

ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در برآورد توزیع مکانی بارش در استان همدان در محیط GIS

صفر معروفی^۱، گلر گل محمدی^۲، کورش محمدی^۳ و حمید زارع ایبانه^۱

تاریخ دریافت: 87/6/5

تاریخ پذیرش: 88/3/10

- 1- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا
- 2- دانشجوی سابق دوره کارشناسی ارشد، آبیاری و زهکشی گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا
- 3- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبه E-mail: smarofi@yahoo.com

چکیده

یکی از مشکلات مهم مطالعات منابع آب، برآورد منطقه‌ای بارندگی بر اساس مشاهدات نقطه‌ای می‌باشد که می‌تواند به روش‌های مختلفی صورت گیرد. در این مطالعه، با استفاده از قابلیت سیستم اطلاعات جغرافیایی و بکارگیری برخی از روش‌های زمین‌آمار از قبیل کریجینگ (ساده، معمولی و عمومی) و توابع پایه شعاعی، تغییرات مکانی مشخصه‌های بارش سالانه استان همدان مورد ارزیابی قرار گرفت است. بدین منظور از داده‌های آماری 11 ساله تعداد 36 ایستگاه هواشناسی و نقشه رقومی استان استفاده گردید. معیارهای ارزیابی در این پژوهش متوسط خطای اریب، متوسط قدرمطلق خطا، ریشه میانگین مربعات خطا و انحراف استاندارد عمومی، با استفاده از روش اعتبارسنجی حذفی بوده است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهند که میزان بارندگی سالانه در این استان بین 206/7 و 494/8 میلیمتر تغییر می‌کند. ضمناً روش کریجینگ ساده با مدل واریوگرام نمایی با توجه به مقادیر متوسط خطای اریب، متوسط خطای مطلق و انحراف استاندارد عمومی که به ترتیب 0/002، 16/53 و 21/04 درصد می‌باشند، بهترین روش برای درونیابی مقادیر میانگین بارندگی است. همچنین با توجه به مقادیر خطاهای ذکر شده، روش کریجینگ ساده با مدل دایره‌ای مناسبترین روش درونیابی مقادیر حداکثر بارندگی می‌باشد. در خصوص مقادیر حداقل بارش سالانه نیز، روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی با مدل گوسین بهترین نتایج را دادند. این نتایج می‌توانند در تخمین دقیق‌تر مکانی مشخصه‌های بارش منطقه استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: بارندگی، توابع پایه شعاعی، زمین‌آمار، سیستم اطلاعات جغرافیایی، کریجینگ، همدان

Evaluation of Geostatistical Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall in Hamedan Province, Iran in GIS Media

S Marofi^{1*}, G Golmohammadi², K Mohammadi³ and H Zare Abyaneh¹

¹Department of Irrigation and Drainage, College of Agric., Bu-Ali Sina Univ.

²Former M.Sc. student of Irrigation and Drainage, College of Agric., Bu-Ali Sina Univ.

³Department of Irrigation and Drainage, College of Agric., Tarbiat Modares Univ.

*Correspondent author: E-mail: smarofi@yahoo.com

Abstract

Estimation of regional rainfall is one of the important water resources studies issue that could be accomplished by different methods. In this research, based on GIS capability and application of some geostatistical methods such as Kriging (Simple, Ordinary and Universal) as well as Radial Basis Functions (RBF), the spatial distribution of annual rainfall characteristics of Hamedan province were evaluated. In this regard, the observed data of 11 years in 36 meteorological stations and digital elevation model of the study area were used. To evaluate the methods, the cross validation technique was applied by error estimation. The results show that rainfall of the area varies between 206.7 and 494.8 mm. They also illustrate that the simple Kriging (with exponential model variogram) is the best method for average annual rainfall interpolation based on the mean bios error, mean absolute error and root mean squared error. They were 0.002, 16.53 and 21.04, respectively. Based on the estimated errors, in the case of maximum data, simple Kriging (with circular model) was identified as the reliable estimation method. The ordinary and universal Kriging methods (with Gaussian model) were also recognized as the most precise methods for the minimum rainfall data estimation. These results can be used to local estimation of rainfall characteristics of the region.

Keywords: Geostatistic, GIS, Hamedan, Kriging, Rainfall, Radial basis function

مقدمه

ایستگاه‌ها و تغییرات زیاد بارش، اهمیت در نظر گرفتن موقعیت نقاط در برآوردها دو چندان می‌گردد. در هر صورت ایجاد شبکه‌های مترکم باران‌سنجی و انجام محاسبات کلاسیک درونیابی امری اجتناب‌ناپذیر است. از سوی دیگر به دلایل اقتصادی و اجرائی، محدودیت قابل توجهی جهت ایجاد تعداد ایستگاه‌های کافی در هر شبکه

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجهی که در سنوات اخیر در خصوص پیش‌بینی و اندازه‌گیری بارش ایجاد شده است، هنوز تعیین دقیق میزان بارش در یک منطقه امری مشکل می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل پراکندگی

همکاران (2003) نیز مقادیر بارندگی را در 91 ایستگاه باران‌سنجی واقع در حوضه‌ای با وسعت حدود 141 کیلومتر مربع در نزدیکی تامبستون آریزونا² مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور دو روش کریجینگ و مولتی‌کوادریک³ در شبکه‌هایی به وسعت 100×100 متر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تکنیک اعتبارسنجی حاصل از این دو روش مشابه یکدیگر بوده و هیچ‌یک از روش‌ها بر دیگری برتری نداشتند. دیسکرویکس و همکاران (2001) به مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی بارندگی در منطقه شمال غرب مکزیکو پرداختند. آنها روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ را به عنوان روش‌های بهتر و معمول‌تر برای میان‌یابی و بازسازی داده‌ها معرفی کردند. در تحقیق دیگری با هدف تبدیل داده‌های نقطه‌ای به شبکه‌های مستطیلی توسط لینچ (2001) انجام گردید، از روش‌های عکس وزنی فاصله، کریجینگ، اسپیلین برای رستری (برداری) نمودن و درون‌یابی اطلاعات بارندگی 170 نقطه در آفریقای جنوبی استفاده شد و در بین آنها، روش عکس وزنی فاصله، به عنوان بهترین رابطه توصیه گردید. لینچ و شولز (1995) از چند روش میان‌یابی از قبیل عکس وزنی فاصله، تیسن و کریجینگ را برای میان‌یابی مکانی بارندگی روزانه در منطقه‌ای به وسعت 10735 کیلومتر مربع در جنوب آفریقا استفاده کردند. نتایج مربوطه نشان‌دهنده آن بود که روش کریجینگ عمومی دارای کمترین میزان خطای برآورد می‌باشد. کستون (2001) برای پایش تغییرات و نوسانات اقلیمی و مدل‌سازی توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی در مقیاس قاره‌ای و منطقه‌ای مطالعاتی را انجام دادند. آنها با استفاده از مدل TPSS⁴ برای داده‌های دما و فشار ماهانه شبکه ایستگاه‌های هواشناسی برای دوره‌های

وجود دارد. این مشکل در مناطق نیمه کوهستانی نیمه‌خشک که موضوع این تحقیق نیز است، افزون‌تر می‌باشد.

