

# اثر تراکم ایستگاه و تفکیک منطقه‌ای در برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه (مطالعه موردی بر روی بارندگی جنوب غرب ایران)

بهرام ثقفیان\*، سیما رحیمی بندرآبادی\*\*، حمید طاهری شهرآئینی\*\*\* و جعفر غیومیان\*\*\*\*  
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

(دریافت مقاله: ۸۲/۳/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۳/۲۴)

چکیده - بارندگی یکی از متغیرهای اقلیمی است که به عنوان محرک چرخه هیدرولوژی از اهمیت زیادی برخوردار است. اصولاً در مطالعات برآورد و پیش بینی سیلاب در حوزه های متوسط و بزرگ و یا مطالعات آلودگی، علاوه بر تغییرات زمانی بارندگی، نیاز به بررسی تغییرات مکانی آن نیز هست. برآورد تغییرات مکانی بارندگی روزانه بدون توجه به مقایسه و انتخاب روشهای مناسب، می تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در تعیین ورودی مدل های بارش-رواناب باشد. میانبایی از جمله روشهای تعیین توزیع مکانی بارندگی است. در این تحقیق، چند روش میانبایی برای برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه جنوب غرب ایران مورد توجه قرار گرفت. برای مقایسه و ارزیابی روشها، از تکنیک اعتبار سنجی تقاطعی (CV)<sup>۱</sup> استفاده شد. ارزیابی روشهای مختلف برای برآورد بارندگی روزانه نشان داد که روش TPSS<sup>۲</sup> با توان ۲ در دو تراکم متفاوت ایستگاههای بارندگی مناسب است. به طور کلی، تقسیم منطقه دقت میانبایی را افزایش می دهد که این افزایش دقت در روش منطقه بندی خوشه‌ای بیشتر از منطقه بندی بر اساس مرز حوزه‌های آبخیز دیده می شود.

واژگان کلیدی: تحلیل خوشه‌ای، تراکم ایستگاه، میانبایی، زمین آمار، بارندگی روزانه، اعتبار سنجی تقاطعی، ایران

## The Effect of Station Density and Regional Division on Spatial Distribution of Daily Rainfall

B. Saghafian, S. Rahimi Bandarabadi, H. Taheri Shahraceni and J. Ghayoomian  
Soil and Watershed Conservation Research Institute

**Abstract:** Rainfall is one of the most important climatic variables in the hydrology cycle. In flood estimation as well as environmental pollution studies in medium to large watersheds not only temporal pattern of rainfall must be known, but also the knowledge of its spatial distribution is required. Estimation of daily rainfall distribution without comparison and selection of

\* - دانشیار پژوهشی      \*\* - کارشناسی ارشد      \*\*\* - دانشجوی دکترا      \*\*\*\* - استادیار پژوهشی

suitable methods may lead to errors in input parameters of rainfall – runoff models. Interpolation methods are among the techniques for estimating spatial distribution of rainfall. In this study, Thin Plate Smoothing Splines (TPSS), Weighted Moving Average (WMA) and Kriging are applied to estimate spatial daily rainfall in the southwest of Iran. Cross validation technique is used for comparison and evaluation of the methods. The results of analysis with two different station density showed that the TPSS method with power of 2 is the most accurate method in estimating daily rainfall. Zoning of the region also increased the interpolation accuracy. Generally speaking, division of the region based on cluster analysis improves accuracy compared with division by inter basin boundaries.

**Keywords:** Cluster Analysis, Station Density, Interpolation, Geostatistics, Daily Rainfall, Cross Validation, Iran

## فهرست علائم

MAE : میانگین مطلق خطا (یا به اختصار خطا)	$C_0$ : اثر قطعه‌ای
MBE : میانگین خطای انحراف (یا به اختصار انحراف)	$C(h)$ : تابع کوواریانس
n : تعداد کل ایستگاهها،	CV : اعتبار سنجی تقاطعی
RMSE : خطای ریشه میانگین مربعی	DEM : مدل ارتفاعی رقومی
WMA : میانگین متحرک وزنی	$D_i$ : فاصله بین ایستگاه $i$ ام تا نقطه مجهول
$Z(x_i)$ : مقدار بارندگی ثبت شده در موقعیت $x_i$	GIDS : عکس مجذور فاصله همراه با گرادیان
$Z^*(x_i)$ : مقدار بارندگی برآورد شده در موقعیت $x_i$	h : فاصله بین جفت ایستگاهها
$\alpha$ : توان وزن دهی	i : معرف نقاط مشاهده‌ای
$\lambda_i$ : وزن ایستگاه $i$ ام	m : درجه مشتق نسبی تابع اسپلاین در نقاط اندازه گیری شده
	$\theta$ : پارامتر پیرایش

