تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یکم، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۴
Volume 1, No. 2, Summer 2005(IR-WRR)
۷۴-۸۴

مقایسه روشهای درونیابی و برونیابی برای برآورد توزیع مکانی مقدار بارندگی سالانه

بهرام ثقفیان[۱]
سیما رحیمی بندرآبادی[۲]

چکیده

یکی از مراحل اصلی در مطالعات منابع آب برآورد توزیع مکانی بارندگی در مقیاس‌های زمانی متفاوت می‌باشد. هر نوع کاستی در انتخاب روش مناسب برآورد تغییرات مکانی بارندگی می‌تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در به کارگیری مدل‌های بارش- رواناب در مراحل پیش بینی و طراحی باشد. به علاوه در مطالعات بیلان آب، کاهش عدم قطعیت در برآورد توزیع مکانی بارندگی اهمیت فراوانی دارد. روشهای مختلفی برای تحلیل مکانی بارندگی بر اساس داده‌های نقطه ای حاصل از ایستگاههای باران سنجی وجود دارد. از جمله این روشها می‌توان به روشهای زمین آماری[۱] اشاره نمود. روشهای زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و موقعیت و آرایش مکانی داده‌ها، مورد توجه بسیاری از کاربردهای مهندسی هستند. در این تحقیق، قابلیت چند روش میانیابی شامل میانگین متحرک وزنی[۲]، TPSS[۳] و کریجینگ[۴] برای برآورد توزیع مکانی بارندگی ماهانه و سالانه جنوب غرب ایران بررسی شد. برای مقایسه و ارزیابی روشها، از تکنیک اعتبارسنجی تقاطعی[۵] استفاده گردید. مقایسه روشهای مختلف برای برآورد بارندگی سالانه نشان می دهد که هرچند روش TPSS نسبتا دارای خطای کمتری می‌باشد، ولی روش کوکریجینگ تغییرات مکانی بارندگی در منطقه را بهتر نشان می‌دهد و با توپوگرافی منطقه هماهنگی بیشتری دارد. همچنین بررسی نتایج تکنیک اعتبارسنجی تقاطعی و توزیع مکانی واریانس خطا نشان می‌دهد که استفاده از داده های بازسازی شده دقت برآورد را کاهش می دهد.

کلمات کلیدی : درونیابی، زمین‌آماری، بارندگی، واریانس تخمین.

Comparison of Interpolation and Extrapolation Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall

B. Saghafian[1]
S. Rahimi Bondarabadi[2]

Abstract

Estimation of spatial distribution of rainfall in different time scales is one of the basic steps in water resources studies. Problems in selection of proper methods for spatial variation of rainfall can produce error in input parameters of rainfall-runoff models in design or prediction stages. Also, reducing uncertainty in rainfall distribution is important in water budget studies. There are different methods for estimation of spatial distribution of rainfall based on raingage point data. Geostatistical methods are among such techniques. Geostatistical methods are favored in engineering studies since these methods consider spatial structure and location of data points. In this study, a number of methods were evaluated to estimate spatial distribution of monthly and annual rainfall in southwest of Iran. These methods consist of Thin Plate Smoothing Splines (TPSS), Weighted Moving Average (WMA) and Kriging. Cross validation technique was used for comparison of the methods. Results showed, although the TPSS method with power of 2 was marginally the most accurate method (with minimum MAE) in estimating annual rainfall but co-kriging method showed better consistency with topography of the study area. Analysis of variogram and error variance also demonstrated that generating missing data decreases accuracy of the interpolation.

Keywords: Interpolation, Geostatistics, Rainfall, Spline, Estimation Variance.

۱ – دانشیار پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور
۲ –کارشناس ارشد پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

1 - Associate Research Prof.-Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran
2 - Senior (Research) Scientist Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran

۱- مقدمه

با توجه به محدودیت پوشش ایستگاههای اندازه گیری باران، برآورد بارندگی برای مناطق ما بین آنها، در بسیاری از مطالعات مورد نیاز است. عدم توجه به استفاده از روشهای مناسب در تعیین تغییرات مکانی بارندگی می‌تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در نتایج مطالعات منابع آب تلقی شود. روشهای مختلفی برای برآورد توزیع مکانی با در دست داشتن داده‌های نقطه ای وجود دارد. روشهای کلاسیک در هیدرولوژی از معمول‌ترین این روشها محسوب می گردد. از آن جمله میتوان به روش میانگین حسابی، روش تیسن، روش گرادیان و روش استفاده از خطوط هم باران اشاره نمود. اگر چه محاسبات این روشها سریع و آسان هستند ولی معایب و اشکالات آنها اغلب منجر به ارائه نتایج غیر قابل قبول و با دقت کم می گردند. از این گذشته روشهای سنتی مبتنی بر یک نظریه تغییرات مکانی مشخص نیستند. روشهای زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن موقعیت ایستگاهها و ساختار مکانی داده ها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند. این روشها کمتر در طرحهای منابع آب کشور مورد توجه بوده اند.

کاربرد روشهای زمین آمار ابتدا در رشته معدن شروع گردید و سپس در علوم دیگر توسعه یافت. Mattron پژوهشگر فرانسوی با انتشار مقاله ای در سال ۱۹۶۲ پایه های تئوری زمین آمار را بنا نهاد (رحیمی، ۱۳۷۹). Tabios (1985) و Salas روش کریجینگ را در توزیع بارش سالانه در یکی از ایالتهای آمریکا برای ۲۹ ایستگاه باران سنجی مناسب تشخیص دادند. Abtew et al. (1993) در زمینه برآورد بارندگی ماهانه روش کریجینگ را برای جنوب فلوریدا توصیه نمودند. Price et al. (2000) برای میانیابی مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالانه در غرب و شرق کانادا، دو روش TPSS و روش عکس مجذور فاصله همراه با گرادیان[۶] را بررسی کردند. مقدار RMSE[۷] محاسبه شده برای روش TPSS در هر دو ناحیه کمتر از روش GIDS بود. البته نتایج هر دو روش در نواحی شرقی کانادا (ایالات آنتاریو و کبک)، که تغییرات توپوگرافی و اقلیمی ملایمتری دارند، نسبت به نواحی غربی بهتر بودند. Goovaerts (2000) روشهای کریجینگ ساده، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ را برای برآورد بارندگی سالانه و دمای ۳۶ ایستگاه کلیماتولوژی در ناحیه ای به وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در کشور پرتغال بررسی کرد. در مقایسه روشهای ذکر شده با روشهای عکس مجذور فاصله، رگرسیون خطی با ارتفاع، تیسن و کریجینگ معمولی، روش کریجینگ ساده مناسبترین روش شناخته شد. Hargrove (2001) از روش Spline با حالتهای Tension و Smooth برای برآورد بارندگی در سوئیس استفاده کرد. برآوردها با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و بدون آن انجام شدکه هر دو نتایج مشابهی را ارائه کردند.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که روشهای میانیابی بسته به نوع متغیر و همچنین منطقه مورد مطالعه، تراکم نقاط انداره گیری و نحوه آرایش آنها دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند و نمی‌توان نتایج یک منطقه را به منطقه‌ای دیگر تعمیم داد. در این مقاله، انتخاب‌های مختلف از سه روش میانیابی شامل WMA (Wheighted Moving Average) TPSS (Thin Plate Smoothing Splines) و کریجینگ (Kriging) برای برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه در منطقه جنوب غرب ایران ارزیابی گردیده و مناسبترین روش برای درونیابی و برونیابی بارندگی در این منطقه با توجه به عوامل خطا و تفسیر نتایج معرفی می گردد. ضمن آنکه تاثیر استفاده از داده های بازسازی شده بر دقت برآورد بارندگی نیز بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روشها

