تحلیل فضایی و بهینه‌سازی شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان با استفاده از واریانس خطای کریجینگ

آرش زندکریمی[1] داود مختاری [2]

شیدا زندکریمی [3]

تاریخ دریافت مقاله: ۹٤/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۰٦

****

چکیده

در راستای برداشت دقیق داده‌های بارش به عنوان مهمترین ورودی مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، شبکه‌ی باران‌سنجی نقش اساسی را ایفا می‌کند. با طراحی شبکه‌ی باران‌سنجی بهینه می‌توان با حداقل هزینه و عدم اطمینان داده‌های بارش را برداشت نمود. به منظور بهینه‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی روش‌های متفاوتی ارایه شده که در این میان روش‌های زمین آمار به گستردگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیق حاضر وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان و پتانسیل بهینه‌سازی موقعیت آنها را با استفاده از روش‌های زمین آمار بر مبنای واریانس خطای کریجینگ و با در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه بررسی نموده است. در این تحقیق به منظور تحلیل فضایی و برآورد واریانس خطا از داده‌های بارش ۱٤۵ ایستگاه هواشناسی در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۳-۲۰۰۱) و نقشه‌ی رقومی ارتفاع ماهواره‌ی SRTM استفاده گردیده و با توجه به وسعت زیاد منطقه‌ی مورد مطالعه و تغییرات زیاد داده‌های بارش، ناحیه‌بندی منطقه یا خوشه‌بندی ایستگاه‌ها صورت گرفته است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ارتفاعات بیشترین سهم را در ایجاد خطای برآورد بارش داشته و با حذف ایستگاه‌هایی که در موقعیت مناسبی واقع نشده‌اند می‌توان هزینه‌ی نگهداری ایستگاه‌ها را کاهش داد؛ همچنین با حذف یا جابجایی ۸ ایستگاه از ایستگاه‌های موجود و اضافه نمودن ۲۸ ایستگاه جدید به شبکه‌ی باران‌سنجی، مقادیر میانگین واریانس خطا ۱۱% کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش در بخش‌های مرکزی استان با ۲٤،۰۳% می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر به منظور کاربرد روش‌های زمین آمار در تحلیل فضایی و بهینه‌سازی ایستگاه‌های باران‌سنجی در نواحی کوهستانی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و نقشه‌های تولید شده نیز برای سازمان‌های اجرایی (نظیر سازمان هواشناسی، وزارت نیرو و ...) از ارزش کاربردی بالایی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، زمین آمار، واریانس خطا، شبکه‌ی باران‌سنجی، استان کردستان

****

۱- کارشناس ارشد سنجش از دور دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) arashz1946@yahoo.com

۲- استاد گروه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد آمایش سرزمین-محیط زیست دانشگاه پیام نور تهران شرق shaidaz1946@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

پیش‌بینی وقوع سیل و کاهش خسارات ناشی از آن به شدت تحت تأثیر مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی و توزیع زمانی- فضایی بارش قراردارد (Tsintikidis et al, 2002:176؛ Younger et al,2009:1989؛ Arnaud,2011:398؛ Jung et al,2014:267).

همچنین اندازه‌گیری مستقیم و برداشت ویژگی‌های بارش به عنوان مؤلفه‌های اساسی مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک از طریق باران‌سنج صورت می‌گیرد (Westcott,2009:27 Bakhtiari et al,2013:45)؛ لذا تراکم و توزیع بهینه باران‌سنج‌ها در شبکه‌ی باران‌سنجی[1] در موفقیت بیشتر طرح‌های آبی و استفاده مؤثر از اطلاعات تأثیرگذار است (کریمی حسینی،۱۳۸۹: ۱).

هدف از طراحی شبکه‌ی باران‌سنجی داشتن تعداد مطلوب و مکان‌های بهینه برای ایستگاه‌ها می‌باشد (Adhikary, 2014:2583). شبکه‌ی باران‌سنجی بهینه داده‌های بارش را با حداقل عدم اطمینان و هزینه برداشت مینماید (Kassim and Kottegoda,1991:225؛ 207:;Pardo-Igúzquiza,1998 Basalirwa et al.,1993:415). بنابراین در طراحی شبکه می‌بایستی با دو رویکرد عمل نمود:

۱- حذف ایستگاه‌های نزدیک به هم به منظور کاهش هزینه

۲- گسترش شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی با نصب و راه‌اندازی ایستگاه‌های اضافی در موقعیت‌های مناسب جهت کاهش عدم قطعیت (Mishra and Coulibaly,2009:15).

با توجه به اهمیت طراحی شبکه‌ی باران‌سنجی، در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی بدین منظور توسعه یافته‌اند که از این میان روش‌های زمین آمار مخصوصاً کریجینگ به دلیل کاربردی بودن و فراهم نمودن واریانس تخمین[2]، عموماً در طراحی شبکه مورد توجه بوده است (Adhikary, 2014:2584).

اطلاعات بیشتر در مورد روش‌های زمین‌آمار را می‌توان در کتاب (Webster and Oliver, 2007) مشاهده نمود. در بسیاری از مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی طراحی شبکه از روش کریجینگ به تنهایی استفاده شده است (Papamichail, 1996; Loof et al., 1994؛ Goovaerts, 2000؛ Tsintikidis et al., 2002؛ Cheng et al., 2008؛ کسایی رودسری و همکاران:۱۳۸۹؛ رحیمی بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹؛ شفیعی و همکاران،۱۳۹۲) اما در بعضی از مطالعات از کریجینگ در ترکیب با سایر روش‌ها از جمله آنتروپی (Chen et al., 2008؛ Yeh et al., 2011) و یا تجزیه و تحلیل چند متغیره (Shaghaghian and Abedini, 2013) استفاده شده‌است.

محاسبه‌ی خطا در روش کریجینگ تابع نیم تغییرنمای (ساختار مکانی) متغیر موردنظر است 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 (رحیمی بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹: ۲۷). در این روش لزوماً n ایستگاه، تخمین بهتری از m ایستگاه (n>m) ارایه نخواهد داد (Tsintikidis et al,2002:184) که این ویژگی بسیار مهم یکی از نقاط قوت روش کریجینگ می‌باشد.

اگرچه امروزه پیشرفت‌های زیادی در تخمین بارش به وسیله‌ی تصاویر ماهواره‌ای ایجاد شده است (Ali, et al,2005:1700). اما این تصاویر ماهواره‌ای به تنهایی هنوز هم نمی‌تواند برآورد دقیق بارش را برای مطابقت با اندازه‌گیری باران‌سنج فراهم کند (Cheng et al,2008:2554) و به منظور اندازه‌گیری تغییرات مکانی بارش از ایستگاه‌های بارانسنجی استفاده می‌شود (نظیف و همکاران،۱۳۹۲: ۱).

