پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۴۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳
صص ۴۶۲-۴۴۵

توسعهٔ بهینهٔ شبکهٔ باران‌سنجی با استفاده از روش کریجینگ و آنتروپی در محیط GIS (مورد مطالعه: حوضهٔ آبریز کرخه)

حسنعلی فرجی‌سبکبار* ـ دانشیار دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران
هادی محمودی‌میمند- کارشناس‌ارشد GIS & RS دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران
سارا نظیف- استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
رحیم علی‌عباسپور- استادیار، دانشکدهٔ نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۳۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۴/۰۸

چکیده

با توجه به محدودیت امکان توسعهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی، تعیین بارش در تمام نقاط و به تبع آن تخمین دقیق بارش منطقه‌ای امکان‌پذیر نیست. لذا، باید در انتخاب محل و تعداد ایستگاه‌ها در تخمین بارش منطقه‌ای دقت کافی به عمل آید. در این تحقیق از آنتروپی انتقال اطلاعات و واریانس تخمین بارش منطقه‌ای برای تعیین نقاط بهینهٔ توسعهٔ ساختار موجود شبکهٔ باران‌سنجی استفاد شده است. در ساختار پیشنهادی، نقاط دارای حداکثر واریانس تخمین و حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه کاندید ایستگاه‌های جدید در نظر گرفته می‌شود. مدل بهینه‌سازی برای ترکیب نتایج این دو روش توسعه داده شده و در نهایت موقعیت پیشنهادی تأسیس ایستگاه‌های جدید تعیین می‌شود. در ساختار پیشنهادی، از محیط GIS برای ارائهٔ بهتر نتایج تحلیل‌های مکانی استفاده شده است. حوضهٔ آبریز کرخه با توجه به اهمیت بالایی که از بعد منابع آبی کشور دارد، مطالعهٔ موردی این تحقیق در نظر گرفته شده است. نتایج بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته در این تحقیق نشان‌دهندهٔ این است که با استفاده از ایستگاه‌های پیشنهادی در حوضهٔ کرخه که هفده موردند می‌توان دقت نتایج تحلیل مکانی بارش را به میزان زیادی افزایش داد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی، حوضهٔ کرخه، سیستم اطلاعات جغرافیایی، واریانس تخمین، آنتروپی.

مقدمه

بارندگی از عناصر هواشناسی است که تغییرات شدید زمانی و مکانی دارد. بدین منظور مطالعهٔ توزیع مکانی بارندگی نیاز به تعداد زیادی نقاط دیده‌بانی دارد که در منطقهٔ مورد نظر به‌خوبی توزیع شده باشند. تعیین تراکم و توزیع مطلوب باران‌سنج‌ها در شبکه‌های باران‌سنجی هر منطقه، گام مؤثری در موفقیت طرح‌های آبی و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و استفادهٔ مؤثر از اطلاعات است. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ استفاده از روش‌های زمین‌آمار در بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی انجام گرفته و اخیراً نیز روش آنتروپی[1] مورد توجه قرار گرفته است.

نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۵۳۵۹۲۱۷
* E- mail: hfaraji@ut.ac.ir

1. Entropy

شانون (۱۹۸۴) تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ استفاده از نظریهٔ آنتروپی در زمینه‌های مختلف مثل ارزیابی سری‌های زمانی اقتصادی و مباحث بوم‌شناختی (اکولوژیکی) انجام داد. خواجه‌زاده (۱۳۸۴) ضمن به کارگیری این روش در ارزیابی سیستم‌های پایش رودخانه‌ها، موقعیت ایستگاه‌های جدید اندازه‌گیری کیفیت آب را برای بهبود عملکرد سیستم پایش کیفی جریان رودخانه مطرح کرد. معصومی و کراچیان (۱۳۸۶) به ارزیابی کارایی سیستم پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از نظریهٔ آنتروپی گسسته پرداختند و از روی منحنی آنتروپی انتقال اطلاعات[1] بر حسب فاصلهٔ بین ایستگاه‌ها، یک منحنی نمایی به مجموعه نقاط برازش دادند و کمترین فاصله‌ای را که تغییرات مقدار انتقال اطلاعات بر حسب فاصله بسیار کم و ناچیز می‌گردد بهینه‌ترین فاصله بین ایستگاه‌های پایش در نظر گرفتند. چن و همکاران (۲۰۰۸) روش کریجینگ[2] را برای درون‌یابی داده‌های بارش ماهیانهٔ سیزده ایستگاه باران‌سنجی ثبت‌کنندهٔ ۸۷ ماه بارش منطقهٔ شیمن[3] تایوان را در شبکه‌ای به ابعاد ۷/۵×۷/۵ کیلومتر استفاده کردند. تعداد شبکه‌های حاصل در منطقه هفده مورد بود که در مرکز هر شبکه یک ایستگاه قرار داده شد که مبنای بررسی‌های بعدی قرارگرفت. با توجه به آمار بارش آن‌ها از آنتروپی انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌ها برای اولویت‌بندی ایستگاه‌های بارش جدید استفاده شد. در نهایت، با توجه به ۹۵ درصد آنتروپی انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌ها، تعداد شش ایستگاه برای ناحیه مکان‌یابی شد.

کریمی (۱۳۸۸) در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود، پس از محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات زوج ایستگاه‌ها، رابطهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات- فاصله برای منطقه را تعیین کرد. سپس، به کمک SA و GA با دو هدف بیشینه‌کردن حداقل آنتروپی و بیشینه‌کردن متوسط آنتروپی، مناطق نیازمند ایستگاه‌های جدید را تعیین کرد. مهجوری مجد و کراچیان (۱۳۸۷) از آنتروپی گسسته به منظور ارزیابی و مکان‌یابی مجدد ایستگاه‌های پایش کیفیت آب موجود و تعیین فواصل زمانی بهینهٔ نمونه‌برداری متغیرهای کیفی شاخص در طول رودخانهٔ جاجرود استفاده کردند. در این مطالعه وضعیت سیستم پایش کیفی رودخانه از نظر اطلاعات مازاد ارزیابی شد و فراوانی نمونه‌برداری برای متغیرهای کیفی مختلف بهنگام‌سازی شد. موغیر و سینگ (۲۰۰۲) نیز با استفاده از نقشه‌های خطوط همسان آنتروپی مرزی[4]، روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه دادند. اُسلو و تانریور (۱۹۷۹) تلاش‌هایی در زمینهٔ استفاده از آنتروپی در تعیین فواصل بهینهٔ مکانی و زمانی جمع‌آوری اطلاعات در سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی انجام دادند.

محققان بسیاری نشان دادند که تکنیک پیش‌بینی زمین‌آماری، نسبت به روش‌های سنتی، برآورد بهتری از بارندگی منطقه‌ای فراهم می‌سازد. از این میان کریجینگ به دلیل داشتن فواید بسیار و فراهم نمودن واریانس تخمین، همواره در زمینهٔ طراحی شبکه مورد توجه بوده و ساختار بهینهٔ شبکه با به حداقل رساندن واریانس خطای تخمین کریجینگ تأمین شده است. نتیجهٔ مطالعات بسیاری از محققان در زمینهٔ تخمین بارندگی منطقه‌ای، برتری این روش را بر دیگر روش‌ها نشان می‌دهد که در ادامه به چند مورد آن‌ها اشاره می‌شود.

1. Transformation Entropy
2. Kriging
3. Shimen
4. Marginal Entropy

بارکا و همکاران (۲۰۰۸) از تکنیک‌های احتمال، GIS[1] و دو معیار کمینه‌سازی متوسط کمترین فاصله و واریانس تخمین کریجینگ معمولی برای ارتقای شبکهٔ باران‌سنجی موجود در منطقه‌ای در جنوب ایتالیا استفاده کردند. مشعل و همکاران (۱۳۸۷) در تحقیقی با عنوان «بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در دشت خوزستان» با استفاده از روش خطای کریجینگ باران‌سنج‌های غیرضروری را حذف کردند. برای این منظور از اعتبارسنجی حذفی استفاده کردند و در مرحلهٔ اول جاهایی را حذف کردند که اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی ایستگاه کمتر است. در مرحلهٔ دوم نقاط با بالاترین خطای تخمین به ایستگاه‌های موجود اضافه شد تا به حد مشخص برسد و در نهایت پنج ایستگاه حذف و سه ایستگاه اضافه شد.