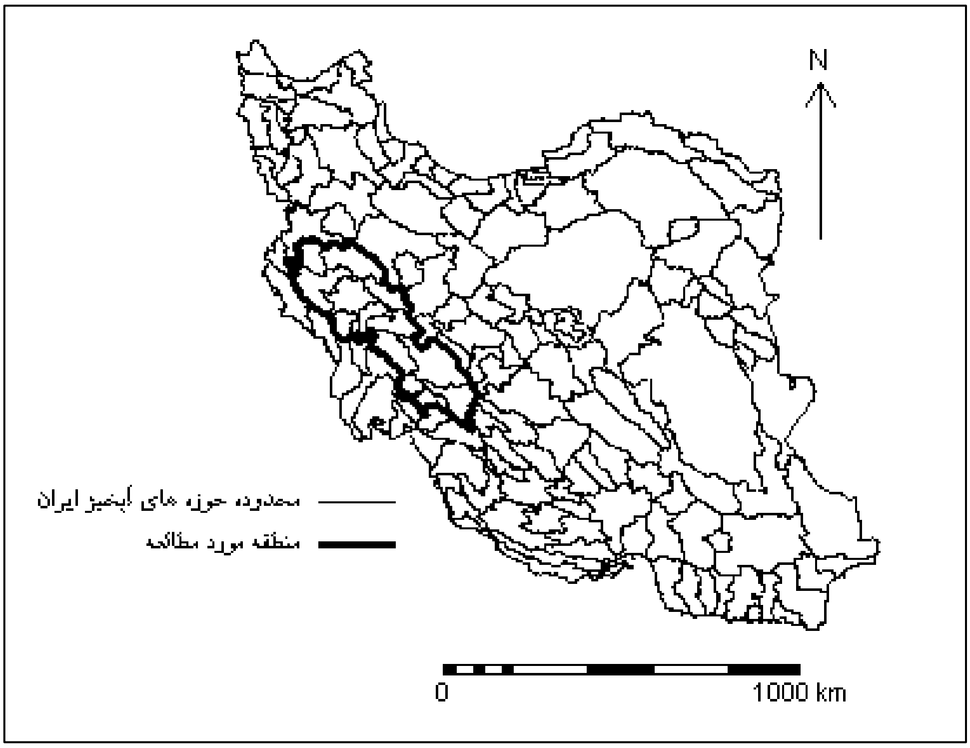
۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه قسمتی از رشته کوههای زاگرس، در جنوب غربی ایران واقع شده است (شکل ۱). این منطقه بین طولهای جغرافیایی '۵۷ و °۴۶ تا ´۱۸ و °۵۷ شرقی و عرض‌های ´۲۴ و °۲۶ تا °۳۴ شمالی واقع شده است. حوزه های آبریز کرخه تا محل سد کرخه، دز تا محل سد دز و کارون تا محل سد کارون ۱ در محدوده منطقه قرار دارند. منطقه مورد نظر به طور کلی از توده‌های رطوبتی و جبهه‌های باران زایی که از جنوب، جنوب غرب و غرب وارد کشور می‌گردند متاثر می‌باشد. حداکثر ارتفاع در این منطقه حدود ۴۵۷۰ متر و حداقل آن صفر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه نیز از ۱۷۳ میلی‌متر تا ۱۱۹۶ میلی‌متر تغییر می‌کند. محدوده این سه حوزه آبریز از نظر تامین منابع آب دارای اهمیت فوق العاده می‌باشد، به طوریکه میزان آورد سالانه آنها بالغ بر ۴۸ میلیارد متر مکعب برآورد شده است. این مقدار حدود ۲۵ درصد کل جریانات سطحی کشور را تشکیل می‌دهد.

تعداد ایستگاههای موجود در منطقه ۱۵۲ ایستگاه بارانسنجی می‌باشد که از این تعداد ۹۵ ایستگاه، دارای آمار تقریبا کامل (نیاز به بازسازی کمتر از ۴ سال) طی دوره مشترک آماری ۱۳۵۳ تا ۱۳۷۷هستند. در موارد لازم نیز تطویل و بازسازی داده‌ها انجام شده است.

۲-۲- روشهای میانیابی

در این تحقیق روش‌های TPSS با درجات ۲ و۳، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، WMA با درجات ۲، ۳، ۴ و ۵ و رگرسیون یک متغیره مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در روش‌های مختلف میانیابی، مقادیر برآوردی از مجموع حاصلضرب یک فاکتور وزنی در مقادیر



شکل ۱- محدوده حوزه های آبریز منطقه مورد بررسی

نقاط مشاهده‌ای به دست می آید. تفاوت روش‌های میانیابی در برآورد فاکتور وزنی یاد شده می‌باشد، به طوری که در روش WMA این فاکتور براساس فاصله بین نقاط، در روش کریجینگ بر اساس تابع همبستگی مکانی نقاط (آنالیز نیم تغییرنما) و در روش TPSS این فاکتور بر اساس تابع پیرایش[۸] محاسبه می‌شود (Hohn, 1999; Hutchinson, 1992; Watson, 1984). در روش رگرسیون نیز مناسبترین تابع برازش به نقاط مشاهده‌ای براساس کمترین مربع انحراف انتخاب می گردد.

۲-۳- نیم تغییرنما

در بررسی‌های آمار کلاسیک نمونه هایی که از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می شوند فاقد اطلاعات مکانی هستند. در نتیجه مقدار اندازه گیری شدهٔ یک کمیت معین در یک نمونهٔ آماری هیچگونه اطلاعی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه گیری به فاصلهٔ معین و معلوم در بر نخواهد داشت. در حالیکه در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت مکانی نمونه نیز مورد توجه قرار می گیرد (رحیمی، ۱۳۷۹). منحنی نیم تغییرنما برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می رود و بنابراین ابزار اساسی در زمین آمار می باشد. این نیم تغییرنما که بر اساس مقادیر نمونه‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود را نیم تغییر نمای تجربی می‌گویند و از معادله زیر قابل محاسبه می‌باشد :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2.n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x+h) - z(x)]^2 \qquad (۱)$$

که در آن:

n(h): تعداد جفت نمونه های بکار رفته در محاسبه به ازای هر فاصله مانند *h* ،

z(x): متغیر اندازه گیری شده در موقعیت *x*

z(x+h) متغیر اندازه گیری شده که به فاصله *h* از *z(x)* قرار دارد.

