را می‌توان در هر نقطه درون منطقه مطالعاتی محاسبه کرد. یک شبکه موجود ایستگاه‌های باران‌سنجی را می‌توان حسب درصد مساحتی با دقت پذیرش از طریق جابه‌جایی ایستگاه‌ها یا افزودن ایستگاه‌های جدید تقویت کرد. با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط Cheng et al., (2008) می‌توان جهت ارزیابی کارایی توأم مجموعه‌ای از ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده کرد، که به شرح ذیل می‌باشد (Cheng et al., 2008; Shafiei et al., 2014).

۱- محاسبه A_p برای شبکه با حذف یک ایستگاه از شبکه موجود در یک سطح دقت مورد نظر (α).
 ۲- برگرداندن ایستگاه حذف شده در مرحله قبل به شبکه، انتخاب ایستگاهی دیگر و محاسبه مجدد A_p . این مرحله تا آنجایی ادامه می‌یابد که همه ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین مجموعه‌ای از مقادیر A_p به ازای حذف هر ایستگاه از شبکه به دست می‌آید.
 ۳- در این مرحله ایستگاهی که بیشترین مقدار A_p را در مرحله ۲ داشته از محاسبات کنار گذاشته می‌شود. سپس از تعداد ایستگاه‌های باقی‌مانده یکی کم می‌شود و مراحل ۱ و ۲ تکرار می‌شوند.

مرحله ۳ تا زمانی اجرا می‌شود که تنها یک ایستگاه باقی بماند. پس از اتمام الگوریتم ترتیبی فوق، تمامی ایستگاه‌ها بر اساس نوبت (رتبه) حذف شدنشان در گام سوم اولویت‌بندی می‌شوند. علاوه بر این در هر بار که در گام سوم یک ایستگاه حذف می‌شود نقشه مقادیر احتمال پذیرش و مقادیر A_p متناظر با آن با استفاده از ایستگاه‌های باقی‌مانده به دست می‌آید. با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک ایستگاه‌های باران‌سنجی یا معادل آن مجموعه‌ای از ایستگاه‌های باقی‌مانده، نموداری بر اساس A_p و شماره ایستگاه حذف شده متناظر با آن برای نشان دادن ترتیب اولویت باران‌سنجی‌ها و کارایی مجموعه باران‌سنجی‌ها می‌توان ترسیم کرد.

¹ Discordancy

می‌شود در نزدیکی مرزهای استان و مناطقی که ایستگاه وجود ندارد احتمال پذیرش کمتر از سایر نقاط می‌باشد.



شکل ۳- واریوگرام تجربی (نقاط) و برازش داده شده (منحنی) بارندگی سالانه در استان خراسان جنوبی

Figure 3- Experimental (points) and fitted (curve) variogram of annual rainfall in South Khorasan Province

با توجه به توزیع مکانی $p_A(x_0)$ در استان برای ضریب ثابت $\alpha=0/8$ ، $36/2$ درصد از کل مساحت استان از دقت پذیرش برخوردار هستند ($A_p=36/2\%$). همچنین دیده می‌شود که به ازای $\alpha=0/7$ حدود ۶۳ درصد از سطح استان از دقت پذیرش برخوردار می‌باشد. Cheng et al., (2008) در مطالعه خود در یک منطقه مرطوب (با متوسط بارندگی سالانه ۴۰۰ میلی‌متر) به این نتیجه رسیده‌اند که در صورتی که آستانه قابل قبول (α) را برای A_p برابر ۸۰٪ درصد به عنوان معیار ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی در نظر بگیریم آنگاه در سطح $\alpha=0/8$ شبکه باران‌سنجی مورد تایید می‌باشد و قابل ارزیابی و بهینه‌یابی می‌باشد. از طرفی Shafiei et al. (2014) نیز در حوضه نیمه‌مرطوب گرگان‌رود (با متوسط بارندگی ۳۰۰ میلی‌متر) به نتایج مشابه رسیده‌اند و آستانه قابل قبول ضریب α را برابر ۰/۸ در نظر گرفته و سپس ارزیابی و بهینه‌یابی را در شبکه باران‌سنجی منطقه انجام داده‌اند. بنابراین در این مطالعه نیز سطح احتمال ۰/۸ در نظر گرفته شده است و عملکرد (کارایی) شبکه باران‌سنجی استان برابر ۳۶ درصد به دست آمده است که کارایی نسبتاً ضعیفی می‌باشد.

