هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۸، پاییز ۱۳۹۵، صص ۷۲-۵۳

وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۸

کاربرد روش‌های زمین‌آمار در بهینه‌یابی و تقویت شبکه‌ی ایستگاه‌های باران سنجی استان کردستان جهت افزایش صحت مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک

داود مختاری[۱*]

آرش زندکریمی[۲]

شیدا زندکریمی[۳]

چکیده

بارندگی به عنوان اصلی‌ترین ورودی در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک محسوب می‌شود. شبکه‌ی کارآمد ایستگاه‌های باران‌سنجی، شبکه‌ای است که از تراکم مناسبی برخوردار بوده و در نقاط فاقد ایستگاه، برآورد مطلوبی از بارش داشته باشد. به منظور بهینه‌سازی موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی روش‌های متفاوتی ارایه شده که در این میان روش‌های زمین‌آمار به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان و بهینه‌سازی موقعیت این ایستگاه‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آمار صورت گرفته است. در این تحقیق و در راستای ارزیابی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی مشخص شد که روش Ordinary Kriging با مدل تابع Circular نسبت به سایر مدل‌ها از اعتبار بیشتری برخوردار بوده و مناسب‌ترین روش درون‌یابی پراکنش بارش در استان کردستان می‌باشد. در ادامه به منظور بهینه‌یابی و برآورد خطای ایستگاه‌های موجود از داده‌های بارش ۱۴۵ ایستگاه هواشناسی استفاده گردیده‌است و با

۱ـ استاد گروه ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز (نویسنده‌ی مسئول). Email:d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

۲ـ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور دانشگاه تبریز.

۳ـ کارشناس ارشد آمایش سرزمین-محیط‌زیست دانشگاه پیام نور تهران شرق.

تـوجه بـه وسعت زیاد منطقه‌ی مورد مطالعه و تغییرات زیاد داده‌های بارش، ناحیه‌بندی منطقه یا خوشه‌بندی ایستگاه‌ها صورت گرفت و کل منطقه به ۸ خوشه تقسیم شده است. نتایج حاصله از بهینه‌یابی بر مبنای ضریب تغییرات کریجینگ نشان می‌دهد که با اضافه شدن ۱۷ ایستگاه پیشنهادی جدید به شبکه‌ی باران‌سنجی موجود در این استان، مقـادیر ضـریب تغییـرات مکـانی بـارش سـالانه از بخش‌های مرکزی تا جنوبی بین ۰,۲۱ تا ۶,۶۷ درصد و در نواحی غربی نزدیک به ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش حاضر به منظور کاربرد روش‌های زمین‌آمار در بهینه‌یابی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و نقشه‌های تولید شده نیز برای سازمان‌های اجرایی (وزارت نیرو، سازمان هواشناسی و ...) از ارزش کاربردی بالایی برخوردار هستند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، شبکه ایستگاه باران‌سنجی، زمین‌آمار، GIS، استان کردستان.

مقدمه

یکی از مراحل مهم در بسیاری از برنامه‌های کاربردی هیدرولوژیک، برآورد متوسط بارندگی در حوضه‌های آبریز بوده که این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ایستگاه‌های باران‌سنجی[1] صورت می‌گیرد (باستین و همکاران[2]، ۱۹۸۴: ۴۵۶؛ پاردو[3]، ۱۹۹۸: ۲۰۶). از پیش شرط‌های اصلی برای برداشت داده‌های صحیح بارش، وجود شبکه‌ی مناسب باران‌سنجی می‌باشد چرا که این داده‌های مکانی به شدت تحت تأثیر پراکنش شبکه‌ی ایستگاه‌ها قرار دارند (زیمرمن[4]، ۲۰۰۶: ۶۳۵). از طرفی با توجه به بحران به وجود آمده در مورد منابع آب در سطح دنیا، نیاز به مدیریت دقیق منابع آب لازم و ضروری به نظر می‌رسد (ازغدی و همکاران،۱۳۹۰ :۱) و این مدیریت

1- Rain-gauge stations
2- Bastin et al.,
3- Pardo
4- Zimmerman

وابسته به اطلاعاتی است که از ایستگاه‌های باران‌سنجی به دست می‌آید. از آنجا که داده‌های به دست آمده از ایستگاه‌ها جهت به دست آمدن اطلاعات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد (رودل[1]، ۲۰۰۱: ۳) بنابراین هر چه دقت داده‌هایی که از ایستگاه‌ها برداشت می‌شود بیشتر باشد، میزان صحت تصمیم‌گیری در مورد مسائل فوق بالاتر می‌رود (ازغدی و همکاران،۱۳۹۰: ۲).

هدف از طراحی شبکه‌ی ایستگاه باران‌سنجی به دست آوردن اطلاعات قابل اطمینان با کمترین هزینه است (یاه و همکاران[2]، ۲۰۱۱: ۳۴۴). 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 (ازغدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). سازمان جهانی هواشناسی (WMO)[3] تراکم ایستگاه‌ها را برای 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 ،۱۹۹۴: ۲۵۴).

