

مقایسه روش‌های زمین آمار در برآورد توزیع مکانی بارش سالانه در مناطق خشک و

نیمه خشک جنوب شرقی ایران^۱

محمد مهدوی^۲ ابراهیم حسینی چگینی^۲ محمد حسین مهدیان^۴ سیما رحیمی بندرآبادی^۵

چکیده

در بسیاری از مطالعات و بررسی‌های منابع طبیعی و کشاورزی به دلیل عدم پوشش کامل ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقطه‌ای باران، برآورد بارش منطقه‌ای و یا تخمین بارش در مناطق مابین ایستگاه‌ها امری ضروری است. برای این امر روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آنها روش‌های میانابی می‌باشد. در بیشتر موارد یکی از روش‌های موجود به دلخواه کارشناس انتخاب و مورد استفاده قرار می‌گیرد، که ممکن است برآورد دقیقی صورت نگیرد. در این مطالعه سه روش کریجینگ (معمولی و کوکریجینگ) میانگین متحرک وزن‌دار و (TPSS) (با و بدون متغیر کمکی) برای برآورد بارش سالانه با استفاده از آمار ۲۲ ساله ایستگاه‌های باران سنجی در جنوب شرق ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین متغیر کمکی در روش‌هایی که نیاز به متغیر کمکی است، ضریب همبستگی بارش با ارتفاع محاسبه شد که این ضریب برای کل ایستگاه‌ها به دلیل وسعت منطقه و پراکندگی ایستگاه‌ها پایین و غیر قابل قبول بود. لذا منطقه بر اساس حوزه‌های آبخیز تقسیم‌بندی و در مواردی که تعداد ایستگاه‌های واقع در یک حوزه کم و یا چند حوزه دارای ضریب همبستگی تقریباً یکسان بودند، آن حوزه‌ها در هم ادغام شد. که در نهایت کل منطقه به سه زیر منطقه تقسیم شد. ضریب همبستگی با ارتفاع در یک زیر حوزه ۰/۱۲ و در دو منطقه دیگر ۰/۷ و ۰/۸ محاسبه شد. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد، برای اینکه یک متغیر کمکی بتواند دقت روش میانابی را افزایش دهد ضریب همبستگی آن با بارندگی سالانه بایستی بیشتر از ۰/۶ باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش TPSS با متغیر کمکی ارتفاع (MAE برابر ۲۸-۱۳ میلیمتر) مناسبترین روش تخمین بارندگی سالانه است. روش کریجینگ (با MAE برابر ۵۰-۲۹ میلیمتر) و روش میانگین متحرک وزن‌دار با توان ۲ (با MAE برابر ۵۷-۲۶ میلیمتر) در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: جنوب شرقی ایران، زمین‌آمار، میانابی، بارندگی، کریجینگ، TPSS، میانگین متحرک وزن‌دار.

^۱- تاریخ دریافت: ۷۹/۴/۳، تاریخ پذیرش: ۸۳/۶/۲۹

^۲- استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (Email: Mahdavi@nrf.ut.ac.ir)

^۳- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

^۴- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

^۵- کارشناس ارشد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل مورد استفاده در مطالعات منابع طبیعی، مقدار متوسط بارش و اغلب متوسط منطقه‌ای بارش است. روش‌های مختلفی برای برآورد مقدار بارش وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های زمین آماری^۱ اشاره نمود. روش‌های زمین‌آمار به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در بررسی‌های آمار کلاسیک نمونه‌هایی که از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می‌شوند، فاقد بعد مکانی بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه هیچگونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه‌گیری به فاصله معین و معلوم در بر نخواهد داشت. در حالی که در زمین‌آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت مکانی نمونه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. به این لحاظ می‌توان موقعیت مکانی نمونه‌ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر یک جا مورد تحلیل قرار داد. به عبارت دیگر باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیت در جامعه نمونه‌ها و فاصله نمونه‌ها و جهت قرارگیری آنها نسبت به هم ارتباط برقرار کرد. این ارتباط مکانی (فاصله‌ای و جهتی) بین مقدار یک کمیت در جامعه نمونه‌های برداشت شده، ممکن است در قالب‌های ریاضی قابل بیان باشد. به این قالب‌های ریاضی ساختار مکانی گفته می‌شود.

گفتنی است که روش‌های مختلف زمین‌آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند. متأسفانه مهندسیین و کارشناسان اغلب یک روش را به صورت تصادفی انتخاب کرده و برآورد مورد نظر را انجام می‌دهند که دقت تخمین آنها جای تأمل است. البته با توجه به امکان استفاده از این روش‌ها در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و استفاده روزافزون از این سیستم‌ها در امور مطالعاتی و تحقیقاتی، اهمیت انتخاب روش مناسب توسط استفاده کننده دو چندان می‌گردد. با عنایت به مطالب طرح شده

در بالا، انتخاب روش میانبایی مناسب و دقیق برای برآورد بارش ضروری به نظر می‌رسد.

کاربرد روش‌های زمین‌آمار در مطالعات معادن شروع شد و سپس در علوم دیگر توسعه یافت. اولیور، مک برانتی و دویستر و درافل از پیشگامان استفاده کننده روش‌های زمین‌آمار محسوب می‌شوند (۱). تابوس^۲ (۱۹۸۵) روش کریجینگ را در توزیع بارش سالانه در شمال ایالت کونینتال آمریکا برای ۲۹ ایستگاه باران سنجی مناسب تشخیص دادند. ابتهو^۳ و همکاران (۱۹۹۳) در زمینه برآورد بارندگی ماهانه روش کریجینگ را برای جنوب فلوریدا توصیه نمودند. روش‌های کوکریجینگ، یونیورسال کریجینگ، کریجینگ عمومی، نزدیکترین همسایه، عکس مجذور فاصله و روش عکس مجذور فاصله همراه با گردایان (GIDS) توسط وین و نالدر^۴ (۱۹۹۸) به منظور بررسی توزیع مکانی بارندگی و دمای ماهانه در جنگل‌های شمالی کانادا آزمون شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش GIDS با خطای متوسط ۰/۵ درجه سانتیگراد برای دمای ماهانه و ۳۶ میلیمتر برای بارندگی ماهانه از سایر روش‌ها مناسب‌تر است. پرایس و همکاران (۲۰۰۰) برای میانبایی مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالانه در غرب و شرق کانادا دو روش TPSS و GIDS را بررسی کردند. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات^۵ از روش TPSS در هر دو ناحیه کمتر از روش GIDS بود. البته هر دو روش در نواحی شرقی (ایالات آنتاریو و کبک)، که تغییرات توپوگرافی و اقلیمی ملایم‌تری دارند، نتایج بهتری نسبت به نواحی غربی ارائه کرده‌اند.