ارزیابی و بهینه‌یابی شبکه باران‌سنجی استان

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها ارائه شد، ارزیابی کارایی شبکه بر مبنای درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (A_p) بر اساس الگوریتم ارائه شده قابل انجام است. با انجام این الگوریتم نقش (مشارکت) هر ایستگاه باران‌سنجی در دقت شبکه محاسبه و ارزیابی می‌شود.

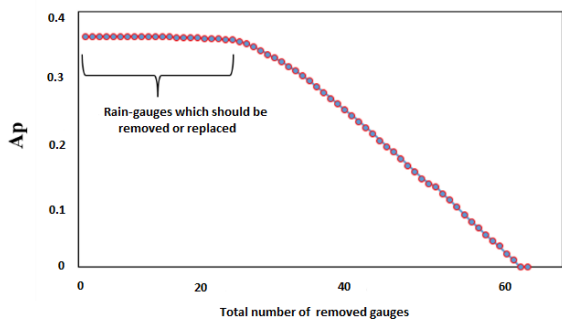
اقلیمی، داده‌های بارندگی سالانه ۳۳ ایستگاه منطقه توسط معادله ۱۵ مورد پردازش قرار گرفتند. جهت تحلیل ساختار مکانی بارندگی سالانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی خراسان جنوبی ابتدا واریوگرام تجربی آن به کمک نرم‌افزار Variowin2.2 ساخته شد و سپس بهترین برازش واریوگرام نظری بر روی آن انجام شد (شکل ۳). برای برازش واریوگرام تجربی از انواع متداول واریوگرام نظری مانند خطی، توانی، نمایی و گوسی استفاده شد و در نهایت مدل واریوگرام نمایی بهترین برازش را نشان داد. در شکل ۳ واریوگرام بدون بعد نمایی برای بارندگی سالانه در استان خراسان جنوبی ارائه شده که دامنه تأثیر آن برابر $176/4$ کیلومتر، سقف آن $0/68$ برحسب واحد بدون بعد، اثر قطعه‌ای آن صفر به دست آمده است. واریوگرام برازش داده شده در معادله ۱۶ قابل نمایش است.

$$\gamma(h) = 0.68 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{58.7}\right) \right) \quad (16)$$

محاسبه احتمال پذیرش و کارایی شبکه موجود باران‌سنجی استان

بر اساس ساختار مکانی تغییرات بارندگی سالانه در منطقه و روابط ارائه شده در محاسبه احتمال پذیرش (بخش ۲-۳) احتمال پذیرش (P_A) در نقاط مختلف استان محاسبه و سپس دقت پذیرش (A_p) در سطوح احتمال مختلف تحلیل و بررسی شده‌اند. در این مطالعه از بارندگی سالانه برای ترسیم نقشه‌های هم‌مقدار احتمال پذیرش و ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی (به عبارتی محاسبه دقت پذیرش) منطقه استفاده شده است. بر اساس معادله محاسبه احتمال پذیرش (معادله ۱۴) و الگوریتم ارائه شده ارزیابی شبکه باران‌سنجی انجام شده است. با در نظر گرفتن یک شبکه سلولی یک کیلومتر در یک کیلومتر و با استفاده روابط و ابزار توسعه داده شده، احتمال پذیرش در شبکه وجود باران‌سنجی منطقه شامل تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی فعال منطقه (به عبارتی تعداد ۶۳ ایستگاه موجود) محاسبه شده است و نتیجه مقادیر هم‌مقدار آن در شکل ۴ آمده است. نتایج نشان داد که بازه تغییرات احتمال پذیرش بین ۰/۵ تا ۱ به دست آمده است. در محل هر ایستگاه باران‌سنجی مقدار احتمال پذیرش برابر یک می‌باشد چون تخمین‌گر کریجینگ معمولی دقیق است و خطای تخمین در محل‌هایی که داده اندازه‌گیری شده دارند صفر می‌باشد و همانطور که در شکل ۴ دیده