### ۱- مقدمه

کرد. اگر چه محاسبات این روشها سریع و آسان است ولی معایب و اشکالات آنها گاهی منجر به ارائه نتایج غیر قابل قبول و با دقت کم می‌شوند. از معایب این روشها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. در روش میانگین حسابی، موقعیت ایستگاهها در نظر گرفته نمی‌شود و بنابراین به نحوه پراکنش نقاط با مقادیر معلوم در اطراف نقطه مجهول بهایی داده نمی‌شود. در این حالت وقتی که تغییرات بارندگی در منطقه زیاد و تراکم شبکه باران سنجی کم باشد، میانگین محاسبه شده قابل اعتماد نخواهد بود. ضمن آنکه توزیع مکانی بارندگی نیز به دست نمی‌آید. در روش عکس فاصله، اگر چه هر نقطه به طور مستقل در نظر گرفته می‌شود، ولی توپولوژی و موقعیت نسبی نقاط در محاسبات لحاظ نمی‌شود و بنابراین وزن نقاطی که به فاصله

برآورد میزان بارندگی در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی اجتناب ناپذیر است. لیکن به دلیل عدم امکان پوشش کامل ایستگاههای اندازه‌گیری، بارندگی برای مناطق مابین ایستگاهها باید مورد توجه قرار گیرد. ضعف در تعیین تغییرات مکانی بارندگی روزانه می‌تواند از عوامل مهم ایجاد خطا در پارامترهای ورودی مدل‌های بارش- رواناب در کاربردهای پیش‌بینی و طراحی باشد. به علاوه در برآورد بیلان آبی دقت در برآورد توزیع مکانی بارندگی اهمیت فراوانی دارد. روشهای مختلفی برای برآورد توزیع مکانی بارندگی وجود دارد. از جمله روشهای کلاسیک معمول می‌توان به روش میانگین حسابی، تیسن، هیسومتریک و روش استفاده از خطوط هم باران اشاره

یکسان از نقطه مجهول قرار دارند، یکسان در نظر گرفته می‌شود. در روش تیسن نیز، تمامی وزن به نمونه مرکزی داده می‌شود. ضمن آنکه با توجه به تقسیم منطقی به وسیله عمود منصفها، تغییرات بارندگی بین دو ایستگاه دارای یک ناپوستگی است و در نتیجه برای اغلب مناطق نظیر مناطق کوهستانی نمی‌تواند دقت زیادی داشته باشد.

اشکالات موجود در روشهای ساده، استفاده از تخمینگرهای آماری غیرپارامتری نظیر روشهای TPSS و میانگین متحرک وزنی (WMA)<sup>۳</sup> را مطرح می‌کند. همچنین استفاده از روشهای پارامتری زمین آمار نظیر کریگینگ<sup>۴</sup> نیز باید در نظر گرفته شود. کاربرد روشهای زمین آمار ابتدا در رشته معدن شروع شد و سپس در علوم دیگر توسعه یافت. ماترون<sup>۵</sup> پژوهشگر فرانسوی با انتشار مقاله‌ای در سال ۱۹۶۲ پایه‌های نظری زمین آمار را بنا نهاد [۱]. تابیوس و سالاس [۲] روش کریگینگ را در توزیع بارش سالیانه در یکی از ایالت‌های شمالی آمریکا برای ۲۹ ایستگاه باران سنجی مناسب تشخیص دادند. آبتو و همکاران [۳] در زمینه برآورد بارندگی ماهانه روش کریگینگ را برای جنوب فلوریدا توصیه کردند. کستون و هاجینسون [۴] نیز روش TPSS را برای برآورد پارامترهای اقلیمی در استرالیا بکار برد. روشهای کوکریگینگ، یونیورسال کریگینگ، کریگینگ عمومی، نزدیکترین همسایه، عکس مجذور فاصله و روش عکس مجذور فاصله همراه با گرادیان (GIDS) توسط نالدر و وین [۵] به منظور بررسی توزیع مکانی بارندگی و دمای ماهانه در جنگلهای شمالی کانادا آزمون شد. نتایج به دست آمده نشان داد 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 [۶] برای میانبایی مکانی دما و بارندگی ماهانه و سالیانه در غرب و شرق کانادا دو روش TPSS و GIDS را بررسی کردند. مقدار خطای ریشه میانگین مربعی (RMSE)<sup>۶</sup> از روش TPSS در هر دو ناحیه کمتر از روش GIDS بود. البته هر دو روش در نواحی شرقی (ایالات انتاریو و کبک)، که تغییرات توپوگرافی و