برای رسم نیم تغییرنما، فاصله یا *h* در محور افقی و مقدار γ در محور قائم آورده می شود. فاصله‌ای که طی آن نیم تغییرنما به حد ثابتی می‌رسد و به حالت افقی نزدیک می شود، شعاع تأثیر یا دامنه تغییر نما (*R*) گفته می شود. مقدار نیم تغییرنما پس از آنکه به حد ثابتی

رسید به نام آستانه ($Sill$) خوانده می شود. مقدار آستانه برابر واریانس کل تمام نمونه هایی است که در محاسبه تغییرنما بکار رفته‌اند. مقدار تغییرنما در مبدأ مختصات یعنی به ازای $h=o$ به نام اثر قطعه ای (C_0) نامیده می شود. در این تحقیق از نیم تغییرنما برای میانیابی با مشتقات روش کریجینگ و همچنین محاسبه توزیع مکانی واریانس خطای برآورد روش کریجینگ استفاده خواهد شد.

۲-۴- واریانس تخمین[۹]

یکی از مهمترین نقاط قوت روشهای زمین آمار، توانائی آن در محاسبهٔ واریانس تخمین و بنابراین توانایی تعیین سطح اعتماد تخمین می‌باشد. واریانس تخمین که با نماد $E\sigma^2$ نمایش داده می‌شود نشانگر واریانس خطای بین مقدار حقیقی و مقدار تخمینی می‌باشد. محاسبهٔ واریانس تخمین نیز به صورت زیر می باشد :

$$E\sigma^2 = 2\sum_{i=1}^{n}\lambda_i.\gamma_{0i} - \gamma_0 - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\lambda_i.\lambda_{ij} \quad (۲)$$

که در آن :

n : تعداد داده ها،

λ_i: وزن داده در موقعیت i،

γ_O : مقدار نیم تغییرنما به ازای $h=0$ ،

γ_{Oi}: مقدار نیم تغییرنما بین داده ها در موقعیت i ،

γ_{ij} : مقدار نیم تغییرنما بین نقطه مورد نظرو داده ها.

در این تحقیق از واریانس تخمین به منظور انتخاب ایستگاهها برای استفاده از آنها در محاسبات برآورد توزیع مکانی داده‌ها استفاده شده است.

۲-۵- معیارهای ارزیابی روشها

هر یک از روش‌ها به منظور تعیین دقت و یا انتخاب پارامترهای مناسب باید ارزیابی شوند. در این زمینه روشهای مختلفی وجود دارد که یکی از مهمترین آنها روش اعتبارسنجی تقاطعی میباشد. در این روش با حذف هر یک از نقاط اندازه گیری شده، که معمولاً تنها ابزار مقایسه می‌باشند، عملیات میانیابی مجددا انجام می‌گیرد و تفاوت مقدار برآورد شده و مقدار واقعی به عنوان معیاری از خطا محاسبه می‌شود. به همین ترتیب برای تمام نقاط برآورد صورت می‌گیرد و خطای حاصل برای کلیه نقاط به دست می آید.

برای ارزیابی میزان دقت و انتخاب بهترین روش، معیارهای مختلفی نظیر محاسبهٔ مجموع مربعات باقیمانده (R.S.S)، میانگین مربعات باقیمانده (R.M.S)، استفاده از روشهای مقایسه آماری نظیـر آنالیز واریانس، کای مربع و مانند آنها وجود دارد. در این مقاله از دو معیار میانگین خطای مطلق[۱۰] (MAE) و میانگین خطای انحراف[۱۱] (MBE) استفاده می‌شود. MAE گویای میانگین خطای هر روش و MBE نشانگر انحراف میانگین هر روش با میانگین داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. مناسبترین روش در مرحله اول برمبنای کمترین مقدار MAE و MBE انتخاب می‌شود. در مرحله دوم، برمبنای تطابق تغییرات بارندگی با وضعیت منطقه روش نهایی معرفی می‌گردد.