۲۰ ایستگاه نقش بسیار کمی در افزایش دقت برآورد مکانی بارندگی در منطقه دارند.

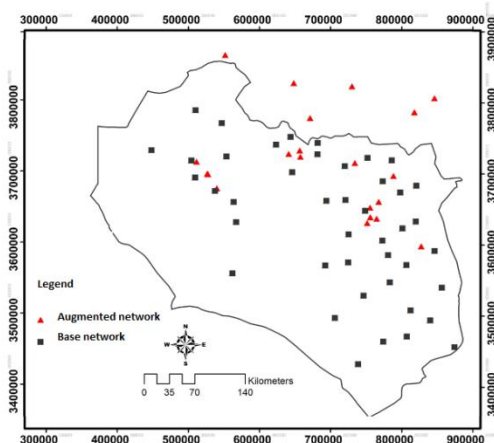


شکل ۵- اولویت بندی ایستگاه ها و مقدار A_p متناظر آن ها برای

$$\alpha=0.8$$

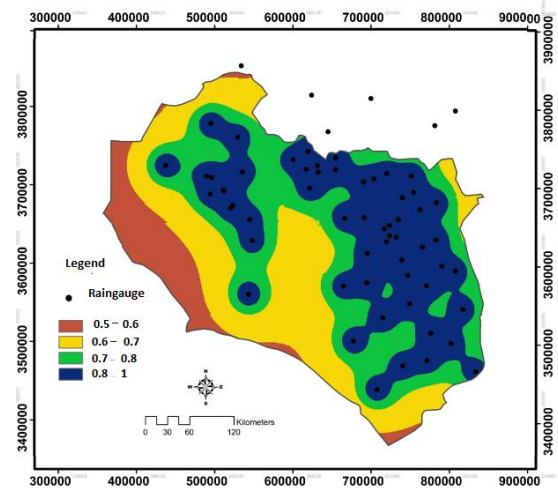
Figure 5- Rain-gauges prioritization and the corresponding A_p values for $\alpha=0.8$

به طوری که این ایستگاه ها بهتر است در روند بهینه یابی و تقویت شبکه باران سنجی جا به جا شوند یا در صورت تحمیل هزینه های اضافی حذف گردند. سایر ۴۳ ایستگاه باقی مانده در واقع تشکیل شبکه ایستگاه های پایه را می دهند به طوری که همه آن ها نقش موثری در افزایش دقت شبکه باران سنجی در برآورد بارندگی سالانه دارند. نکته قابل توجه این است که کارایی شبکه باران سنجی با ۴۳ ایستگاه پایه برابر کارایی شبکه اصلی (موجود) با ۶۳ ایستگاه است. همچنین همانطور که در شکل ۶ مشخص است ایستگاه های باران سنجی مجاور استان تأثیر کمی در افزایش دقت شبکه دارند و استفاده از آن ها جهت برآورد بارندگی سالانه و یا میانگین بارندگی در استان تأثیری در افزایش دقت برآوردها نخواهد داشت.