گووارتنز^۶ (۲۰۰۰) روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ با روند خارجی و کوکریجینگ را برای بارندگی سالانه و دمای ۳۶ ایستگاه کلیماتولوژی در ناحیه ای به وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در پرتغال بررسی کرد. در مقایسه این سه

^۲ -Tabios

^۳ -Abtew

^۴ -Wein & Nalder

^۵ - Root Mean Square Error

^۶ -Goovaerts

^۱ - Geostatistics

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب شرق ایران بین طول‌های جغرافیایی $51^{\circ} 50' 51''$ شرقی و عرض‌های $25^{\circ} 17'$ شمالی واقع شده که شامل ۱۶۱ ایستگاه هواشناسی مربوط به وزارت نیرو است (شکل ۱). آمار مورد استفاده دارای دوره مشترک ۲۲ ساله (پس از رفع نواقص و بازسازی) می‌باشند. سایر ویژگی‌های در جدول (۱) ارایه شده است. با استفاده از نرم افزار (HYFA) مشخص شد که داده‌های بارندگی سالانه در ناحیه مورد مطالعه از توزیع پیرسون نوع ۳ تبعیت می‌کند هر چند فرض نرمال بودن داده‌ها در نرم‌افزار SPSS رد نمی‌شود. هیستوگرام بارش منطقه در شکل (۲) ارایه شده است.

جدول ۱- مشخصات بارندگی و ارتفاع در منطقه مورد مطالعه

بارندگی یا ارتفاع	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار
بارش (میلیمتر)	۱۸۳/۰	۴۸۶/۰	۴۱/۳	۹۰/۷
ارتفاع (متر)	۱۳۲۰	۳۰۰۰	۰	۷۳۱

واحدهای طول و عرض جغرافیایی در این جدول برحسب واحد متر بوده و به این ترتیب محاسبه شده است که ابتدا مختصات جغرافیایی به سیستم جغرافیایی لامبرت تبدیل شده و سپس مبدا مختصات جدیدی برای آن تعریف شد. لازم به ذکر است که تلفیق این حوزه‌ها بر اساس نزدیکی ضریب همبستگی و یا افزایش تعداد ایستگاه‌ها به حد قابل قبول صورت گرفته است.

روش با روش‌های عکس مجذور فاصله، رگرسیون خطی با ارتفاع، تیسسن و کریجینگ معمولی با استفاده از تکنیک ارزیابی صحت^۱ روش کریجینگ ساده مناسب‌ترین روش شناخته شد. هارگرو^۲ (۲۰۰۱) از روش اسپلاین^۳ با حالت‌های و Smooth برای برآورد بارندگی در سوئیس استفاده کرد. برآوردها با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و بدون آن انجام شد که هر دو نتایج مشابهی ارایه کردند. در این تحقیق سه روش TPSS^۴، کریجینگ و میانگین متحرک وزن دار برای برآورد بارندگی سالانه در منطقه خشک و نیمه خشک جنوب شرقی ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به زیاد بودن وسعت منطقه و پراکندگی ایستگاه‌ها، که منجر به پایین بودن ضریب همبستگی بین متغیر مورد نظر و متغیر کمکی (ارتفاع) شده است، منطقه مورد مطالعه به زیر حوزه‌های همگن تر تقسیم شد. این تقسیم‌بندی بر اساس حوزه‌های آبخیز منطقه بوده که پس از تلفیق برخی از آنها، نهایتاً ۳ زیر حوزه مجزا شد، (واحد های ۱۲، ۷+۵، ۱۱+۲+۳+۱۱) شکل (۳). خلاصه مشخصات این واحدها در جدول (۲) ارایه شده است.

جدول ۲- مشخصات زیر حوزه‌های مجزا شده در منطقه مورد مطالعه

واحد	طول جغرافیایی - متر		عرض جغرافیایی - متر		ارتفاع - متر		تعداد ایستگاه	R*
	بیشترین	کمترین	بیشترین	کمترین	بیشترین	کمترین		
۱	۶۸۱۳۷۲	۳۷۳۴۳۶	۷۰۱۲۹۱	۳۹۰۵۲۰	۲۳۵۰	۱۷۲۰	۱۲	۰/۳۱
۲	۳۹۳۱۸۳	۸۲۰۵۶۱	۴۷۵۹۳۹	۲۰۷۶۳۴	۲۸۳۰	۴۹۰	۲۲	۰/۲۲
۳	۰/۱۲	۹۷۰۰۶	۴۷۱۸۰۹	۳۰۳۳۸	۱۹۵۰	۱۱	۵۲	۰/۴۲
۵	۸۴۶۹۶۱	۱۰۱۳۵۷۳	۶۴۱۵۹۲	۲۱۱۹۴۲	۱۹۰۰	۴۹۰	۷	۰/۸۳
۷	۴۰۷۷۸۸	۸۲۴۹۰۶	۹۰۵۷۲۵	۴/۰۰۰/۰۰۰	۳۰۰۰	۶۵۰	۳۸	۰/۶۷
۱۱	۱۴۸۰۸	۱۶۳۵۶	۵۶۸۴۷	۴۸۱۰۴۰	۲۳۰۰	۱۶۰۰	۵	۰/۸۸
۱۲	۷۷۳۰۴	۵۲۲۶۸۰	۸۷۰۶۶۳	۴۶۲۳۷۳	۲۲۰۰	۳۰	۲۵	۰/۸۲
۷+۵	۴۰۷۷۸۸	۱۰۱۳۵۷۳	۹۰۵۷۲۵	۲۱۱۰۴۲	۳۰۰۰	۴۹۰	۴۵	۰/۷۲
۱۱+۲+۳+۱۱	۷۷۳۰۳۴	۹۷۰۰۹۶	۷۰۱۲۹۱	۳۰۳۳۸	۲۸۳۰	۱۱	۹۱	۰/۲
کل منطقه	۰/۱۲	۱۰۱۳۵۷۳	۹۰۵۷۲۵	۳۰۳۳۸	۳۰۰۰	۱۱	۱۶۱	۰/۰۸

R* : ضریب همبستگی ارتفاع و بارش

۱-Cross Validation

۲-Hargrove

۳-Splin

۴-Thin Plate Smoothing Splines

آنالیز واریوگرام^۱

یکی از روش‌های محاسبه تغییرات مکانی یک متغیر، روش واریوگرام است. محاسبه منحنی واریوگرام از مهم‌ترین عملیات زمین‌آماراست که از طریق معادله زیر قابل محاسبه است:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(xi) - z(xi+h)]^2 \quad (1)$$

$\gamma(h)$: مقدار واریوگرام برای جفت نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند؛

$n(h)$: تعداد زوج نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند؛

$z(xi)$: مقدار مشاهده شده متغیر X ؛

$z(xi+h)$: مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله h از x قرار دارد.