امروزه روش‌های مختلف زمین‌آمار برای تخمین متغیرهای مکانی منطقه‌ای، به دلیل در نظر گرفتن همبستگی، موقعیت و آرایش داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. روش‌های مختلف زمین‌آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را نشان می‌دهند. با توجه به امکان استفاده از این روش‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و استفاده روز افزون از این سامانه‌ها، اهمیت انتخاب روش مناسب توسط استفاده کننده دو چندان می‌گردد. بطور کلی نتایج تحقیقات و مطالعات انجام شده، حاکی از برتری روش‌های زمین‌آمار بر روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک بوده است.

در آنالیز درون‌یابی بارندگی در منطقه سانتا باربارا که توسط نگوین و همکاران (1998) گردید از دو روش کریجینگ و فاصله معکوس برای درون‌یابی اطلاعات استفاده شد. در همین رابطه با رسم نیم‌تغییرنماها¹ و تفسیر آنها بدلیل آنکه همبستگی خاصی بین اطلاعات وجود نداشت، روش کریجینگ مناسب تشخیص داده نشده و به جای آن روش رگرسیون چندگانه استفاده گردید. در این مطالعه اطلاعات بارندگی برای 60 نقطه به دست آمد و با محاسبه میزان خطای باقیمانده نسبی، روش رگرسیون چندگانه نتایج بهتری نسبت به روش فاصله معکوس برای درون‌یابی بارندگی در برداشت.

تانگ (2002) برای اطلاعات بارندگی ماهانه مربوط به 61 نقطه پنج مدل تغییرنما (کروی، نمایی، خطی، گوسین و درجه دوم) بکاربرد. نیم‌تغییرنماها با مدل گوسین و درجه دوم، بهترین نتایج را برای درون‌یابی نشان داد. سید و

²Tombstone Arizona

³Multiquadric

⁴Thin plate smoothing spline

¹Semi-Variograms

شده است. در تحقیقی که توسط موسوی‌نژاد (1379) در محدوده مرکزی ایران انجام گرفت، تعداد 403 ایستگاه هواشناسی با آمار سالانه و ماهانه 30 ساله بارندگی، روش‌های زمین‌آماري کريجينگ معمولی، کريجينگ با لگاریتم داده‌ها، کوکريجينگ با متغیر کمکی ارتفاع، و همچنین روش‌های غیرپارامتری نظیر میانگین متحرک وزنی و TPSS برای پهنه‌بندی بارندگی استفاده شد. نتایج نشان داد که روش TPSS با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و توان 2، بهترین دقت را برای بارندگی سالانه و ماهانه دارد.

در تحقیقی دیگری که توسط مهدی‌زاده (1381) انجام گردید، روش‌های مختلف زمین‌آمار را برای برآورد دما و بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مورد ارزیابی قرار داد. بطور کلی از بین روش‌های TPSS، کريجينگ، کوکريجينگ و میانگین متحرک وزنی، روش TPSS با متغیر کمکی و توان 2 برای برآورد دما انتخاب گردید و روش‌های کوکريجينگ، کريجينگ و میانگین متحرک وزنی به ترتیب در مراتب بعدی قرار گرفتند. در رابطه با بارندگی نیز روش TPSS با توان 2 و بدون متغیر کمکی و سپس روش کريجينگ معمولی و میانگین متحرک وزنی اولویت داشتند. در مجموع روش TPSS با متغیر کمکی و توان 2 روش مناسب برای برآورد دمای متوسط ماهانه می‌باشد. فقط در دی‌ماه توان 3 نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. در مورد دمای سالانه نیز روش TPSS با متغیر کمکی و توان 2 با خطا و انحراف به ترتیب در حدود 0/59 و 0/10 درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با روش‌های دیگر از دقت بیشتری برخوردار است. برای برآورد بارندگی ماهانه نیز، به غیر از ماه‌های بهمن و تیر که روش TPSS با متغیر کمکی و توان 2 بهترین دقت را دارد، از روش مذکور بدون متغیر کمکی استفاده شد، که در مقایسه با سایر روش‌ها از نتیجه بهتری برخوردار بوده است. همچنین برای برآورد

1952 تا 1990 به این نتیجه رسیدند که حرکت شگرفی در اقلیم قاره اقیانوسیه دیده می‌شود. جفری و همکاران (2001) نیز داده‌های بارندگی و اقلیمی 4600 ایستگاه در سرتاسر استرالیا را بررسی نموده و با ایجاد یک شبکه منظم از روش TPSS میان‌یابی متغیرهای اقلیمی روزانه انجام داده و همچنین از روش کريجينگ معمولی برای میان‌یابی بارندگی ماهانه و روزانه استفاده کردند.

در ایران نیز روش‌های فوق‌الذکر در موارد مختلف در طی دهه گذشته استفاده شده است. طی تحقیقی که در دشت سیستان توسط دلبری (1380) صورت گرفته است، ضمن بررسی تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی خاک، مناسب‌ترین روش میان‌یابی زمین‌آماري انتخاب گردیده است. روش‌های میان‌یابی استفاده شده در تحقیق مذکور شامل کريجينگ، میانگین متحرک وزنی (WMA)¹ و TPSS بوده و بر اساس روش ارزیابی متقابل (با معیار میانگین قدرمطلق خطا) کنترل و بررسی شده است. در مجموع پس از بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که روش TPSS بیشترین دقت را در برآورد هدایت هیدرولیکی دارد. در تحقیقی که توسط صفری و همکاران (1381) انجام شد، از تخمین‌گرهای زمین‌آماري برای ایجاد شبکه بهینه پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت چمچمال کرمانشاه استفاده شد.

رحیمی‌بندرآبادی (1379) روش‌های کريجينگ معمولی، کوکريجينگ و TPSS بدون متغیر کمکی را برای برآورد بارش سالانه و ماهانه در منطقه جنوب شرق ایران مورد بررسی و مقایسه قرار داد. نتایج بدست آمده نشان داد که برای بارندگی سالانه منطقه مذکور به ترتیب روش‌های TPSS با متغیر کمکی ارتفاع و کريجينگ، مناسب‌ترین روش بدین منظور می‌باشند. در خصوص بارندگی ماهانه نیز روش TPSS با توان 2 بعنوان بهترین روش شناخته

¹Weighted moving average

اقدسی (1383) به ارزیابی روش‌های زمین‌آمار برای ترسیم میدان عددی بارندگی‌های روزانه و سالانه پرداخت. او در این مطالعه با استفاده از چند روش زمین‌آمار که شامل کریجینگ، WMA (با توان‌های یک الی پنج) و TPSS (با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و بدون آن، و توان‌های دو الی پنج) برای منطقه‌ای کردن بارش سالانه، ماهانه، ده روزه و روزانه در منطقه دشت برخوار اصفهان واقع در بخش مرکزی ایران مورد ارزیابی قرار گرفتند. معیار ارزیابی روش‌های مذکور، مقادیر متوسط قدر مطلق خطا¹ (MAE)، متوسط خطای اریب² (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا³ (RMSE) و انحراف استاندارد عمومی⁴ (GSD)، حاصل از تکنیک اعتبارسنجی حذفی بوده‌است. ارزیابی روش‌ها در هر یک از مقیاس‌های زمانی سالانه، ماهانه، ده روزه و روزانه حاکی از آن است که، مناسب‌ترین روش برای برآورد بارندگی روش TPSS می‌باشد.