در گذشته، این ایستگاه معمولاً بدون هیچ استاندارد و با توجه به تراکم جمعیت و یا امکان‌سنجی ترافیک احداث می‌شدند (Chen et al,2008:4626). برای رسیدن به داده‌های قابل اطمینان بارش نیاز به یک شبکه‌ی منظم از ایستگاه‌ها وجود دارد (Bakhteari et al,2013:47). اگر تعداد ایستگاه‌های مورد نظر زیاد باشد از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و در صورت کم بودن آنها میزان تخمین بارندگی با واقعیت محل، تفاوت فاحشی خواهد داشت (اعمی ازغدی و همکاران،۱۳۸۹: ۲). با این- حال تراکم ایستگاه‌های باران‌سنجی در اکثر نقاط دنیا از مقادیر پیشنهادی سازمان جهانی هواشناسی (WMO)[3] کمتر است (Awadallah,2011:36). این سازمان تراکم ایستگاه‌ها را برای

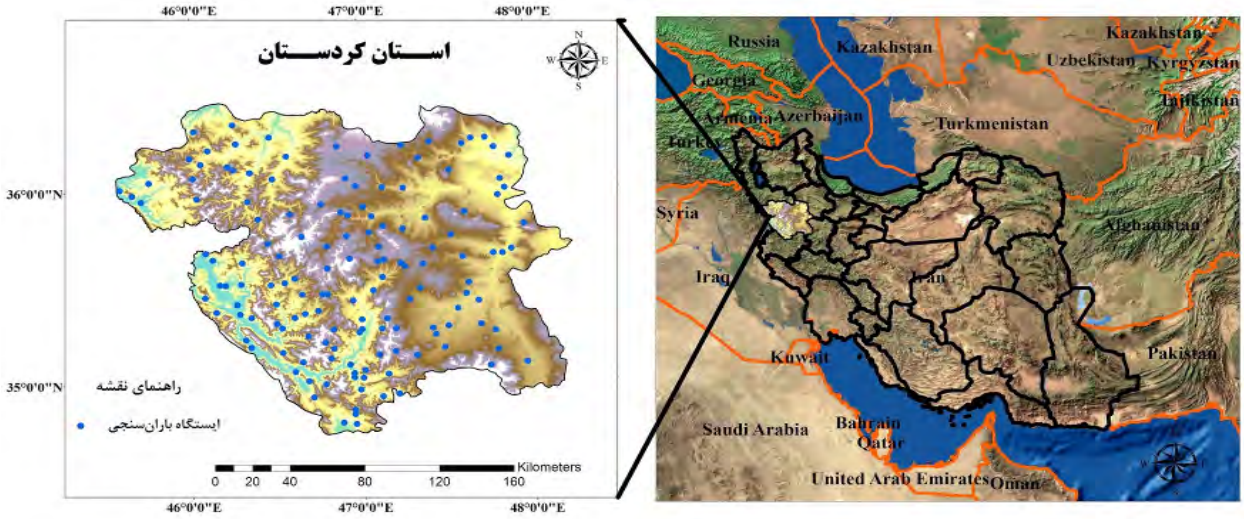
1- Rain gage network

2- Variance Estimation

3- World Meteorological Organization

Archive of SID

www.SID.ir



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی استان کردستان

مناطق مسطح به ازای هر ۵۰۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه و در حوضه‌های کوهستانی با بارش نامنظم در هر ۲۵ کیلومتر مربع یک ایستگاه پیشنهاد نموده است *(WMO,1994:254)*. تحقیق حاضر با هدف بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی استان کردستان با استفاده از واریانس برآورد کریجینگ و با در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه صورت گرفته است؛ تابع هدف این پژوهش حذف ایستگاه‌های نامطلوب و تقویت شبکه با اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید می‌باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- معرفی محدوده مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان کردستان در غرب کشور ایران واقع شده و ۸/۱ درصد مساحت آن را به خود اختصاص داده است (نگاره ۱). این استان با دارا بودن بارندگی حدود ۵۰۰ میلی‌متر (بیش از دو برابر بارندگی متوسط ایران) یکی از پرآب‌ترین استان‌های ایران است و نقش عمده‌ای را در بیلان آبی کشور ایفا می‌کند.

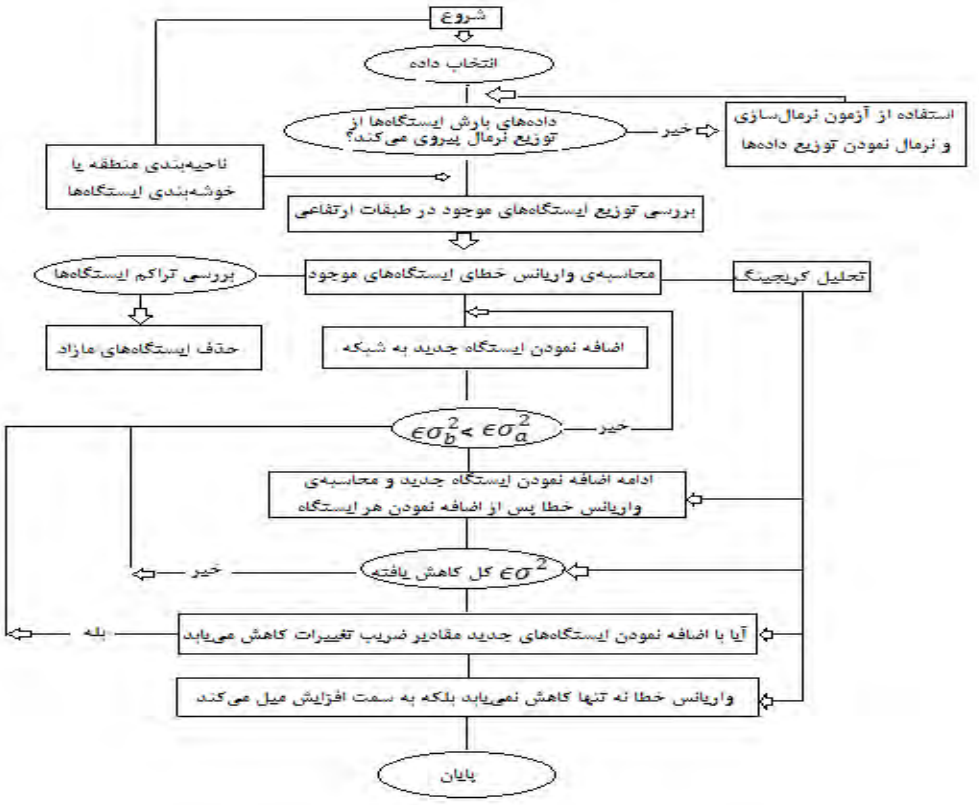
استان کردستان دارای دو نوع آب و هوای متمایز می‌باشد، در نواحی کوهستانی و دشت‌های مرتفع، آب و هوای با زمستان‌های بسیار سرد و در دره‌ها و محدوده‌هایی از قلمروی غربی استان، دارای آب و هوای معتدل است. وجود ارتفاعات و دره‌های عمیق شرایط متنوعی در سطح این استان فراهم آورده که ضرورت مطالعات در زمینه‌ی تحلیل فضایی ایستگاه‌های باران‌سنجی و شرایط هیدروکلیماتیک را ایجاب می‌نماید.