برای ترسیم واریوگرام لازم است ابتدا مقدار $\gamma(h)$ را به ازای مقادیر مختلف h محاسبه و سپس مقادیر به دست آمده را به ازای 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 اندازه‌گیری شده 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^۱ و ناهمسانگردی^۲ را مشخص می‌نماید. واریوگرام دارای مشخصاتی است که شامل آستانه ($Sill=C_1+C_0$)، فاصله مؤثر (R) 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، برخلاف 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 کرد. با توجه به روابط میان واریوگرام و کوواریوگرام می‌توان نوشت:

$$\gamma(h) + C(h) = \sigma^2 \quad (2)$$

σ^2 : آستانه؛

$\gamma(h)$: مقدار واریوگرام؛

$C(h)$: مقدار کوواریانس.

روش و معیار ارزیابی

روش‌های مختلف میان‌یابی بر اساس روش ارزیابی صحت مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش یک نقطه به صورت موقتی حذف شده و با اعمال میان‌یابی مورد نظر برای آن نقطه مقداری برآورد می‌گردد. 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 نشان دهنده مقادیر واقعی و برآورد شده است، حاصل می‌گردد.

با داشتن این دو مقدار می‌توان دقت (MAE) و انحراف (MBE)^۳ مدل را برآورد نموده هر چه دو مقدار یادشده به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده بالا بودن دقت مدل است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(xi) - Z(xi)| \quad (3)$$

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

Z^* : مقدار برآورد شده متغیر مورد نظر؛

Z : مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر؛

n : تعداد داده‌ها؛

MAE : میانگین مطلق خطا (دقت)؛

MBE : میانگین خطای انحراف.

روش‌های میان‌یابی استفاده شده

در این تحقیق روش‌های TPSS با و بدون متغیر کمکی، کریجینگ با و بدون متغیر کمکی و میانگین متحرک

^۱ Mean Absolute Error

^۲ Mean Bias Error

^۱ -Variogram

^۲ -Isotropic

n : تعداد کل نقاط مشاهده‌ای.

نکته قابل ذکر آنکه، برای برآورد نا اریب مقادیر، برقراری رابطه زیر الزامی است.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (6)$$

در روش میانگین متحرک وزن دار، مقدار فاکتور وزنی معادله (۵) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (7)$$

D_i : فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه i ؛

α : توان معادله ؛

n : تعداد نقاط مشاهده شده.

وزن دار با درجات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (جدول ۳)، که به صورت مختصر به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

معادله کلی در روش‌های مختلف میانبایی به صورت معادله (۵) است، تفاوت روش‌ها در برآورد فاکتور وزنی معادله است.

$$Z^*(xi) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(xi) \quad (5)$$

$Z^*(xi)$: مقدار برآورد شده متغیر X ؛

$Z(xi)$: مقدار مشاهده شده متغیر X ؛

λ_i : مقدار وزن نقاط مشاهده شده ؛

i : نقاط مشاهده‌ای ؛

جدول ۳- روش‌های میانبایی استفاده شده در این تحقیق

علامت اختصاری	روش
WMA	میانگین متحرک وزن دار
WMA ۱	$\alpha^* = 1$
WMA ۲	$\alpha = 2$
WMA ۳	$\alpha = 3$
WMA ۴	$\alpha = 4$
WMA ۵	$\alpha = 5$
OK	کریجینگ معمولی
OK LO	لگاریتم داده‌ها در کریجینگ
OK CO	ارتفاع به عنوان متغیر کمکی
TPSS	Thin Plate Smoothing Splines
بدون متغیر کمکی	
TPSS ۲	$\alpha = 2$
TPSS ۳	$\alpha = 3$
TPSS ۴	$\alpha = 4$
TPSS ۵	$\alpha = 5$
با متغیر کمکی	
TPSS CO۲	$\alpha = 2$
TPSS CO۳	$\alpha = 3$
TPSS - CO ۴	$\alpha = 4$
TPSS - CO ۵	$\alpha = 5$

$\alpha^* = \alpha$: توان معادله در روش میانبایی

اریب بودن، واریانس تخمین نیز حداقل است. این نشانگر آن است که از اطلاعات موجود به بهترین نحو استفاده شده است. بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می‌دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به

کریجینگ تخمین‌گری نا اریب، با کمترین مقدار واریانس تخمین است. شرط نا اریب بودن در سایر روش‌های تخمین، نظیر روش چند ضلعی، عکس فاصله نیز اعمال می‌شود ولی ویژگی کریجینگ در آن است که در عین نا

واتسون (۱۹۸۴) ثابت کرد TPSS نوعی کریجینگ است که تابع کوواریانس آن به صورت زیر است (۸):

$$C(h) = h^k \log(h) \quad (10)$$

$$C(0) = \emptyset$$

\emptyset : پارامتر پیرایش (smoothing)

$m-1 : k$

m : درجه مشتق نسبی داده‌های مشاهده شده؛

h : فاصله بین نقاط.

بحث و نتیجه‌گیری

برای بررسی ساختار مکانی بارندگی سالانه، مقادیر واریوگرام تجربی داده‌ها محاسبه و منحنی مربوط به آن ترسیم شد و سپس یک مدل مناسب به این نقاط برازش داده شد (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد که بارندگی سالانه واریوگرام کروی و برای ارتفاع واریوگرام خطی بیشترین دقت را دارد. با استفاده از داده‌های کل منطقه، واریوگرام تجربی ارتفاع و بارش منطقه، همچنین واریوگرام بارش برای هر یک از واحدها، همچنین واریوگرام تلاقی بارش و ارتفاع برای واحد (۵+۷) رسم شد که به عنوان نمونه واریوگرام‌های واحد (۵+۷) در شکل‌های (۴ تا ۶) آورده شده است. واریوگرام تجربی ارتفاع ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که تا شعاع حدود ۴۰۰ کیلومتری، بین ایستگاه‌ها از نظر ارتفاع رابطه معنی‌داری وجود دارد و بعد از این فاصله، رابطه آنها به صورت تصادفی در می‌آید.

فرد کریجینگ می‌توان قسمت‌هایی که در آنجا خطا بالا است و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است را مشخص کرده و تحت پوشش لازم قرار داد. در روش OK، مقدار λ از طریق معادله زیر قابل برآورد است.

$$K \cdot \lambda_i = b \quad (8)$$

K : ماتریس کوواریانس بین داده‌ها؛

b : بردار کوواریانس بین نقاط مشاهده شده و برآورد شده؛

λ_i : بردار وزنی نقاط مورد نظر.

برای حل این معادله نیاز به واریوگرام تجربی است که در قسمت آنالیز واریوگرامی محاسبه می‌شود.