اقلیمی ملایمتری دارند، نتایج بهتری نسبت به نواحی غربی ارائه کردند.

گوارتز [۷] روشهای کریگینگ ساده، کریگینگ با روند خارجی و کوکریگینگ را برای بارندگی سالیانه و دمای ۳۶ ایستگاه کلیماتولوژی در ناحیه ای به وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در پرتغال بررسی کرد. در مقایسه این سه روش با روشهای عکس مجذور فاصله، رگرسیون خطی با ارتفاع، تیسن و کریگینگ معمولی با استفاده از تکنیک اعتبار سنجی تقاطعی، روش کریگینگ ساده مناسبترین روش شناخته شد. هارگرو [۸] از روش اسپلاین با حالت‌های تنش<sup>۷</sup> و اسموت<sup>۸</sup> 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. رحیمی بندرآبادی [۹] کاربرد روشهای زمین آماری را در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد برای برآورد بارندگی ماهانه و سالیانه روش TPSS با توان ۲ و با متغیر کمکی ارتفاع روش مناسبی است.

در زمینه توزیع مکانی بارندگی در پایه زمانی روزانه، لینچ [۱۰] از بین روشهای میانگین متحرک وزنی و کریگینگ و اسپلاین‌ها برای برآورد بارندگی روزانه در آفریقای جنوبی، روش میانگین متحرک وزنی را مناسب تشخیص داد. جفری و همکاران [۱۱] تغییرات مکانی داده‌های ثبت شده در ایستگاههای هواشناسی کشور استرالیا را مورد بررسی قرار دادند. آنها با ایجاد یک شبکه منظم ۰/۰۵ درجه‌ای از روش TPSS برای میانبایی متغیرهای اقلیمی روزانه و از روش کریگینگ معمولی برای میانبایی بارندگی ماهیانه و روزانه استفاده کردند. بال و لوک [۱۲] برای تخمین توزیع شدت بارندگی در حومه شهر سیدنی در کشور استرالیا، روشهای تیسن، عکس فاصله، اسپلاین و چندجمله‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش اسپلاین با خطای نسبی ۲۲ درصد دقیقترین روش و روش تیسن با خطای نسبی ۷۶ تا ۴۸۸ درصد نامناسبترین روش است. ثقفیان و همکاران [۱۳] چند روش میانبایی تیسن،

میانگین متحرک وزنی، رویه متحرک<sup>۹</sup>، رویه چندجمله‌ای<sup>۱۰</sup> و کریگینگ را برای بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ (۱۶ اسفند ۱۹۹۱) در جنوب غرب ایران و با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سازمان هواشناسی (۴۷ ایستگاه) آزمون کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش میانگین متحرک وزنی با توان ۳ بیشترین دقت را برای بارندگی روز ۱۶ اسفند ارائه می‌کند.

در این تحقیق، روش‌های TPSS و میانگین متحرک وزنی (WMA) در تحلیل توزیع مکانی بارش روزانه ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ در یک شبکه متراکتر با اضافه کردن ایستگاه‌های وزارت نیرو (مجموعاً ۳۴۷ ایستگاه) به کار گرفته می‌شود و نتایج حاصله با نتایج بهترین روش پژوهش ثقفیان و همکاران [۱۳] برای مجموعه ایستگاه‌های سازمان هواشناسی و وزارت نیرو در جنوب غرب ایران (۳۴۷) در روز ۱۶ اسفند مقایسه و بهترین روش معرفی می‌شود. علاوه بر آن در این تحقیق، منطقه بندی به روش تحلیل کلاستر و براساس مرز حوزه‌های آبخیز موجود در منطقه انجام می‌شود و نتیجه آن در بهبود توزیع مکانی بررسی می‌شود. هم چنین تحلیل واریوگرافی در هر یک از مناطق برای بررسی همبستگی مکانی و نقش تقسیم منطقه در ایستادن داده‌ها با توجه به نوع بارش در این روز (عدم پراکنش یکنواخت مقادیر بارش) انجام می‌گیرد. نتایج روش کریگینگ معمولی نیز در این مناطق با سایر روش‌های ذکر شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به منظور بررسی امکان تعمیم نتایج، بارندگی روز ۲۲ اسفند ۱۳۶۹ (معادل ۱۳ مارس ۱۹۹۱) با پراکنش متفاوت نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت.