در این تحقیق و در راستای بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی استان کردستان از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و کلیماتولوژی استفاده شده است. پس از بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌ها، دوره‌ی آماری (۲۰۱۳- ۲۰۰۱) برای مطالعه انتخاب شده و از میان کلیه ایستگاه‌های داخل حوضه، ایستگاه‌هایی که تا سال ۱۳۹۲ دارای ۱۲ سال آمار کامل یا قابل بازسازی بودند برای مطالعه برگزیده شدند. در ادامه کیفیت داده‌ها و نرمال بودن سری داده‌های ثبت شده با استفاده از آزمون آماری Kolmogorov – Smirnov مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از توابع تحلیلی نرم‌افزارهای ArcGIS 10.2.2، Surfer 11و IBM SPSS Statistics 22 استفاده شده است.

بعد از بررسی داده‌های ایستگاه‌های موجود، با توجه به دوره‌ی آماری ایستگاه‌ها و با در نظر گرفتن اینکه در بازسازی داده‌های بارندگی مفقود، حداقل طول دوره‌ی مشترک آماری آنها نباید کمتر از ۱۰ سال باشد *(Sun & peterson, 2006: 1990)*، آزمون نرمال بودن داده‌ها صورت گرفته و در نهایت ۱۴۵

Archive of SID

www.SID.ir



نگاره ۲: فلوچارت مراحل اجرای پژوهش

ایستگاه برای تحلیل شبکه‌ی موجود و بهینه نمودن آن، برگزیده شده‌اند.

۲-۲- روش تحقیق

پس از انتخاب داده‌های نرمال و مکانی نمودن آنها، به واسطه‌ی وسعت زیاد منطقه و تغییرپذیری متوسط بارش سالانه، سطح استان کردستان به نواحی کوچکتر با تغییرات کمتر میانگین بارندگی، تقسیم شده است. تقسیم‌بندی منطقه یا خوشه‌بندی[1] ایستگاه‌ها با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.2.2 و بر مبنای حوضه‌های آبریز اصلی صورت گرفته است. در مرحله‌ی بعدی با توجه به اهمیتی که ارتفاعات در دریافت بارندگی و تأمین آب دارند، توزیع باران‌سنج‌ها در طبقات ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفته است، سپس مقادیر توزیع مکانی بارندگی و واریانس خطا محاسبه شده است.

وجود باران‌سنج اضافی در شبکه و نگهداری از آن، نیازمند هزینه‌هایی می‌باشد *(کسایی رودسری و همکاران،۱۳۸۹: ۳۶)* و با توجه به اینکه ایستگاه‌هایی که در فاصله نزدیک به هم واقع شده و در یک دامنه‌ی ارتفاعی قرار دارند همچنین مقادیر واریانس خطای آنها نیز مشابه می‌باشد، می‌توانند حذف گردند *(رحیمی‌بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹: ۳۳)*، در این مرحله حذف ایستگاه‌های مازاد در دستور کار قرار گرفت. با حذف هر ایستگاه مقادیر واریانس خطا محاسبه گردیده و با اطمینان از کاهش آن، حذف ایستگاه‌های دارای شرایط مذکور ادامه یافت، پس از حذف ایستگاه‌ها از مناطقی که تراکم آنها بیش از حد نیاز است، وارد نمودن ایستگاه جدید به شبکه خصوصاً در ارتفاعات مورد بررسی قرار گرفت به صورتی که پس از اضافه نمودن هر ایستگاه تحلیل کریجینگ بر روی کل شبکه صورت گرفته، در این مرحله اولویت احداث ایستگاه برای مناطقی است که واریانس

1- Clustering

Archive
www.SID.ir

خطای آنها بالا می‌باشد، بعد از اضافه شدن هر ایستگاه، مجدداً واریانس خطا در کل سیستم محاسبه شده است. اضافه نمودن ایستگاه جدید به شبکه تا زمانی ادامه می‌یابد که خطای شبکه به حداقل مقدار خود برسد، در این حالت موقعیت ایستگاه‌های جدید بهینه گردیده و شبکه‌ی اصلاح شده جدید طراحی شده است. نگاره (۲) مراحل اجرای پژوهش را نشان می‌دهد.

۲-۲-۱- بررسی توزیع داده‌ها و آماده‌سازی آنها

با توجه به اینکه یکی از پیش شرط‌های استفاده از داده‌ها در درونیابی، نرمال بودن توزیع داده می‌باشد *(نادی و همکاران،۱۳۹۱: ۱۲۲)*. در این پژوهش در گام اول توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون Kolmogorov – Smirnov در سطح ۹۵% بررسی شده است.

۲-۲-۲- خوشه‌بندی ایستگاه‌ها

وسعت زیاد منطقه و تغییرپذیری متوسط بارندگی، باعث ایجاد واریانس زیاد در مقادیر بارش می‌گردد، بنابراین می‌بایستی تقسیم‌بندی منطقه و خوشه‌بندی ایستگاه‌ها صورت گیرد، این تقسیم‌بندی با توجه به حوضه‌های آبریز اصلی و براساس این اصل که توپوگرافی باعث ایجاد الگوی متفاوت بارش گردیده و تأثیر مستقیمی بر توزیع زمانی-مکانی آن دارد *(Wei et al, 2014:4627)*، صورت گرفته است. در این پژوهش با استفاده از نقشه‌ی رقومی ارتفاع منطقه و بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در نرم‌افزار ArcGIS ۱۰,۲,۲، خوشه‌بندی ایستگاه‌ها و تقسیم‌بندی منطقه صورت گرفته است.

۲-۲-۳- بررسی توزیع ایستگاه‌ها در طبقات ارتفاعی

بررسی نقشه‌های توپوگرافی استان کردستان نشان می‌دهد که ارتفاع این منطقه بین ۷۰۸ تا ۳۲۰۷ متر نوسان دارد، این در حالی است که ایستگاه‌های هواشناسی آن در محدوده‌ی ۸۳۰ تا ۲۳۹۲ متر قرار دارند. بنابراین با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تغییرات شدید توپوگرافی و اهمیتی که ارتفاعات در دریافت بارندگی و تأمین آب دارند، توزیع ایستگاه‌های بارانسنجی در طبقات ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفته تا در صورت نیاز، همگنی[1] بین توزیع ایستگاه‌ها و طبقات ارتفاعی ایجاد گردد.