هابرلندت (۲۰۰۷) نیز کریجینگ معمولی را در مقایسه با دیگر روش‌های میان‌یابی تک‌متغیرهٔ بارندگی (نزدیک‌ترین همسایگی، چند ضلعی‌های تیسن، معکوس وزنی مربع فاصله) و کریجینگ شاخص دقیق‌تر یافت. چن و همکاران (۲۰۰۸) روشی متشکل از دو معیار طراحی شبکهٔ کریجینگ و آنتروپی را برای یافتن تعداد کافی باران‌سنج‌ها استفاده کردند، به طوری که معرف پدیدهٔ بارندگی ماهیانه باشد و با محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک[2] درجه اهمیت ایستگاه‌ها را تعیین کردند. دیمیتریس و متاکسا (۲۰۰۶) به منظور ارزیابی مکانی بارش و بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی تایوان با استفاده از داده‌های بارش ساعتی و سالیانه، از روش زمین‌آماری بهره گرفتند. در این تحقیق مشخص شد که بارش‌های ساعتی نسبت به بارش‌های سالیانه تغییرات مکانی بیشتری دارند. همچنین، ارزیابی شبکه بر اساس درصد منطقه با دقت قابل قبول (حاصل از واریانس کریجینگ) انجام شد و طراحی بهینهٔ شبکهٔ باران‌سنجی صورت گرفت.

کارآموز و همکاران (۱۳۸۹) در تحلیل مکانی بارش، مقایسهٔ روش‌های کریجینگ با روش‌های متداول روی ۳۸ ایستگاه بارش در محدودهٔ غرب کشور را مطالعه کردند. نتایج به‌دست آمده از درون‌یابی هر ایستگاه با نتایج ثبت‌شدهٔ هر ایستگاه مقایسه شد. از روش به‌دست آمده از کریجینگ عام[3] نسبت به دیگر روش‌های درون‌یابی، نتایج بهتری به‌دست آمد و در نهایت تعدادی ایستگاه جدید به منظور بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی پیشنهاد شد.

شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) برای ارزیابی شبکهٔ باران‌سنجی حوضهٔ گرگان‌رود از روش زمین‌آماری کریجینگ و تابع توزیع احتمال نرمال استفاده کردند. در این روش ابتدا با تحلیل تغییرات مکانی، بارندگی حوضه استخراج شد. سپس، توسط الگوریتم ارائه‌شده، شبکهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد از ۳۳ ایستگاه مورد تحلیل، ۲۱ ایستگاه ایستگاه‌های مبنا شناخته شده‌اند. شقاقیان و عابدینی (۲۰۱۳)، برای طراحی شبکهٔ باران‌سنجی از ترکیبی از ابزارهای زمین‌آماری و تجزیهٔ عاملی[4] همراه با تکنیک خوشه‌بندی با اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی از نظر محتوای اطلاعات در منطقهٔ مورد مطالعه استفاده کردند.

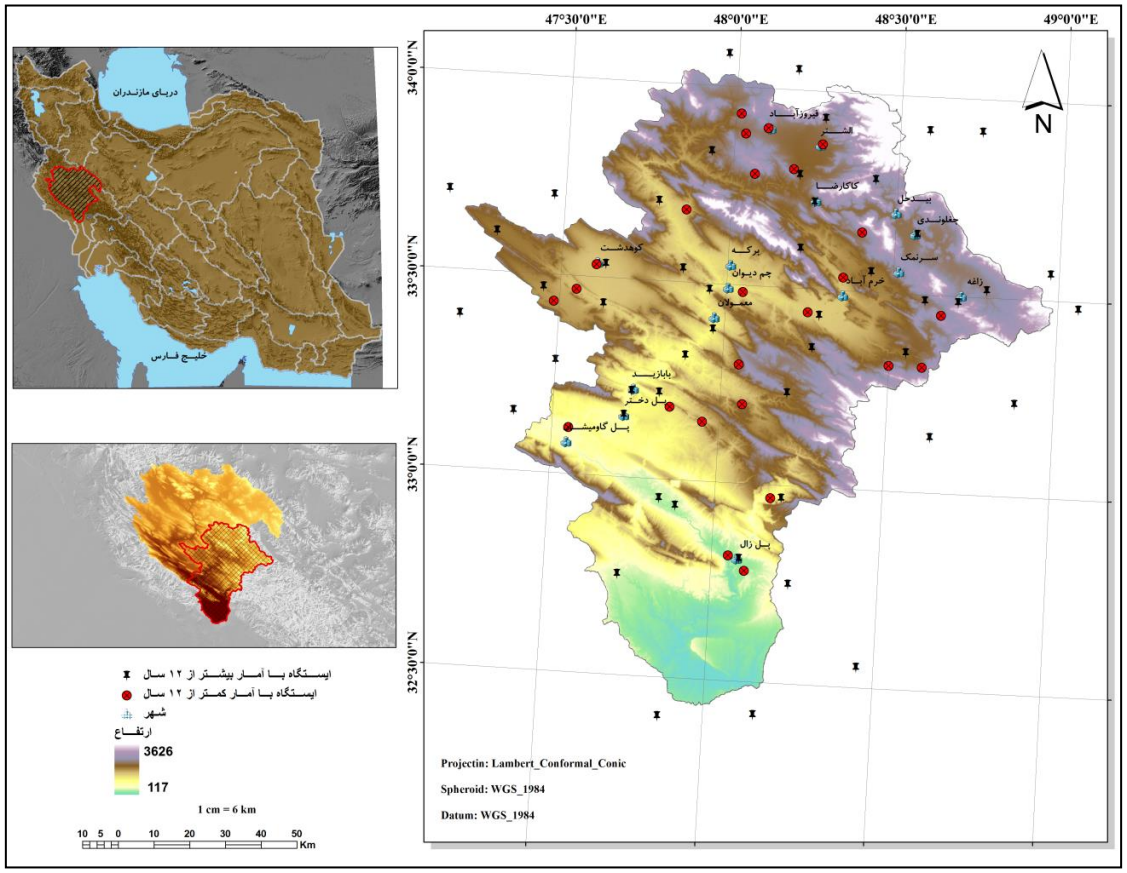
در این مقاله برای مکان‌یابی بهینهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی از ترکیب دو مفهوم واریانس خطای کریجینگ و

1. Geographical Information System
2. Joint Entropy
3. Universal Kriging
4. Factor Analysis

آنتروپی استفاده شده است. در این مقاله سعی شده است با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی شبکه با نظریهٔ آنتروپی و خطای حاصل از درون‌یابی کریجینگ، ساختار بهینه‌ای برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید در شبکهٔ موجود ارائه شود.

منطقهٔ مورد مطالعه

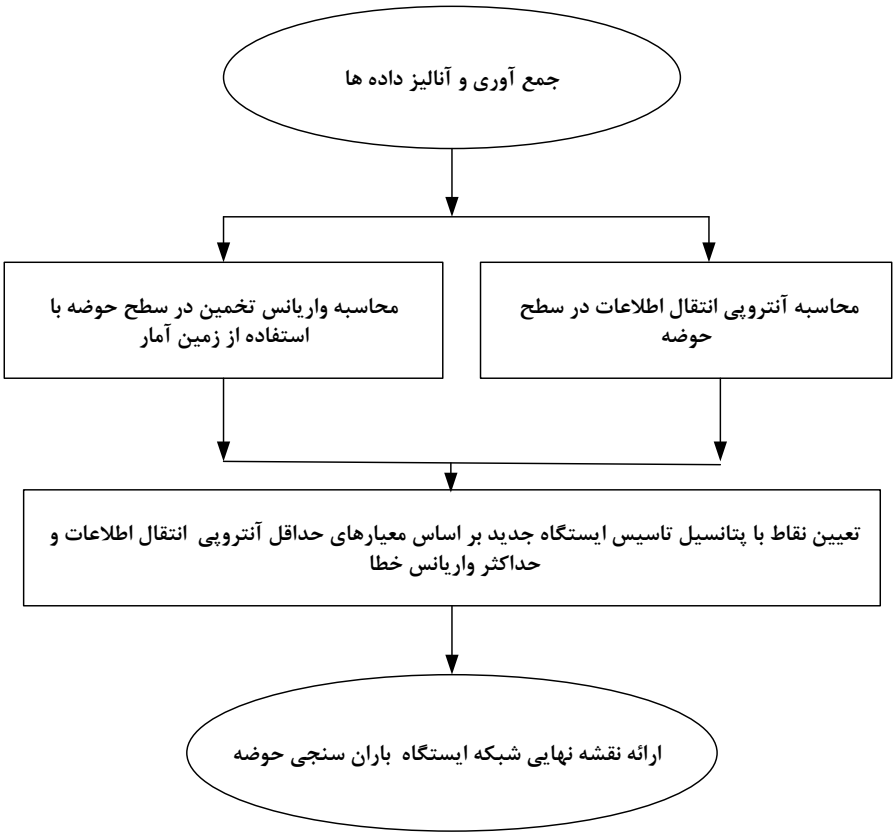
منطقهٔ مورد مطالعهٔ این تحقیق، یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضهٔ کرخه، بین ۳۲ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲ دقیقهٔ عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۸ دقیقهٔ طول شرقی، به مساحت ۱۳۶۳۲کیلومترمربع است (شکل ۱). حوضهٔ آبریز کرخه به لحاظ وسعت بسیار زیاد از شرایط آب‌وهوایی متنوعی برخوردار است. متوسط سالانهٔ ریزش‌های جوّی در حوزهٔ آبریز کرخه از ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر در سال متغیر بوده است و معمولاً نیمی از کل بارندگی سالانه در زمستان نازل می‌شود. پس از آن بیشترین بارندگی مربوط به فصل پاییز و بهار است. همچنین، میانگین بارندگی از ۱۵۰ میلی‌متر در سال در مناطق جنوبی تا فراتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمالی و مناطق شرقی حوضه تغییر می‌کند. در کل، رژیم بارش آن اغلب مدیترانه‌ای است. دشت خوزستان و قسمت‌های جنوبی حوزهٔ نیمه‌خشک با زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم و طولانی است، در حالی که بخش‌های شمالی و مناطق کوهستانی دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم است (خواجه‌گیلی، ۱۳۸۶). ارتفاع این حوضه از ۱۱۷ متر در نقطهٔ خروجی حوضه تا ارتفاع حدود ۳۶۰۰ متر در ارتفاعات آن تغییر می‌کند. از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضهٔ مورد مطالعه می‌توان از رودخانهٔ هررود، دوآب‌الشتر، خرم‌آباد، چولهول، مادیان‌رود وکشکان نام برد که از رودخانه‌های اصلی تغذیه‌کنندهٔ سد کرخه‌اند. در مطالعهٔ حاضر، اطلاعات تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش اعم از سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی در سطح حوضه از سازمان هواشناسی و شرکت مدیریت منابع آب ایران جمع‌آوری شده است. دورهٔ آماری ایستگاه‌های مختلف این حوضه از یک سال تا بیش از چهل سال تغییر می‌کند. از میان این ایستگاه‌ها، هجده ایستگاه آمار بالای سی سال دارند ولی توزیع آن‌ها برای درون‌یابی بارندگی در سطح حوضه نامناسب است. در این مطالعه برای بهبود توزیع ایستگاه‌ها از آمار بارش ماهیانهٔ دوازده سالهٔ (۱۳۷۴–۱۳۸۵) ۴۹ ایستگاه استفاده شد که دارای بیشترین دورهٔ آماری مشترک‌اند. لازم به توضیح است که استفاده از دورهٔ آماری طولانی‌تر در صورت وجود اطلاعات تأثیر بسزایی در بهبود دقت مطالعات دارد. موقعیت ایستگاه‌های منتخب در سطح منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضهٔ مورد مطالعه و ایستگاه‌های منتخب در این تحقیق