لوک‌زاده (1383) به ارزیابی روش‌های مختلف بازسازی خلاءهای آماری بارندگی در منطقه البرز مرکزی پرداخت. روش‌های بکار رفته در این تحقیق شامل روش‌های کلاسیک از قبیل رگرسیون خطی، نسبت نرمال و عکس مجذور فاصله و نیز روش‌های زمین‌آماري بوده است. بدین منظور از بین ایستگاه‌های موجود در منطقه 18 ایستگاه که در دوره 27 ساله دارای آمار کامل و بدون خلاء بود انتخاب گردید و در مقاطع زمانی سالانه، فصلی و ماهانه خلاءهای آماری بازسازی گردید. نتایج ارزیابی با معیار RMSE، روش نسبت نرمال⁵ را در 69/2 درصد

بارندگی سالانه، استفاده از روش TPSS بدون متغیر کمکی و توان 2، با خطا و انحرافی به ترتیب در حدود 43/4 و 5/3 میلیمتر در مقایسه با روش‌های میانگین متحرک وزنی و کریجینگ، از دقت بهتری برخوردار بود.

پرهمت (1381) برای بررسی مدل توزیع رواناب حاصل از ذوب برف، توزیع مکانی بارش را با استفاده از روش‌های زمین‌آماري بررسی کرد. در این رابطه روش‌های مختلف در شبیه‌سازی توزیع مکانی بارش با بکارگیری معیارهای ارزیابی برای بارندگی در سه مقیاس روزانه، واقعه طوفان و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف بکاربرده شده نشان‌دهنده آن است که دو روش TPSS و همبستگی، نسبت به برآورد بارندگی در سه مقیاس زمانی مورد نظر (بر اساس معیارهای موجود) مناسب‌تر از بقیه روش‌ها می‌باشند. بر این اساس نقشه توزیع مکانی بارندگی در دوره منتخب در سال آبی 76-1375 در پیکسل‌های 300 متری از روش TPSS تهیه گردید. همچنین نقشه همباران سالانه با استفاده از نقشه‌های توزیعی فوق بدست آمده‌اند.

میثاقی (1383) در مطالعه‌ای تحت عنوان توسعه الگوریتم ترکیبی زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی بمنظور استخراج توزیع مکانی بارندگی، که برای 24 ایستگاه باران‌سنجی موجود در منطقه مارون واقع در شمال شرق استان خوزستان انجام گرفته است، نشان داد که از بین کلیه الگوریتم‌ها و روش‌های میان‌یابی بررسی شده، تخمین‌گرهای زمین‌آماري نتیجه بهتری حاصل می‌نمایند و خطای برآورد و میان‌یابی توسط مدل‌های شبکه عصبی نسبت به روش‌های زمین‌آماري بیشتر است. لذا تخمین‌گرهای کریجینگ و کوکریجینگ دارای این توانایی هستند که میزان بارندگی را در نقاط فاقد آمار با دقت قابل قبولی، برآورد نمایند.

¹Mean absolute error

²Mean bios error

³Root mean squared error

⁴General standard deviation

⁵Normal relation method

استان¹ (DEM) و در محیط ArcHydro جهت پردازش داده‌ها و انجام محاسبات مربوطه استفاده گردید.

2. روش‌های میان‌یابی

در این تحقیق روش‌های کریجینگ معمولی² (OK)، کریجینگ ساده³ (SK) و کریجینگ عمومی⁴ (UK)، توابع پایه شعاعی⁵ (RBF) و تحلیل تغییرنا برای تخمین متغیر اندازه‌گیری نشده مورد استفاده قرار گرفت. در مورد سه روش کریجینگ معمولی، ساده و عمومی، مدل‌های دایره-ای⁶، کروی⁷، نمایی⁸ و گوسین⁹ بکاربرده شد. همچنین برای روش توابع پایه شعاعی، مدل‌های توابع اسپیلاین کاملاً منظم¹⁰، مولتی‌کوآدریک معکوس¹¹، مولتی‌کوآدریک، اسپیلاین با کشش¹²، اسپیلاین صفحه نازک استفاده گردید. در روش‌های مختلف میان‌یابی، مقادیر برآوردی از مجموع حاصل‌ضرب یک فاکتور وزنی در مقادیر نقاط مشاهده‌ای به دست می‌آید. معادله کلی در روش‌های مختلف میان‌یابی بصورت زیر است، تفاوت روش‌های میان‌یابی، در برآورد فاکتور وزنی یادشده می‌باشد.

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot Z(x_i) \quad [1]$$

در معادله مذکور: $Z^*(x_i)$ مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه x_i و λ_i وزن آماری که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه i ام در برآورد است.

موارد و معیار ضریب همبستگی همین روش را در 53/8 درصد موارد به عنوان مناسب‌ترین روش معرفی نمودند. با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده در خصوص کاربرد روش‌های زمین‌آماری در تخمین توزیع مکانی بارندگی، روش‌های کریجینگ و توابع شعاعی پایه (با تابع TPSS) بیشتر از بقیه روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق نیز این دو روش زمین‌آماری (بر اساس مدل‌ها و توابع مختلف)، به منظور تعیین بهترین برآورد مکانی (برآورد منطقه‌ای) پارامترهای بارندگی سالانه استان همدان بکاربرده شده است. همچنین برای عمومیت دادن به روش انتخابی (بر خلاف سایر تحقیقات که عمدتاً از متوسط آماری استفاده نموده‌اند)، علاوه بر دوره نرمال، دوره‌های خشک و مرطوب نیز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد نظر استان همدان می‌باشد. این استان با مساحتی در حدود 19546 کیلومترمربع، یکی از نواحی کوهستانی و غربی کشور بوده که در حد فاصل جغرافیایی $33^{\circ}33'$ تا $35^{\circ}38'$ عرض شمالی و $47^{\circ}45'$ تا $49^{\circ}36'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرارگرفته است (شکل 1). استان همدان از نظر کشاورزی و بخصوص دیم‌کاری دارای اهمیت قابل توجهی در سطح کشور می‌باشد. از این رو تخمین دقیق بارندگی سالانه و ویژگی‌های آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق از آمار مربوط به 36 ایستگاه هواشناسی که دارای طول دوره مشترک آماری 11 ساله می‌باشند، استفاده شد. در شکل (2) موقعیت و پراکنش مکانی ایستگاه‌های مذکور نشان داده شده است. اطلاعات بارندگی مورد استفاده شامل میانگین سالانه بارندگی و دو جامعه آماری مربوط به داده‌های حداکثر (سال پرآبی) و حداقل (سال کم‌آبی) بارش سالانه ایستگاه‌های منطقه می‌باشند. ضمناً از نقشه رقومی