۲-۲-۴- محاسبه‌ی واریانس خطای و بررسی تراکم ایستگاه‌ها برای تعیین ایستگاه‌های مازاد

روش کریجینگ یکی از روش‌های پیشرفته زمین آمار است *(گلمحمدی و همکاران،۱۳۸۶: ۵۰۷)*. این روش تخمین‌گر خطی ناارایب با کمترین واریانس بوده *(نورزاده حداد،۱۳۹۲: ۷۴)* که در ابتدا برای ارزیابی منابع طبیعی پیشنهاد شد *(Zho, et al. 2013,33)* در واقع روش کریجینگ یک میانگین متحرک وزن‌دار است *(جلالی و همکاران،۱۳۹۲: ۱۹۷)* که به عنوان بهترین تخمینگر خطی ناارایب شناخته می‌شود *(مهرشاهی و خسروی،۱۳۸۷: ۲۳۶)*. مطلق بودن تخمین در درونیابی از ویژگی‌های عمده این روش است *(میرموسوی،۱۳۸۸: ۱۱۲)*. به طور کلی تغییرات فضایی در روش کریجینگ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید *(فرجی سبکبار و عزیزی،۱۳۸۵: ۸)*.

(۱)

$$\acute{Z} = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \, Z\,(S_i)$$

که در آن Z(si)، برآورد آماری از متغیر موردنظر، λ i، وزن آماری اختصاص داده شده به نمونه، s0، فاصله از نقطه نمونه، N، تعداد نقاط نمونه می‌باشد. نیم تغییر نمای داده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود.

(۲)

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} [Z\,(u) - Z\,(u+d)]^2$$

N(d) برابر تعداد زوج نمونه که به فاصله‌ی بردار d از یکدیگر واقع‌اند و Z(u) مقدار پارامتر موردنظر در موقعیت u می‌باشد *(کسایی رودسری،۱۳۸۹:۳۶)*. واریانس خطای مقادیر حقیقی و برآوردی با استفاده از فرمول ۳ به دست می‌آید.

1- Homogeneity

Archive of SID

www.SID.ir

$$E\sigma^2 = 2\sum_{i=1}^{n}\lambda_i.\gamma_{0i} - \gamma_0 - \sum_{i=1}^{n}.\sum_{j=1}^{n}\lambda i.\gamma_{ij} \quad (۳)$$

که در آن n = تعداد داده‌ها، λ i = وزن داده‌ها در موقعیت i، γ_0 = مقادیر نیم تغییرنما به ازای h=۰، γ_{0i} = مقادیر نیم تغییرنما بین i امین داده و نقطه‌ی موردنظر، γ_{ij} = مقدار واریوگرام بین i و j می‌باشد. با توجه به اینکه واریانس کریجینگ محاسبه شده تابع ویژگی‌های نیم تغییرنما می‌باشد بنابراین غیرمستقیم با مقدار واقعی داده‌ها ارتباط دارد. ویژگی‌هایی مانند فاصله نمونه‌ها تا نقطه‌ی برآورد و نحوه‌ی پراکندگی نقاط نمونه‌برداری، حول نقطه‌ی برآورد، در ساختار مکانی و در نتیجه در تغییرنما منعکس می‌شود *(رحیمی بندآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹: ۳۰)*. بنابراین با تکیه بر ویژگی‌های ذکر شده و بررسی تراکم ایستگاه‌ها در سطوح مختلف حوضه، نقاطی به عنوان کاندید حذف انتخاب و پس از حذف هر ایستگاه، مقادیر واریانس برآورد محاسبه و با کاهش آن صحت تصمیم‌گیری تأیید می‌شود.

۲-۲-۵- اضافه نمودن ایستگاه‌های پیشنهادی و محاسبه‌ی واریانس خطای شبکه‌ی جدید

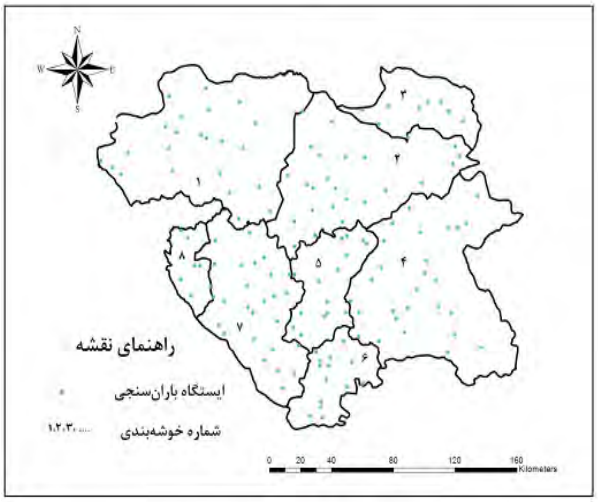
به منظور تقویت شبکه‌ی موجود پس از حذف ایستگاه‌های مازاد، ایستگاه‌هایی به شبکه اضافه می‌گردد.

با توجه به اینکه به فرض نرمال بودن توزیع خطای برآورد، واریانس خطا باید کمتر از واریانس داده‌های مشاهده شده باشد *(مدنی،۱۳۷۳: ٥٤)*، نقاطی که در آنها واریانس خطا، مساوی و یا بزرگتر از مقدار واریانس داده‌ها بود به عنوان اولویت اول احداث ایستگاه در نظر گرفته می‌شود، با اضافه نمودن هر ایستگاه واریانس خطای کل شبکه مجدداً محاسبه گردیده و در صورتی که کاهشی در آن صورت گیرد به معنای انتخاب موقعیت درست برای احداث ایستگاه می‌باشد و در غیر این صورت می‌بایستی موقعیت ایستگاه پیشنهادی تغییر کند. دو مرحله آخر تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که مقادیر واریانس خطا در تمامی خوشه‌ها به حداقل مقدار خود برسد.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- تقسیم‌بندی منطقه و خوشه‌بندی ایستگاه‌ها

پس از بررسی توزیع داده‌ها و اطمینان از نرمال بودن توزیع آنها، خوشه‌بندی ایستگاه‌ها صورت گرفته است، این کار به منظور یکنواخت نمودن داده‌ها با توجه به تغییرات زیاد میانگین بارندگی سالیانه در سطح منطقه صورت گرفته و کل منطقه‌ی مورد مطالعه به ۸ خوشه تقسیم شده است. نگاره ۳ پراکنش ایستگاه‌ها در خوشه‌بندی را نشان می‌دهد.