TPSS، که نوعی اسپلاین است، عبارت است از صفحه نازک قابل ارتجاعی که از نقاط داده، با جهش‌های عمودی عبور می‌کند. برای به‌دست آوردن تابع کلی TPSS و به جهت داشتن بهترین تطابق منحنی با نقاط، معادله زیر باید مینیمم گردد:

$$\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i/y)]^2}{n\sigma^2} + \emptyset \int F'(x)^2 \cdot dx = \text{Minimum} \quad (9)$$

y_i : مقدار مشاهده شده متغیر مورد نظر؛

$F(x_i, y_j)$: مقدار تابع در نقاط مشاهده شده؛

n : تعداد داده‌ها؛

σ^2 : واریانس داده‌ها؛

$F'(x)$: مشتق دوم تابع $F(x_i, y_j)$ ؛

\emptyset : پارامتر پیرایش، که عدد مثبتی است.

جدول ۴- نتایج بررسی مدل‌های مختلف نیم تغییرنما در روش OK برای برآورد بارندگی سالانه

مدل	ارتفاع (متر)		بارش (میلیمتر)	
	MAE	MBE	MAE	MBE
نمایی	۲۴۳/۲	۳/۲	۵۰/۳	-۰/۹۸
خطی	۲۱۷/۰	۳/۲	-	-
کروی	۲۱۹/۲	۱/۳	۴۹/۹۸	۱/۲

در مقایسه با نتایج سایر محققین، نتایج این تحقیق با نتایج پرایس و همکاران (۲۰۰۰) همخوانی دارد. آنها برای میانبایی مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالانه در غرب و شرق کانادا دو روش TPSS و GIDS را بررسی کردند. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات از روش TPSS در هر دو ناحیه کمتر از روش GIDS بود. در این تحقیق نیز روش TPSS دقت بیشتری برای برآورد بارندگی سالانه ارائه می‌کند. از طرف دیگر هارگرو (۲۰۰۱) از روش اسپلاین با حالت‌های Tension و Smooth برای برآورد بارندگی در سوئیس استفاده کرد. برآوردها با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و بدون آن انجام شد که هر دو نتایج مشابهی ارائه کردند. در این مطالعه در صورتی که ضریب همبستگی بارندگی و ارتفاع بالاتر از ۰/۶ باشد، روش TPSS با متغیر کمکی دقت بیشتری ارائه می‌کند در غیر این صورت نتایج تفاوت چندانی ندارد و در برخی موارد دقت در حالت استفاده از متغیر کمکی کاهش نیز یافته است.

آنچه از این مطالعه حاصل می‌گردد به شرح زیر است:

- ۱- استفاده از متغیر کمکی منوط به داشتن رابطه همبستگی بالا با متغیر مورد نظر است، آنچه بررسی‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد، ضریب همبستگی باید بالاتر از ۰/۶ باشد.
- ۲- تغییرات بارندگی سالانه عمدتاً از مدل کروی تبعیت می‌کند.
- ۳- همبستگی مکانی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه از نظر ارتفاع حدود ۴۰۰ کیلومتر و از نظر بارندگی حدود ۵۰۰ کیلومتر است، لذا بهتر است متوسط فاصله بین ایستگاه‌ها بیشتر از ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر نباشد.
- ۴- روش TPSS مناسبترین روش برآورد مقادیر بارش سالانه در هر وضعیت منطقه است، که البته در صورت استفاده از متغیر کمکی روش دقت بیشتری خواهد داشت. به عبارت دیگر مقدار MAE روش TPSS در صورت استفاده از متغیر کمکی کاهش می‌یابد.
- ۵- بعد از روش TPSS، در صورت وجود همبستگی مکانی بین داده‌ها، که از بررسی و تحلیل واریوگرام قابل تشخیص

واریوگرام بارش واحد (۱۲) نشان دهنده عدم همبستگی مکانی بین ایستگاه‌های این واحد است که مدل نیز چندان با نقاط تطبیق نیافته است. مشخصات واریوگرام برای واحدهای مختلف در جدول (۵) خلاصه شده است. چنانچه در جدول نیز مشاهده می‌شود، مقدار C_1 از ۱۴۰۰ تا ۸۵۰۰ میلیمتر مربع در تغییر است و تقریباً دارای متوسطی حدود ۴۳۰۰ میلیمتر مربع است. در حالی که بدون در نظر گرفتن واحد (۱۲)؛ که فاقد همبستگی مکانی مناسبی است، مقدار C_0 حدود ۲۶۰۰ میلیمتر مربع است. همچنین مقدار خطای اندازه‌گیری (C_0 / Sill) از ۰ تا ۰/۵ در تغییر است (به طور متوسط ۰/۳). مقدار متوسط فاصله مؤثر، نیز برای بارندگی سالانه حدود ۵۰۰ کیلومتر بوده که بیانگر شعاعی است که در آن ایستگاه‌ها از نظر بارندگی دارای همبستگی می‌باشند.

در زمینه استفاده از روش میانگین متحرک وزن‌دار، تعداد مناسب نقاط همسایگی مورد بررسی قرار گرفته است که تعداد (۹) نقطه با دقت ۴۷/۶ میلیمتر و انحراف حدود ۷ میلیمتر مناسب تشخیص داده شد (شکل ۷). در این تحقیق روش میانگین متحرک وزن‌دار با توان‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفت که در پیشینه موارد روش میانگین متحرک وزن‌دار با توان ۲ دقت بیشتری را ارائه داد (با MAE برابر ۴۷ تا ۵۲ میلیمتر).

روش TPSS نیز با درجات ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ و بدون متغیر کمکی ارتفاع به کار برده شد که توان‌های ۰/۲ و ۰/۳ دارای بیشترین دقت بودند. در واحد ۱۲ توان ۰/۲ و در واحد (۵+۷) توان ۰/۳ و ۰/۴ با متغیر کمکی ارتفاع و در واحد (۱+۲+۳+۱۱) توان ۰/۲ و بدون متغیر کمکی دارای دقت بیشتری بودند. لازم به ذکر است که تفاوت دقت توان‌های ۰/۲ و ۰/۳ حدود ۷/۳ میلیمتر (کمتر از ۵۰ درصد) است. نتایج روش‌های مختلف در جدول (۶) خلاصه شده است.

پس از شناسایی مناسبترین روش برآورد توزیع بارندگی سالانه در هر واحد، توزیع بارندگی سالانه در سه ناحیه با روش یا توان مناسب آن واحد، تهیه شد. سپس نقشه‌ها در محیط GIS جهت تلفیق و پردازش وارد شد. شکل (۸) توزیع بارندگی سالانه در منطقه را نشان می‌دهد.