¹Digital elevation model

²Ordinary kriging

³Simple kriging

⁴Universal kriging

⁵Radial basis function

⁶Circular

⁷Spherical

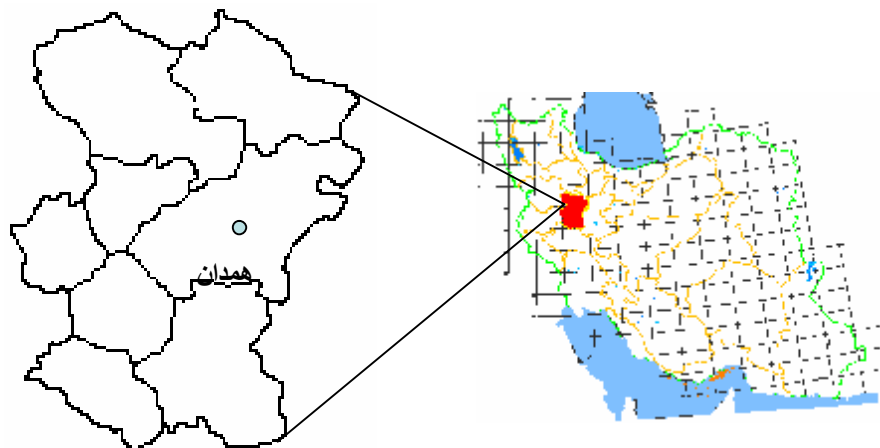
⁸Exponential

⁹Gaussian

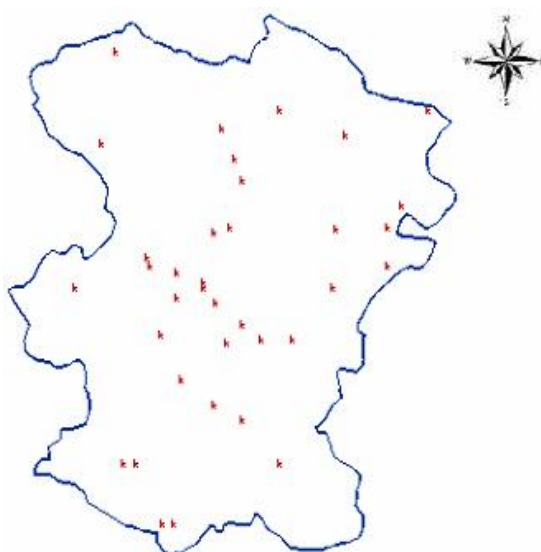
¹⁰Completely regularized spline

¹¹Inverse multiquadric

¹²Spline with tension



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در سطح کشور



شکل ۲- موقعیت و پراکنش مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان همدان، مقیاس ۱:۱,۰۰۰,۰۰۰

است که در عین نااریب بودن، واریانس تخمین نیز حداقل می‌باشد. به عبارت دیگر در این روش از اطلاعات موجود به‌بهترین نحو استفاده شده است.

بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز ارائه می‌دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به فرد کریجینگ می‌توان قسمت‌هایی را که در آنجا خطا زیاد

روش میان‌یابی کریجینگ، یکی از روش‌های پیشرفته زمین‌آمار است که بر اساس آنالیز نیم‌تغییرنما استوار می‌باشد. کریجینگ تخمین‌گری نااریب است که تنها یک متغیر را پیش‌بینی می‌نماید. شرط نااریب بودن در سایر روش‌های تخمین، نظیر روش چند جمله‌ای و معکوس فاصله نیز اعمال می‌شود ولی ویژگی کریجینگ در آن

در معادله مذکور: $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ به ترتیب مقدار متغیر در نقاط x_i و x_i+h بوده و $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های بکار رفته به ازای هر فاصله h می‌باشند.

برای ترسیم واریوگرام لازم است ابتدا مقدار $\gamma(h)$ را به ازاء مقادیر مختلف h محاسبه و سپس مقادیر به دست آمده را به ازاء فواصل h مختلف در یک نمودار رسم کرد. لازم به ذکر است که واریوگرام همان واریانس اختلاف مقدار نقاطی به فاصله h از یکدیگر است. واریوگرامی که از طریق نمونه‌های تجربی به دست می‌آید، واریوگرام تجربی گفته می‌شود. این واریوگرام یک کمیت برداری است و معمولاً با متغیر فاصله و جهت تغییر می‌کند که درجه همسان‌گردی و ناهمسان‌گردی را مشخص می‌کند. واریوگرام دارای مشخصاتی است که شامل آستانه $(Sill=C_1+C_2)$ ، فاصله مؤثر (Range) و اثر قطعه‌ای (C_0) است. مقدار آستانه که بیشترین مقدار واریوگرام بوده، در عمل همان واریانس مکانی متغیر مورد نظر است. کمترین نقطه واریوگرام اثر قطعه‌ای بوده و بیانگر واریانس خطای اندازه‌گیری است. فاصله مؤثر، بیانگر فاصله همبستگی و پیوستگی مکانی یک متغیر بوده و فاصله‌ای است که در آن، واریوگرام دارای بیشترین مقدار می‌گردد. کوواریانس بر خلاف واریانس، مقدار شباهت دو متغیر را نشان می‌دهد. چون جمع جبری تشابه و اختلاف مقدار ثابتی دارد، لذا می‌توان به جای معیار واریوگرام که در آن از میانگین اختلاف نقاطی به فاصله h از یکدیگر استفاده می‌شود، از کوواریوگرام که مقدار تشابه دو متغیر را معرفی می‌کند، استفاده نمود. با توجه به روابط بین واریوگرام و کوواریوگرام می‌توان نوشت:

$$\gamma(h) + C(h) = \sigma_2 \quad [3]$$

در این معادله σ_2 آستانه، $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام، $C(h)$ مقدار کوواریانس می‌باشد.

است و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است را مشخص نموده و تحت پوشش قرار داد. همچنین می‌توان میزان کاهش واریانس تخمین را به ازای یک نمونه اضافی قبل از نمونه‌گیری تعیین کرد. لذا با استفاده از واریانس تخمین می‌توان بهترین نقاط نمونه‌برداری را پیشنهاد نمود. روش توابع پایه شعاعی از جمله روش‌های درون‌یابی می‌باشد که در آن‌ها سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌کند. این روش حالتی از شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد و از ویژگی‌های آن این است که در این روش مقادیر بیشتر از حداکثر مقادیر مشاهده‌ای و یا کمتر از حداقل مقادیر مشاهده‌ای در سطح تخمین وجود دارد. در روش معکوس فاصله نیز سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌نماید اما این روش‌ها هیچ‌گاه مقادیر بیشتر از حداکثر و کمتر از حداقل داده‌های مشاهده‌ای را تخمین نمی‌زند.