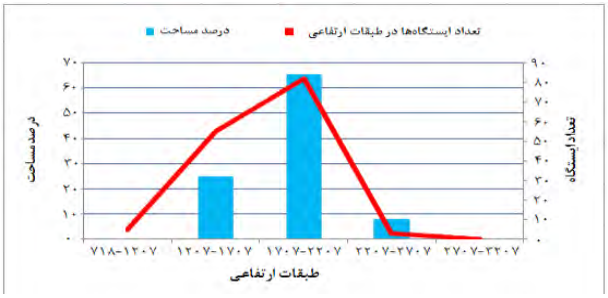
نگاره ۳: خوشه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان

۳-۲- بررسی توزیع ایستگاه‌ها در طبقات ارتفاعی

با توجه به اهمیت ارتفاعات در دریافت بارش و تأمین آب منطقه، طبقات ارتفاعی و تعداد ایستگاه‌های مستقر در هر طبقه بررسی گردید و مشخص شد که طبقه‌ی ۳ (۱۷۰۷-۲۲۰۷ متر) با ٦٥/٤٦% مساحت، بالاترین تعداد (۸۲ ایستگاه) را در خود جای داده و از طرفی طبقه‌ی ٤ ارتفاعی (۲۲۰۷-۲۷۰۷ متر) با اینکه ۸/۲۷% مساحت منطقه را شامل شده، فقط ۳ ایستگاه بارانسنجی در آن قرار دارد (نگاره ٤).

این در حالی است که طبقه‌ی ۱ (۷۱۸- ۱۲۰۷ متر) با ۰/٦۹% مساحت دارای ۵ ایستگاه می‌باشد.

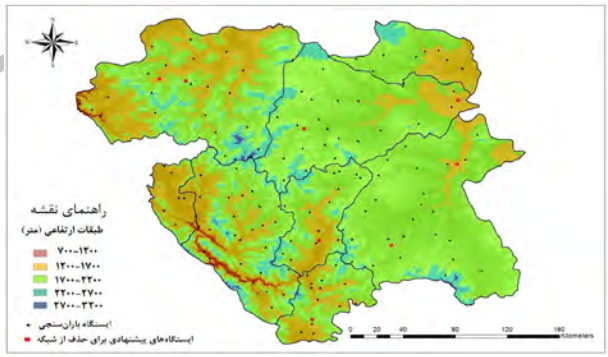
Archive of SID
www.SID.ir



نگاره ٤: پراکنش ارتفاعی ایستگاه‌های موجود در منطقه

۳-۳- محاسبه‌ی واریانس خطا و بررسی تراکم ایستگاه‌ها برای تعیین ایستگاه‌های مازاد

به منظور کاهش هزینه، در مناطقی که تراکم ایستگاه‌ها بالا بوده و در یک دامنه ارتفاعی قرار دارند همچنین واریانس خطای مشابه‌ی را نشان می‌دهند اقدام به حذف ایستگاه‌های مازاد گردیده است. نگاره ۵ ایستگاه‌هایی که لازم است حذف و یا موقعیت آنها تغییر یابد را نشان می‌دهد.

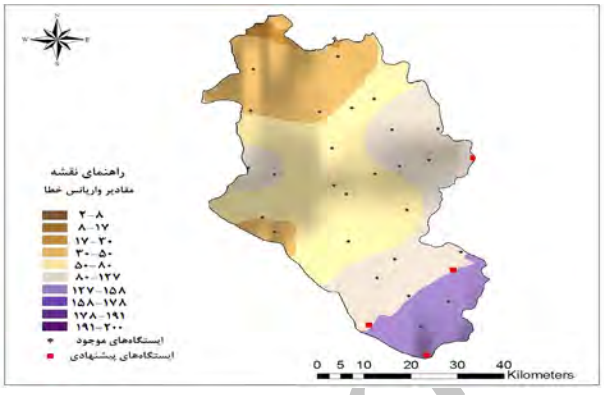


نگاره ۵: طبقات ارتفاعی و ایستگاه‌های پیشنهادی برای حذف از شبکه

مشخصات ۸ ایستگاه پیشنهادی برای حذف از شبکه‌ی موجود در جدول ۱ نشان داده شده است.

۴-۳- اضافه نمودن ایستگاه‌های پیشنهادی و محاسبه‌ی واریانس خطای شبکه‌ی جدید

اضافه نمودن ایستگاه جدید به شبکه بر اساس $E\sigma^2$ (واریانس خطا)[1] صورت گرفته است، به صورتی که نقاطی با واریانس خطای مساوی و یا بزرگتر از مقدار واریانس داده به عنوان اولویت اول احداث ایستگاه در نظر گرفته شده است. نقاطی که واریانس خطای آنها بین واریانس داده‌ها و یک دوم واریانس داده‌ها قرار دارد به عنوان اولویت دوم و در نهایت اولویت سوم به نقاطی تعلق دارد که واریانس آنها بین یک دوم و یک چهارم واریانس می‌باشد *(رحیمی‌بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹: ۳۰)*. در این پژوهش به منظور بالا بردن دقت در تمامی خوشه‌ها به صورت مجزا مقادیر واریانس خطا محاسبه گردیده و به ترتیب اولویت ایستگاه‌های پیشنهادی به شبکه اضافه شده است. نگاره ٦ مقادیر واریانس خطا و موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی را در خوشه‌ی ۷ نشان می‌دهد، برای سایر خوشه‌ها نیز همانند نگاره ٦ مقادیر واریانس خطا محاسبه می‌گردد.



نگاره ٦: پراکنش مقادیر واریانس خطا و موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی در خوشه‌ی ۷

لازم به ذکر است با اضافه نمودن هر ایستگاه مقادیر واریانس خطای کل شبکه محاسبه گردیده و در صورت عدم کاهش و یا افزایش مقادیر آن، موقعیت ایستگاه پیشنهادی بایستی تغییر یابد. بنابراین نهایی کردن موقعیت هر ایستگاه بعد از تمرین و تکرار صورت می‌گیرد. اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید تا زمانی که مقادیر واریانس خطا به کمترین مقدار خود برسد، ادامه می‌یابد. نگاره ۷، موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی و ایستگاه‌های موجود را به صورت توأمان نشان می‌دهد؛ پراکنش ارتفاعی ایستگاه‌های پیشنهادی نیز در ۸ آمده است.