روش پژوهش

ساختار پیشنهادی تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا داده‌های بارش ماهیانهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح حوضه و مناطق مجاور آن جمع‌آوری می‌شود. این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور و شرکت مدیریت منابع آب ایران (باران‌سنجی، سینوپتیک و کلیماتولوژی) اخذ می‌شود. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، شبکهٔ باران‌سنجی اولیهٔ حوضه ایجاد می‌شود. کنترل کیفیت داده‌ها، در گام ابتدایی تحقیق مدنظر قرار گرفته است. با ترسیم سری‌های آماری و محاسبهٔ شاخص‌های آماری وجود داده‌های پرت و داده‌های مفقود بررسی شد. بر اساس شبکهٔ ایستگاه‌های موجود و بارش ماهیانهٔ آن‌ها، تحلیل مکانی بارش با استفاده از روش‌های زمین‌آمار در سطح حوضه صورت می‌گیرد. با توجه به بارش تخمین‌زده شده در نقاط مختلف واریانس خطا محاسبه شد و معیاری در تعیین نقاط با پتانسیل تأسیس ایستگاه در نظر گرفته شد. همچنین، با تحلیل مکانی آنتروپی بارش نیز در سطح حوضه، مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات برای زوج ایستگاه‌ها در سطح حوضه محاسبه و معیار دوم در تعیین نقاط با پتانسیل تأسیس ایستگاه جدید در نظر گرفته می‌شود. در مرحلهٔ بعد، با توجه به معیارهای منتخب، تابع هدفی برای پیداکردن نقاطی با کمینهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات و بیشینهٔ واریانس خطا ارائه می‌شود. با استفاده از این تابع هدف مجموعه نقاط پتانسیل برای تأسیس ایستگاه جدید تعیین می‌گردد.



شکل ۲. روندنمای پیشنهادی در تعیین موقعیت و تعداد بهینهٔ ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در حوضهٔ محاسبهٔ واریانس تخمین در سطح حوضه با استفاده از روش کریجینگ

کریجینگ از روش‌های تحلیل مکانی است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است. این روش از بهترین تخمینگرهای خطی ناریب است. مبنای روش کریجینگ خطی رابطهٔ ۱ است.

رابطهٔ ۱ $$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i . Z(x_i)$$

در این رابطه $\hat{Z}(x_0)$ میزان بارش برآورد شده در نقطهٔ x_0 و λ_i وزن ایستگاه iام است که مجموع آن‌ها در همهٔ نقاط برابر ۱ است. همچنین $Z(x_i)$ میزان بارش اندازه‌گیری شده در نقطهٔ x_i و N تعداد ایستگاه‌هاست. کریجینگ علاوه بر تخمین مقادیر مجهول، خطای مرتبط با آن تخمین را نیز محاسبه می‌کند. واریانس خطای مقادیر بارش برآورد شده برابر است با:

رابطهٔ ۲ $$\sigma_{\hat{z}}^2 = \mu + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \gamma_{i0}$$

که در آن $\sigma_{\hat{z}}^2$ واریانس خطای کریجینگ، γ_{i0} مقدار تغییرنما بین نمونهٔ i و نقطهٔ مورد تخمین، μ پارامتر لاگرانژ و λ_i وزن‌های کریجینگ است.

از آنجا که کریجینگ، همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می‌دهد، به این ترتیب علاوه بر محاسبهٔ مقدار متوسط خطا، می‌توان توزیع خطا (واریانس تخمین)[1] را در کل محدودهٔ مورد بررسی به‌دست آورد. با استفاده از این ویژگی

1. Estimition Variance

منحصر به فرد می‌توان مناطقی را مشخص کرد که در آن‌ها خطای تخمین بارش بالاست و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است و تحت پوشش قرار داد. از طرفی می‌توان میزان کاهش واریانس تخمین بـه ازای اضـافه کـردن یـک ایستگاه را قبل از اقدام به نصب آن تعیین کرد. بنابراین، می‌توان بهترین نقاط نصب ایستگاه را پیشنهاد کرد.

روند کلی محاسبهٔ واریانس تخمین برای سطح حوضه در شکل ۳ آمده است. با توجـه بـه اینکـه شـرط اسـتفاده از روش‌های زمین‌آماری از جمله کریجینگ، تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال است، لذا ابتدا تبعیت توزیع داده‌های بارندگی هـر ماه از توزیع نرمال بررسی می‌شود و داده‌ها در ماه‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، با استفاده از روش لوگ نرمال یا کاکس- باکس به توزیع نرمال تبدیل می‌شوند. در این تحقیق از مدل‌های گوسـی یـا کـروی بـرای مشـخص کـردن بهترین تغییرنما استفاده شد. برای ارزیابی میزان خطا و مقایسهٔ میان مقادیر واقعی و تخمینی از سه معیـار میـانگین قـدر مطلق خطا (MAE)[1]، میانگین خطای انحراف (MBE)[2] و ریشهٔ میانگین مربع خطای استاندارد (RMSE)[3] استفاده شـد. پس از انتخاب مدل مناسب تغییرنما برای داده‌های بارش ماهیانه هر کدام از ماه‌های مورد بررسی، بـا توجـه بـه ضـریب همبستگی ارتفاع و بارش از روش کریجینگ معمولی یا کوکریجینگ[4] معمولی بـرای بـرآورد بـارش و واریـانس خطـا در سطح منطقه انجام می‌شود. در صورتی‌که ضریب همبستگی بارش و ارتفاع بیشتر از ۰/۶ باشد، از کوکریجینگ و در غیـر این صورت از روش کریجینگ استفاده می‌شود (محمدی، ۱۳۸۶).

از آنجا که اهمیت بارش در ماه‌های مختلف سال متفاوت است و در طول ماه‌های تر تخمین دقیـق بـارش اهمیـت بیشتری دارد، بنابراین ماه‌های با بارش بیشتر، وزن بالاتری به خود اختصاص می‌دهند. پس از محاسبهٔ واریانس تخمـین بارش در هر ماه، با توجه به وزن بارش در هر ماه که برابر میانگین بلندمدت بارش ایستگاه‌هـا در مـاه مـورد نظـر اسـت، لایه‌های واریانس تخمین ماهیانه وزن‌دهی می‌شود. سپس، لایهٔ نهایی واریانس تخمین از روش میانگین وزنی بـه‌دسـت می‌آید که برای بررسی‌های بعدی و یافتن نقاط پتانسیل با بالاترین واریانس خطای کریجینگ آماده مـی‌شـود و یکـی از معیارهای منتخب در ساختار مدل بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید باران‌سـنجی بـه‌کـار می‌رود.

محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه

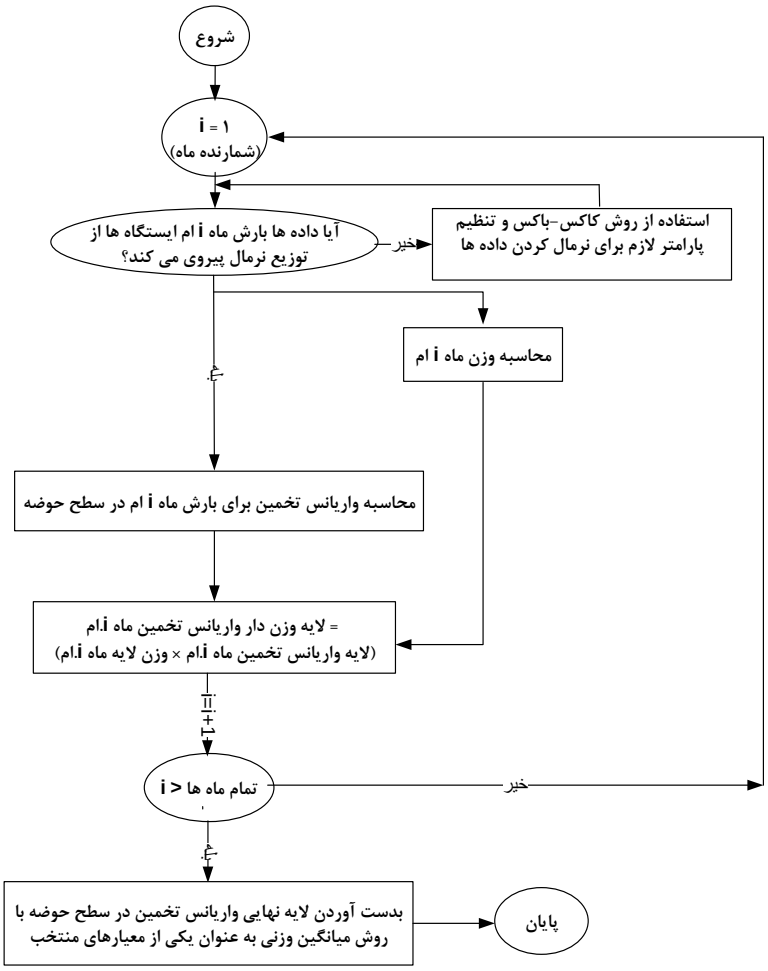
مسئلهٔ طراحی شبکهٔ باران‌سنجی را می‌توان به صورت انتخاب یک سری ایسـتگاه‌هـای جدیـد تعریـف کـرد کـه انتقـال اطلاعات در شبکه را بهبود می‌بخشد و به سطح مطلوب می‌رساند. بنابراین، آنتروپی انتقال اطلاعات که معیاری از انتقال اطلاعات در شبکه است معیار طراحی شبکه استفاده می‌شود.

از تحلیل آنتروپی انتقال اطلاعات میان ایستگاه‌های موجود شبکه می‌توان برای تعیین مناطق دارای آنتروپی انتقـال

1. mean absolute error
2. mean bias error
3. root mean square error
4. Cokriging

اطلاعات پایین و نیازمند تأسیس ایستگاه جدید بهره جست. انتقال اطلاعات متغیر تصادفی و پیوسته بین دو نقطهٔ x و y به صورت رابطهٔ ۳ بیان می‌شود که به مفهوم کاهش عدم قطعیت y به‌واسطهٔ اطلاع از x یا کاهش عدم قطعیت y به‌واسطهٔ اطلاع از x است.

رابطهٔ ۳
$$T(x,y) = T(y,x) = -\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\mathrm{Ln}\left(\frac{f(x,y)}{f(x)f(y)}\right)$$



شکل ۳ . روند کلی محاسبهٔ واریانس تخمین بارش در سطح حوضه

که در آن T(x,y) آنتروپی انتقال اطلاعات متغیر مورد نظر بین دونقطهٔ x و y، f(x) تابع چگالی احتمال متغیر x، f(y) تابع چگالی متغیر y و f(x,y) تابع چگالی احتمال مشترک x و y است. موغیر و سینگ (۲۰۰۲) رابطهٔ ۳ را برای متغیری با توزیع نرمال به‌صورت زیر ساده کردند.

رابطهٔ ۴
$$T(x,y) = -\frac{1}{2}\mathrm{Ln}(1-r_{xy}^2)$$

که در آن r_{xy} ضریب همبستگی x و y است. روند کلی محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه در شکل ۴ نشان داده شده است که توضیح آن در ادامه می‌آید. برای استفاده از رابطهٔ ۴ در تعیین آنتروپی انتقال اطلاعات زوج ایستگاه‌ها، باید نرمال‌بودن سری داده‌های بارندگی ماهیانهٔ تمام ایستگاه‌های منطقه در دورهٔ زمانی بررسی شود. در غیر این صورت از تبدیل کاکس- باکس برای نرمال کردن داده‌ها استفاده می‌شود.

پس از تعیین ضریب همبستگی جفت ایستگاه‌ها، مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات آن‌ها از رابطهٔ ۴ محاسبه شده است. از آنجا که مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات دو به دو برای ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود، بنابراین برای هر ایستگاه در هر ماه n−۱ مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات به‌دست می‌آید که n برابر با کل تعداد ایستگاه‌های موجود در شبکهٔ باران‌سنجی است. به منظور بررسی تغییرات مکانی آنتروپی انتقال اطلاعات در منطقه از درون‌یابی اسپلاین[1] در سطح حوضه استفاده شده است. این روش با استفاده از تعداد خاصی از نقاط همسایه مقادیر را برای نقاطی به دست می‌آورد که فاقد مقادیر اندازه‌گیری شده است.

با فرض اینکه N ایستگاه موجود باشد، در نتیجه برای هر ماه N لایه درون‌یابی آنتروپی انتقال اطلاعات حاصل می‌شود. سپس، از روی‌هم‌گذاری[2] N لایه با توجه به بیشینهٔ مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات سلول‌هایی نظیر به نظیر، که به صورت زیر تعریف می‌شود، لایهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات هر ماه به‌طور جداگانه به‌دست می‌آید.

رابطهٔ ۵ $$\{\max\{\alpha_{i,j}\},\ \ i \in A,\ \ 1 \le j \le N\}$$

که در آن A مجموعه ایستگاه‌های موجود در شبکهٔ باران‌سنجی حوضه است که در این تحقیق به شبکه‌های ۳/۵×۳/۵ کیلومتر تقسیم‌بندی شده و $\alpha_{i,j}$ مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات در شبکهٔ مورد نظر است.

سپس، همانند روش محاسبهٔ واریانس تخمین در سطح حوضه، لایه‌های هر ماه با توجه به میانگین بارش ماهیانه وزن‌دهی می‌شود و در نهایت از میانگین وزنی لایه‌ها، لایهٔ نهایی آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه به‌دست می‌آید. در نتیجه، یافتن نقاط پتانسیل با پایین‌ترین مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات یکی از معیارهای منتخب در ساختار مدل بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی به‌کار می‌رود. روند کلی، محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات برای سطح حوضه در شکل ۴ آمده است.

تهیهٔ مدل بهینه‌سازی شبکهٔ باران‌سنجی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی

مکان‌یابی صحیح ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در بهبود تخمین بارش منطقه‌ای با حداقل هزینه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضهٔ آبریز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل توسعه داده شده عبارت‌اند از:

۱. بیشینه‌کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات
۲. کمینه‌کردن مقدار واریانس خطا

بنابراین تابع هدف پیشنهادی به صورت زیر تعریف شده است.

رابطهٔ ۶ $$Min\ Z = a_{ij}\{\alpha_1(Errs_{ij} - Errs_{max})^2 + \alpha_2(Ents_{ij} - Ents_{min})^2\}$$