3. تحلیل نیم‌تغییر نما

یکی از روش‌های محاسبه تغییرات مکانی یک متغیر، روش نیم‌تغییر نما است. هدف اصلی از برقرار کردن تابع نیم‌تغییرنما آن است که بتوان ساختار تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی شناسایی نمود که آمار کلاسیک مجهز به چنین قابلیت‌هایی نمی‌باشد.

از نظر تعریف، اگر واریانس بین نقاطی به فاصله h کوچک باشد، نشانه وابستگی بیشتر متغیر بین آن نقاط است. این واریانس وابسته به فاصله، نیم‌تغییرنما نامیده می‌شود که با $\gamma(h)$ نشان می‌دهند. تابع نیم‌تغییرنما، تغییرات یک پارامتر را با در نظر گرفتن فاصله بصورت معادله زیر نشان می‌دهد:

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad [2]$$

4. معیار ارزیابی

در معادلات فوق: n تعداد نقاط مشاهده‌ای، $\bar{Z}(x_i)$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای، $Z^*(x_i)$ مقدار برآوردی در نقطه i ام و $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌ای برای نقطه i ام می‌باشد.

نتایج

در پژوهش حاضر چند روش درونیابی، از لحاظ میزان دقت آنها، برای درونیابی داده‌های مربوط به میانگین بارندگی سالانه با یکدیگر مقایسه شدند. هدف دیگر این تحقیق، مقایسه میزان دقت درونیابی برای سال‌های پرباران، کم‌باران و میانگین سالانه (سال نرمال) بود. نتایج بدست آمده با توجه به معیارهای چهارگانه خطاسنجی که در جداول 1 تا 3 ارائه شده‌اند. شکل‌های 3 تا 5، به ترتیب نقشه‌های پهنه‌بندی داده‌های متوسط، حداکثر و حداقل بارش سالانه را نشان می‌دهند.

همچنین به منظور بررسی مقادیر نیم‌تغییرنمای داده‌های مورد نظر، برای هر یک از سال‌های پرباران، کم‌باران، سال نرمال و همچنین تعیین مشخصه‌های مدل‌های برازشی مربوطه، با توجه به مبانی ذکر شده در قسمت مواد و روش‌ها، مشخصات مدل‌های واریوگرام مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مربوطه در جداول 4 تا 6 ارائه شده‌اند. شکل‌های 6 تا 8 مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی را با استفاده از ارزیابی متقابل و به‌کارگیری روش‌های فوق‌الذکر، که بهترین مدل‌های محاسباتی مشخصه‌های بارش استان همدان می‌باشند، را به نمایش می‌گذارند.

در این تحقیق به منظور مقایسه روش‌های بکار برده شده و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین‌آمار، از تکنیک ارزیابی متقابل¹ استفاده شده است. در این خصوص، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط موجود، مقدار آن نقطه برآورد گردید. این کار برای کلیه نقاط مشاهده‌ای تکرار شد، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود داشت. همچنین با استفاده از مدل‌های بدست آمده، در تعدادی از نقاطی که اندازه‌گیری وجود داشته است، مقادیر تخمینی محاسبه گردید. معیارهای مختلفی نیز برای ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی وجود دارد، که می‌توان به میانگین خطای اریب یا انحراف (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و انحراف استاندارد عمومی (GSD) اشاره کرد. معادلات مربوطه به قرار زیر هستند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]}{n} \quad [4]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |[Z^*(x_i) - Z(x_i)]|}{n} \quad [5]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{n}} \quad [6]$$

$$GSD = \frac{RMSE}{\bar{Z}(x)} \quad [7]$$

¹Cross validation

جدول ۱- نتایج ارزیابی روش‌های درونیابی برای برآورد میانگین سالانه بارندگی، محاسبه شده از طریق روش ارزیابی متقابل

*GSD (%)	*MAE (%)	*MBE (%)	*RMSE (mm)	*MAE (mm)	*MBE (mm)	مدل-تابع	روش
23/18	17/72	0/58	74/87	57/22	-1/87	دایره‌ای	**OK
23/18	17/72	0/60	74/88	57/23	-1/93	کروی	
23/32	17/86	0/75	75/30	57/68	-2/41	نمایی	
23/17	17/55	0/48	74/83	56/68	-1/56	گوسین	
21/03	16/60	0/03	67/94	53/62	0/10	دایره‌ای	SK
21/04	16/60	0/03	67/94	53/61	0/1	کروی	
21/04	16/53	0/002	67/94	53/39	0/007	نمایی	
21/03	16/58	0/03	67/93	53/55	0/08	گوسین	
23/18	17/72	0/58	74/87	57/22	-1/87	دایره‌ای	UK
23/18	17/72	0/60	74/88	57/23	-1/93	کروی	
23/32	17/86	0/75	75/30	57/68	-2/41	نمایی	
23/17	17/46	0/48	74/83	56/68	-1/56	گوسین	
23/92	18/49	0/94	77/24	59/70	-3/04	اسپیلاین کاملاً منظم	RBF
23/63	18/36	0/89	76/31	59/30	-2/89	مولتی‌کوآدریک معکوس	
27/21	20/28	0/54	87/89	65/50	-1/75	مولتی‌کوآدریک	
22/18	17/29	0/47	71/65	55/85	-1/52	اسپیلاین با کشش	
34/83	25/47	0/76	112/49	82/25	2/47	اسپیلاین صفحه نازک	

* به ترتیب از راست به چپ، از طریق روابط 4 الی 7 محاسبه شده اند.

** روش‌های OK، SK، UK و RBF در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شده اند.

جدول 2- نتایج ارزیابی روش‌های درونیابی برای برآورد بارندگی سال پرآبی، محاسبه شده از طریق روش ارزیابی متقابل

روش	مدل-تابع	MBE (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	MBE (%)	MAE (%)	GSD (%)
OK	دایره‌ای	-0/87	110/56	152/71	0/18	22/78	31/46
	کروی	-0/81	110/78	152/88	0/17	22/82	31/49
	نمایی	-1/44	110/63	152/96	0/30	22/79	31/51
	گوسین	-0/22	111/21	152/08	0/04	22/91	31/33
SK	دایره‌ای	2/00	104/90	140/09	0/41	21/61	28/86
	کروی	1/99	104/89	140/11	0/41	21/61	28/86
	نمایی	1/40	104/78	140/41	0/29	21/59	28/93
	گوسین	2/05	104/89	140/09	0/42	21/61	28/86
UK	دایره‌ای	-0/87	110/56	152/71	0/18	22/78	31/46
	کروی	-0/81	110/78	152/88	0/17	22/82	31/50
	نمایی	-1/44	110/63	152/96	0/30	22/79	31/51
	گوسین	-0/22	110/21	152/08	0/04	22/91	31/33
RBF	اسپیلاین کاملاً منظم	0/35	112/74	154/88	0/07	23/22	31/90
	مولتی‌کوآدریک معکوس	1/36	111/47	152/55	0/28	22/96	31/42
	مولتی‌کوآدریک	-3/43	130/25	186/18	0/71	26/83	38/35
	اسپیلاین با کشش	10/52	106/75	139/89	2/17	21/99	28/82
	اسپیلاین صفحه نازک	8/28	166/82	251/80	1/70	34/37	51/87