1- Error variance

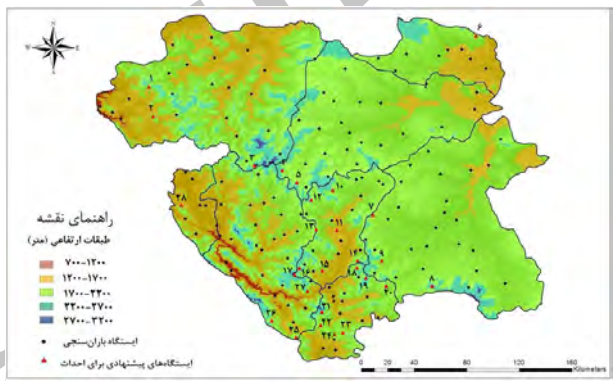
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱: اختلاف واریانس تغییرات پس از حذف ایستگاه‌های مازاد در حوضه

ردیف	شماره خوشه	نام ایستگاه	طول	عرض	بارش	واریانس خطا
۱	۱	کسنزان	٦٠٩٤٧٢,٩٢	٣٩٩٩٤٢٢,٦٥	٥٢٧,٩٨	٥٩,١٧
۲	۱	اداه سقز	٥٩٥١١١,١٧	٤٠٠٠٦١٠,٤٩	٤٦٠,١٩	٧٣,٢٦
۳	۲	چنگیزقلعه	٦٧٣٨٣٣,١٨	٣٩٧١٦١١,٤٩	٣٢٣,٠٧	٤٨,٣٠
٤	۲	بیانلو	٧٥٧٦٥٢	٣٩٨٨٢١٧	٢٩٥,٤٧	٥١,٤٨
٥	٤	سلامت آباد	٧٥٦٨٤٣,٧١	٣٩٥٠٦٥٧,١٣	٢٩٨,٧٤	١٥٠,٥٩
٦	٤	حسن‌آباد دهگلان	٧٢١٣٩٠,٦٣	٣٩٠٣٤٨١,٩	٣٨٦,٤٢	٧٣,٥٦
٧	٥	سنندج	٦٨١٨٨٤,٤٥	٣٩٠٦٢٩٨,٤٥	٤٠١,٣٥	١٦٦,٣٩
٨	٦	سورسور	٦٧٨٢٤٠,٩	٣٨٥٩٩٩١,٣٨	٦٥٠,٢٥	٢٠٠

جدول ۲: اختلاف واریانس خطا در شبکه‌ی جدید و موجود

شماره خوشه	درصد واریانس خطای اولیه	درصد واریانس خطای نهایی	اختلاف
۱	٥٦,٥٦	٥١,٣٩	٥,١٧
۲	٨٢,٣٥	٧٠,٣٩	١١,٩٦
۳	٥٩,٦٤	٤٧,١١	١٢,٥٣
٤	٦٨,٥٩	٥٥,٢٩	١٣,٣
٥	٨٥,٢٩	٦١,٢٦	٢٤,٠٣
٦	٦٣,٥٩	٦٢,٠٢	١,٥٧
۷	٧٨,١٥	٧١,١٤	٧,٠١
۸	٥٩,٩٩	٥٠,٧١	٩,٢٨



نگاره ۷: موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی و پراکنش آنها در طبقات ارتفاعی

نگاره ۸: توزیع ایستگاه‌های پیشنهادی در طبقات ارتفاعی

به منظور بررسی کارایی شبکه و اطمینان از بهبود برداشت داده‌ها مقادیر واریانس خطا قبل و بعد از بهینه‌سازی موقعیت ایستگاه‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول ۲ میانگین واریانس خطای هر خوشه را در دو حالت نشان می‌دهد.

جدول ۳ موقعیت احداث ایستگاه‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ۲۸ ایستگاه جهت تقویت شبکه به شبکه‌ی موجود اضافه گردیده است.

٤- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه بارش به عنوان ورودی اصلی در برنامه‌ریزی توسعه پایدار منابع آب محسوب می‌شود، در این مطالعه تقویت شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات قبلی عموماً آنتروپی را به عنوان مدل اصلی جهت اصلاح شبکه در نظر گرفته‌اند، لذا با توجه به محدودیت این روش‌ها در استفاده نکردن از ویژگی‌های نیم تغییرنما، در این پژوهش از روش

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳: اختلاف واریانس تغییرات پس از حذف ایستگاه‌های مازاد در حوضه

ردیف	طول (UTM)	عرض (UTM)	شماره خوشه	دهستان	نزدیکترین روستا	بارش (mm)	واریانس خطا
۱	۵۷۸۲۰۶,٤	۳۹۹۶۰۰۰	۱	شوی	صدبار	٦۲۱,۱۹	۱۷۵,٦٤
۲	۵۸۰۳۳۸,۷	۳۹۸۰۰۰۰	۱	پشت آربابا	کانی گویز	٦۸۹,۷۵	۱۸٤,۱٦
۳	٦۳۵۰۸۷,۷	۳۹۵۳۰۰۰	۱	گلچیدر	کانی تمرخان	٦۱۷,۵٤	۱۹۵,۷۱
٤	٦۵۰۰۸۸,۲	۳۹۵۰۱۵۰	۲	سارال	درویان فارس	۳۹۵,۷٤	۱٤۷,٤۳
۵	٦۵۸۰۲۷,۳	۳۹٤۳٤۳۹	۲	سارال	آقبلاق	٤۲٦,٤۵	۱۷۱,۱۹
٦	۷۵٤۵٦۱,۸	٤۰۲٤۲۳۱	۳	گرگین	تکیه	۳۳۹,۵٤	۷۵,٤۷
۷	٦۹۹۰۷۱,۸	۳۹۲۵٤۸۸	٤	قوری چای	ناوگران	۳۲۷,۸٦	۷۹,۵۳
۸	۷۳۰۹۵۳	۳۸۸٦۵۲۸	٤	پنجه‌علی جنوبی	مشیرآباد پنجه	۳۷۹,۵٦	۸۳,۰۷
۹	۷۰۳۷۵۹,٦	۳۹۰۰٤۵۲	٤	ئیلاق جنوبی	سرواله	٤۵۷,۵٤	۸٤,٤۹
۱۰	٦۷۷۳۹۵	۳۹۳۹۲۹٤	۵	حسین‌آباد جنوبی	باینچوب	٤۳۹,۷٦	٤٦,۱۷
۱۱	٦۷۹۵۸۱,۹	۳۹۱۷۳۰۷	۵	آرندان	اجگره	٤٦۱,۵٤	۱۰۱,۲۳
۱۲	٦٦۵۷٤۰	۳۹۳۳۸۷٦	۵	سراب قامیش	کانی تاله	٤۷۱,۵٤	۱۱٤,۹۵
۱۳	٦٦۸۳۸۷,۸	۳۹۱۷٦۰۱	۵	کلاترزان	تودار ملا	۵۱٦,۳٦	۱۳٦,۵٤
۱٤	٦۹۰۸۲٦,٦	۳۹۰۰٦٦٤	۵	حومه سنندج	کانی کوچک	٤٦۸,۰۵	۸۵,۷۱
۱۵	٦۷۱۷۲۳,۸	۳۸۹٤۹٤۵	۵	آبیدر	سرسوی سفلی	٤٦۷,۸۹	۱۳۷,۰٦
۱٦	٦۵۹٤۰٦,۵	۳۸۹٦۳۱٤	۵	ژاورود شرقی	تکیه هشمیر	٤۹۷,۳٤	۱۵۳,۳٦
۱۷	٦۵٦۸۰۷,٦	۳۸۹۲۹۵۵	۵	ژاورود شرقی	شیان	۵۱۰,۵٤	۱۷۵,٦۹
۱۸	٦۹۰٤٦۷,۵	۳۸۹٦٤۹۱	٦	نران	تجره	٤۳۵,۱٤	۱۸٦,۹۵
۱۹	٦۹۵۳۰۰,۵	۳۸۹۱۰۰۵	٦	نران	اشکفتان	٤۲۵,۱۹	۱۹۷,۱٦
۲۰	۷۰٦۲٤۰,۹	۳۸۸٦٦۳۰	٦	امیرآباد	صوفی آباد	٤۵۹,۷٦	۹۵,٦۳
۲۱	٦۷۱٤۰۹,٤	۳۸۷۲۲٦۳	٦	عوالان	یمینان علیا	۵۲۷,٦۵	۱۳۵,۵۱
۲۲	٦۷۰۹۳۳,۱	۳۸٦۵۰۹۳	٦	گاورود	آفریان علیا	۵۳۱,۹۵	۱٦۷,۵٤
۲۳	٦۸۲۹٤۸	۳۸٦۰۸۹۹	٦	بیلوار	بوانه	۵٤٦,۷٤	۱۸۳,۲۷
۲٤	٦۷۸۲٤۰,۹	۳۸۵۹۹۹۱	٦	بیلوار	کاظم‌آباد	٦۵۰,۲۵	۱٦۹,۱٤
۲۵	٦۵۷۷۱۸,٤	۳۸۵۸۳٤٦	۷	ژاورود	کلاتی	٤٦۵,۲٤	۱۳۷,۳۹
۲٦	٦٤٤۳۷۰,۲	۳۸٦۷٤۳٤	۷	ژاورود	تیلکوه	٤٤٦,۷۹	۸۵,۹۰
۲۷	٦٦۳۷۷۰,۸	۳۸۸۳۹۸٤	۷	ژاورود شرقی	وصی سفلی	٤۹۸,۵	۱۲۸,۳۳
۲۸	۵۹۵٦۳۷,۸	۳۹۳۱۱٤٦	۸	سردوش	خاوومیرآباد	۸۵۹,۱٤	۱۸٤,۱۵