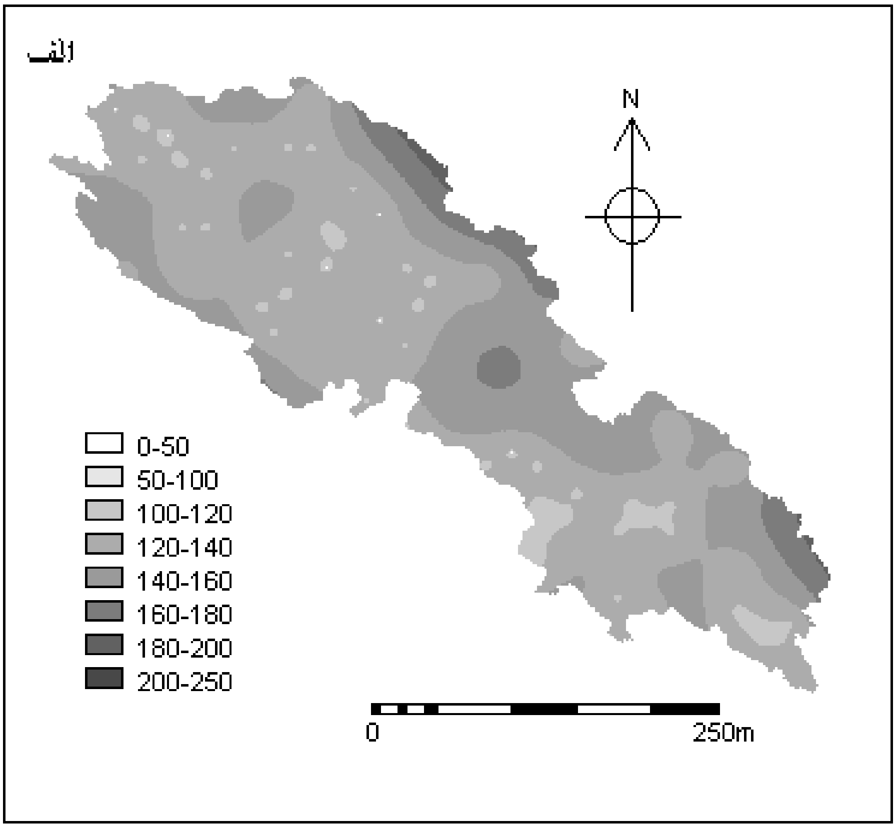
۳- نتایج و بحث

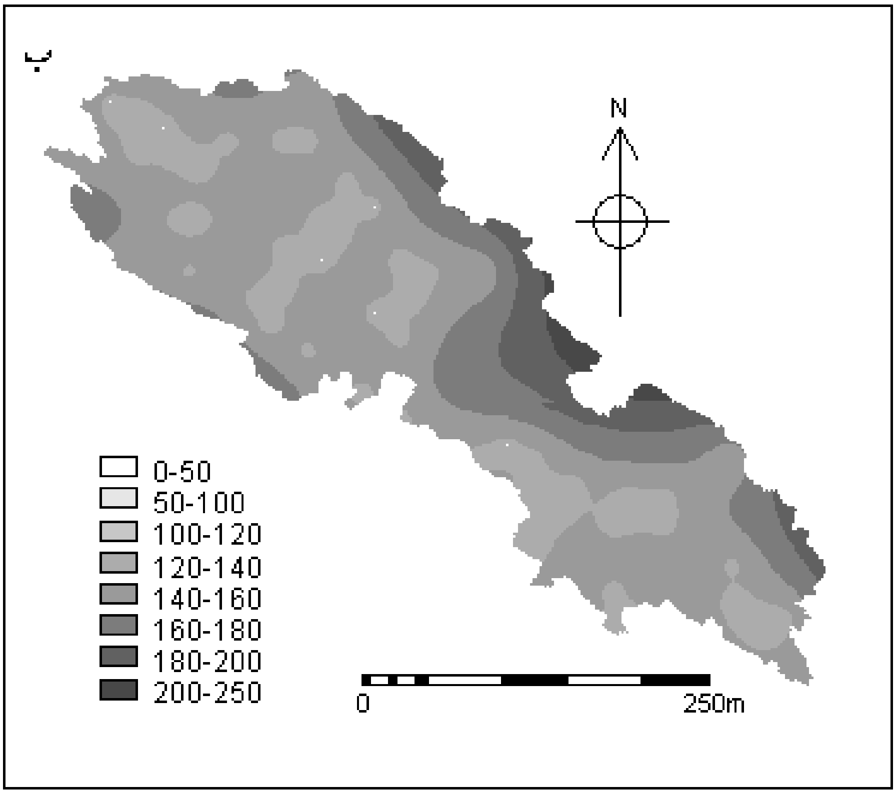
۳-۱- بررسی آمار توصیفی و تعیین داده های مورد استفاده

بررسی دقت برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه در دو حالت انجام گرفت. حالت اول تنها ایستگاههای دارای آمار کامل و یا نیاز به کمتر از ۴ سال بازسازی را پوشش می دهد (۹۵ ایستگاه) و حالت دوم کل ایستگاهها شامل ایستگاههای بازسازی شده و دارای آمار کامل را دربرمی‌گیرد (۱۵۲ ایستگاه). نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که مقدار خطای تخمین در حالت استفاده از ایستگاههای بازسازی شده (حالت دوم) افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول (۱) نیز مشاهده می‌شود در همه روشها مقدار MAE با استفاده از داده‌های بازسازی شده افزایش یافته است. برای حصول اطمینان بیشتر، نقشه توزیع واریانس خطا نیز برای هر دو حالت با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ، بررسی گردید که نقشه توزیع خطا نیز بیانگر دقت کمتر در استفاده از داده‌های بازسازی شده می باشد. شکل (۲) نقشه توزیع خطا برای دو حالت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲ الف) نیز مشخص می‌باشد، در ناحیه شرقی منطقه در حالت اول، مقدار انحراف معیار خطا بیشتر از سایر قسمتها است که بیانگر خطای زیاد برآورد در این قسمت می‌باشد. بنابر این استفاده از چند ایستگاه در این قسمت برای کاهش خطای برآورد می‌تواند مفید باشد. در یک آرایش جدید (حالت سوم)، از داده‌های بازسازی نشده و فقط ۴ ایستگاه فریدون شهر، شهرکرد، چرخ و فلک و رشن آباد (دارای آمار بازسازی شده بیش از ۴ سال) که در این قسمت قرار دارند استفاده گردید. نقشه توزیع خطا بعد از استفاده از آمار این ۴ ایستگاه وضعیت مناسبی را نشان داد به نحویکه میانگین منطقه‌ای انحراف معیار خطا از ۱۵۶/۱ میلی‌متر (برای حالت اول) به ۱۳۸/۱ میلی‌متر (در حالت ۳ که از ایستگاههای کامل و ۴ ایستگاه فوق الذکر استفاده شده است) کاهش یافت. با عنایت به نتایج به دست آمده، برای برآورد تغییرات مکانی بارندگی در این منطقه از آرایش ایستگاههای حالت ۳ استفاده گردید.

۳-۲- نتایج آنالیز نیم تغییرنما

بررسی همبستگی مکانی بارندگی سالانه نشان می‌دهد که همبستگی مکانی از مدل کروی تبعیت می‌کند و دارای شعاع همبستگی حدود ۳۰۰ کیلومتر می‌باشد (شکل ۳). نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع نشان می‌دهد که استفاده از ارتفاع به عنوان متغیر کمکی، دامنه همبستگی مکانی را به ۲۱۱ کیلومتر کاهش می‌دهد.


الف
N
0-50
50-100
100-120
120-140
140-160
160-180
180-200
200-250
0
250m


ب
N
0-50
50-100
100-120
120-140
140-160
160-180
180-200
200-250
0
250m

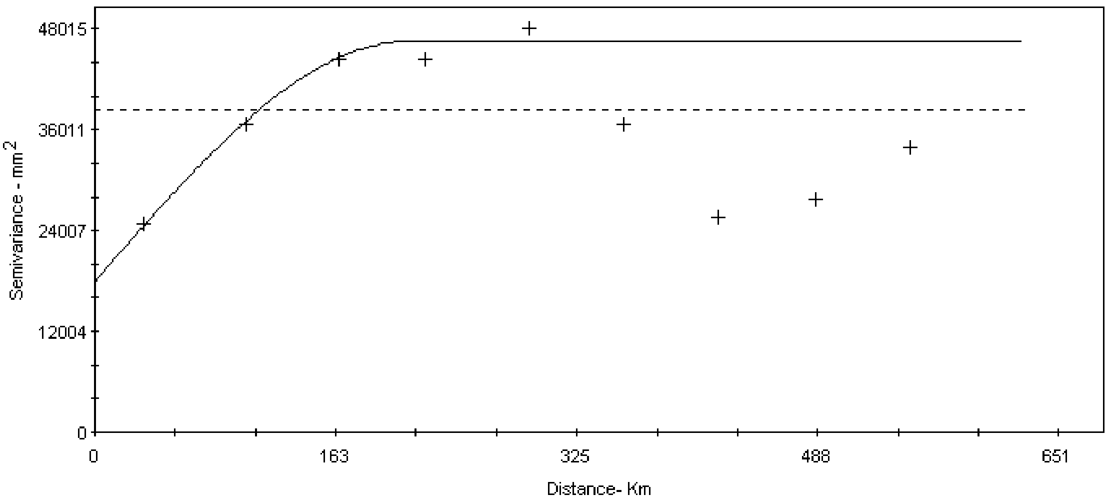
شکل ۲ : نقشه توزیع انحراف معیار خطای برآورد بارندگی سالانه (به میلی‌متر) در دو حالت داده‌ها، الف) استفاده از داده‌های بازسازی نشده (حالت ۱) ، ب) استفاده از کل داده‌ها (حالت ۲)