جدول 3- نتایج ارزیابی روش‌های درونیابی برای برآورد بارندگی سال کم‌آبی، محاسبه شده از طریق روش ارزیابی متقابل

روش	مدل-تابع	MBE (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	MBE (%)	MAE (%)	GSD (%)
OK	دایره‌ای	-2/26	61/086	77/13	0/99	26/8	33/84
	کروی	-2/43	61/22	77/29	1/06	26/86	33/91
	نمایی	-3/11	61/99	78/26	1/36	27/19	34/33
	گوسین	-1/25	60/15	75/86	0/55	26/39	33/28
SK	دایره‌ای	-2/66	62/38	75/98	1/17	27/37	33/33
	کروی	-2/62	62/46	76/05	1/15	27/40	33/36
	نمایی	-2/19	63/23	76/44	0/96	27/74	33/54
	گوسین	-2/63	62/44	76/08	0/15	27/39	33/38
UK	دایره‌ای	-2/26	61/09	77/13	0/99	26/8	33/84
	کروی	-2/43	61/22	77/29	1/06	26/86	33/91
	نمایی	-3/11	61/99	78/26	1/36	27/19	34/33
	گوسین	-1/25	60/15	75/83	0/55	26/39	33/28
RBF	اسپیلاین کاملاً منظم	-3/78	62/99	79/43	1/66	27/63	34/85
	مولتی‌کوآدریک معکوس	-3/59	62/64	78/71	1/58	27/48	34/53
	مولتی‌کوآدریک	-6/66	67/97	87/62	2/92	29/79	38/44
	اسپیلاین با کشش	-8/85	73/27	96/3	3/88	32/14	42/25
	اسپیلاین صفحه نازک	-17/11	81/181	105/32	7/50	35/61	46/21

جدول 4- مشخصات مدل واریوگرام برآورد میانگین سالانه بارندگی در سطح استان همدان

C ₀ /Sill (%)	Range (km)	Sill (mm) ²	*C ₀ (mm) ²	مدل	روش
11/4	104/2	0/28	0/032	دایره‌ای	OK
10/9	97	0/28	0/031	کروی	
9/8	89/9	0/28	0/027	نمایی	
12/5	104/2	0/28	0/035	گوسین	
11/4	104/2	0/28	0/032	دایره‌ای	SK
12/26	97	0/26	0/032	کروی	
10/4	89/9	0/27	0/028	نمایی	
13/9	104/2	0/26	0/036	گوسین	
11/4	104/2	0/28	0/032	دایره‌ای	UK
12/26	97	0/26	0/032	کروی	
10/4	89/9	0/27	0/028	نمایی	
13/9	104/2	0/26	0/036	گوسین	

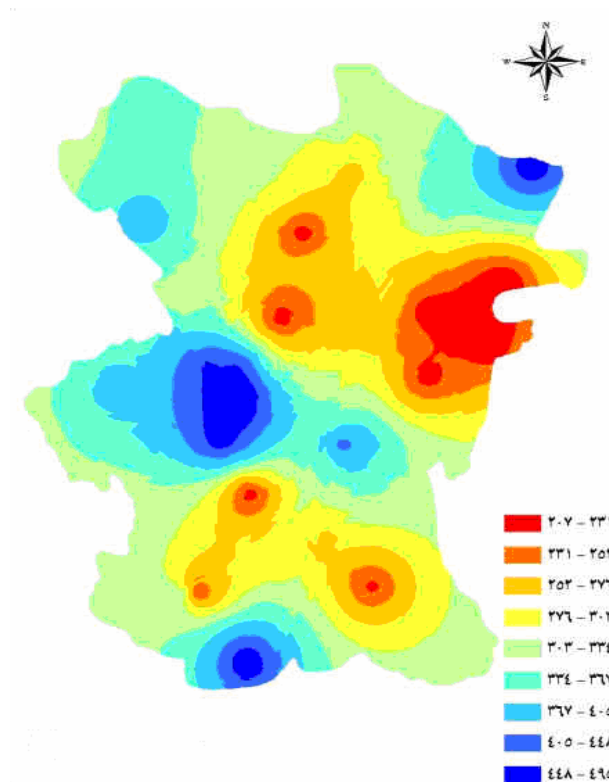
C₀: اثر قطعه‌ای، Sill: آستانه و Range: فاصله موثر

جدول 5- مشخصات مدل واریوگرام برآورد بارندگی سال پرآبی در سطح استان همدان

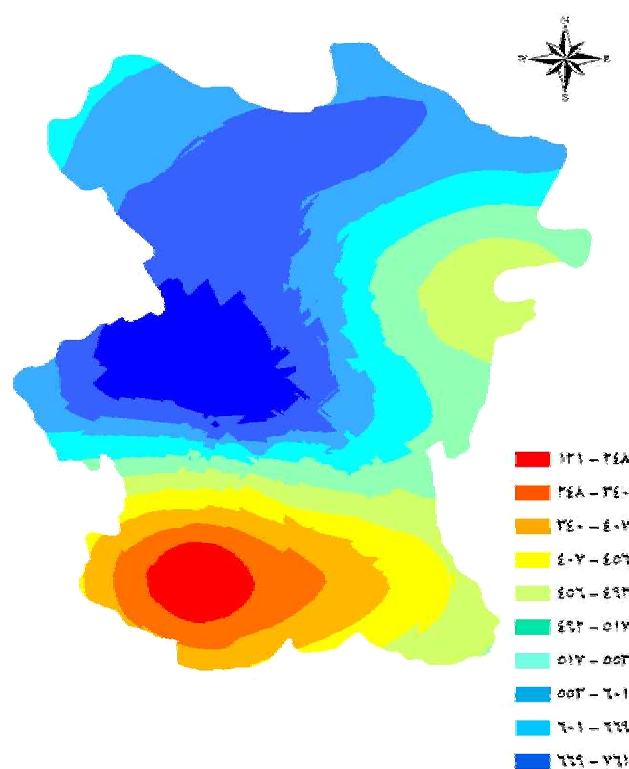
C ₀ /Sill (%)	Range (km)	Sill (mm) ²	C ₀ (mm) ²	مدل	روش
3/6	97	1/6	0/057	دایره‌ای	OK
4	111/3	1/4	0/057	کروی	
4/6	125/5	1/2	0/055	نمایی	
4/4	111/3	1/4	0/062	گوسین	
4/5	86/7	1/29	0/059	دایره‌ای	SK
5/1	98/6	1/14	0/059	کروی	
3/7	104/5	1/84	0/068	نمایی	
5	98/6	1/36	0/069	گوسین	
3/6	97	1/6	0/057	دایره‌ای	UK
4	111/3	1/42	0/057	کروی	
4/6	125/5	1/2	0/055	نمایی	
4	111/3	1/75	0/7	گوسین	