Archive of SID

www.SID.ir

زمین آمار مبتنی بر واریانس خطای کریجینگ به سبب دقت بالا استفاده گردید؛ مقدار افزایش صحت در این روش تا حد زیادی به ویژگی‌های نیم تغییرنما (ساختار مکانی) بارش بستگی دارد که با بهره‌گیری از آن می‌توان قبل از احداث ایستگاه و آماربرداری، میزان کاهش واریانس برآورد را به ازای اضافه نمودن ایستگاه جدید محاسبه کرد؛ 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.

نکته‌ی دیگری که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد خوشه-بندی ایستگاه‌ها و لحاظ نمودن تغییرات بارش در سطوح گسترده است که در تحقیقات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است.

در این تحقیق و در راستای کاهش هزینه نگهداری ایستگاه‌ها، پس از خوشه‌بندی منطقه، ۸ ایستگاه که حذف آنها تأثیر چندانی در صحت برداشت داده ندارد در سطح استان مشخص گردید. سپس به منظور تقویت شبکه، بهینه‌یابی ایستگاه‌های جدید در دستور کار قرار گرفت و ۲۸ نقطه به عنوان مکان ایستگاه‌های پیشنهادی تعیین شد. برای مقایسه عملی نتایج، مقادیر واریانس خطا قبل و بعد از اضافه نمودن ایستگاه‌های پیشنهادی محاسبه گردید، همانطور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود میانگین واریانس خطای بارش سالانه در سطح استان حدود ۱۱% کاهش یافته که بیشترین کاهش مربوط به قسمت مرکزی استان با ۲٤/۰۳% می‌باشد. علت کاهش خطا، خوشه‌بندی ایستگاه‌های موجود بر اساس تغییرات مکانی بارش و همچنین اضافه نمودن ایستگاه‌های پیشنهادی در مناطق با امکان ایجاد خطای بالا می‌باشد.

براساس نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود پژوهشگران از نتایج این تحقیق، در پژوهش‌های آتی از الگوریتم‌های مختلف زمین آمار در ترکیب با سایر روش‌ها و همچنین در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، جهت رسیدن به دقت بالاتر استفاده نمایند. نتایج پژوهش حاضر به منظور کاربرد روش‌های زمین آمار در بهینه‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی در نواحی کوهستانی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و نقشه‌های تولید شده به دلیل افزایش دقت برداشت اطلاعات پایه و کمک به برنامه‌ریزی دقیق‌تر، برای سازمان‌های اجرایی (وزارت نیرو، سازمان هواشناسی و ...) از ارزش کاربردی بالایی برخوردار هستند.

منابع و مآخذ

۱- اعمی ازغدی، مکرم، آبشیرینی، شایسته زراعتی؛ علی، مرضیه، احسان، حسین (۱۳۸۹). مکانیابی و بهینه‌سازی ایستگاه‌های باران‌سنجی (مطالعه موردی شمال شرق خوزستان)، همایش ملی ژئوماتیک.

۲- جلالی، طهرانی، برومند، سنجری؛ قباد، محمدمهدی، ناصر، صالح (۱۳۹۲). مقایسه روش‌های زمین آمار در تهیه نقشه پراکنش مکانی برخی عناصر غذایی در شرق استان مازندران. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). شماره ۲۷، صفحات۱۹٦- ۲۰٤.

۳- رحیمی بندرآبادی، ثقفیان؛ سیما، بهرام (۱۳۸۹). بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی بر مبنای بارش ماهانه و سالانه. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال چهارم، شماره ۱۲، صفحات ۲۷-۳٦.

٤- شفیعی، قهرمان، ثقفیان؛ مجتبی، بیژن، بهرام (۱۳۹۲). ارزیابی و بهینه‌یابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی بر مبنای روش کریجینگ احتمالی (مطالعه موردی: حوضه گرگان-رود). تحقیقات منابع آب ایران. سال ۹، شماره ۲، صفحات ۹- ۱۸.

۵- فرجی سبکبار، عزیزی؛ حسنعلی، قاسم (۱۳۸۵). ارزیابی میزان دقت روش‌های درونیابی فضایی مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوضه کارده مشهد. پژوهش-های جغرافیایی، شماره ۵۸، صفحات ۱- ۱۵.

٦- کریمی حسینی، بزرگ حداد، هورفر، ابراهیمی؛ آزاده، امید، عبدالحسین، کیومرث (۱۳۸۹). مکانیابی ایستگاه‌های باران-سنجی با استفاده از آنتروپی. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. شماره ۱۱. صفحات ۱-۱۱.

Archive of SID

www.SID.ir

۷- کسایی رودسری، قهرمان، شریفی؛ بابک، بیژن، محمد باقر (۱۳۸۹). بررسی تراکم شبکه‌ی ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین آماری، مطالعه‌ی موردی: استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. شماره ۱۰، صفحات ۳۵-٤٤.