رابطهٔ ۷ $$a_{ij} = b_{ij} \times c_{ij}$$

1. Spline
2. Overlay

$$b_{ij} > \frac{r_1 - Ents_{ij}}{r_1}$$ رابطهٔ ۸

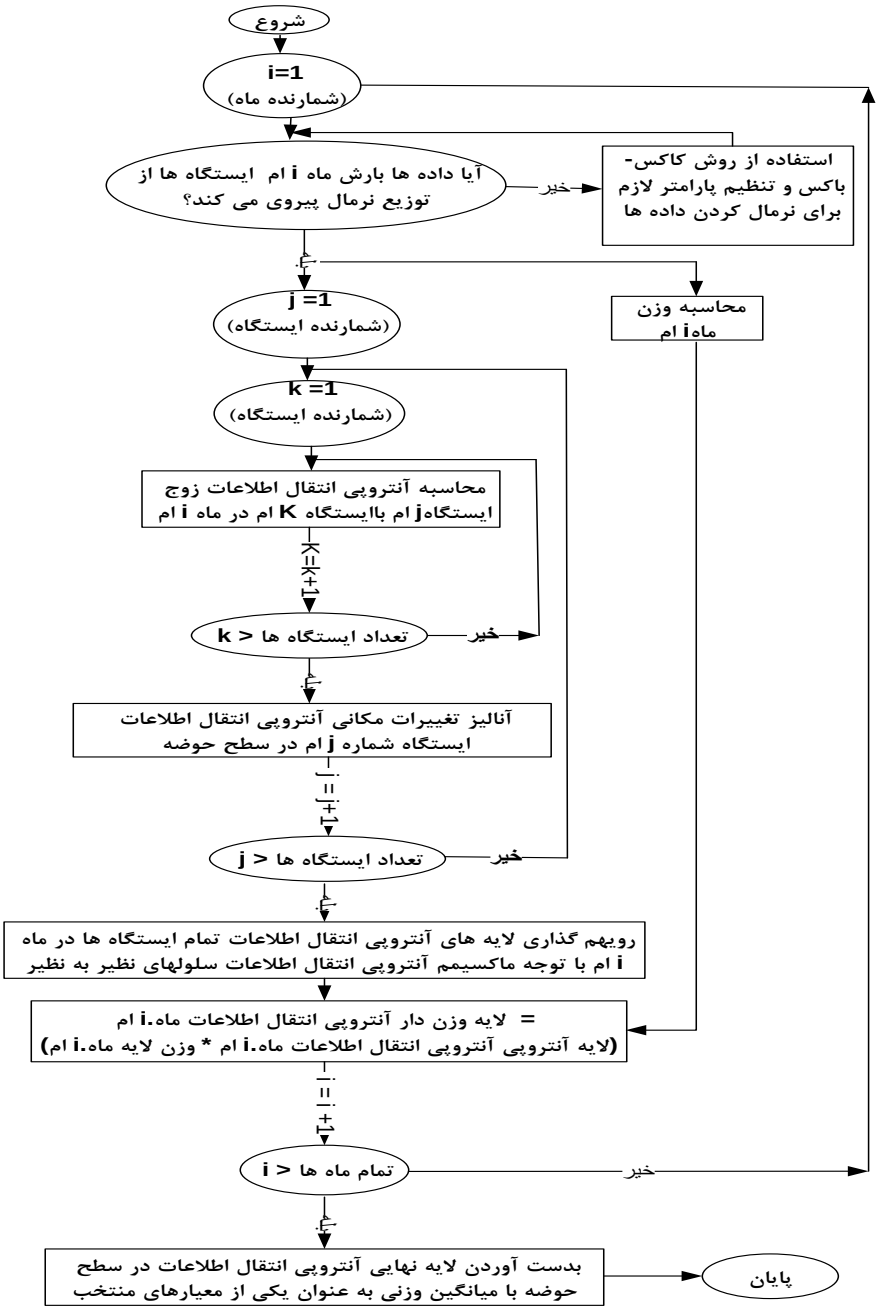
$$b_{ij} < \frac{r_1}{Ents_{ij}}$$ رابطهٔ ۹

$$c_{ij} > \frac{Errs_{ij} - r_2}{r_2}$$ رابطهٔ ۱۰

$$c_{ij} < \frac{Errs_{ij}}{r_2}$$ رابطهٔ ۱۱

$$\sum_{i=1}^{2} \alpha_i = 1$$ رابطهٔ ۱۲

$$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in [0, 1]$$ رابطهٔ ۱۳



شکل ۴. روند کلی محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه

از آنجا که دامنهٔ تغییرات آنتروپی انتقال اطلاعات و واریانس خطا متفاوت است، برای مقایسهٔ این دو معیار از اعداد استاندارد شده استفاده می‌شود تا داده‌های هر دو معیار بین صفر و ۱ و تأثیر یکسانی در ارزیابی نهایی تابع هدف داشته باشد. برای استانداردسازی این معیارها از روابط ۱۴ و ۱۵ استفاده می‌شود.

رابطهٔ ۱۴ $$Ents_{ij} = \frac{Ent_{ij} - Ent_{min}}{Ent_{max} - Ent_{min}}$$

رابطهٔ ۱۵ $$Errs_{ij} = \frac{Err_{ij} - Err_{min}}{Err_{max} - Err_{min}}$$

که Ent_{ij} و Err_{ij} به ترتیب مقدار واقعی آنتروپی و خطای واریانس است. $Ent_{min} = min(Ent_{ij})$ و $Err_{max} = max(Err_{ij})$ به ترتیب مقدار کمینهٔ آنتروپی و بیشینهٔ خطای واریانس است.

همچنین، در تابع هدف بالا $Errs_{max} = max(Errs_{ij})$ مقدار بیشینهٔ استانداردشده خطای واریانس برابر ۱ است. همچنین، $Ents_{min} = min(Ents_{ij})$ مقدار کمینهٔ استانداردشدهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات و برابر صفر است. r_1 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدودهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات و r_2 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدودهٔ خطای واریانس است.

چون برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید از نقاط پتانسیل با کمینهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، بنابراین متغیر باینری کمکی b_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقرار بودن شرط $Ents_{ij} < r_1$ (یعنی، نقاط پتانسیلی که مقدار آن‌ها از یک مقدار خاص آنتروپی انتقال اطلاعات کمتر است)، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. مقدار ۱ به معنی این است که شرط مسئله برقرار است و الگوریتم برای مراحل بعد بررسی می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به مقدار واریانس تخمین، نقاطی برای مکان‌یابی ایستگاه مناسب‌اند که دارای بیشینهٔ واریانس تخمین باشند. بنابراین، متغیر باینری کمکی c_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقرار بودن شرط $Ents_{ij} > r_2$، (یعنی نقاط پتانسیلی که مقدار آن‌ها از یک مقدار خاص واریانس خطا بالاتر باشد) مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. a_{ij} متغیر تصمیم باینری است که در صورت برقرار بودن هر دو شرط $Ents_{ij} < r_1$ و $Ents_{ij} > r_2$، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. a_{ij} وقتی مقدار ۱ می‌گیرد که هر کدام از متغیرهای کمکی b_{ij} و a_{ij} مقدار ۱ بگیرند، در این صورت الگوریتم اجرا می‌شود و به دنبال نقطهٔ بهینه می‌گردد، در غیر این‌صورت مقدار صفر و الگوریتم متوقف می‌شود.

α_1 و α_2 ضرایبی بین صفر و ۱ اند که مقدار آن‌ها با توجه به اهمیت هر کدام از معیارهای تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. ضریب هر معیاری که بیشتر باشد، تأثیر آن معیار در پیدا کردن نقطهٔ بهینه بیشتر است. با اجرای تابع هدف بالا نقاط با عدم قطعیت بیشتر (حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات)، همچنین با واریانس خطای بالا مشخص می‌شود که در واقع نقاط پیشنهادی برای تأسیس ایستگاه‌های جدیدند.

نتایج

در این مطالعه از سری زمانی بارش ماهیانه به منظور تحلیل‌های مکانی استفاده شده است. با توجه به اینکه تنها در هشت ماه از سال، بارش در حوضه اتفاق می‌افتد و در بقیهٔ سال تقریباً بارندگی صفر است، بنابراین در تحلیل‌ها تنها

اطلاعات ماه‌های مهر تا اردیبهشت مدنظر قرار گرفته است. پس از جمع‌آوری داده‌ها از سازمان هواشناسی و مدیریت منابع آب، داده‌های ناقص یا مفقود شده در بازه زمانی مورد نظر، مشخص و آمار آن‌ها با توجه به ایستگاه‌های مجاور تخمین و بازسازی می‌شود. روش‌های مختلفی برای بازسازی داده‌ها وجود دارد که در این تحقیق، روش میانگین‌گیری ایستگاه‌های مجاور برای تخمین داده‌های ثبت نشده یا ناقص استفاده شده است. در روش میانگین‌گیری از رابطهٔ ۱۶ استفاده می‌شود.

رابطهٔ ۱۶ $$\frac{P_x}{N_x} = (\frac{1}{N}) \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{P_i}{N_i}\right)$$

که در این فرمول

P_x = مقدار بارندگی در ایستگاهی که آمار آن موجود نبوده و باید تخمین زده شود.

N_x = متوسط سالانهٔ بارندگی در ایستگاهی که آمار آن موجود نیست.

N = تعداد ایستگاه‌های اطراف که برای تخمین P_x از آن‌ها استفاده می‌شود.

P_i = مقدار بارندگی در ایستگاه مجاور در همان زمانی که P_x ثبت نشده باشد.

N_i = متوسط سالانه بارندگی در ایستگاه مجاور.

بررسی همبستگی بارش با ارتفاع

نتایج حاصل از بررسی همبستگی بارش و ارتفاع در ماه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. با توجه به ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۶ بارندگی و ارتفاع برای ماه‌های مهر، آبان، فروردین و اردیبهشت، در این ماه‌ها از روش کوکریجینگ برای تحلیل مکانی بارش استفاده شد و برای بقیهٔ ماه‌های سال بارش نقاط مختلف با استفاده از روش کریجینگ تخمین زده شده است.