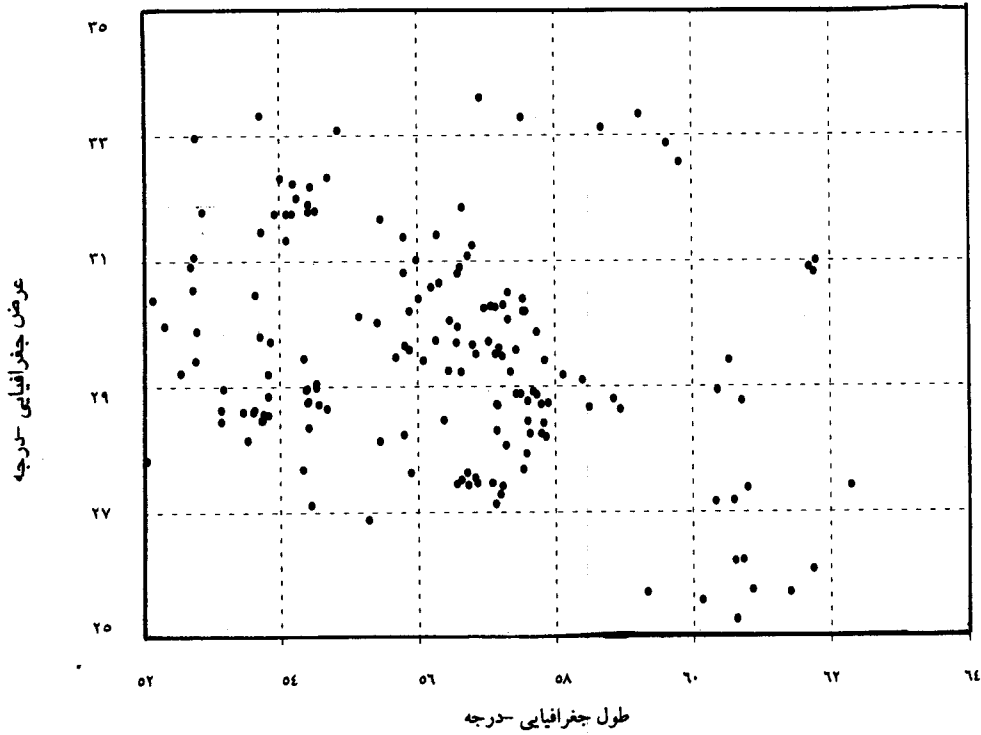
است، روش کریجینگ و در غیر این صورت روش میانگین متحرک وزن دار مناسب است.

جدول ۵- مشخصات مدل واریوگرام بارندگی سالانه در واحد های مختلف

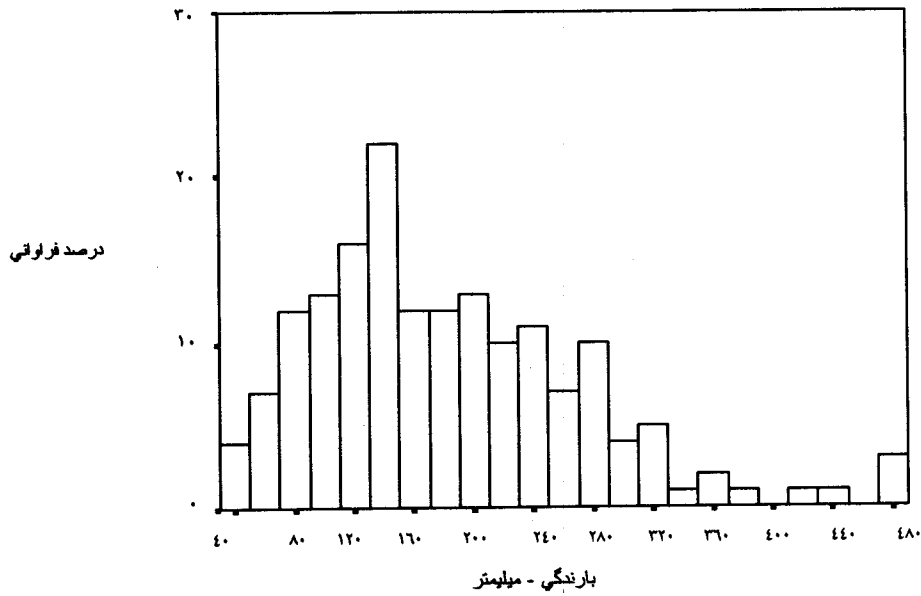
نوع مدل	C ₀ / Sill درصد	R m	C ₂ mm ² or m ²	C ₁ mm ² or m ²	متغیر
کروی	۴۰	۵۰۰/۰۰۰	۶۰۰۰	۳۸۰۰	بارندگی- کل منطقه
کروی	۳۰	۴۶۰/۰۰۰	۰/۲۴	۰/۰۸	لوگ بارندگی- کل منطقه
خطی	۹/۱	۴۰۰/۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	ارتفاع- کل منطقه
خطی	--	۶۰۰۰۰۰	۲/۵	۰	لوگ بارندگی- کل منطقه
کروی	۵۰	۴۰۰/۰۰۰	-۱۵/۰۰۰	۱۵۰۰۰	تلاقی بارندگی ارتفاع- کل منطقه
کروی	--	۳۰۰/۰۰۰	۱۴۰۰	۰	بارندگی - واحد ۱۲
کروی	۴۰	۳۰۰۰۰۰	۰/۲	۰/۰۸	لوگ بارندگی- واحد ۱۲
کروی	--	۳۰۰۰۰۰	۰/۱	۰	تلاقی بارندگی و ارتفاع- واحد ۱۲
کروی	۵۰	۳۰۰۰۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	بارندگی- واحد (۷+۵)
کروی	۱۳	۴۵۰/۰۰۰	۰/۳۹	۰/۰۶	لوگ بارندگی- واحد (۷+۵)
کروی	--	۴۵/۰۰۰	۰/۴	۰	تلاقی بارندگی و ارتفاع- واحد (۷+۵)
کروی	۲۲	۵۰۰/۰۰۰	۷۵۰۰	۲۵۰۰	بارندگی- واحد (۱+۲+۳+۱۱)
خطی	۱۶	۱/۰۰۰/۰۰۰	۰/۳	۰/۰۱۶	لوگ بارندگی- واحد (۱+۲+۳+۱۱)