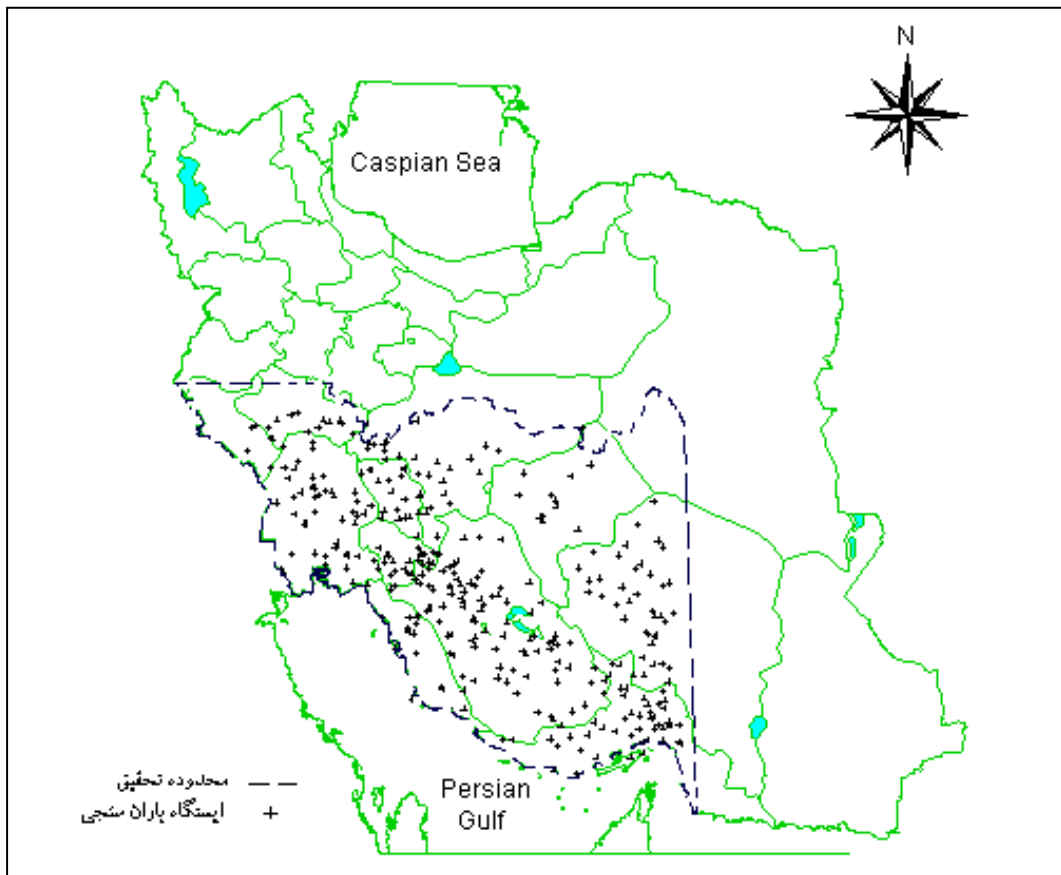
## ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی ایران و شامل استانهای خوزستان، بوشهر، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد و قسمتهایی از استانهای اصفهان، هرمزگان، فارس، یزد و کرمان است، شکل (۱). این منطقه بین طولهای جغرافیایی ۵۷° و ۶۶° تا ۱۸° و عرضهای ۲۴° و ۲۶° تا ۳۴° شمالی واقع شده است. حوزه‌های آبریز کرخه، دز، کارون،