جدول ۱. ضریب همبستگی ارتفاع با متوسط بارندگی ماهیانه ایستگاه‌های حوضه

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
ضریب همبستگی	۰/۷۵	۰/۴۹	-۰/۰۲	-۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۷۰	۰/۷۱

محاسبهٔ واریانس خطای کریجینگ

وضعیت نرمال‌بودن داده‌ها در ماه‌های مختلف، تبدیل‌های به کار رفته، کشیدگی و چولگی آن‌ها قبل و بعد از تبدیل در جدول ۲ آمده است. تبدیل کاکس و باکس تا حدود زیادی توزیع داده‌ها را به توزیع نرمال نزدیک می‌کند که شکل کلی آن در رابطهٔ ۱۷ آمده است (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹).

رابطهٔ ۱۷ $$Z = \begin{cases} \frac{x^{\lambda}-1}{\lambda} & (\lambda \neq 0)\ ,\ x > 0 \\ Ln(x) & (\lambda = 0)\ ,\ x > 0 \end{cases}$$

که در آن x مقدار داده‌هایی است که باید نرمال شوند، λ مقدار حقیقی و Z مقدار تبدیل یافته است. در هر تبدیل فوق مقدار ثابتی (λ) وجود دارد که باید طوری تعیین شود که توزیع داده‌ها را تا حد ممکن به توزیع نرمال نزدیک کند؛ یعنی، به تابع توزیعی نزدیک کند که چولگی[1] آن صفر و کشیدگی[2] آن ۳ باشد.

از آزمون کلموگروف- اسمیرنوف (K-S) با سطح اطمینان ۹۵٪، نرمال بودن داده‌های بارش ماهیانه تأیید می‌شود. در صورت غیرنرمال بودن داده‌ها با تبدیل کاکس– باکس یا لوگ نرمال، توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک می‌شود.

جدول ۲. نوع تبدیل به‌کار رفته برای تبدیل داده‌های بارش به توزیع نرمال

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
نوع تبدیل	نرمال	کاکس – باکس	لوگ نرمال	لوگ نرمال	لوگ نرمال	کاکس – باکس	کاکس – باکس	لوگ نرمال
λ (پارامتر)	-	۰/۴	۰	۰	۰	۰/۵	۰/۶	۰
چولگی قبل از تبدیل	۳	۰/۹	۲/۱	۱/۶	۱	۰/۷	۰/۴	۰/۶
چولگی بعد از تبدیل	-	۰	۱/۲	۰/۹	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۸	-۰/۰۶
کشیدگی قبل از تبدیل	۰/۳۴	۵/۳	۸/۱	۵/۳	۴/۱	۴	۳/۶	۲/۴
کشیدگی بعد از تبدیل	-	۵	۴/۵	۳/۲	۲/۹	۳/۹	۳/۲	۲/۹

ضرایب مربوط به وزن‌دار کردن لایه‌های آنتروپی انتقال اطلاعات که از میانگین بارش ماهیانهٔ ایستگاه‌ها در هر ماه به‌دست می‌آید در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. ضرایب (میلی‌متر) مربوط به هر ماه برای وزن‌دار کردن لایه‌های آنتروپی و واریانس تخمین

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
۷/۸۱	۵۳/۶۴	۸۲/۲۳	۸۶/۴۶	۹۴/۱۷	۷۱/۶۳	۹۹/۵۱	۳۰/۹۱

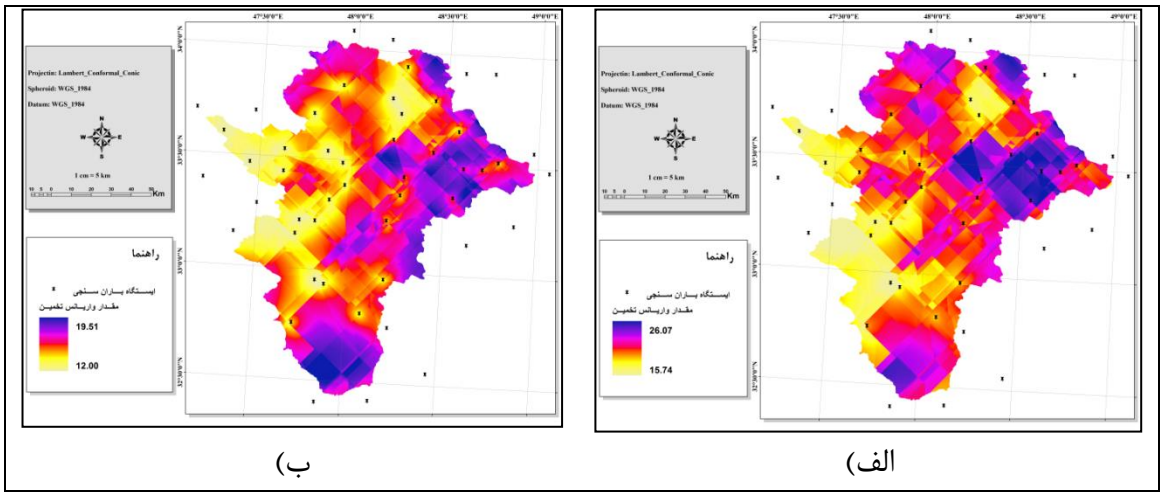
پس از محاسبهٔ واریانس خطای تخمین هر ماه (به عنوان نمونه، لایهٔ واریانس تخمین مربوط به ماه بهمن در شکل ۵الف)، لایه‌های مربوط به ماه‌های مختلف با توجه به جدول ۳ وزن‌دار می‌شود و در نهایت لایهٔ نهایی واریانس تخمین مربوط به حوضه به‌دست می‌آید (شکل ۵ب) و یکی از معیارهای تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. در این لایه امکان شناسایی نقاط با مقدار تخمین بالا و نیازمند نمونه‌برداری بیشتر وجود دارد، البته نمی‌توان در ارتباط با تعداد ایستگاه‌ها و اثر هم‌زمان آن‌ها در صورت احداث اظهارنظر کرد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مقادیر بیشینهٔ واریانس تخمین، بیشتر در مرزهای شمالی و شرقی حوضه، جاهایی است که فاصلهٔ ایستگاه‌ها بیشتر است، همچنین در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.

1. Skewness
2. Kurtosis

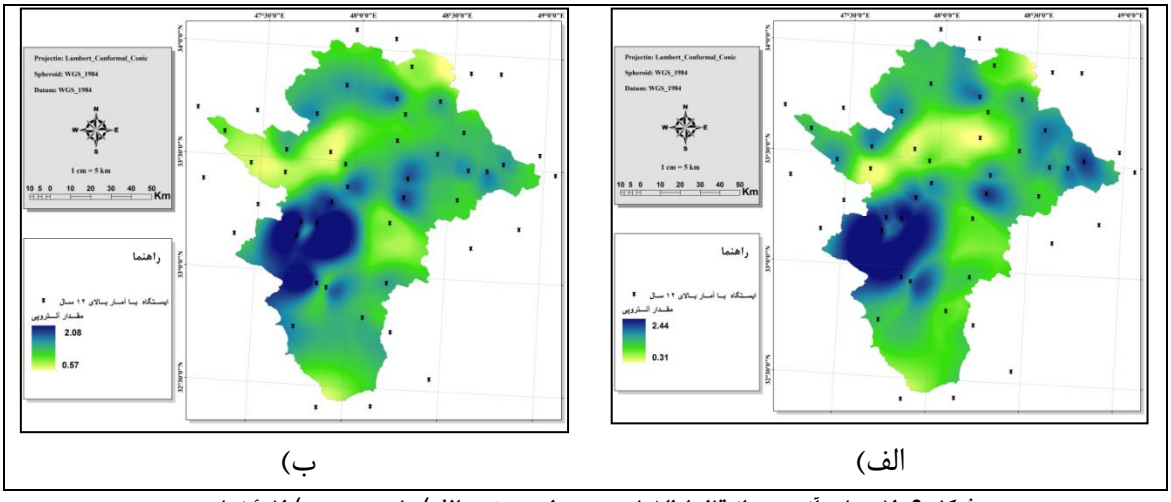
محاسبهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه

آزمون کلموگروف- اسمیرنوف با سطح اطمینان ۹۵٪، نرمال بودن سری داده‌های بارش ایستگاه‌ها در دورهٔ زمانی مورد نظر در ماه‌های مختلف را تأیید می‌کند.

شکل ۶ الف نمونهٔ لایهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات ماه بهمن در سطح حوضه را نشان می‌دهد که از روی‌هم‌گذاری تمام لایه‌های مربوط به انتقال اطلاعات ایستگاه‌ها در این ماه به دست آمده است. همچنین، شکل ۶ب لایهٔ نهایی آنتروپی انتقال اطلاعات سطح حوضه را نشان می‌هد که از میانگین‌گیری وزنی لایه‌های آنتروپی ماه‌های مختلف به‌دست می‌آید. این لایه معیار دوم در کنار واریانس خطای تخمین کریجینگ وارد تابع هدف تعیین نقاط بهینهٔ تأسیس ایستگاه جدید می‌شود. در این لایه مکان‌هایی که دارای مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات پایین‌تری‌اند نقاط پتانسیل نصب ایستگاه جدید محسوب می‌شوند تا با افزودن ایستگاه‌های پیشنهادی به شبکهٔ باران‌سنجی موجود، بیشترین انتقال اطلاعات در شبکه صورت گیرد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، این نقاط بیشتر در مرزهای حوضه، در جاهایی است که فاصلهٔ ایستگاه‌ها بیشتر است؛ همچنین، در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.