شکل ۶- پراکنش مکانی ایستگاه های شبکه باران سنجی دارای حداقل تأثیر در دقت شبکه

Figure 6- Spatial distribution of rain gauge stations with minimum effect in network accuracy



شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر احتمال پذیرش در استان خراسان جنوبی

Figure 4- Spatial variation of acceptance probability values in South Khorasan Province

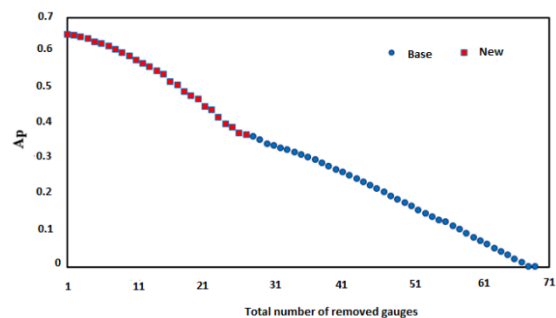
همچنین، تقویت شبکه موجود باران سنجی موجود با جابه جایی ایستگاه های که تأثیر کمی در افزایش دقت برآورد بارندگی دارند یا احداث ایستگاه جدید در موقعیت بهینه امکان پذیر می باشد که توسط الگوریتم ارائه شده قابل انجام است. بر اساس مطالعات پیشین (Cheng et al., 2008; Shafiei et al., 2014) احتمال پذیرش در سطح $\alpha=0.8$ جهت ارزیابی و بهینه یابی (تقویت) شبکه باران سنجی موجود انتخاب شده است. بنابراین با الگوریتم ارائه شده ابتدا ارزیابی نقش ایستگاه های موجود در دقت شبکه باران سنجی سالانه انجام شده است و سپس در نقاطی که سطح احتمال پذیرش آن ها از ۰/۸ کمتر می باشد می توان نقاط ایستگاهی جدید را معرفی کرد به طوری که دقت پذیرش شبکه موجود از ۳۶/۲ درصد به حداکثر ممکن (به عبارتی ۱۰۰ درصد) برسد.

ارزیابی مشارکت ایستگاه های باران سنجی موجود در افزایش دقت شبکه

با انجام الگوریتم، تمامی ایستگاه ها بر اساس نوبت (رتبه) حذف شدنشان اولویت بندی شدند و با استفاده از مقادیر A_p مربوط به حذف تک ایستگاه های باران سنجی یا معادل آن مجموعه ای از ایستگاه های باقی مانده، نموداری بر اساس A_p و شماره ایستگاه حذف شده متناظر با آن برای نشان دادن ترتیب اولویت باران سنجی ها و کارایی مجموعه باران سنجی ها در شکل ۵ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است تعداد حدود

تقویت شبکه باران سنجی موجود در منطقه

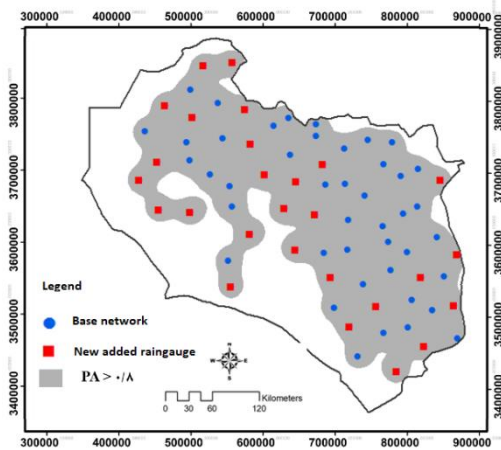
جهت افزایش دقت در شبکه باران سنجی پایه یا به عبارتی افزایش کارایی شبکه به دقت پذیرش (A_p) ۱۰۰ درصد، در نقاطی که $P(A) < \alpha$ با توجه به الگوریتم ارائه شده می توان به ترتیب نقاطی را که بیشترین A_p را در ترکیب با شبکه باران سنجی پایه می دهند به دست آورد. برای این کار ابتدا یک سری نقاط پیشنهادی (شبکه پیشنهادی جدید) در نقاطی که مقادیر احتمال پذیرش کمتر از حد آستانه آن می باشد در نظر گرفته می شود و سپس الگوریتم بهینه یابی اجرا می شود. در انتخاب نقاط برای باران سنجی های جدید وجود مرکز جمعیتی و دسترسی به راه های فرعی و اصلی مد نظر قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است که بخشی از مساحت استان خراسان جنوبی در مجاورت کویر است به طوری که هیچ آبادی یا مرکز جمعیتی در آنجا وجود ندارد. در واقع امکان تاسیس و بهره برداری ایستگاه در این مکان ها وجود ندارد. این مناطق در سمت جنوب و غرب استان و در محدوده شهرستان نهبندان و طبس بیشتر واقع شده اند. بنابراین از پیشنهاد ایستگاه جدید در این مناطق صرف نظر شده و کارایی (عملکرد) شبکه در دقت پذیرش کمتر از ۱۰۰ درصد خواهد بود. نتایج نشان داد که با اضافه شدن تعداد ۲۷ ایستگاه جدید به شبکه فعلی مطابق اشکال ۷ و ۸، بهبود کارایی شبکه با در نظر گرفتن این نقاط به ۶۵ درصد افزایش می یابد. همچنین به سبب محدودیت دسترسی در بخش های جنوبی و غربی منطقه امکان ایجاد ایستگاه جدید در این بخش ها وجود ندارد و بنابراین حداکثر کارایی شبکه ۶۵ درصد می باشد که نسبت به شبکه پایه ۳۰ درصد بیشتر شده است.