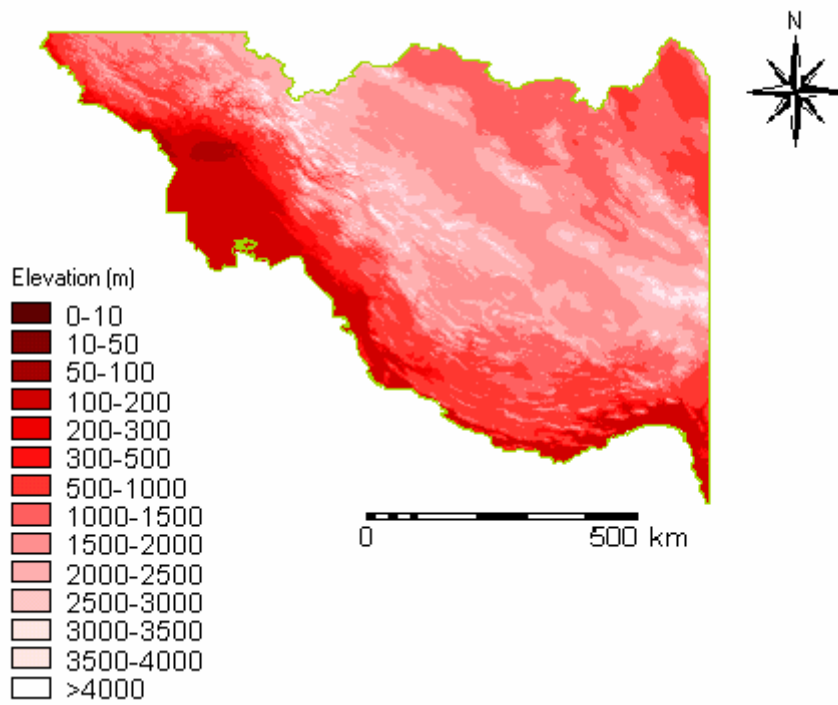
مرزی غرب، مارون - جراحی، زهره، طشک و بختگان، شاپور دالکی، رود مند، رود کل، ساحل خلیج فارس و میناب در محدوده منطقه قرار دارند. مرز شمالی شرقی و میانی محدود به مرز حوزه‌ها و در قسمت غربی محدود به مدار ۱۵°، ۳۴° است. این منطقه از لحاظ اقلیمی متنوع و دارای اقلیمهای خشک بیابانی، فراخشک، نیمه خشک، مدیترانه‌ای و نیمه مرطوب‌اند و به طور کلی از توده‌های رطوبتی و جبهه‌های باران زایی که از جنوب، جنوب غرب و غرب وارد کشور می‌شوند متاثر است. منطقه مورد نظر بخشی از رشته کوه‌های زاگرس را در برمی‌گیرد، به طوری که حداکثر ارتفاع حدود ۴۵۷۰ متر و حداقل آن صفر در ساحل خلیج فارس است. شکل (۲) تغییرات مکانی ارتفاع منطقه را در قالب مدل ارتفاعی رقومی (DEM) نشان می‌دهد. DEM توسط نرم افزار ILWIS GIS با استفاده از نقشه رقومی خطوط تراز ساخته شده است. تعداد ایستگاه‌های ثبت بارندگی در این محدوده مجموعاً ۳۴۷ ایستگاه است که تعداد ۳۰۰ ایستگاه مربوط به وزارت نیرو و تعداد ۴۷ ایستگاه مربوط به سازمان هواشناسی با بیشترین تراکم ایستگاهها در قسمت غربی منطقه است. در شکل (۱) پراکنش این ایستگاهها نشان داده شده است.