جدول ۱ - نتایج برآورد خطادر روشهای مختلف برای ۳ حالت داده

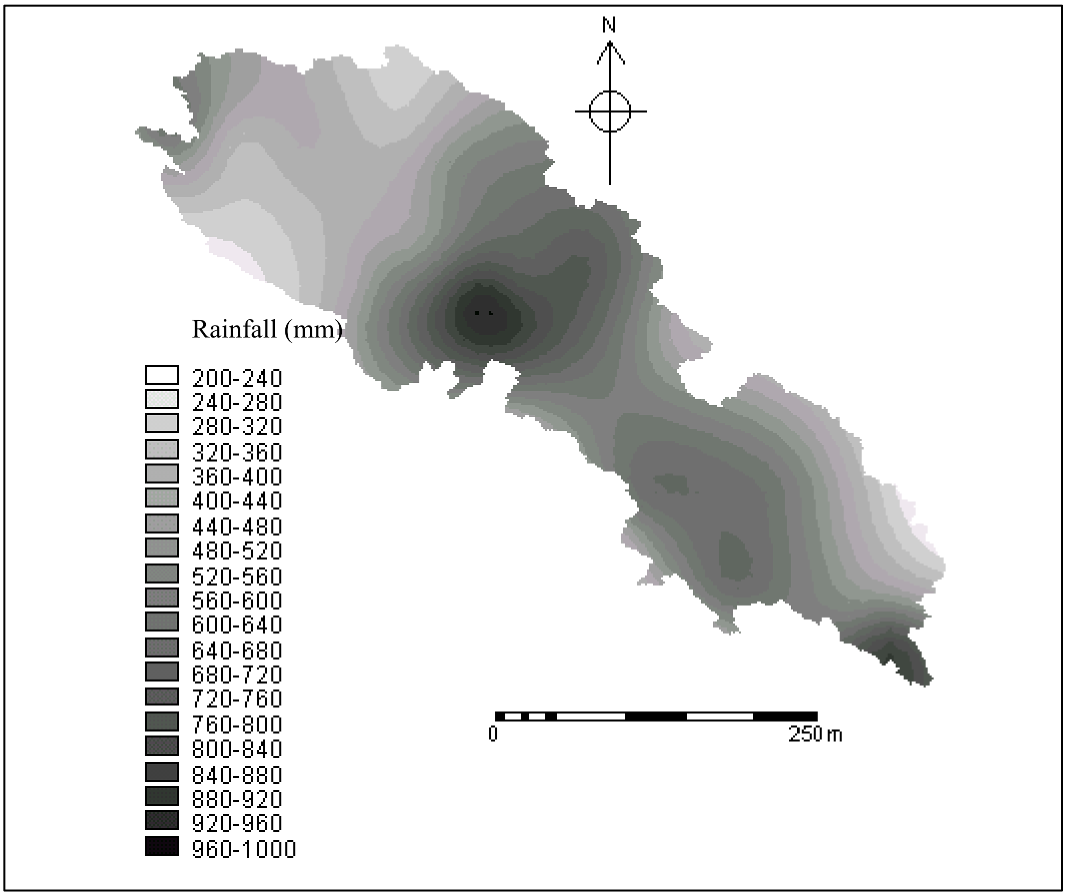
روش	علامت اختصاری	استفاده از ایستگاههای حالت ۱		استفاده از ایستگاههای حالت ۲		استفاده از ایستگاههای حالت ۳	
		MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE
کریجینگ	KRIGING	101.5	3.8	110.5	6.6	100.4	4.1
کوکریجینگ	CO KRIGING	84.7	5.7	93.3	-1.7	86.9	4.9
روش WMA با توان ۲	WMA-2	94.4	13.8	106.2	10.9	96.1	-16.6
روش WMA با توان ۳	WMA-3	90.81	12.3	105.8	7.4	93.5	15.4
روش WMA با توان ۴	WMA-4	90.2	11.3	105.5	4.8	93.3	14.7
روش WMA با توان ۵	WMA-5	90.7	10.8	105.3	2.9	94.0	14.4
روش TPSS با توان ۲	TPSS-2	66..5	-10.1	76.4	-9.8	66.5	-18.1
روش TPSS با توان ۳	TPSS-3	85.0	-18.1	95.7	-13.1	87.1	-18.1

جدول ۲- مشخصات نیم تغییرنمای بارندگی سالانه و نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع

داده	نیم تغییرنمای متقابل بارندگی و ارتفاع				نیم تغییرنمای بارندگی			
	مدل	R (Km)	C_1 (mm^2)	C_0 (mm^2)	مدل	R (Km)	C_1 (mm^2)	C_0 (mm^2)
سالانه	کروی	۳۰۱	۷۰۱۰۰	۳۳۰۰	کروی	۲۱۱	۴۶۵۲۰	۱۷۹۱۰



شکل ۳- نیم تغییرنمای بارندگی سالانه



شکل ۴- نقشه توزیع مکانی بارندگی میانگین سالانه با روش TPSS-2

۳-۳- روش میانیابی مناسب بر اساس میزان خطا

بررسی نتایج روش‌های مختلف برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه نشان می‌دهد که روش TPSS-2 مناسبترین روش برآورد توزیع مکانی بارندگی سالانه در منطقه می باشد (جدول ۱). بنابر این نقشه توزیع مکانی بارندگی سالانه و هر یک از ماهها در مرحله اول با روش TPSS-2 استخراج گردید. شکل (۴) توزیع بارندگی سالانه را با روش ذکر شده نشان می دهد.

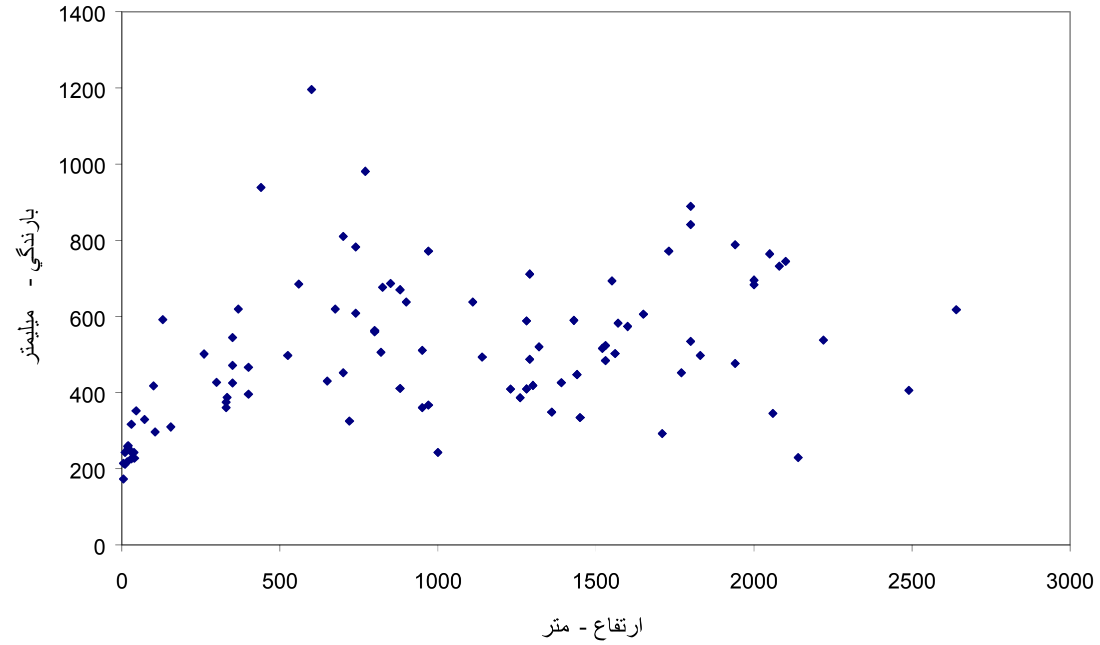
بررسی دقیق نقشه‌ها نشان می‌دهد که این روش در برآورد بارندگی در ارتفاعات دقت خوبی ارائه نمی‌کند، به طوریکه در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر در حوزه کارون بارندگی سالانه را تنها ۲۴۴ میلی‌متر برآورد نموده است. در حالیکه این روند با توجه به تغییرات بارندگی و ارتفاع نمی‌تواند قابل قبول باشد. لذا وضعیت برونیابی روش‌های مختلف در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر بررسی گردید. روش‌های مورد بررسی روش رگرسیون، کوکریجینگ و TPSS می‌باشد.