به منظور ارزیابی شبکه‌ی باران‌سنجی الگوریتم‌های مختلفی ارایه شده که از این میان کریجینگ به دلیل کاربردی بودن و فراهم نمودن واریانس تخمین[4]، عموماً در طراحی شبکه مورد توجه بوده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

کاسم و کوتیگودا[5] (۱۹۹۱)، با استفاده از روش‌های مختلف زمین آمار توسعه‌ی و طراحی شبکه‌ی باران‌سنجی را در حوضه‌ی Severn Trent کشور انگلستان

1- Rudel
2- Yeh et al.,
3- World Meteorological Organization
4- Variance Estimation
5- Kassim and Kottegoda

بررسی نموده‌اند. در این پژوهش، عملکرد روش‌های مختلف زمین‌آمار در طراحی شبکه ارزیابی شده است. پاپامیشل و میتاکسا[1] (۱۹۹۶)، در پژوهشی با عنوان تحلیل مکانی بارش و طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی باران‌سنجی در شمال یونان؛ با استفاده از تحلیل فضایی ایستگاه‌های موجود و بهره‌گیری از انحراف معیار کریجینگ طراحی شبکه‌ی جدید در منطقه‌ی مورد مطالعه را انجام داده‌اند. چنگ و همکاران (۲۰۰۸)، نیز با استفاده از واریانس خطای کریجینگ و احتمال پذیرش به ارزیابی شبکه باران سنجی و تقویت آن در شمال تایوان پرداخته‌اند. یاه و همکاران (۲۰۱۱)، از روش متشکل از دو معیار آنتروپی و کریجینگ جهت اصلاح شبکه در تایوان استفاده نموده‌اند. شقاقیان و عابدینی (۲۰۱۲)، در مقاله‌ای به طراحی شبکه‌ی باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تجزیه‌ی عاملی در زاگرس جنوبی پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از خوشه‌بندی ایستگاه‌ها، منطقه‌ی مورد مطالعه به نواحی همگن تقسیم شده و سپس با ترکیب تجزیه‌ی عاملی و کریجینگ معمولی، شبکه‌ی جدید باران‌سنجی طراحی شده‌است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با افزودن ۶ ایستگاه باران‌سنجی جدید دقت برداشت داده‌های بارش بالا خواهد رفت. آدهیکاری و همکاران[2] (۲۰۱۵)، با استفاده از روش کریجینگ و محاسبه‌ی خطای شبکه، امکان حذف و احداث ایستگاه جدید در حوضه‌ی آبریز رودخانه یارا در استرالیا را بررسی نموده‌اند.

رحیمی بندرآبادی و ثقفیان (۱۳۸۹)، در مقاله‌ای بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی بر مبنای بارش ماهانه و سالانه در حوضه‌ی آبخیز کرخه را بررسی نموده‌اند.نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با جابجایی ۱۷ ایستگاه در منطقه، واریانس خطا ۱۰٪ کاهش یافته است. شفیعی و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی به ارزیابی و

1- Papamichail and Metaxa
2- Adhikary et al.,

بهینه‌یابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی برمبنای روش کریجینگ احتمالی در حوضه‌ی گرگان‌رود پرداخته‌اند. در این پژوهش که با استفاده از روش مبتنی بر زمین‌آماری کریجینگ و تابع توزیع نرمال صورت گرفته است ابتدا با تحلیل تغییرات مکانی بارندگی سالانه در حوضه، ساختار مکانی بارندگی استخراج گردیده و سپس الگوریتم ارایه شده جهت اصلاح شبکه اجرا شده است. فرجی سبکبار و همکاران (۱۳۹۳)، نیز توسعه‌ی بهینه‌ی شبکه‌ی باران‌سنجی با استفاده از روش کریجینگ و آنتروپی را در حوضه‌ی آبریز کرخه بررسی نموده‌اند.

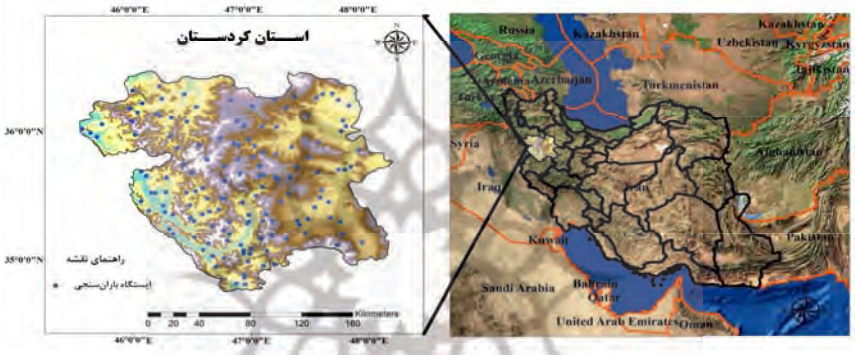
با توجه به اینکه روش کریجینگ به ازای هر برآورد، خطای مرتبط با آن را نیز محاسبه نماید، بنابراین می‌تواند علاوه بر مقدار متوسط خطا، توزیع خطا را نیز در کل محدوده‌ی موردنظر به دست آورد (رحیمی بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۹: ۲۷). در این روش به دلیل وجود تابع نیم تغییرنما که ارتباط مکانی معقولی را بین نقاط نمونه مشخص می‌کند، لزوماً n ایستگاه، تخمین بهتری از m ایستگاه (n>m) ارایه نخواهد داد (سین‌تکیدز و همکاران[1]، ۲۰۰۲: ۱۸۴) که این ویژگی بسیار مهم یکی از نقاط قوت روش کریجینگ می‌باشد. تحقیق حاضر با هدف تحلیل و ارزیابی شبکه‌ی باران‌سنجی موجود در استان کردستان و پیشنهاد اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید (در صورت نیاز) و همچنین اولویت‌گذاری بین ایستگاه‌های پیشنهادی جهت کم کردن مقادیر ضریب تغییرات مکانی بارش صورت گرفته است.

معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

استان کردستان با مساحت ۲۹۱۷۳ کیلومترمربع در غرب کشور ایران واقع شده است (شکل ۱). این استان با داشتن منابع آبی مهم نقش عمده‌ای را در بیلان آبی کشور ایفا می‌کند به طوری که رودخانه‌های سیروان، قزل‌اوزن و زرینه‌رود از

1- Tsintikidis et al.,

ارتفاعات آن سرچشمه می‌گیرند. متوسط بارندگی استان کردستان ۵۰۰ میلی متر بوده و با قرار گرفتن در رشته کوه زاگرس در قسمت غربی و همچنین وجود دشت دهگلان- قروه در قسمت شرقی دارای دامنه‌ی ارتفاعی ۷۰۸ تا ۳۲۰۷ متر می‌باشد. بنابراین وجود شرایط متنوع هیدروژئومورفولوژیک[1] در استان کردستان ضرورت مطالعات بیشتر در این زمینه را ایجاب می‌کند.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این تحقیق و در راستای ارزیابی و تحلیل شبکه‌ی باران‌سنجی استان کردستان و بهینه‌سازی این شبکه از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و کلیماتولوژی استفاده شده است. پس از بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌ها، دوره‌ی آماری(۲۰۰۱- ۲۰۱۳) برای مطالعه انتخاب شده و از میان کلیه‌ی ایستگاه‌های داخل حوضه، ایستگاه‌هایی که تا سال ۱۳۹۲ دارای ۱۲ سال آمار کامل یا قابل بازسازی بودند، برای مطالعه برگزیده شدند. لازم به ذکر است انتخاب ایستگاه‌ها بر

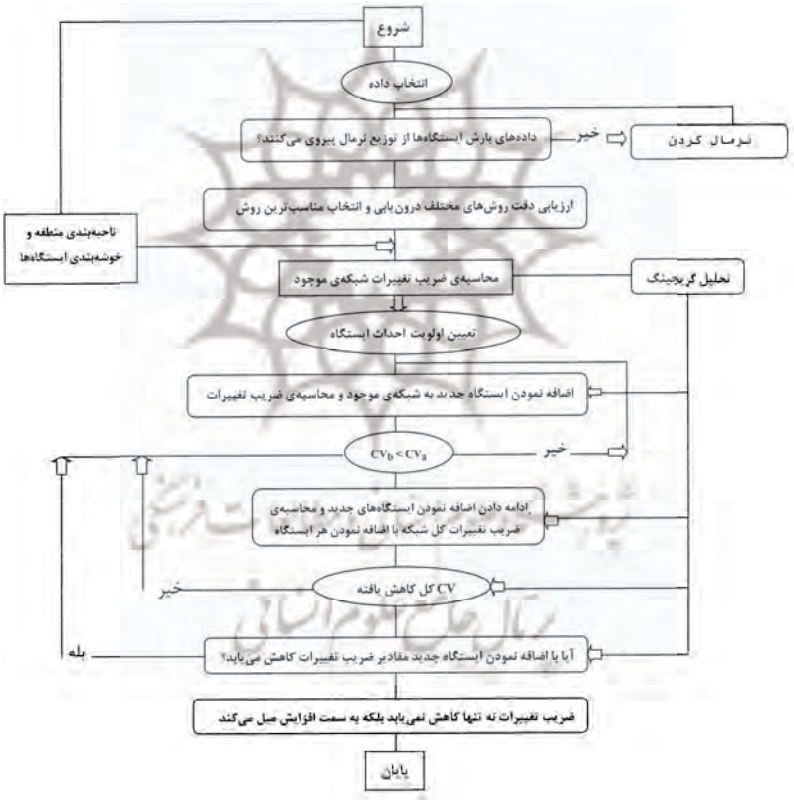
1- Hydrogeomorphologic

اساس امکان بازسازی آمار آن‌ها با به کارگیری روش بیشترین همبستگی خطی[1] با ایستگاه‌های مجاور بوده و در نهایت کیفیت داده‌ها و نرمال بودن سری داده‌های ثبت شده با استفاده از آزمون‌های آماری Kolmogorov-Smirnov مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بعد از بررسی داده‌های ایستگاه‌های موجود (۷۷ ایستگاه باران‌سنجی و ۲۲ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی و ۷۶ ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو)، 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 (سان و پترسون[2]، ۲۰۰۶: ۱۹۹۰)، آزمون نرمال بودن داده‌ها صورت گرفته و در نهایت ۱۴۵ ایستگاه برای تحلیل شبکه‌ی موجود و بهینه نمودن آن، برگزیده شده‌اند؛ سپس دقت روش‌های مختلف درون‌یابی پراکنش بارش به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش سنجیده شد. پس از انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی پراکنش بارش، به واسطه‌ی تغییرپذیری متوسط بارندگی، منطقه‌ی مورد مطالعه به ناحیه‌های کوچک‌تر با تغییرات کم‌تر میانگین بارندگی سالیانه، تقسیم شده‌است. تقسیم‌بندی منطقه یا خوشه‌بندی[3] ایستگاه‌ها بر مبنای حوضه‌های آبریز اصلی صورت گرفته است. در مرحله‌ی بعدی ضریب تغییرات (CV)[4] در تمامی نقاط شبکه‌ی موجود محاسبه شده است، سپس مناطقی با بیشترین ضریب تغییرات به عنوان اولویت نخست جهت احداث ایستگاه‌های پیشنهادی انتخاب گردید. پس از وارد نمودن ایستگاه جدید به شبکه، تحلیل کریجینگ بار دیگر در کل شبکه صورت گرفته و مجدداً ضریب تغییرات درکل سیستم محاسبه شده‌است؛ دو مرحله‌ی

1- Linear correlation
2- Sun and Petreson
3- Clustering
4- Coefficient of Variation

پایانی تا زمانی تکرار می‌گردد که خطای شبکه به حداقل مقدار خود برسد، در این حالت موقعیت ایستگاه‌های جدید، بهینه گردیده و شبکه‌ی اصلاح شده جدید طراحی شده است. با اجرای مرحله‌ی پایانی و رسیدن به حالت بهینه مشخص گردید که ضریب تغییرات با اضافه کردن ایستگاه جدید، نه تنها کاهش نمی‌یابد بلکه به سمت افزایش میل پیدا می‌کند. شکل (۲) مراحل اجرای پژوهش برای انتخاب داده‌ها و بهینه‌ترین روش را نشان می‌دهد.