## ۳- روشهای میانبایی

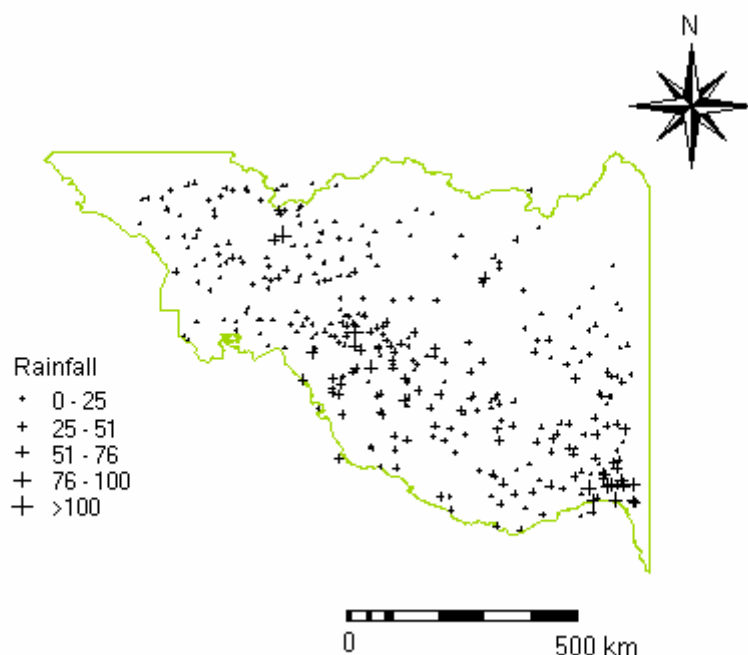
در این منطقه، ثقفیان و همکاران [۱۳] چند روش میانبایی شامل: تیسن، میانگین متحرک، رویه متحرک، رویه چند جمله‌ای و کریگینگ را برای بارندگی روز ۱۶ اسفند سال ۱۳۶۹ با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سازمان هواشناسی (۴۷ ایستگاه) آزمون کردند. نتایج آنها نشان داد که روش میانگین متحرک وزنی (WMA) با توان ۳ مناسبترین روش برای برآورد بارندگی روزانه در این منطقه است. در این تحقیق نتایج روشهای TPSS و روش میانگین متحرک وزنی با نتایج بهترین روش ثقفیان و همکاران [۱۳] به ازای تراکم بیشتر ایستگاهها در منطقه مقایسه می‌شود. در شکل (۳) نحوه پراکنش بارندگی در روز ۱۶ اسفند نشان داده شده است. بررسی توزیع بارندگی در این منطقه با



شکل ۱- منطقه مورد تحقیق در جنوب غرب ایران



شکل ۲- نقشه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه



شکل ۳- پراکنش بارندگی نقطه‌ای در روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ (به میلی‌متر)

در روش WMA، به هر یک از ایستگاهها وزنی بر اساس فاصله بین هر ایستگاه تا موقعیت نقطه مجهول تخصیص می‌یابد. این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود، به طوری که توانهای بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توانهای کوچکتر وزنها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌نند. در این روش مقدار فاکتور وزنی معادله (۱) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^n D_j^{-\alpha}} \quad (3)$$

که در آن:

$\lambda_i$ : وزن ایستگاه  $i$  ام،

$D_j$ : فاصله ایستگاه  $j$  ام تا نقطه مجهول،

$D_i$ : فاصله بین ایستگاه  $i$  ام تا نقطه مجهول،

$\alpha$ : توان وزن دهی.

از طرف دیگر روش TPSS نوعی کریجینگ است که تابع کوواریانس آن به صورت زیر است [۱۴]:

هدف تامین نیازهای مطالعات ارزیابی وضعیت آلودگی بارانهای سیاه ناشی از جنگ کویت و انفجار چاههای نفت کویت، در ایران صورت گرفته است. روز ۱۶ اسفند به دلیل بارندگی بیشتر و فراگیر بودن برای بررسی توزیع مکانی انتخاب شد. معادله کلی میانجی به صورت معادله زیر است. تفاوت روشهای مختلف در برآورد فاکتور وزنی معادله زیر است:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

که در آن:

$Z^*(x)$ : مقدار بارندگی برآورد شده در موقعیت مجهول  $x$ ،

$Z(x_i)$ : مقدار بارندگی مشاهده شده در موقعیت  $x_i$ ،

$\lambda_i$ : مقدار وزن ایستگاه در موقعیت  $x_i$ ،

$i$ : معرف نقاط مشاهده‌ای،

$n$ : تعداد کل ایستگاهها.

برای برآورد نا اریب مقادیر مجهول، معادله زیر باید برقرار باشد:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

$$C(h) = h^k \cdot \log(h) \quad (4)$$

$$C(h=0) = \theta$$

که در آن:

$h$ : فاصله بین جفت ایستگاهها،

$C(h)$ : تابع کوواریانس،

$\theta$ : پارامتر پیرایش،

$$m-1 = K,$$

$m$ : درجه مشتق نسبی تابع اسپلاین در نقاط مشاهده شده.

در روش کریگینگ نیز مقادیر وزن هر ایستگاه بر اساس تحلیل نیم تغییرنما محاسبه می‌شود. این روش در منابع [۱] و [۹] به تفصیل شرح داده شده است.