۳-۴- بررسی کارایی روشها در برونیابی

برای بررسی روش رگرسیون، ابتدا نمودار بارندگی و ارتفاع ایستگاههای حالت ۳ رسم گردید (شکل ۵). همانطور که در شکل (۵) مشخص است رابطه مشخصی بین بارندگی و ارتفاع در منطقه وجود ندارد، لذا بحث تقسیم منطقه به واحدهای همگن مطرح گردید. برای این منظور پس از انجام آنالیز خوشه‌ای (با پارامترهای بارندگی، ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی)، حوزه کارون به صورت یکپارچه و حوزه‌های کرخه و دز نیز به دو ناحیه تقسیم شد. سپس در هر یک از

واحدها مجددا روابط رگرسیونی بررسی گردید. روابط در هر سه منطقه نمایی می‌باشند. سپس توزیع مکانی بارندگی سالانه در واحدهای همگن مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۴) مقادیر MAE و MBE و همچنین حداکثر و حداقل بارندگی سالانه در حوزه کارون را نشان می‌دهد. همانطور که از جدول (۴) نیز روشن است، هرچند روش TPSS دارای MBE و MAE کمتری نسبت به بقیه روشها می‌باشد ولی در برونیابی (محدوده بالاتر از ۲۵۰۰ متر) دقت خوبی ارائه نکرده است روش TPSS مقدار بارندگی در ارتفاع بالاتر از ۲۵۰۰ متر را بین ۲۴۵ تا ۹۰۹ میلی‌متر برآورد می کند که با مقدار بارندگی ایستگاههایی که در نزدیکی این ارتفاع قرار دارند همخوانی ندارد. به نظر می رسد مقدار بارندگی در این محدوده ارتفاع بسیار کم برآورد گردیده است (شکل ۶). با حذف روش TPSS، روش کوکریجینگ و رگرسیون برای برآورد توزیع مکانی مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. روش رگرسیون دارای MBE کمتر ولی MAE بیشتری از روش کوکریجینگ می باشد ضمن آنکه از لحاظ توزیع بارندگی در منطقه (با توجه به مقدار بارندگی در ایستگاهها) نیز مناسب به نظر نمی رسد. زیرا در این روش به ازای یک ارتفاع خاص مقدار بارندگی برآورد می‌گردد که با مقدار بارندگی در ایستگاههای اطراف آن نقطه همخوانی ندارد (شکل ۶). بررسی منحنی‌های فراوانی نسبی (pdf) مقادیر برآوردی توسط سه روش ذکرشده و مقادیر مشاهده ای در منطقه کارون در شکل (۷) نشان می‌دهد که توزیع فراوانی مقادیر برآوردی توسط روش رگرسیون با توزیع فراوانی داده‌های مشاهده‌ای روند مشابهی ندارد و مقادیر ۷۸۰ تا ۸۱۰ میلی‌متر در این روش فراوانی بیشتری دارند.

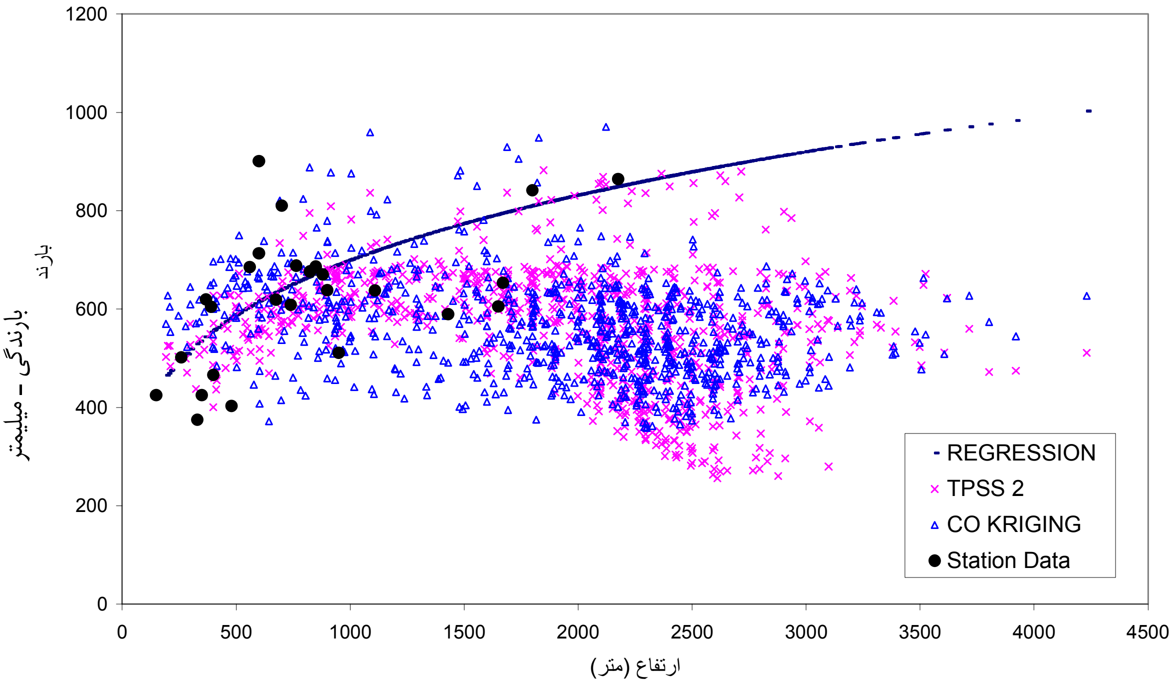
روش TPSS و روش کوکریجینگ تطابق بهتری با روند pdf داده‌ها داشته که در روش TPSS مقادیر حداقل کمتر از حد مشاهده‌ای برآورد گردیده است. بررس نقشه توزیع مکانی با روش TPSS نشان می‌دهد که این مقادیر حداقل در محدوده ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر برآورد گردیده است که مناسب به نظر نمی‌رسد. روش کوکریجینگ نیز مانند بقیه روشها نتوانسته است برونیابی مناسبی در ارتفاعات ارائه نماید (شکل ۶) ولی در ارتفاعات بهتر از روش TPSS عمل نموده است و تطبیق بیشتری با تعداد محدود ایستگاههای موجود در این محدوده ارتفاعی نشان می دهد. مقادیر حداقل در این ارتفاعات از ۴۰۰ میلی‌متر کمتر برآورد نگردیده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات بارندگی با ارتفاع در منطقه مورد مطالعه