شکل (۲) فلوچارت مراحل اجرای پژوهش

ـ آماده‌سازی داده‌ها و بررسی توزیع داده‌ها

در این پژوهش در گام اول توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون Kolmogorov–Smirnov در سطح ۹۵٪ بررسی شده است

ـ اجرای روش‌های مختلف درون‌یابی و ارزیابی دقت آن‌ها

به منظور تعیین مناسب‌ترین الگوریتم درون‌یابی پراکنش بارش استان کردستان اقدام به اجرای روش‌های درون‌یابی از جمله Inverse Distance Weighting، Spline (با تابع‌های Tension، Thin Plate و Completely Regular)، Ordinary Kriging (با تابع‌های Circular، Spherical، Exponential و Gussian) و Kriging Universal (با تابع‌های Rational Quadratic و Liner) گردید، سپس برای ارزیابی دقت متقابل، یک نقطه به صورت موقتی حذف شده و با اعمال درون‌یابی مورد نظر برای آن نقطه مقداری برآورد گردید، سپس مقدار حذف شده به جای خود برگردانده شده و برای بقیه نقاط به صورت مجزا این برآورد صورت می‌گیرد؛ به طوری که در پایان یک جدول با دو ستون که نشان‌دهنده‌ی مقادیر واقعی و برآورد شده می‌باشند، حاصل می‌گردد. با داشتن این مقادیر می‌توان میانگین خطای مطلق (MAE)[1] و معیار اریب خطا (MBE)[2] را به دست آورد. هر چه دو مقدار فوق به صفر نزدیک‌تر باشد، نشاندهنده‌ی بالا بودن دقت مدل می‌باشد؛ از سایر آزمون‌ها جهت ارزیابی کارایی روش‌های درون‌یابی می‌توان به روش ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطا (RMSE)[3] و ضریب همبستگی (R^2) بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده‌ای اشاره کرد که هرچه مقدار RMSE کمتر و میزان R^2 بیشتر باشد، مدل اعمال شده دارای دقت آماری بالاتری خواهد بود (میرموسوی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۱۱).

1- Mean Absolute Error
2- Mean Bias Error
3- Root Mean Square Error

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^{n} \left| z^*(xi) - z(xi) \right| \qquad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

$$MBE = 1/n \sum_{i=1}^{n} \left(z^*(xi) - z(xi) \right) \qquad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^{n} \left(z(xi) - z'(xi) \right) \text{^}2} \qquad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در روابط فوق z*(xi) مقادیر پیش‌بینی شده و z (xi) مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

ـ ناحیه‌بندی منطقه و خوشه‌بندی ایستگاه‌ها

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته منطقه‌ی مورد مطالعه به ۸ خوشه تقسیم شده است (شکل۳).

ـ تحلیل کریجینگ و محاسبه‌ی ضریب تغییرات کلیه‌ی نقاط شبکه‌ی موجود

روش کریجینگ یک میانگین متحرک وزن‌دار است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۹۷) که به عنوان بهترین تخمین‌گر خطی نااریب شناخته می‌شود (مهرشاهی و خسروی، ۱۳۸۷: ۲۳۶). مطلق بودن تخمین در درون‌یابی از ویژگی‌های عمده‌ی 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).

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(S_i) \qquad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

در رابطه‌ی (۴) در آن $Z(S_i)$: برآورد آماری از متغیر موردنظر، λ_i: وزن آماری اختصاص داده شده به نمونه، S_0: فاصله از نقطه‌ی نمونه، N: تعداد نقاط نمونه

می‌باشد. در ادامه اقدام به محاسبه‌ی واریانس کریجینگ یا همان کمترین واریانس می‌گردد که آن را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود (باکچی و همکاران[1]، ۱۹۹۵: ۳۱۹؛ دواتگر، ۱۳۷۶: ۵۶).

$$\delta_p^2(v_a)\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^*\gamma(v_a-v_i)+\eta^* \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

در رابطه‌ی (۵) λ_i و η به ترتیب مقادیر بهینه‌ی وزن‌های آماری و ضریب لاگرانژ می‌باشد که با حل ماتریسی به دست می‌آید (مدنی،۱۳۷۶: ۵۴). γ (ua - ui) مقدار نیم تغییر نما بین نقاط معلوم و نقاط تخمینی می‌باشد. نیم تغییر نمای داده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\gamma^*(d)=\frac{1}{2N(d)}\sum_{i=1}^{N(d)}[z(u)-z(u+d)]^2 \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

در رابطه‌ی (۶۵) N(d) برابر تعداد زوج نمونه که به فاصله‌ی بردار d از یکدیگر واقع‌اند و Z(u) مقدار پارامتر مورد نظر در موقعیت u می‌باشد (کسایی رودسری، ۱۳۸۹: ۳۶). برای یک متغیر تصادفی ضریب تغییرات به صورت زیر تعریف می‌شود (هاشمی‌پرست، ۱۳۶۹: ۵۴؛ صفوی، ۱۳۸۵: ۳۰).

$$CV=\frac{S_x}{\overline{X}} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

نتیجه‌ی به دست آمده از رابطه‌ی بالا که برابر تقسیم انحراف معیار تخمین کریجینگ در هر نقطه‌ی شبکه، روی مقدار میانگین بارش سالانه به دست آمده در آن نقطه است، نسبت به مقدار انحراف معیار شاخصی مناسب‌تر برای تعیین نقاط ضعف شبکه است (حسنی پاک، ۱۳۷۷: ۱۲).