جدول 6- مشخصات مدل واریوگرام بارندگی سال کم‌آبی در سطح استان همدان

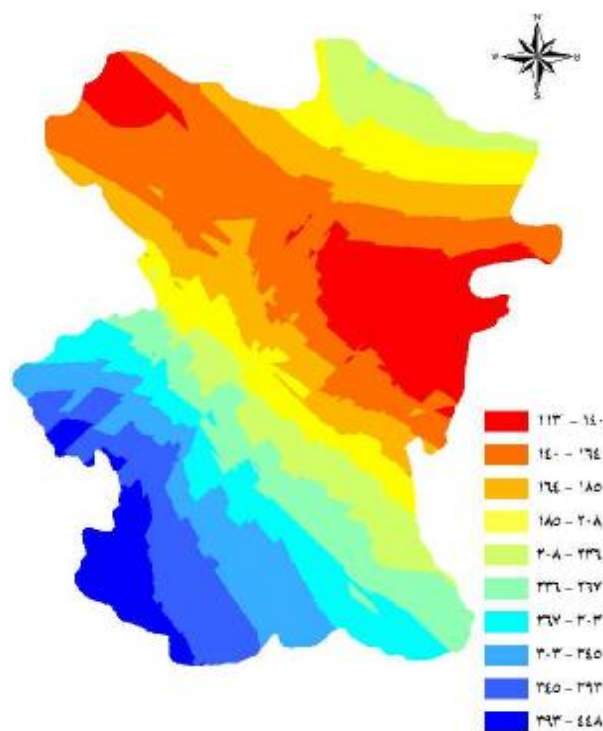
روش	مدل	C_0 (mm) ²	Sill (mm) ²	Range (km)	C_0 /Sill (%)
OK	دایره‌ای	0/066	1/12	97	6
	کروی	0/065	1/07	111/3	6/1
	نمایی	0/056	1/03	111/3	5/4
	گوسین	0/080	1/14	111/3	7
SK	دایره‌ای	0/066	1/12	93/5	6
	کروی	0/065	1/07	100/6	6/1
	نمایی	0/056	1/03	94/7	5/4
	گوسین	0/080	1/14	92/9	7
UK	دایره‌ای	0/066	1/12	97	6
	کروی	0/065	1/07	111/3	6/1
	نمایی	0/056	1/03	111/3	5/4
	گوسین	0/080	1/14	111/3	7



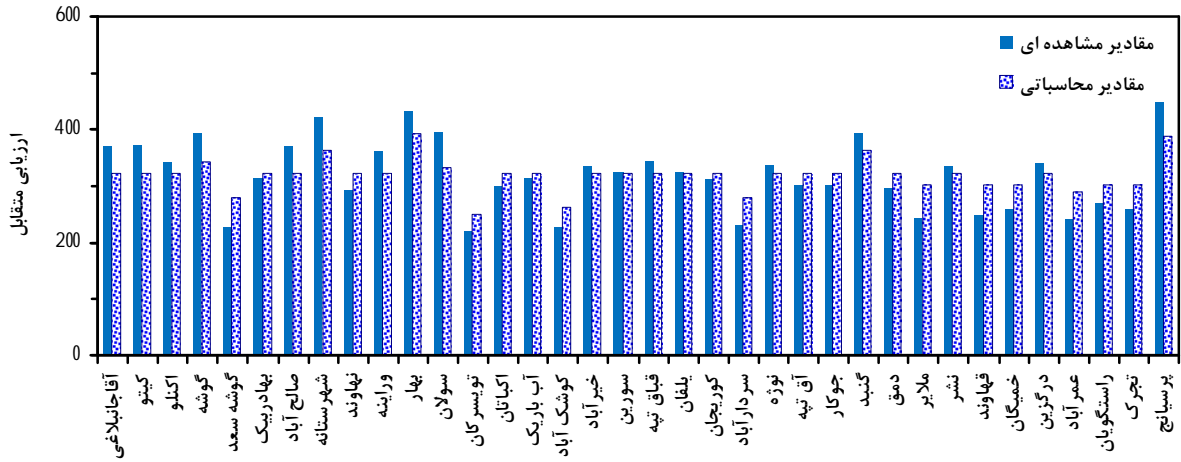
شکل 3- نقشه تخمین سطح میانگین سالانه بارندگی با روش SK، مدل نمایی، مقیاس 1:1,000,000



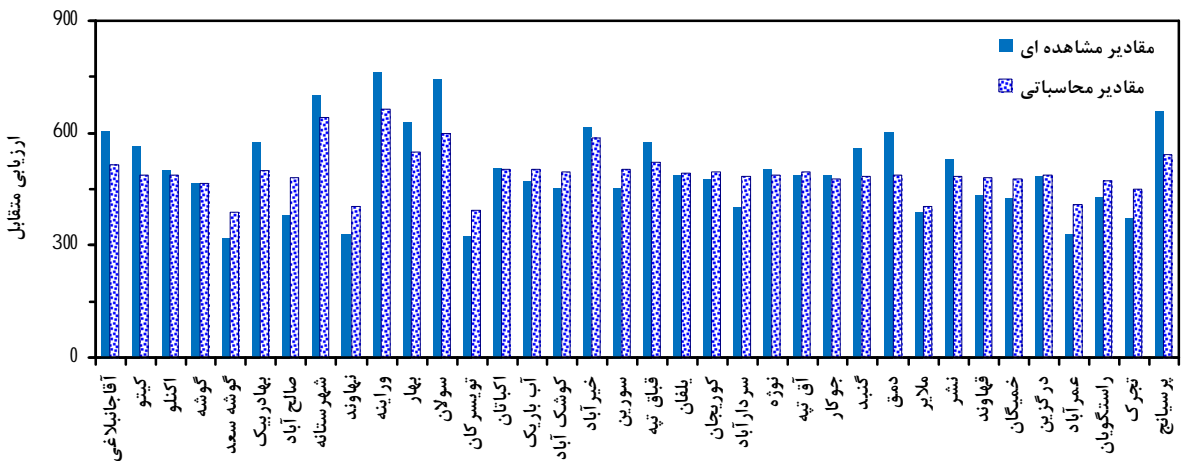
شکل 4- نقشه تخمین سطح بارندگی سال پرآبی با روش SK، مدل دایره ای، مقیاس 1:1.000.000