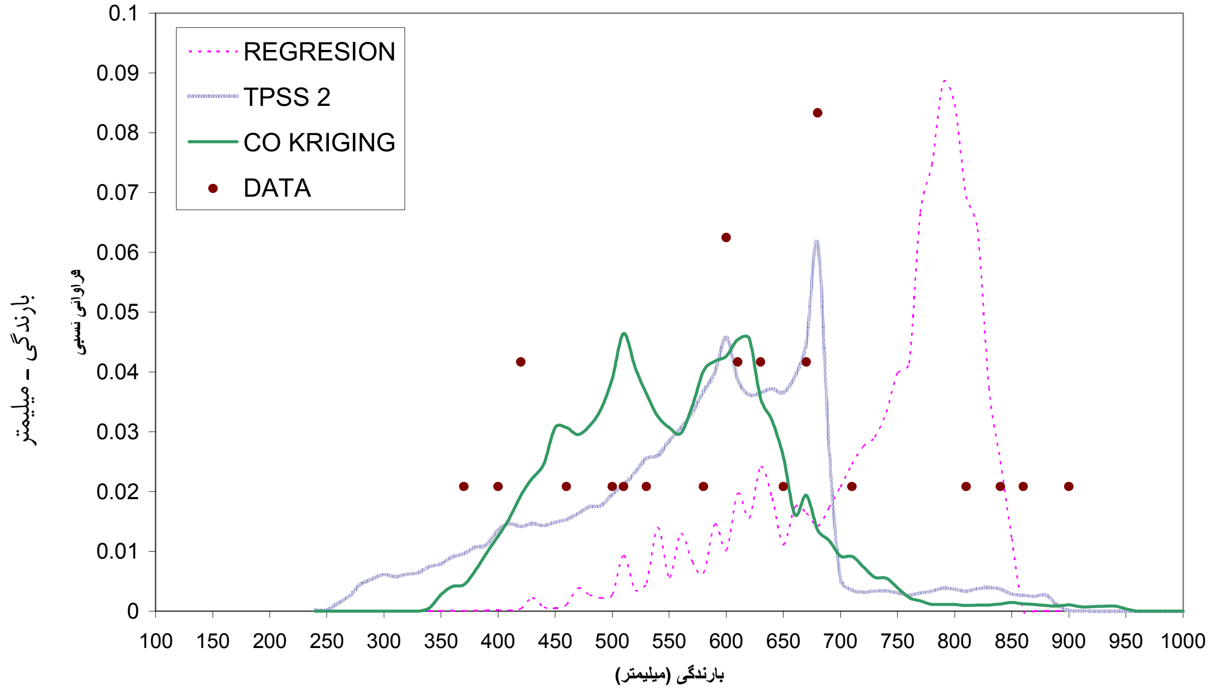
جدول ۴- مقادیر حداکثربارندگی سالانه(Max)، حداقل (Min)
و خطاهای روشهای مختلف میانیابی در حوزه کارون (میلی‌متر)

روش	کل حوزه				ارتفاع بالاتر از ۲۵۰۰ متر	
	MAE	MBE	Max	Min	Max	Min
TPSS-2	72.9	32.9	908.5	244.8	908.5	244.8
Regresion	84.5	15.9	937.5	339.0	937.3	813.5
CO KRIGING	79.1	25.2	861.0	331.0	627.2	465.0
داده های ایستگاهها			900.0	374.0	900.0	537.5



ارتفاع ـ متر

شکل ۶- نمودار تغییرات بارندگی و ارتفاع در روشهای مختلف و مقایسه آنها با داده های مشاهده ای



شکل ۷- منحنی‌های فراوانی نسبی (pdf) روشهای مختلف میانیابی و داده های مشاهده ای در حوزه کارون

برای بررسی دقیقتر در محدوده برونیابی، ایستگاههایی که در ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر بودند حذف گردید و برآورد توزیع مکانی مجددا بدون این ایستگاهها انجام شد. به عبارت دیگر برای ایستگاههای حذف شده عمل برونیابی انجام می‌گیرد و خطای حاصل به عنوان معیار مقایسه روشها در برونیابی می‌باشد. مقادیر MAE و MBE محاسبه شده برای ایستگاههای حذف شده در جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است در همه روشها به جز روش رگرسیون، مقدار برآوردی کمتر ازمقدار مشاهده‌ای (مقدار MBE منفی) و میزان خطای آنها نیز بالا می‌باشد.

ارتفاع ـ متر

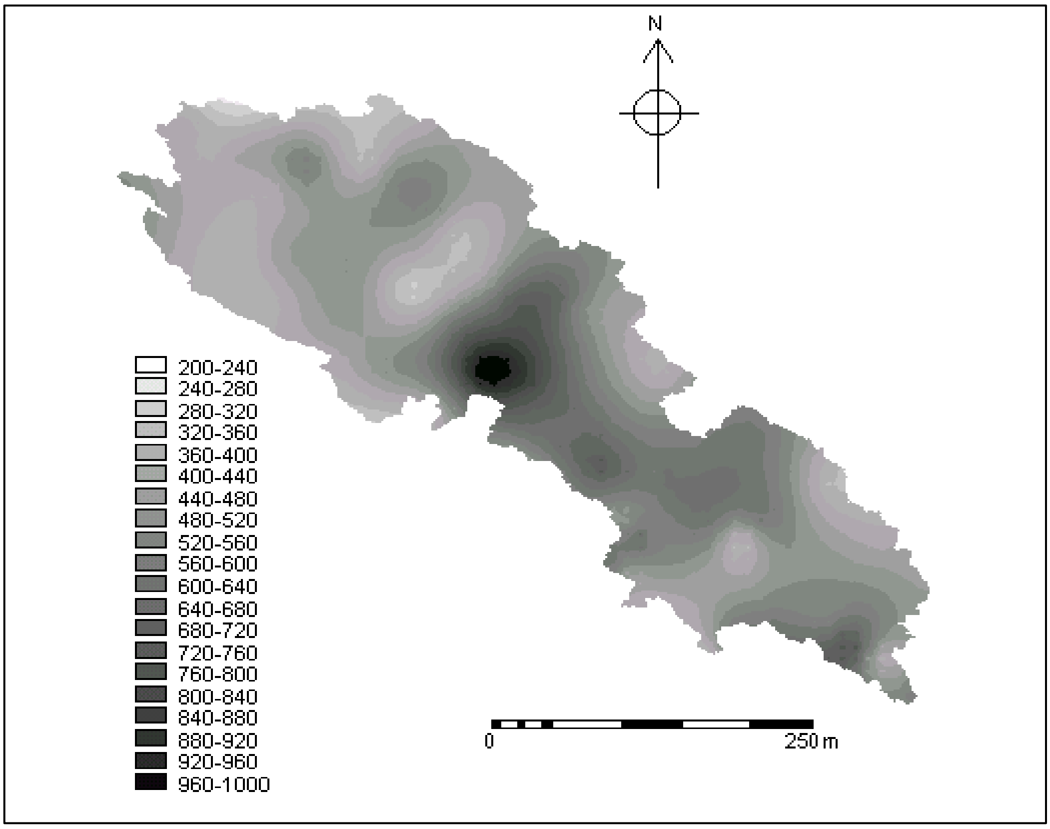
جالب آنکه روش ساده رگرسیون نسبت به بقیه روشها دارای خطا و انحراف کمتری می‌باشد و بعد از آن روش کوکریجینگ قرار می‌گیرد.