1- Bacchi et al.,

در این مقاله با بررسی مقادیر CV مکانی بارش سالانه در سطح هر خوشه، نقاطی که دارای بیشترین ضریب تغییرات هستند به عنوان اولویت احداث ایستگاه در نظر گرفته می‌شود.با اضافه نمودن هر ایستگاه ضریب تغییرات 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

بحث و نتایج

اجرای روش‌های مختلف درون‌یابی و ارزیابی دقت آنها

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، الگوریتم‌های مختلف درون‌یابی پراکنش بارش استان کردستان مورد مقایسه قرار گرفت. برای مقایسه عملی نتایج، از شرایط یکسان برای ارزیابی دقت استفاده گردید؛ سپس مهم‌ترین روش‌های ارزیابی صحت شامل میانگین خطای مطلق (MAE)، معیار اریب خطا (MBE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) استخراج و مشخص شد که روش درون‌یابی Ordinary Kriging با مدل تابع Circular بالاترین دقت را در مقایسه با سایر روش‌ها نتیجه می‌دهد (جدول ۱). یکی از مهم‌ترین دلایل دست‌یابی به دقت بالا در این روش توانایی آن در تخمین خطی نااریب است، البته سایر روش‌ها خصوصاً Universal Kriging با مدل تابع Quadratic به دلیل بهره‌گیری از روندهای محلی دقت قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

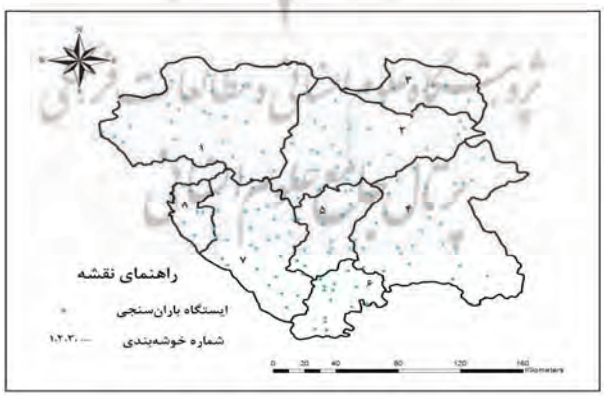
تقسیم‌بندی منطقه و خوشه‌بندی ایستگاه‌ها

پس از تعیین مناسب‌ترین روش پراکنش داده‌های بارش استان کردستان، جهت بالا بردن دقت بهینه‌یابی ایستگاه‌ها و به منظور یکنواخت نمودن داده‌ها، خوشه‌بندی ایستگاه‌ها صورت گرفته است. این کار با توجه به تغییرات زیاد میانگین بارندگی

سالیانه در سطح منطقه و بر اساس حوزه‌های آبریز اصلی در سطح استان است و کل منطقه‌ی مورد مطالعه به ۸ خوشه تقسیم شده‌است؛ شکل (۳) پراکنش ایستگاه‌ها در خوشه‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول (۱) ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی پراکنش بارش استان کردستان

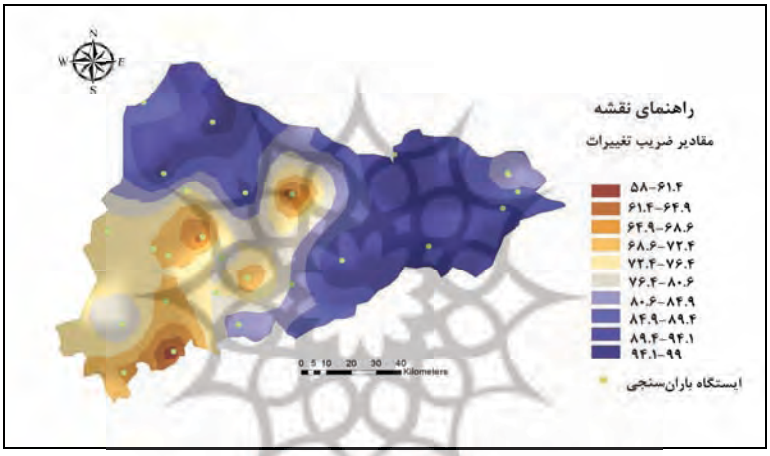
روش	مدل تابع	خطای روش ارزیابی متقابل				معادله خط رگرسیون
		MBE	MAE	RMSE	R^2	
IDW	Power 1.15	-۱/۴۳	۵۵/۵۱	۷۹/۷۵	۰/۶۸	۰/۶۵۲ x + ۱۵۷/۲۵
Spline	Tension	-۰/۵۸	۵۴/۶۲	۷۸/۶۴	۰/۶۹	۰/۶۷۵ x + ۱۴۸/۵۳
	Thin Plate	-۲/۳۳	۶۷/۲۶	۹۷/۶۹	۰/۵۷	۰/۷۲۰ x + ۱۲۲/۹۶
	Regularized	۰/۴۱	۵۴/۷۰	۷۸/۹۰	۰/۶۹	۰/۶۸۱ x + ۱۴۵/۹۷
Ordinary Kriging	Circular	-۰/۰۵	۵۳/۳۷	۷۷/۳۱	۰/۷۰	۰/۷۱۳ x + ۱۳۳/۱۵
	Sepherical	-۰/۰۷۶	۵۳/۵۵	۷۷/۵۰	۰/۷۰	۰/۷۱۵ x + ۱۳۱/۹۲
	Exponential	-۰/۱۳	۵۶/۰۳	۷۷/۵۸	۰/۷۰	۰/۶۹۴ x + ۱۳۹/۵۴
	Gussian	-۰/۱۵	۵۴/۹۳	۷۸/۹۱	۰/۶۹	۰/۷۴۱ x + ۱۱۰/۳۱
Universal Kriging	Quadratic	-۰/۰۸	۵۳/۵۰	۷۷/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۲۹ x + ۱۱۹/۳۷
	Liner	-۰/۱۵	۵۴/۹۱	۷۶/۹۱	۰/۶۸	۰/۷۰۸ x + ۱۳۵/۷۵