۸- گل‌محمدی، معروفی، محمدی؛ گلمر، صفر، کورش (۱۳۸٦). منطقه‌ای نمودن ضریب رواناب در استان همدان با استفاده از روش‌های زمین آماری و GIS. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. شماره ٤٦، صفحات ۵۰۱- ٥١٤.

۹- مهرشاهی، خسروی؛ داریوش، یونس (۱۳۸۷). ارزیابی روش‌های میانیابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایه‌ی مدل ارتفاعی رقومی جهت تعیین توزیع مکانی بارش سالانه، مطالعه‌ی موردی استان اصفهان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا. شماره ٤. صفحات۲۳۳- ۲٤۹.

۱۰- میرموسوی، مزیدی، خسروی؛ سیدحسین، احمد، یونس (۱۳۸۸). تعیین بهترین روش زمین آمار جهت تخمین توزیع بارندگی با استفاده از GIS، مطالعه موردی: استان اصفهان. فضای جغرافیایی، سال ۱۰، شماره ۳۰، صفحات. ۱۰۵- ۱۲۰.

۱۱- نادی، جامعی، بذرافشان، جنت رستمی؛ مهدی، مژده، جواد، سمیه (۱۳۹۱). ارزیابی روش‌های مختلف درونیابی داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره ٤. صفحات ۱۱۷- ۱۳۰.

۱۲- نظیف، محمودی میمند، فرجی سبکبار؛ سارا، هادی، حسنعلی (۱۳۹۲). مقایسه مکانیابی ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه کرخه با استفاده از معیار آنتروپی و واریانس خطا در محیط GIS. هفتمین کنگره‌ی مهندسی عمران، زاهدان. صفحات ۱-۱۰.

۱۳-نورزاده حداد، مهدیان، جعفر ملکوتی؛ مهدی، محمدحسین، محمد (۱۳۹۲). مقایسه کارایی برخی روش‌های زمین آماری به منظور بررسی پراکنش مکانی عناصر ریزمغذی در اراضی کشاورزی، مطالعه موردی: استان همدان. دانش آب و خاک. شماره ۱، صفحات ۷۱-۸۱.

14- Adhikary, S. K., Yilmaz, A. Gokhan, and M. Nitin,(2014).“Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment,Australia”. HydrologicalProcesses. Volume 29, Issue 11, pp: 2582–2599.

15- Ali. A., Lebel, T, and Amani, A., (2005). “Rainfall estimation in the Sahel”. Part I:error function. Applied Meteorology. Volume 44, pp: 1691–1706.

16- Arnaud, P., J, Lavabre., C, Fouchier, S. Diss, and P. Javelle (2011). ”Sensitivity of hydrological models to uncertainty in rainfall input”. Hydrolog. Sci. Volume 56, pp: 397-410.

17- Awadallah, A. G., (2012). “Selecting Optimum Locations of Rainfall Stations Using Kriging and Entropy”. International Journal of Civil & Environmental Engineering. Volume 12, pp:36-41.

18- Bakhtiari. B., M. Nekooamal Kermani M.H., Bordbar (2013). “Rain Gauge Station Network Design for Hormozgan Province in Iran”. Online at http:// jdesert.ut.ac.ir, pp: 45-52.

19- Basalirwa, C.P.K., Ogallo, L.J, and Mutua, F.M (1993)“The design of regional minimum rain gauge network”.International Journal of Water Resources Development, Volume 9, pp: 411– 424.

20- Cheng, K.S., Lin, Y.C, and Liou, J.J (2008).“Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics”. Hydrological Processes. Volume 22, pp:2554–2564.

21- Chen, Y.C., Wei, C, and Yeh, H.C (2008). “Rainfall network design using kriging and entropy”. Hydrological Processes. Volume 22, pp:340–346.

22- Goovaerts, P (2000)”Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall”. Journal of Hydrology, Volume 228, pp:113–129.

23- Jung., Y., Kim, H., Baik, J., and Choi, Minha (2014). “Rain-Gauge Network Evaluations Using Spatiotemporal Correlation Structure for Semi-Mountainous Regions”. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Volume 25, pp: 267-278.

24-Kassim, A.H.M., Kottegoda, N.T (1991). ”Rainfall network design through comparative kriging methods”. Hydrological Sciences Journal. Volume 36, pp: 223–240.

Archive of SID

www.SID.ir

25- Loof, R., Hjorth, P, and Raut, O.B (1994). "Rainfall network design using the kriging technique: a case study of Karnali river basin, Nepal". International Journal of Water Resources Development.Volume10: pp:497–513.

26- Mishra AK, Coulibaly P (2009). "Developments in hydrometric network design: a review". Reviews of Geophysics, Volume 19. pp:1-24.

27- Papamichail DM, Metaxa IG (1996). "Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of rain gauge network". Water Resources Management. Volume 10, pp:107–127.

28- 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. Volume 210, pp: 206–220.

29- Shaghaghian MR, Abedini MJ."Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques". Scientia Iranica 20,pp: 259–269.

30- Sun, B and Petreson, T.C (2006). "Estimating precipitation normal for USCRN stations". Geophysical Research. Volume 111, pp.1984–2012.

31- Tsintikidis D, Georgakakos KP, Sperfslage JA, Smith DE, Carpenter TM (2002). "Precipitation uncertainty and rain gauge network design within Folsom Lake watershed". Journal of Hydrologic Engineering, Volume 7:pp: 175–184.

32- Westcott, N.E (2009) "Continued operation of a 25-rain gage network for collection, Reduction, and analysis of precipitation data for Lake Michigan Diversion accounting: water year 2008". University of Illinois at Urbana-Champaign. Report No 4. pp:1-75.

33- Webster R, Oliver MA (2007). "Geostatistics for Environmental Scientists (2nd Ed)". John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom.

34- Wei, Ch; Yeh, H.Ch (2014). "Spatiotempo- -ral Scaling Effect on Rainfall Network Design Using Entropy". Entropy ,16,. pp 4626-4647.

35- WMO (1994). Guide to Hydrological Practices, 5th Ed., pp: 168-735.

36- Yeh, H.C; Chen, Y.C; Wei C, Chen RH (2011). "Entropy and kriging approach to rainfall network design". Paddy and Water Environment.Volume 9, pp: 343–355,

37- Younger, P. M., J. E. Freer, and K. J. Beven (2009). "Detecting the effects of spatial variability of rainfall on hydrological modelling within an uncertainty analysis framework". Hydrol Process., Volume 23, pp:1988-2003.

38- Zho. P, L.W. Zhang, K.M. Liew (2014). "Geometrically nonlinear thermomechanical analysis of moderately thick functionally graded plates using a local Petrov-Galerkin approach with moving Kriging interpolation".CompositeStructures, Volume 107, pp. 298–314.

Archive of SID

www.SID.ir