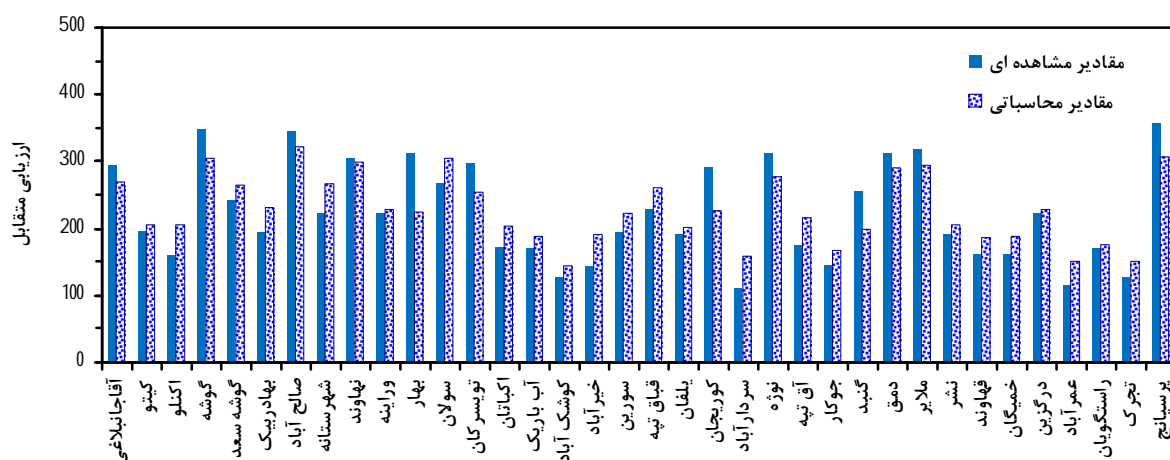
شکل 5- نقشه تخمین سطح بارندگی سال کم آبی با روش UK، مدل گوسین، مقیاس 1:1.000.000



شکل 6- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بارندگی سال میانگین ایستگاه‌های باران‌سنجی با توجه روش SK



شکل 7- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بارندگی سال پربابی ایستگاه‌های باران‌سنجی با توجه روش SK



شکل 8- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بارندگی سال کم آبی ایستگاه‌های باران‌سنجی با توجه روش UK

نتیجه‌گیری

گوسین)، کریجینگ ساده (با مدل دایره‌ای)، کریجینگ عمومی (با مدل گوسین) و توابع پایه شعاعی (با تابع مولتی‌کوادریک معکوس) کم‌ترین مقدار خطا را به ترتیب دارا هستند.

با توجه به نتایج بدست‌آمده از این تحقیق، موارد ذیل قابل استنتاج می‌باشد:

- 1- روش کریجینگ ساده با مدل نمایشی مناسب‌ترین روش برای درونیابی اطلاعات میانگین بارندگی سالانه است.
- 2- روش کریجینگ ساده با مدل دایره‌ای بهترین نتایج را برای درونیابی اطلاعات بارندگی سال‌های پرآبی در برداشتند.
- 3- روش‌های کریجینگ عمومی و معمولی با مدل گوسین بهترین نتایج را برای درونیابی اطلاعات بارندگی سال‌های کم‌آبی ایجاد کردند.

نتایج بدست آمده بیانگر آن است که در هر یک از روش‌های بکاربرده شده جهت درونیابی اطلاعات بارندگی میانگین سالانه، نسبت به بقیه مشخصه‌های بارش منطقه، دقت بیشتری را دارا می‌باشد. همچنین روش‌های کریجینگ ساده (با مدل نمایی)، کریجینگ معمولی (با مدل گوسین)، کریجینگ عمومی (با مدل گوسین) و توابع پایه شعاعی (با تابع اسپیلاین کششی)، به ترتیب کم‌ترین مقدار خطا را در تخمین منطقه‌ای بارندگی میانگین سالانه در بر داشتند. در مورد درونیابی اطلاعات بارندگی سال پرآبی، روش‌های کریجینگ ساده (با مدل دایره‌ای)، توابع پایه شعاعی (با تابع اسپیلاین کششی)، کریجینگ عمومی (با مدل گوسین) و کریجینگ معمولی (با مدل گوسین) کم‌ترین مقدار خطا را نشان داده‌اند. در مورد درونیابی اطلاعات بارندگی سال کم‌آبی، روش‌های کریجینگ معمولی (با مدل

منابع مورد استفاده

- اقدسی ف، 1381. ارزیابی چند روش زمین‌آماري ترسيم ميدان عددي بارندگي روزانه و سالانه (مطالعه موردی دشت برخوار). پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.
- پرهت ج، 1381. مدل توزیع رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور. رساله دکتری رشته آبیاری- هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه علوم و تحقیقات آزاد تهران.
- دلبری م، 1380. کاربرد روش‌های ژئواستاتستیک در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- رحیمی‌بندرآبادی س، 1379. بررسی کاربرد روش‌های ژئواستاتستیک در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه‌خشک جنوب شرق ایران. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در رشته بیابان‌زدایی، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی.
- صفری م، 1381. تعیین شبکه بهینه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی با کمک روش‌های زمین‌آماري مطالعه موردی دشت چمچمال. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.
- لوک‌زاده ص، 1383. ارزیابی چند روش مختلف بازسازی خلاءهای آماری بارندگی در مقاطع زمانی مختلف در منطقه البرز مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.
- موسوی‌نژاد م، 1379. تعیین روش میان‌یابی مناسب برای بارندگی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک حوزه مرکزی ایران. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، مرکز آموزش عالی امام خمینی کرج.
- مهدی‌زاده م، 1381. ارزیابی روش‌های زمین‌آماري برای برآورد دما و بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- میثاقی ف، 1383. توسعه الگوریتم ترکیبی زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی بمنظور استخراج توزیع مکانی بارندگی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.
- Descroix L, Nouvelot JF, Estrada J, and Lebal T, 2001. Complementarily and convergence of rainfall regionalization processes: application to an endoergic basin of Northern Mexico. Rev. Sci. Eau 14(3): 281-305.
- Jeffrey SJ, Carter JO, Moodie KB, and Beswick AR, 2001. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data, Environ. Model. Softw. 16: 309-330.
- Kesteven J, and Hutchinson MF, 2001. Spatial modeling of climate variables on a continental scale. Center for resource and environmental studies institute of advanced studies. Australian National University.
- Lynch SD, 2001. Converting point estimates of daily rainfall onto rectangular grid, Department of Agricultural Engineering University of Natal, South Africa.

- Lynch SD and Schulze RE, 1995. Techniques for estimating areal daily rainfall. Proceeding of the 7th hydrological science symposium, Rhodes University, Grahamstown, South Africa.
- Nguyen RT, Prentiss D and Shively JE, 1998. Rainfall interpolation for Santa Barbara County, UCSB, Department of Geography, Accessed September 2004.
- Syed KH, Goodrich DC, Myer DE and Sorooshian S, 2003. Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff. J. Hydro. 271:1-21.
- Tang Y, 2002. Comparison of semivariogram models for Kirging monthly rainfall in eastern China. Journal of Zhejiang University Science 3(5): 584-590.