شکل (۳) خوشه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان

تعیین اولویت احداث ایستگاه

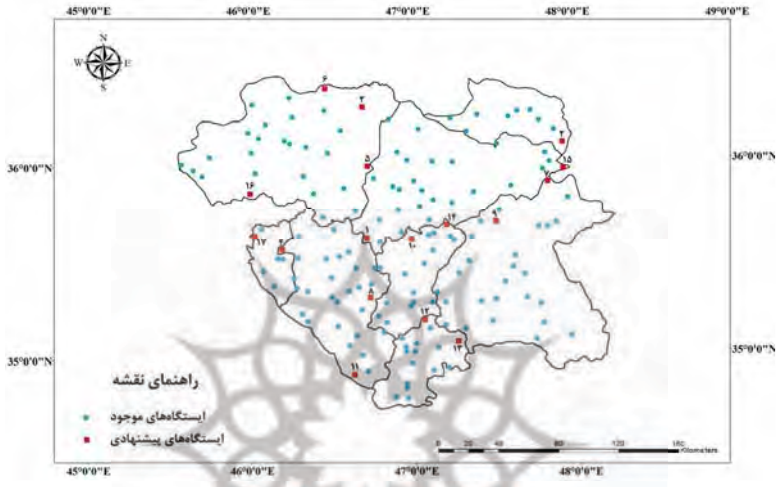
به منظور بالا بردن دقت در انجام کار در تمامی خوشه‌ها به صورت مجزا مقادیر CV برای کلیه‌ی ایستگاه‌ها محاسبه گردیده و بالاترین اولویت نخست برای احداث ایستگاه می‌باشد. برای سایر خوشه‌ها نیز همانند شکل (۴) مقادیر ضریب تغییرات محاسبه می‌گردد (انتخاب این خوشه به صورت تصادفی صورت گرفته است).



شکل (۴) پراکنش مقادیر ضریب تغییرات ایستگاه‌های موجود

لازم به ذکر است تعیین اولویت برای ایستگاه‌های جدید بعد از تمرین و تکرار و محاسبه‌ی ضریب تغییرات برای کل شبکه پس از اضافه نمودن هر ایستگاه صورت گرفته‌است. اضافه نمودن تا زمانی که مقادیر CV دیگر کاهش نیافته و حتی میل به افزایش نیز پیدا کرده، ادامه یافته است. شکل (۵)، موقعیت ایستگاه‌های پیشنهادی را در کنار ایستگاه‌های موجود نشان می‌دهد.جدول(۲) موقعیت اولویت احداث ایستگاه‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود ۱۷ ایستگاه جهت تقویت شبکه به شبکه‌ی موجود اضافه گردیده‌است.همچنین به منظور کمک

به شناسایی دقیق‌تر موقعیت مکانی ایستگاه‌های پیشنهادی، شهرستان، دهستان و نزدیک‌ترین روستا به ایستگاه در جدول (۲) آمده است.



شکل (۵) موقعیت‌های پیشنهادی احداث ایستگاه جدید به ترتیب اولویت

جدول (۲) موقعیت پیشنهادی برای احداث ایستگاه‌های جدید در استان کردستان به ترتیب اولویت

اولویت	طول (UTM)	عرض (UTM)	شهرستان	نزدیک‌ترین روستا	دهستان	بارش (mm)	ضریب تغییرات
۱	۶۵۵۷۱۳/۲	۳۹۴۳۳۲۹	دیواندره	تازه‌آباد قاضی‌علی	سارال	۴۴۰/۸۵	۹۵/۳۷
۲	۷۶۴۹۳۲/۵	۳۹۹۹۵۲۵	بیجار	قره محمدلو	گرگین	۶۶۳/۱۲	۸۹/۲۴
۳	۶۵۲۸۵۰/۴	۴۰۱۸۴۷۳	سقز	یورقل	گل تپه	۴۸۷/۹۳	۸۶/۹۴
۴	۶۰۸۱۵۶/۲	۳۹۳۶۵۷۰	مریوان	سرگل	سلسلی علیا	۵۲۵/۱۴	۸۶/۴۵
۵	۶۵۵۸۲۳/۴	۳۹۸۵۰۰۰	سقز	سرخ موسی	خورخوره	۴۹۳/۵۴	۸۱/۱۳
۶	۶۳۲۰۱۰/۸	۴۰۲۹۰۰۰	سقز	قلندر	سرا	۴۷۶/۳۵	۸۱/۰۲
۷	۷۵۶۸۰۸/۲	۳۹۷۶۸۸۰	بیجار	چشمه‌کوره	خورخوره	۳۱۵/۶۷	۷۹/۵۹