شکل ۷- اولویت بندی ایستگاه ها و مقدار A_p متناظر آنها در

سطح $\alpha=0.8$ در شبکه بهینه

Figure 7- Rain-gauge prioritization and the corresponding A_p values for $\alpha=0.8$ in augmented network



شکل ۸- توزیع مکانی احتمال پذیرش در شبکه باران سنجی

بهینه به همراه موقعیت ایستگاه های جدید پیشنهادی

Figure 8- Spatial distribution of acceptance probabilities in augmented network and their new locations

نتیجه گیری

تخمین دقیق تغییرات مکانی بارندگی در حوضه های آبریز همواره چالشی در مباحث مدل سازی بارش رواناب و همچنین بررسی تغییرات بیلان منابع آبی بوده است. بنابراین ارزیابی عملکرد شبکه ایستگاه های باران سنجی در حوضه ها از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. اما اغلب عدم وجود یک معیار مناسب برای این امر احساس شده است. روش احتمال پذیرش می تواند به عنوان یک روش ساده و کاربردی این مسئله را در مطالعات منابع آب حل نماید. این روش مبتنی بر مدل زمین آماری کریجینگ برای ارزیابی و بهینه یابی شبکه ایستگاه های باران سنجی می باشد و مفهوم آن بر اساس درصدی از مساحت منطقه با دقت پذیرش (A_p) می باشد. از مزیت های بسیار مهم این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) در نظر گرفتن بارندگی نقطه ای (به جای در نظر گرفتن میانگین) در بررسی دقت تخمین توزیع مکانی بارش.
- ۲) انعطاف پذیری بالا، به طوری که پارامترهای معادله احتمال پذیرش نسبت به مقیاس زمانی بارش (ساعتی یا سالانه) و میزان خطا در وسایل اندازه گیری بارندگی قابل تعیین می باشند.

- ۳) کمی سازی میزان مشارکت هر ایستگاه باران سنج در دقت تخمین توزیع مکانی بارندگی.