بنابراین با توجه به نتایج ارائه شده و با مقایسه نقشه‌ها و توزیع مکانی بارندگی، به نظر می‌رسد روش کوکریجینگ میتواند هم به لحاظ درنظرگرفتن اثر ارتفاع و هم به لحاظ در نظر گرفتن همبستگی مکانی داده‌ها در مجموع مناسبترین روش برای برآورد بارندگی در این منطقه باشد. بررسی روشهای ذکر شده در واحدهای کرخه – دز نیز نتایج مشابهی ارائه می‌کند. بنابر این توصیه می‌شود برای بارندگی سالانه از این روش استفاده شود. شکل (۸) نقشه توزیع مکانی میانگین بارندگی سالانه را در منطقه مورد نظر نشان می دهد. مقدار میانگین منطقه ای بارندگی با روش کوکریجینگ (شکل ۸) برابر ۵۶۱ میلی‌متر برآورد شده است که این مقدار برای روش TPSS برابر ۵۶۴ میلی‌متر و برای روش رگرسیون ۷۴۵ میلی‌متر می باشد. مقایسه مقادیر متوسط منطقه‌ای بارندگی نشان می‌دهد که روش TPSS در مقایسه با میانگین بارندگی ایستگاهها در منطقه مورد نظر (۶۲۰ میلی‌متر)، مقدار بارندگی را پایین‌تر و روش رگرسیون بالاتر از حد آن برآورد کرده اند.

جدول ۵- نتایج بررسی روشهای مختلف در برونیابی بارندگی در ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر درحوزه کارون.

روش	MAE	MBE

WMA-2	۱۶۵/۸	-۱۶۵/۸
Cokriging	۱۵۵/۸	-۱۵۵/۸
TPSS-2	۲۰۲/۷	-۲۰۲/۷
Regression	۱۴۸/۵	۷۵/۹



شکل ۸- نقشه توزیع مکانی بارندگی میانگین سالانه با روش کوگریجینگ (به میلی‌متر)

۴- نتیجه گیری

بررسی حالتهای مختلف ترکیب داده ها و روشها نشان می‌دهد که :

- بررسی ترکیب‌های مختلف داده ها نشان داد که استفاده از داده‌های بازسازی شده دقت برآورد مکانی را کاهش می‌دهد. بنابراین در صورتیکه تعداد داده‌ها کافی باشد، بهتر است تنها از اطلاعات ایستگاههایی که دارای آمار کامل هستند، استفاده گردد.
- نتایج این تحقیق نشان داد که در منطقه مورد نظر خطای روشهای TPSS و کوکریگینگ و حتی روش رگرسیون در مجموع درونیابی و برونیابی مشابه بوده و لذا تنها با استفاده از معیارهای ارزیابی متداول نمی توان به سادگی مناسبترین روش را معرفی نمود.
- بررسی وضعیت برونیابی به روش TPSS در منطقه نشان می‌دهد که مقادیر بارندگی در برخی نقاط مرتفع بیش از حد پایین برآورد می‌شوند (در حد بارندگی در ارتفاعات دشتی).
- تحلیل منحنیهای pdf ، نمودار مقادیر بارندگی برآورد شده توسط روشهای مختلف و ارتفاع متناظر آنها و همچنین نقشه های برآورد توزیع مکانی بارندگی و مقایسه آنها با داده های مشاهده ای نشان می دهد که در مجموع در درونیابی روش TPSS و پس از آن روش کوکریگینگ و در برونیابی روش رگرسیون تا اندازه ای بهتر از دو روش دیگر عمل می نماید، هر چند به طور کلی امکان تشخیص و تایید برتری کامل یکی از روشها وجود ندارد و میزان خطای برونیابی در همه روشها بالا می‌باشد. برای مجموعه شرایط درونیابی و برون یابی منطقه، روش کوکریجینگ با اختلاف بسیار کمی نسبت به روشهای دیگر برتری دارد.
- لزوم نصب تجهیزات سنجش بارندگی در حوزه‌های کوهستانی با توجه به نتایج این تحقیق، بیش از پیش آشکار می‌گردد.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳ خرداد ۱۳۸۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ اردیبهشت ۱۳۸۴

پی‌نوشت‌ها

1 - Geostatistics
2 - Weighted Moving Average (WMA)
3 - Thin Plate Smoothing Splines (TPSS)
4 - Kriging
5 - Cross – Validation (CV)
6 - Gradient with Inverse Distance Square (GIDS)
7 - Root Mean Square Error
8 - Smoothing
9 - Estimation Variance
10- Mean Absolute Error
11- Mean Bias Error

۵- مراجع

رحیمی بندرآبادی، سیما. (۱۳۷۹) "بررسی کاربرد روشهای ژئواستاتیستیک در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران.

Abtew, W., J. Obeysekera, and Shih. G. (1993) "Spatial Analysis for Monthly Rainfall in South Florida". *Water Resources Bulletin*. 29(2): 179-188.

Goovaerts, P. (2000) "Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall". *Journal of Hydrology*. 228(1-2), pp.113-129.

Hargrove, W.W. (2001) "Interpolation of Rainfall in Switzerland Using a Regularized Splines with Tension". *Geographic Information and Spatial Technologies Group*, Oak Ridge National Laboratory.

Hohn, M. E. (1999) "Geostatistics and Petroleum Geology". *Kluwer Academic Publishers*. 248 pp.

Hutchinson, M.F. (1992) *Splin A and LAPPNT*. Center For Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Australia.

Price, D.T., D.W. Mckinny, I.A. Nelder, M.F. Hutchinson and Kestevn. J.L. (2000) "A Comparison of Two Statistical Methods for Interpolation". Canadian Monthly Mean Climate Data. *Agriculture and Forest*. 101(2-3), pp. 81-94.

Tabios, G.Q. and Salas, J.D. (1985) "A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Analysis Precipitation". *Water Resources Bulletin*. (21)3, pp. 365-380.

Watson, G. S. (1984) "Smoothing and Interpolation by Kriging and with Splines". *Mathematical Geology*. 16(6), pp. 601-615.