ادامه جدول (۲)

اولویت	طول (UTM)	عرض (UTM)	شهرستان	نزدیک‌ترین روستا	دهستان	بارش (mm)	ضریب تغییرات
۸	۶۵۷۶۸۶/۳	۳۹۰۹۲۶۵	سنندج	کلاته	ژاورود غربی	۴۲۰/۱۲	۷۳/۵۱
۹	۷۲۷۸۰۹/۹	۳۹۵۳۵۴۵	بیجار	قشلاق نوروز	حومه	۲۷۶/۴۷	۷۲/۸۳
۱۰	۶۸۰۶۸۷/۸	۳۹۴۲۸۶۰	سنندج	گزان علیا	حسین‌آبادجنوبی	۳۸۵/۱۲	۶۹/۶۷
۱۱	۶۴۸۹۰۰/۸	۳۸۶۵۲۱۷	کامیاران	میسوراب	ژاورود	۴۱۶/۱۷	۶۶/۷۸
۱۲	۶۸۸۱۶۵/۵	۳۸۹۶۶۹۸	سنندج	تجره	نران	۳۷۰/۵۴	۶۶/۶۳
۱۳	۷۰۶۹۷۷/۴	۳۸۸۴۵۱۴	کامیاران	دگن	امیرآباد	۳۹۵/۷۴	۶۶/۱۷
۱۴	۷۰۰۲۲۷/۳	۳۹۵۱۴۰۶	بیجار	پشت تنگ	نجف‌آباد	۳۶۱/۲۷	۶۵/۰۵
۱۵	۷۶۵۴۵۶/۸	۳۹۸۴۵۱۲	بیجار	ایده لو	خورخوره	۲۹۶/۷۶	۶۰/۲۵
۱۶	۵۹۰۳۰۲/۸	۳۹۶۹۰۶۲	بانه	ننور	ننور	۷۱۶/۷۹	۵۵/۴۱
۱۷	۵۹۲۹۶۷/۵	۳۹۴۳۹۷۲	مریوان	خانم شیخان	خاوومیرآباد	۷۰۵/۱۳	۴۱/۸۴

در مر حله‌ی پایانی به منظور بررسی کارایی شبکه و اطمینان از بهبود برداشت داده‌ها مقادیر CV قبل و بعد از اضافه نمودن مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول (۳) میانگین ضریب تغییرات هر خوشه را در دو حالت نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقادیر ضریب تغییرات قبل و بعد از اضافه نمودن ایستگاه‌های پیشنهادی

شماره خوشه	ضریب تغییرات اولیه	ضریب تغییرات نهایی	اختلاف ضریب تغییرات دو حالت
۱	۳۰	۲۸/۸۸	۱/۱۱
۲	۳۴	۳۳/۳۷	۰/۶۲
۳	۵۹	۵۷/۷۰	۱/۲۹
۴	۶۷/۱۷	۶۴/۵۹	۲/۵۸
۵	۸۰/۰۴	۷۳/۳۷	۶/۶۷
۶	۶۳/۹۲	۶۳/۶۵	۰/۲۷
۷	۵۷/۲۱	۴۵/۶۸	۱۱/۵۲
۸	۶۸/۳۰	۶۶/۷۸	۱/۵۲

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش زمین‌آمار مبتنی بر ضریب تغییرات کریجینگ به سبب دقت بالا استفاده شد؛ مقدار افزایش صحت در این روش تا حد زیادی به ویژگی‌های نیم تغییرنما (ساختارمکانی) 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 خوشه‌بندی 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 تقویت شبکه‌ی باران‌سنجی استان کردستان ۱۷ نقطه به عنوان مکان احداث ایستگاه‌های پیشنهادی تعیین شد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که مقـادیر ضریب تغییرات مکانی بارش سالانه از بخش‌های مرکزی تا جنوبـی بین ۰/۲۱ تا ۶/۶۷ درصد و در نـواحی غربی نزدیک به ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. در راستای نتایج این تحقیق و با توجه به دقت بالایی که روش‌های زمین‌آمار ارائه خواهند داد، پژوهش آتی بر مبنای نتایج به دست آمده و بر استفاده از سایر الگوریتم‌ها و عملگرهای روش کریجینگ استوار خواهد بود. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران برای مکان‌یابی بهینه‌ی سایر ایستگاه‌های هواشناسی نیز از روش‌های زمین‌آمار استفاده نمایند، همچنین در مرحله اضافه نمودن ایستگاه‌ها و مرحله تعیین ایستگاه‌های پیشنهادی برای حذف دقت لازم و تکرار مناسب رعایت گردد. نتایج این تحقیق برای سازمان‌های اجرایی (نظیر وزارت نیرو، سازمان هواشناسی و ...) به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و خاک قابل استفاده است.

منابع

- اعمی ازغدی، علی؛ مکرم، مرضیه؛ آبشیرینی، احسان و حسین شایسته زارعتی (۱۳۸۹)، **مکانیابی و بهینه‌سازی ایستگاه‌های باران‌سنجی (مطالعه‌ی موردی شمال شرق خوزستان)**، همایش ژئوماتیک، صص ۱- ۸.

- جلالی، قباد؛ طهرانی، محمد مهدی؛ برومند، ناصر و صالح سنجری (۱۳۹۲)، **مقایسه‌ی روش‌های زمین‌آمار در تهیه‌ی نقشه‌ی پراکنش مکانی برخی عناصر غذایی در شرق استان مازندران**، فصلنامه‌ی پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۷، صص ۱۹۶- ۲۰۴.