#### ۴- روش و معیار ارزیابی

روشهای مختلف میانبایی بر اساس روش اعتبارسنجی تقاطعی ارزیابی می‌شوند. در این روش یک نقطه به صورت موقتی حذف شده و با اعمال روش میانبایی مورد نظر برای آن نقطه مقداری برآورد می‌شود. سپس مقدار حذف شده به جای خود برگردانده شده و به همین ترتیب برای بقیه نقاط به صورت مجزا این برآورد صورت می‌گیرد. در پایان یک جدول با دو ستون مقادیر واقعی و برآورد شده، به دست می‌آید. با داشتن این دو مقدار می‌توان میانگین قدر مطلق خطا (MAE)<sup>۱۱</sup> و میانگین خطای انحراف (MBE)<sup>۱۲</sup> روش میانبایی را برآورد کرد.

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

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (6)$$

که در آنها:

MAE: میانگین مطلق خطا (خطا)،

MBE: میانگین خطای انحراف (انحراف).

اصولاً مناسبترین روش، دارای کمترین مقدار MAE و MBE است [۱۵]. پس از محاسبه مقادیر خطا و انحراف، هر چقدر این دو معیار به صفر نزدیکتر باشند، نشان دهنده اختلاف

کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. در شرایطی که MAE و MBE برابر صفر باشند، مؤید این مطلب است که مدل مورد نظر متغیر را آن طور که هست، برآورد می‌کند. MAE نشان دهنده میانگین خطای برآورد و MBE نشان دهنده اختلاف میانگین مقادیر مشاهده‌ای و میانگین مقادیر برآوردی است و لذا درجه برآورد بالا دست<sup>۱۳</sup> یا پایین دست<sup>۱۴</sup> را بیان می‌کند.

#### ۵- تحلیل خوشه‌ای

روشهای مختلفی برای رده بندی مشاهدات یک جامعه به چندین گروه موجود است. انتخاب این روشها به معلوم بودن یا مجهول بودن تعداد گروهها، تعداد گروههای هدف و نوع متغیرهای مورد اندازه‌گیری بستگی دارد. تحلیل خوشه‌ای برای تعیین گروههای مشابه در داخل مشاهدات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]. تحلیل خوشه‌ای برای متغیرهای هواشناسی توسط منابع معتبر استفاده شده است [۱۷-۱۹]. در این مقاله از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی<sup>۱۵</sup> (به دلیل مشخص نبودن تعداد گروهها از قبل) استفاده شد. در این روش با محاسبه فاصله هر فرد از سایر افراد شروع و سپس گروهها بر اساس فرایند تجمعی یا تقسیمی تشکیل می‌شوند. پس از تعیین فاصله که معمولاً به یکی از روشهای اقلیدسی، مربع اقلیدسی و چند روش شناخته شده دیگر اندازه‌گیری می‌شود گروههای همگن با یکی از روشهای نزدیکترین همسایه، ارتباط بین گروهها، دورترین همسایه، میانه و Ward's استخراج می‌شود. برای آزمون صحت گروه بندی از روش تحلیل تابع تشخیص<sup>۱۶</sup> استفاده شد. از این روش زمانی که تعداد و اعضای گروهها مشخص باشد برای پیش بینی صحت گروهها استفاده می‌شود [۲۰].

#### ۶- مراحل کار و نتایج

در ابتدا، داده‌ها از نظر همگنی و کیفیت مورد بررسی قرار گرفتند و ایستگاههای دارای داده‌های پرت و مشکوک (۱۰)