شکل ۵. لایه‌های واریانس خطای تخمین در سطح حوضه؛ الف) ماه بهمن ب) لایهٔ نهایی



شکل ۶. لایه‌های آنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه؛ الف) ماه بهمن، ب) لایهٔ نهایی

مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی

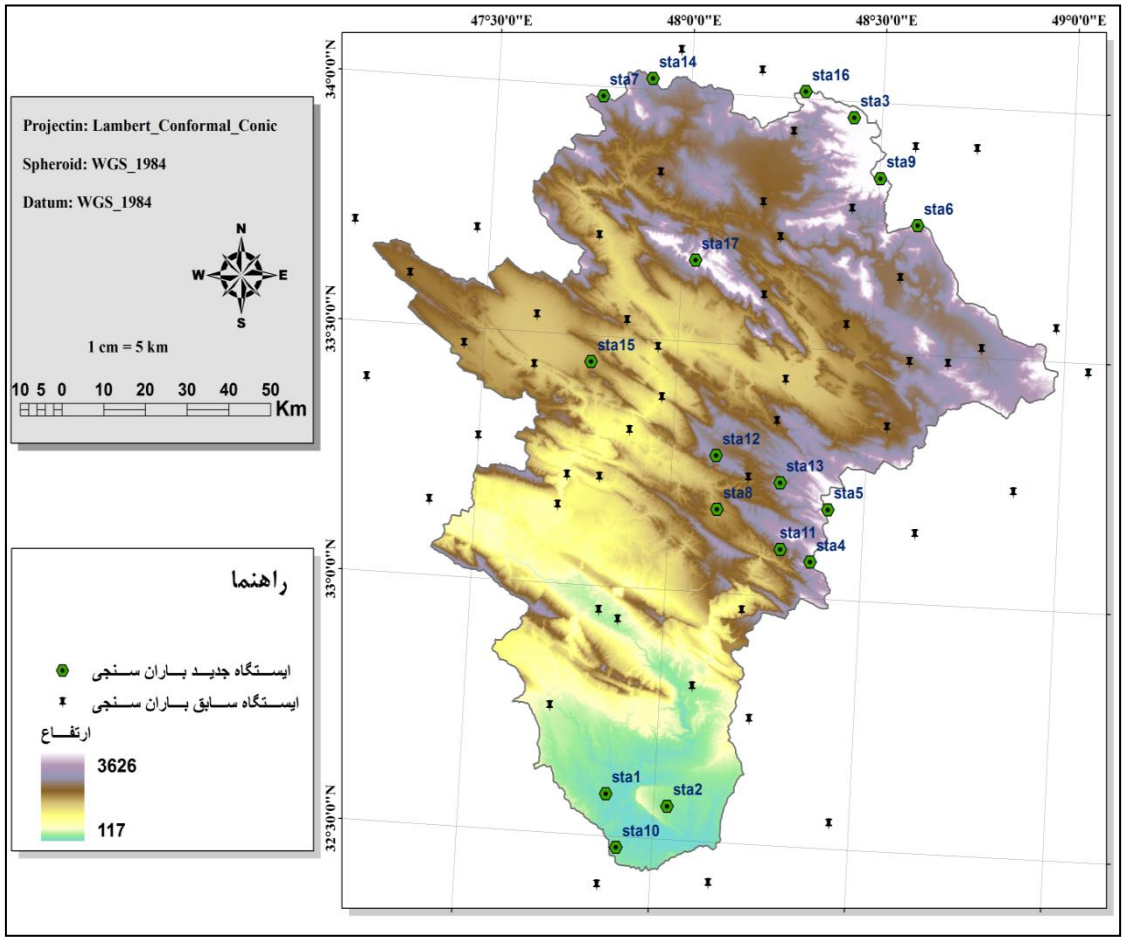
برای اجرای ساختار بهینه، ابتدا باید مقادیر r_1 و r_2 مشخص شود. همان‌طور که گفته شد این مقادیر برای مشخص‌کردن محدوده با آنتروپی انتقال پایین و واریانس خطای بالاست، بنابراین با توجه به خصوصیات شبکهٔ باران‌سنجی منطقه و آزمون و خطا با مقادیر مختلف، در نهایت ۳۰ درصد کمینهٔ آنتروپی انتقال اطلاعات، یعنیr_1=۰/۳ و ۶۰ درصد بیشینهٔ خطای کریجینگ، یعنیr_2=۰/۶، در انتخاب موقعیت بهینهٔ تأسیس ایستگاه جدید مدنظر قرارگرفتند. همچنین، به دلیل اهمیت یکسان هر دو معیار، مقادیر α_1 و α_2 برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد.

همچنین، طبق استاندارد سازمان جهانی هواشناسی (WMO)[1]، در مناطق مسطح با آب‌وهوای معتدل، یک ایستگاه در هر ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلومترمربع لازم است. بر این مبنا و با توجه به وجود اقلیم‌های نسبتاً متفاوت در محدودهٔ مطالعاتی، در اطراف هر یک از نقاط منتخب تأسیس ایستگاه جدید، محدوده‌ای به شعاع ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود که در آن محدوده امکان تأسیس ایستگاه دیگری وجود ندارد. مدل بهینه‌سازی در محیط MATLAB توسعه داده شد و در هر بار اجرا، یک نقطهٔ جدید برای تأسیس ایستگاه تعیین شد. پس از اجرای کامل ساختار بهینه، تعداد هفده نقطه برای تأسیس ایستگاه‌های جدید تعیین شد که در جدول ۴ مختصات آن‌ها همراه با مقدار آنتروپی و مقدار خطای متناظر نمایش داده شده است. همچنین، موقعیت این ایستگاه‌ها در سطح حوضه در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۴. هفده ایستگاه جدید باران‌سنجی به‌دست آمده از ساختار پیشنهادی بهینه‌سازی شبکه

شمارهٔ اختصاصی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات	مقدار خطای کریجینگ
۵۰	sta1	۴۷° ۵۲′	۳۲° ۳۴′	۰/۹۴۲	۱۹/۲۵۶
۵۱	sta2	۴۸ ° ۲۳′	۳۲° ۳۳′	۰/۹۶۵	۱۸/۵۰۸
۵۲	sta3	۴۸ ° ۲۴′	۳۳° ۵۸′	۰/۶۶۷	۱۸/۴۱۱
۵۳	sta4	۴۸ ° ۲۴′	۳۳° ۲۱′	۰/۹۹۹	۱۸/۰۱۷
۵۴	sta5	۴۸ ° ۲۴′	۳۳° ۱۰′	۰/۹۴۸	۱۷/۸۹۱
۵۵	sta6	۴۸ ° ۳۶′	۳۳° ۴۵′	۰/۹۷۱	۱۷/۷۶۱
۵۶	sta7	۴۷° ۴۵′	۳۳° ۵۹′	۰/۹۷۱	۱۷/۳۶۲
۵۷	sta8	۴۸ ° ۰۶′	۳۳° ۰۹′	۰/۹۰۷	۱۷/۱۸۰
۵۸	sta9	۴۸ ° ۳۳′	۳۳° ۵۲′	۰/۸۲۷	۱۷/۰۷۰
۵۹	sta10	۴۷ ° ۵۴′	۳۲° ۲۸′	۰/۷۰۹	۱۶/۹۸۶
۶۰	sta11	۴۸ ° ۱۶′	۳۳° ۰۵′	۰/۹۴۴	۱۶/۹۲۳
۶۱	sta12	۴۸ ° ۰۷′	۳۳° ۱۶′	۰/۹۲۷	۱۶/۷۷۴
۶۲	sta13	۴۸ ° ۱۸′	۳۳° ۱۴′	۰/۸۶۱	۱۶/۶۹۵
۶۳	sta14	۴۷ ° ۵۴′	۳۴° ۰۰′	۰/۹۹۹	۱۶/۶۶۸
۶۴	sta15	۴۷ ° ۳۳′	۳۳° ۲۶′	۰/۹۰۰	۱۶/۵۶۸
۶۵	sta16	۴۸ ° ۱۷′	۳۴° ۱۵′	۰/۸۱۲	۱۶/۵۶۴
۶۶	sta17	۴۸ ° ۰۲′	۳۳° ۴۰′	۰/۸۹۸	۱۵/۹۰۵