جدول ۶- نتایج نهایی ارزیابی روش های مختلف میانبایی

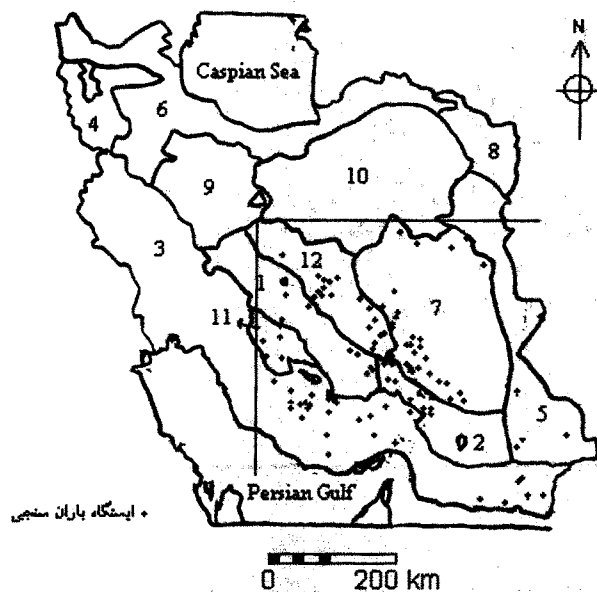
کل منطقه			۱۱+۳+۲+۱			۵+۷			۱۲			حوزه
رتبه	انحراف	دقت	رتبه	انحراف	دقت	رتبه	انحراف	دقت	رتبه	انحراف	دقت	روش
۴	۶/۹	۴۸/۷	۵	۱۱/۴	۵۳/۵	۳	۱/۸	۵۱	۷	-۰/۸	۲۸/۸	WMA-۱
۴	۶/۹	۴۷/۹	۴	۱۰/۲	۵۱/۹	۳	۲/۹	۵۱/۱	۶	-۰/۳	۲۶/۷	WMA-۲
۴	۶/۱۴	۴۹/۲	۴	۸/۶	۵۲	۴	۳	۵۴	۵	-۰/۲	۲۵/۷	WMA-۳
۴	۵/۴	۵۰/۵	۴	۷/۵	۵۴	۵	۲/۷	۵۶/۲	۴	-۰/۳	۲۵/۶	WMA-۴
۳	۴/۹	۵۱/۵	۴	۶/۸	۵۴/۶	۵	۲/۴	۵۷/۷	۳	-۰/۲	۲۵/۶	WMA-۵
۲	۱/۱	۴۹/۹	۲	۳/۰۲	۵۰/۳	۳	۱/۴	۵۰/۲	۷	-۰/۵	۲۸/۸	OK
۶	۱۲/۸	۴۹/۴	۴	۹/۳	۴۹/۸	۳	۹/۴	۴۸/۴	۹	-۶/۳	۳۱/۶	OK-LOG
۱۰	۱۵/۶	۱۱۰/۱	--	--	--	۴	۲/۲	۴۸/۳	۱۰	۱/۹	۴۸/۲	OK-CO
۱	۲/۹	۲۸/۴	۱	-۶/۵	۴۴/۷	۴	-۲/۹	۴۷/۲	۸	۶/۰۱	۲۸/۸	TPSS-۲
۳	۶/۲	۴۵/۷	۳	-۳/۷	۵۷	۳	-۳/۱	۴۶/۸	۱۱	۱۸/۴	۴۸/۱	TPSS-۳
۶	۹/۴	۵۶/۷	۶	-۸/۵	۶۱/۷	۳	-۳/۱	۴۶/۸	۱۲	۵۲/۷	۱۲۲/۷	TPSS-۴
۹	۱۱/۲	۱۰۶/۶	۶	-۸/۵	۶۱/۷	۳	-۳/۱	۴۶/۸	۱۲	۵۲/۷	۱۲۲/۷	TPSS-۵
۴	۲۲/۹	۴۵/۶	--	--	--	۲	-۱۰	۳۸/۱	۱	۴/۷	۱۳/۲	TPSS-CO۲
۷	۳۰/۵	۵۵/۹	--	--	--	۱	-۸/۹	۳۰/۸	۲	۷/۳	۱۵/۶	TPSS-CO۳
۷	۲۹/۷	۶۵/۷	--	--	--	۱	-۸/۹	۳۰/۸	۱۳	۱۳/۸	۲۷/۵	TPSS-CO۴
۸	۳۰/۹	۶۳/۴	--	--	--	۱	-۸/۹	۳۰/۸	۱۳	۱۳/۸	۲۷/۵	TPSS-CO5



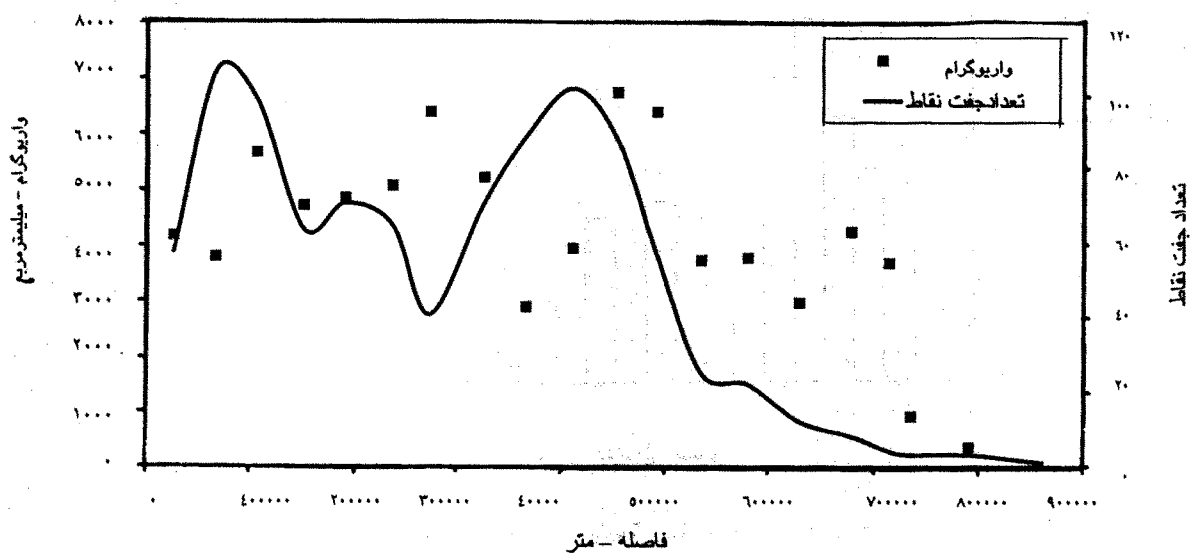
شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی جنوب شرق ایران