منابع

- Bastin, G., Lorent, B., Duque, C., Gevers, M. 1984. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of raingauge locations. *Water Resources Research*, 20(4): 463-470.
- Berne, A., Krajewski, W. F. 2013. Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential?. *Advances in Water Resources*, 51, 357-366.
- Bogardi, I., Bardossy, A. 1985. Multicriterion network design using geostatistics. *Water Resources Research*, 21(2): 199-208.
- Bras, R. L., Colón, R. 1978. Time averaged areal mean of precipitation: Estimation and network design. *Water Resources Research*, 14(5): 878-888.
- Bras, R. L., Rodríguez Iturbe, I. 1976. Network design for the estimation of areal mean of rainfall events. *Water Resources Research*, 12(6): 1185-1195.
- Cheng, K. S., Wei, C., Cheng, Y. B., Yeh, H. C., Liou, J. J. 2008. Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14): 2555-2564.
- Hershfield, D. M. 1965. On the spacing of raingages. In *Proceedings of the WMO/IASH Symposium on Design of Hydrometeorologic Networks*. International Association Science. Hydrololgy Publications, 67: 72-79.
- Hosking, J. R. M. 1994. The Four-Parameter Kappa distribution. *IBM Journal of Research and Development*, 38(3): 251-258.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. 1997. *Regional frequency analysis: An approach based on L-Moments*. Cambridge University Press, New York, USA.
- Hughes, J. P., Lettenmaier, D. P. 1981. Data requirements for kriging: estimation and network design. *Water Resources Research*, 17(6): 1641-165.
- Kassim, A. H. M., Kottegoda, N. T. 1991. Rainfall network design through comparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal*, 36(3): 223-240.
- Pannatier, Y. 1996. *VARIOWIN software for spatial data analysis in 2D*. Springer, New York. Lausanne Edition Springer, Institut of Mineralogy, University of Lausanne.
- Pardo-Igúzquiza, E. 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, 210(1-4): 206-220.
- Rodríguez Iturbe, I., Mejía, J. M. 1974. The design of rainfall networks in time and space. *Water Resources Research*, 10(4): 713-728.
- Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Pande, S., Gharari, S., Davary, K. 2014. Assessment of rain-gauge networks using a probabilistic GIS based approach. *Hydrology Research*, 45(4-5): 551-562.
- Sun, B., Petreson, T. C. 2006. Estimating precipitation normal for USCRN stations. *Journal of Geophysical research*, 111(D9): 1984-2012.
- Webster, R., Oliver, M. A. 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, UK, 271p.
- WMO. 1994. *Guide to hydrological practices*, 5th Ed., WMO No. 168, 735 p.



Application of acceptance probability approach for determination of optimal rain gauge network density (Case study: South Khorasan province)

M. Pourreza-Bilondi^{1*}, M. Shafiei², F. Shahabi Fard³, H. Mousazadeh⁴

Received: 11/11/2017

Accepted: 16/07/2018

Abstract

For accurate estimation of rainfall, as a key element in agricultural and water balance studies, an optimum density of rain gauges is required. Although many approaches based on geostatistic are developed to optimize rain gauges network, but majority of them suffer from drawbacks. This study aimed to assess a newly developed method in geostatistic based on acceptance probability, for designing the rain gauge network with least error in South Khorasan province. The linear moment method was used for testing the homogeneity of the study stations. Then, by choosing a suitable semi-variogram, the acceptance probability in the region was calculated. Based on the spatial pattern of annual rainfall, the acceptance probability was worked out for various parts of the province and the acceptance accuracy (AP) values were analyzed at different levels of probability. The results showed that 20 stations of existing network had no significant effect on estimating the rainfall and it can be recommended to shift their location in order to obtain an optimal network. Also, similar to the existing network of 63 stations, the remaining 43 stations could cover 36% of the province at the probability acceptance level of 80%. Besides, the results indicated that by adding 27 rain gauges to the locations specified in the optimal density, the performance of the optimized network will be approximately doubled comparing to previously existing one, which means 65% coverage of province.

Keywords: Climatological variogram, Kriging variance, Acceptance accuracy, Density, Rain gauge



¹ Assistant professor, Department of water engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*Corresponding Author Email Address: mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)

DOI: 10.22125/agmj.2018.141606.1023

² Assistant professor, Hydroinformatics Department, East Water and Environment Research Institute (EWERI), Mashhad, Iran

³ M. Sc., Manager of Studies Office, South Khorasan Water Authority, Birjand, Iran

⁴ Ph. D. Student, Department of geology, International Campus, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran & Department of Environment and Water Resources Quality, South Khorasan Regional Water Company, Birjand, Iran