1. World Meteorological Organization



شکل ۷. ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی با ساختار پیشنهادی

بحث و نتیجه‌گیری

طراحی شبکهٔ باران‌سنجی، تعیین تعداد و موقعیت ایستگاه‌هایی است که تأمین‌کنندهٔ معیارهای طراحی شبکه است. در مطالعات قبلی عمدتاً برای بهینه‌کردن شبکهٔ باران‌سنجی از معیار خطای کریجینگ یا آنتروپی به طور جداگانه استفاده شده بود. این مسئله ممکن است منجر به این شود که برخی نقاط توسط معیارهای زمین آمار یا آنتروپی پوشش داده نشود و باعث گمراهی شود. با ترکیب دو روش زمین‌آمار و نظریهٔ آنتروپی می‌توان بهترین نقاط تأسیس ایستگاه‌ها را تعیین کرد، به نحوی که هر دو معیار همدیگر را پوشش دهند که این مسئله باعث ارتقای اطمینان‌پذیری شبکه نسبت به حالتی می‌شود که تنها یک معیار در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو، در مطالعهٔ حاضر پس از محاسبهٔ تغییرات مکانی واریانس تخمین و آنتروپی انتقال اطلاعات بارش در سطح حوضه، یک مدل بهینه برای توسعهٔ شبکهٔ باران‌سنجی بر اساس کمینه‌کردن واریانس تخمین و بیشینه‌کردن آنتروپی انتقال اطلاعات پیشنهاد شد. با اجرای مدل پیشنهادی در حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کرخه، تعداد هفده ایستگاه باران‌سنجی جدید برای اضافه‌شدن به شبکه موقعیت‌یابی شد که اطلاعات آن‌ها دارای کمترین وابستگی است. ایستگاه‌های پیشنهادی بیشتر در مناطق مرزی شرقی و شمال‌شرقی حوضه، در مناطق کوهستانی مکان‌یابد شد که تغییرات بارش زیاد است؛ همچنین، در نقاطی که تراکم ایستگاه‌ها کم

است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که تنها استفاده از یک رویکرد مانند خطای محاسباتی یا اطلاعات مشترک انتقالی توسط ایستگاه‌ها توسعهٔ ساختار شبکه را از حالت بهینه دور می‌کند و نیازها و خلأهای اطلاعاتی موجود را پوشش نمی‌دهد. همچنین، استفاده از اطلاعات گسترده‌تر با دورهٔ زمانی طولانی‌تر در مطالعات آتی دقت مطالعات مشابه در سایر حوضه‌ها را افزایش می‌دهد.

نکتهٔ مهم دیگری که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد لزوم بررسی و لحاظ کردن تغییرات بارش در بازه‌های مختلف زمانی در طول سال است. برای مثال، توسعهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی برای بهبود دقت بارش تخمینی در ماه‌های خشک سال از اهمیت کمتری نسبت به ماه‌های پربارش سال برخوردار است که در تحقیقات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق تلاش شده است تا حد امکان تغییرات زمانی بارش در طول سال نیز در توسعهٔ شبکه مدنظر قرار گیرند تا توسعهٔ شبکه با بهبود بیشتر در تخمین بارش منطقه‌ای ماه‌های پربارش نظر به اهمیت بالای آن‌ها در مدیریت منابع آبی همراه باشد. نتایج این تحقیق به نحو مؤثری در برنامه‌ریزی برای توسعهٔ شبکهٔ سنجش بارش و تخصیص بودجهٔ موجود استفاده می‌شود.

منابع

حسنی پاک، ع.ا. (۱۳۸۹). **زمین آمار (ژئواستاتیستیک)**، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

خواجه‌زاده، ا. (۱۳۸۴). **طراحی شبکهٔ پایش کیفی رودخانه‌ها با کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی کیفی**، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، استاد راهنما: محمد کارآموز و اکبر باغوند.

خواجه‌گیلی، م. (۱۳۸۶). **ارزیابی تخمین‌گرهای ژئواستاتیستیکی به منظور تحلیل مکانی شاخص خشکسالی SPI (مطالعهٔ موردی حوزهٔ آبریز کرخه)**. پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، پردیس ابوریحان، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، استاد راهنما: سید محمود رضا بهبهانی.

شفیعی، م.، قهرمان، ب. و ثقفیان، ب. (۱۳۹۲). **ارزیابی و بهینه‌یابی شبکهٔ باران‌سنجی بر مبنای روش کریجینگ احتمالاتی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ گرگان‌رود)**. فصلنامهٔ تحقیقات منابع آب ایران، سال نهم، شمارهٔ ۲، ص. ۹-۱۸.

کریمی حسینی، آ. (۱۳۸۸). **بررسی و مقایسهٔ روش‌های مکان‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی در محیط GIS**. پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ کشاورزی، گروه آبیاری و آبادانی، هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، استاد راهنما: عبدالحسین هورفر، امید بزرگ حداد.

کارآموز، م.، فلاحی، م. و نظیف، س. (۱۳۸۹). **تحلیل مکانی بارش: مقایسهٔ روش‌های کریجینگ با روش‌های متداول**. دوفصلنامهٔ تحقیقات منابع آب ایران، سال ششم، شمارهٔ ۱ (پیاپی۱۶).

محمدی، ص. (۱۳۸۶). **بررسی تغییرات مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از زمین‌آمار**. پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، استاد راهنما: علی سلاجقه.

معصومی، ف. و کراچیان، ر. (۱۳۸۵). **ارزیابی کارآیی سیستم‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با تئوری آنتروپی گسسته، مطالعهٔ موردی: آبخوان تهران**. دومین کنفرانس ملی منابع ایران، ۳ و ۴ بهمن، اصفهان.

مهجوری‌مجد، ن. و کراچیان، ر. (۱۳۸۷). **ارزیابی کارایی سیستم‌های پایش کیفی رودخانه با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (رودخانهٔ جاجرود)**، دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، ۲۸ اردیبهشت الی ۱ خرداد، دانشگاه تهران، تهران.

Barca, E., Passarella, G. and Uricchio, V. (2008), **Optimal Extension of the Rain Gauge Monitoring Network of the Apulian Regional Consortium for Crop Protection**, Environ Monittoring Assessment, No.145, pp. 375-386.

Chen, Y.C., Wei, C. and Yeh, H. C. (2008), **Rainfall Network Design Using Kriging and Entropy**, Hydrological processes.No. 22, pp. 340-346.

Dimitris, M. and Metaxa, G. (2006), **Geostatiscal Analisis of Spatial Variability of Rainfall and Optimal Design of a Rainguage Network**, Water Resources Management, No.10, pp. 107-127.

Haberlandt, U. (2007), **Geostatistical Interpolation of Hourly Precipitation from Rain Gauges and Radar for a Large-scale Extreme Rainfall Event**, Journal of Hydrology, No, 332, pp. 144-157.

Hassani-pak, A.A. (2001), **Geostatistics**, University of Tehran, Iran.

Karamouz, M., Fallahi M. and Nazif, S. (2010), **Analysis of Spatial Variation of Precipitation: Comparison of Conventional and KrigingMethods**, Iran-Water Resources Research, Vol. 6, No. 1, pp. 1-9.

Karimi Hosseini, A. (2010), **Comparing location methods Rain Gauge Network using Geographic Information System (GIS)**, M.Sc Thesis, Tehran University, Faculty of Agriculture and Natural Resources.

Khajeh Gili, M. (2008), **Evaluation of Geostatistical to analyze the spatial SPI Indicator (Karkheh Basin case study)**, M.Sc Thesis, Tehran University, Faculty of Irrigation and Drainage Engineering.

Khajehzadeh Nokhandan, A. (2006), **Design of river water quality monitoring networks using simulation models**, M.Sc Thesis, Tehran University, Faculty of Environment.

Mahjouri-majd, N. and Kerachian, R. (2009), **Performance assessment of river quality monitoring systems using discrete entropy theory (River Jajrud)**, Environmental Engineering Conference, Iran, Tehran.

Mashal, M.M., Darvishi, E., and Rahimikhoob, A. (2009), **Optimizing the rain gauges networks using geostatistical method**, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, Vol. 2, No. 2, pp. 43-51.

Masoumi, F., and Kerachian, R. (2007), **Optimal Groundwater Monitoring Network Design Using the Entropy Theory**, National Conference of Water Resources, Esfehan, Iran.

Mogheir, Y. and Singh, V.P. (2002), **Application of Information Theory to Groundwater Quality Montoring System**, Water Resources Management, No.16, pp. 37 – 49.

Mohammadi, S. (2008), **Research into spatial variations of groundwater quality and quantity in kerman plain using of geostatistic**. M.sc Thesis, Tehran University, Faculty of Agriculture and Natural Resources.

Shaghaghian, M.R. and Abedini, M.J. (2013), **Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques**, Scientia Iranica, Volume 20, Issue 2, pp. 259-269.

Shannon, C.E. (1948), **A Mathematical Theory of Communication**, Bell System Technical Journal, No.27, pp. 379-423.

Uslu, O., Taanrivor, A. (1979), **Measuring the Information Contact of Hydrological Process**, the First National Congress on Hydrology, Istanbul, pp. 473-443.

Yeh, H.C., Chen, Y.C. and Wei, C. (2011)**, Entropy and Kriging Approach to Rainfall Network Design**, Paddy Water Environ, No.9, pp. 343-355.