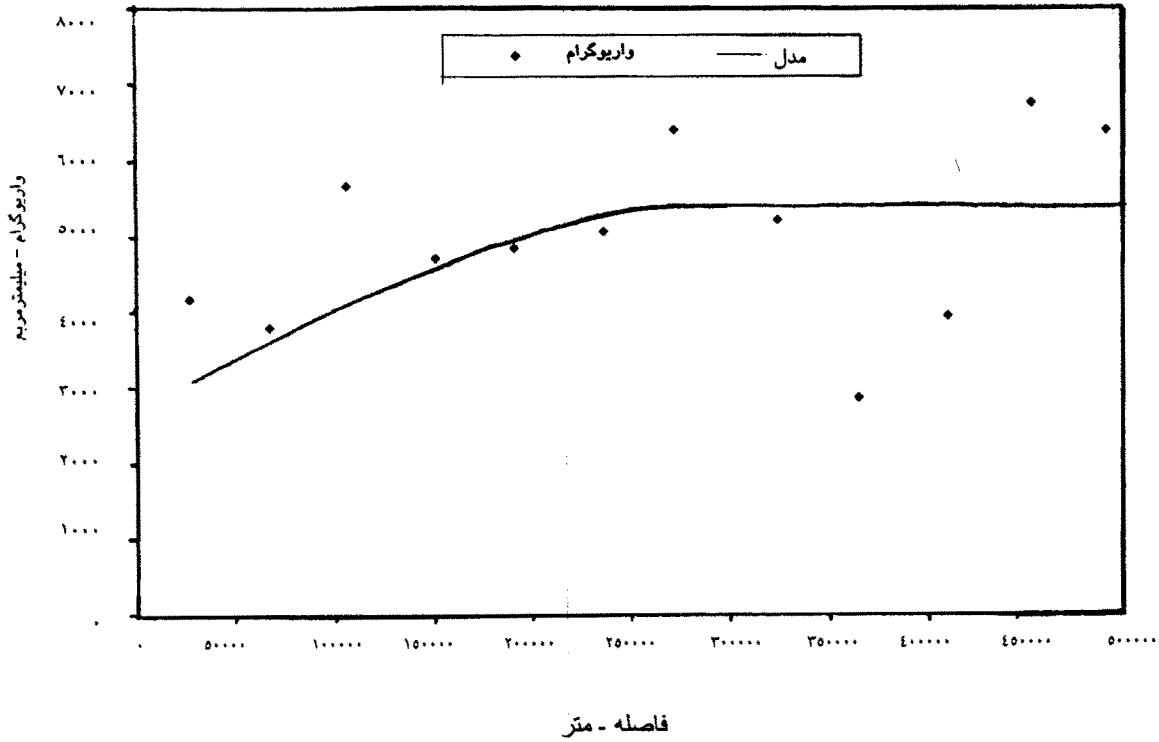
شکل ۲- هیستوگرام بارندگی سالانه جنوب شرق ایران



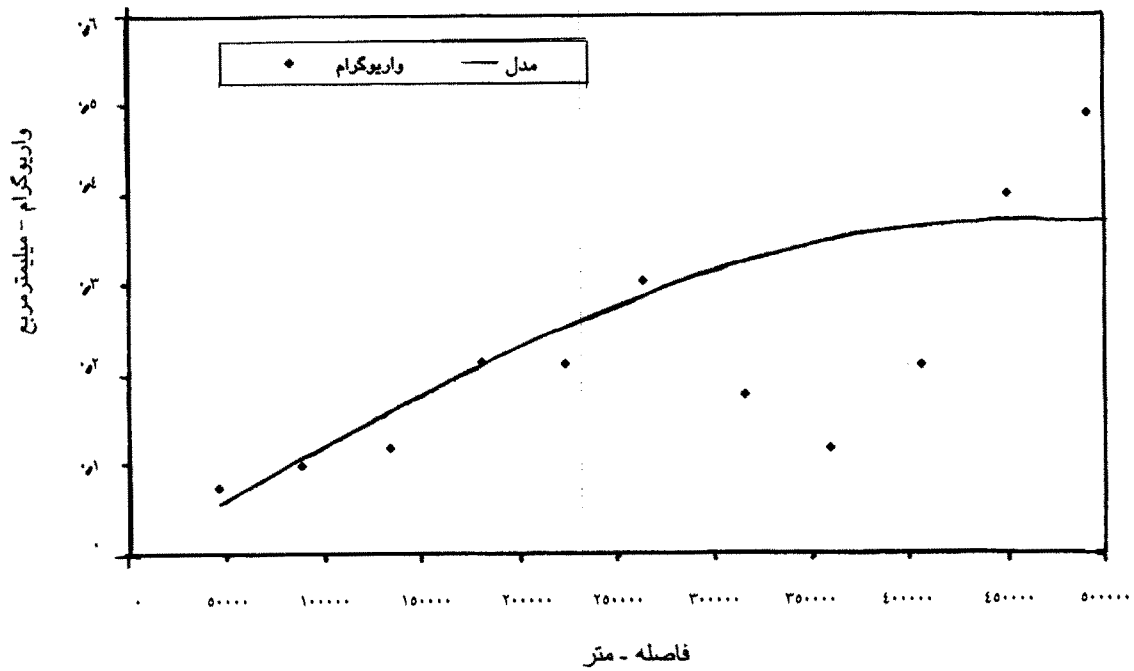
شکل ۳- موقعیت حوزه‌های آبخیز ایران (براساس تقسیم‌بندی جاماب) و ایستگاه‌های باران سنجی جنوب



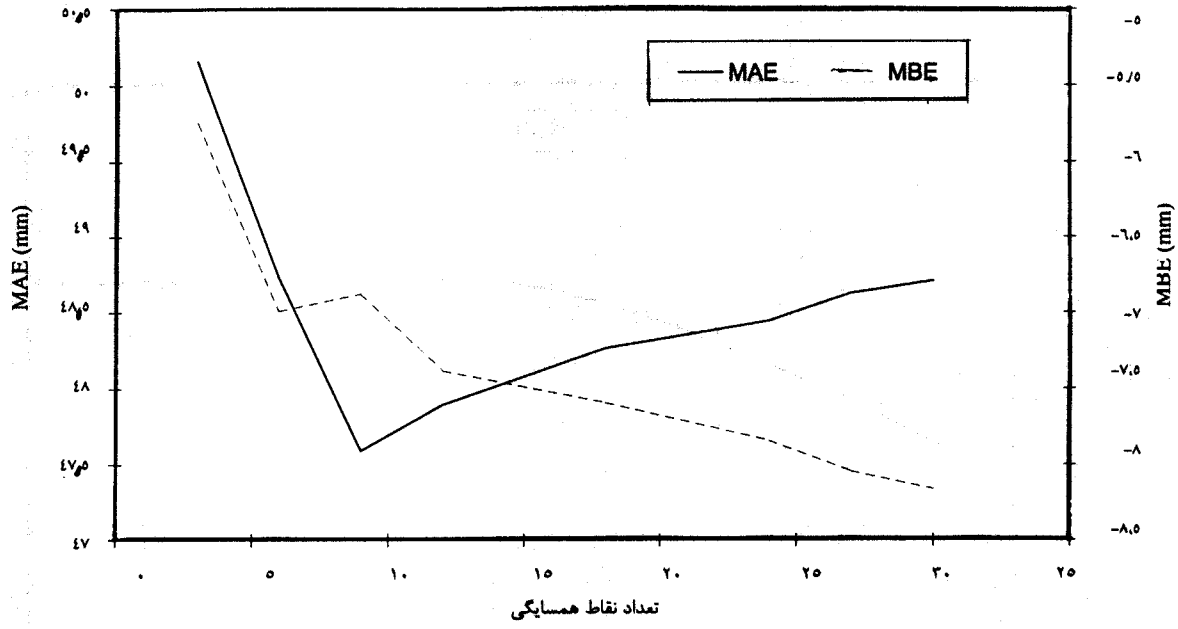
شکل ۴ = واریوگرام تجربی و تعداد جفت نقاط بارندگی سالانه ایستگاه‌های جنوب شرق ایران - واحد (۷+۵)