- دواتگر، ناصر (۱۳۷۶)، **بررسی امکان وجود تغییرات فضایی در توزیع اندازه‌ی ذرات، مواد آلی، جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع دو مزرعه شالیزاری**، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز.

- رحیمی بندرآبادی، سیما و بهرام ثقفیان (۱۳۸۹)، **بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی بر مبنای بارش ماهانه و سالانه**، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال چهارم، شماره‌ی ۱۲، صص ۲۷-۳۶.

- شفیعی، مجتبی؛ قهرمان، بیژن و بهرام ثقفیان (۱۳۹۲)، **ارزیابی و بهینه‌یابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی برمبنای روش کریجینگ احتمالی (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی گرگان‌رود)**، تحقیقات منابع آب ایران، سال نهم، شماره‌ی ۲، صص ۹- ۱۸.

- فرجی سبکبار، حسنعلی؛ محمودی میمند، هادی؛ نظیف، سارا و رحیم علی‌عباسپور (۱۳۹۳)، **توسعه‌ی بهینه‌ی شبکه‌ی باران‌سنجی با استفاده از روش کریجینگ و آنتروپی در محیط GIS (مورد مطالعه: حوضه‌ی آبریز کرخه)**، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره‌ی ۴۶، شماره‌ی ۴، صص ۴۴۵-۴۶۲.

- کسایی رودسری، بابک؛ قهرمان، بیژن و محمدباقر شریفی (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، سال چهارم – شماره‌ی ۱۰، صص ۳۵-۴۴.

- گلمحمدی، گلمر؛ معروفی، صفر و کورش محمدی (۱۳۸۶)، **منطقه‌ای نمودن ضریب رواناب در استان همدان با استفاده از روش‌های زمین آماری و GIS**، فصلنامه‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره‌ی ۴۶، صص ۵۰۱- ۵۱۴.

- میرموسوی، سیدحسین؛ مزیدی، احمد و یونس خسروی (۱۳۸۸)، **تعیین بهترین روش زمین‌آمار جهت تخمین توزیع بارندگی با استفاده از GIS (مطالعه‌ی موردی: استان اصفهان)**، مجله‌ی علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی سال ۱۰، شماره‌ی ۳۰، صص ۱۰۵-۱۲۰.

- مهرشاهی، داریوش. و یونس خسروی (۱۳۸۷)، **ارزیابی روش‌های میانیابی کریجینگ و رگرسیون خطی بر پایه‌ی مدل ارتفاعی رقومی جهت تعیین توزیع مکانی بارش سالانه (مطالعه‌ی موردی استان اصفهان)**، فصلنامه‌ی برنامه‌ریزی و آمایش فضا، شماره‌ی چهار، صص ۲۳۳- ۲۴۹.

- نورزاده حداد، مهدی؛ مهدیان، محمدحسین و محمدجعفر ملکوتی (۱۳۹۲)، **مقایسه‌ی کارایی برخی روش‌های زمین‌آماری به منظور بررسی پراکنش مکانی عناصر ریزمغذی در اراضی کشاورزی، مطالعه‌ی موردی: استان همدان**، نشریه‌ی دانش آب و خاک. جلد ۲۳، شماره‌ی ۱، صص ۷۱-۸۱.

-Adhikary, S.K., Yilmaz, A.G., Muttil. N. (2014), **Optimal Design of Rain Gauge Network in the Middle Yarra River Catchment**, Australia, Hydrological Processes, Volume 29, Issue 11, PP. 2582–2599.

-Awadallah, A.G. (2011), **Selecting Optimum Locations of Rainfall Stations Using Kriging and Entropy**, International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 12 No: 01. PP.36-41.

-Bacchi, B. and Kottegoda, N.T. (1995), **Identification and Calibration of Spatial Correlation Pattern of Rainfall**, J. of Hydrology, 165. PP. 311-348.

-Cheng, K.Sh, Lin, Y. Ch. and Liou, J.J., (2008), **Rain-gauge Network Evaluation and Augmentation Using Geostatistics**, Hydrol, Process, 22, PP. 2554–2564.

-Rudel, E. (2001), **Design of the New Austrian Surface Meteorological Network**, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria. PP: 1-10.

-Shaghaghian, M.R., Abedini, M.J., (2013), **Rain Gauge Network Design Using Coupled Geostatistical and Multivariate Techniques**, Scientia Iranica A 201320 (2). PP. 259–269.

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

-Sun, B and Petreson, T.C., (2006), **Estimating Precipitation Normal for USCRN Stations**, Journal of Geophysical Research, 111(D9). PP. 1984–2012.

-Wei, Ch; Yeh, H.Ch., (2014), **Spatiotemporal Scaling Effect on Rainfall Network Design Using Entropy**, Entropy 2014, 16,. PP. 4626-4647.

-Yeh, H. Ch; Chen, Y.Ch; Wei, Ch; Ru-Huei, Ch., (2011), **Entropy and Kriging Approach to Rainfall Network Design**, Paddy Water Environ 9. PP. 343–355.

-Zimmerman, D.L., (2006), **Optimal Network Design for Spatial Prediction**, Covariance Parameter Estimation, and Empirical Prediction, Environmetrics, 17. PP. 635–652.

-Zho. P, L.W. Zhang, K.M. Liew., (2013), **Geometrically Nonlinear Thermomechanical Analysis of Moderately thick Functionally Graded Plates Using a Local Petrov-Galerkin Approach with Moving Kriging Interpolation**, Composite Structures, Vol. 107. PP. 298–314.