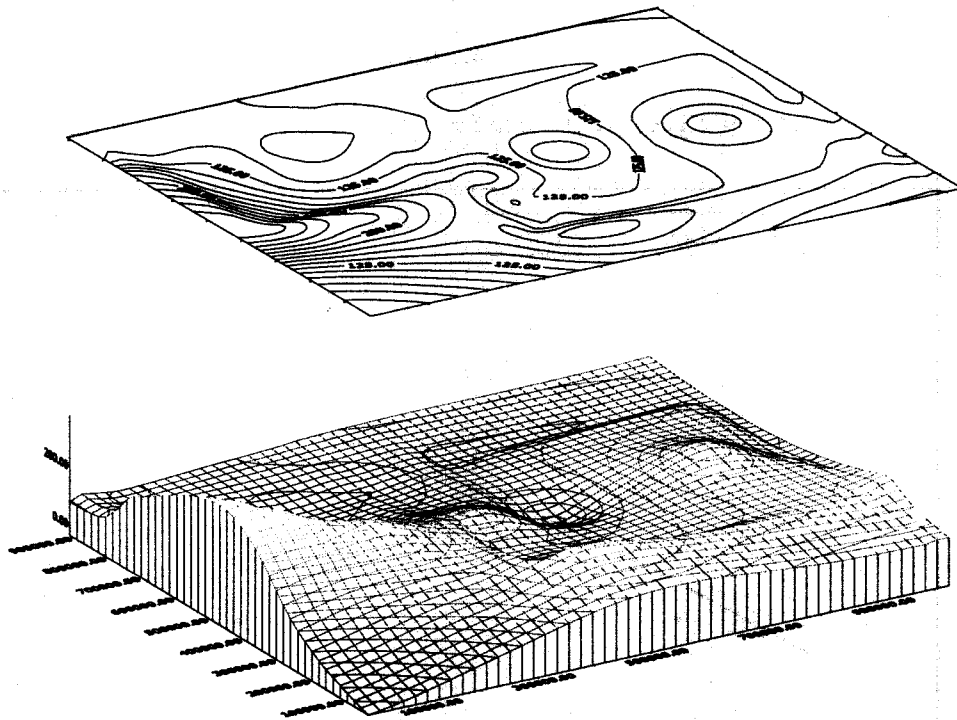
شکل ۵ مدل و واریوگرام تجربی بارندگی سالانه ایستگاه‌های جنوب شرق ایران - واحد (۷+۵)



شکل ۶ مدل و واریوگرام تجربی تلاقی بارندگی سالانه و ارتفاع ایستگاه‌های جنوب شرق ایران - واحد (۷+۵)



شکل ۷- تاثیر تعداد نقاط همسایگی در روش WMA



شکل ۸- نقشه خطوط همباران جنوب شرق ایران با روش TPSS

منابع

- ۱- حسنی پاک، علی اصغر، ۱۳۷۷ زمین آمار. انتشارات دانشگاه تهران.
- 2-Abtew, W., J. Obeysekera, and G. Shih. 1993. Spatial Analysis for Monthly Rainfall in South Florida. *Water Resources Bulletin*. 29(2): 179-188.
- 3-Goovaerts, P. 2000. Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall. *Journal of Hydrology*. Amsterdam. 228 (1-2):113-129.
- 4-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. hnw@fire.esd.ornl.gov.
- 5-Nalder, J.A. and R.W. Wein. 1998. Spatial Interpolation of Climate Normal: Test of a New Method. *Canadian Boreal Forest. Agri-Forest*. 94(4): 211-225.
- 6-Price, D.T., D.W. Mckenny, I.A. Nelder, M.F. Hutchinson and J.L. Kestevn. 2000. A Comparison of Two Statistical Methods for Interpolation. *Canadian Monthly Mean Climate Data. Agriculture and Forest*. 101(2-3): 81-94.
- 7- تا ب و س-7, G.Q. and J.D. Salas. 1985 A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Analysis Precipitation. *Water Resources Bulletin*. (21)3: 365-380.
- 8-Watson, G.S. 1984. Smoothing and Interpolation by Kriging and With Splines. *Mathematical Geology*. 16(6): 601-615.

Application of Geostatistical Methods for Estimation of Annual Spatial Rainfall in Arid and Semiarid Regions of South East of Iran

M. Mahdavi¹

E.Hosseini Chegini²

M.H. Mahdian³

S.Rahimi Bondarabadi⁴

Abstract

Estimation of rainfall is indispensable in many natural resources and agricultural studies. There are several methods of estimating rainfall among which interpolation is helpful in this regard. In most cases, a method is selected and estimation is then made with unknown precision. In this study, 3 methods were used to estimate annual rainfall. These methods were: Thin Plate Smoothing Splines (TPSS), with and without covariable, Weighted Moving Average (WMA) and Kriging (ordinary, Cokriging, Log kriging). The data in 167 stations from south east of Iran with 22 years of record were used in this study. Elevation was used as covariable and its correlation with rainfall evaluated. Because of size of the area and dispersing stations, the correlation coefficient was low and unacceptable for all stations. Therefore, the study area was divided into subcatchments, based on watershed catchments. In cases where few stations existed in the catchment or regression coefficient (between elevation and rainfall) for two stations was the same, those subcatchments were combined. Finally, 3 units of subcatchment were obtained. Regression coefficient between rainfall and elevation was low in one of the subcatchments ($R=0.12$) while in the other two subcatchments was higher (0.7 and 0.8). The results show that regression coefficient (between rainfall and elevation) must be greater than 0.6 to improve interpolation accuracy when using elevation as covariable. The results also show that TPSS method with elevation as covariable is the most precise method in estimating annual rainfall (MAE=13-38 mm). Kriging (MAE= 29-50 mm) and WMA methods (26-57 mm) stood in second and third order, respectively.

Keyword: Geostatistics, Interpolation, Rainfall, Kriging, TPSS, WMA, Iran, Rainfall.

¹ -Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran (E-mail: Mahdavi@nrf.ut.ac.ir)

² -Assistant Professor in Research, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

³ -Assistant Professor in Research, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

⁴ -Senior Expert, Soil Conservation and Watershed Management Institute