ایستگاه) حذف شدند. در این تحقیق روشهای WMA با توان ۳ (WMA-3) و روش TPSS با توانهای ۲ (TPSS-2) و ۳ (TPSS-3) مورد بررسی قرار گرفتند. این روشها برای سه حالت داده‌های شبکه ایستگاههای سازمان هواشناسی (حالت ۱)، داده‌های شبکه ایستگاههای وزارت نیرو (حالت ۲) و ترکیب دو شبکه (حالت ۳) انجام شد، جدول (۱). نتایج آزمون روشهای میانبایی در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش تراکم ایستگاهها دقت روشها تا حدودی افزایش یافته است (مثلاً در روش TPSS-2 مقدار MAE از ۷/۴ به ۷/۲ میلیمتر و مقدار MBE از ۱/۶ به ۰/۱ تقلیل یافته است). این تغییر دقت در روش WMA بیشتر مشهود است. ضمن آن که روش TPSS با توان ۲ دقت بیشتری را نسبت به روش WMA با توان ۳ در هر سه حالت ارائه می‌کند. در شکل (۴) نمودار مقادیر برآوردی و مشاهده ای برای هر دو روش (برای حالت ۳) ارائه شده است. همانطور که نمودار (۴) نشان می‌دهد، مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای در روش TPSS-2 به هم نزدیکترند و به عبارت دیگر دارای همبستگی بیشتری می‌باشند. مقایسه تغییرات MAE و MBE در شکل (۵) نشان می‌دهد که افزایش تعداد و تراکم ایستگاهها، تاثیر بیشتری بر روی کاهش اختلاف میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی دارد، به طوری که مقدار MBE در روش TPSS-2 از ۱/۶ میلیمتر برای تعداد ۴۷ ایستگاه به ۰/۱ میلیمتر برای ۳۴۷ ایستگاه تنزل یافته است.

به دلیل وسعت زیاد منطقه و تغییرات زیاد ارتفاع و بارندگی در منطقه، این فرض که تقسیم بندی منطقه به واحدهای کوچکتر و همگن می‌تواند دقت میانبایی را افزایش دهد مطرح شد. بنابراین منطقه ابتدا بر اساس حوزه‌های آبخیز اصلی تقسیم‌بندی شد، شکل (۶) و عملیات میانبایی با مناسبترین روش (TPSS-2) در هر یک از حوزه‌های اصلی انجام شد. نتایج ارزیابی در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقسیم منطقه به حوزه‌های اصلی تا حدی دقت را افزایش داده است به نحوی که نسبت MAE به میانگین مکانی بارش (مقدار بدون بعد

(MAE) از ۷۵٪ برای کل منطقه به ۷۱٪ (متوسط حوزه‌ها) تقلیل یافته است.

در مرحله بعد، به منظور بررسی امکان دستیابی به مناطق همگن تر با توجه به وسعت منطقه و تغییرات زیاد ارتفاع در منطقه، تحلیل کلاستر (با استفاده از نرم افزار SPSS) بر اساس بارندگی، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع انجام شد که منطقه به سه ناحیه تقسیم شد، (نواحی A، B و C در شکل ۷). سپس با روش تحلیل تابع تشخیص صحت تقسیم بندی مورد آزمون قرار گرفت. نتیجه این آزمون نشان دهنده ۸۶٪ تطابق است. نتایج میانبایی بارندگی (با روش TPSS-2) طبق تقسیم بندی تحلیل کلاستر در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار خطا در تقسیم بندی بر اساس تحلیل کلاستر به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد (مقدار متوسط منطقه ای خطا نسبت به میانگین حدود ۴۹ درصد است). همچنین حجم بارندگی برای سطح منطقه (معادل  $570000 \text{ km}^2$ ) در تقسیم‌بندی حوزه‌ای حدود  $6076$  میلیون متر مکعب و در تقسیم منطقه به روش تحلیل کلاستر حدود  $5774$  میلیون متر مکعب برآورد شد. این مقدار برای کل منطقه بدون تقسیم بندی برابر  $6738$  میلیون متر مکعب است. در این زمینه، نتایج رحیمی [۹] نیز نشان داد که تقسیم منطقه به واحدهای همگن، دقت میانبایی بارش ماهیانه را افزایش می‌دهد. در آن تحقیق تقسیم‌بندی بر اساس حوزه‌های آبخیز و اقلیم منطقه مورد مقایسه قرار گرفت، که نتایج موید دقت بیشتر میان یابی در تقسیم بندی بر اساس اقلیم منطقه بود.

با افزایش تعداد ایستگاهها، با فرض بهبود ساختار مکانی و افزایش دقت روش کریگینگ، تحلیل واریوگرافی نیز صورت گرفت. واریوگرام حاصله، شکل (۸) تفاوت قابل توجهی را با واریوگرام ثقفیان و همکاران [۱۳] که با تعداد ۴۷ ایستگاه محاسبه شده بود، نشان نداد. در نتیجه دقت روش کریگینگ نیز تغییر قابل توجهی نخواهد داشت. بررسی واریوگرام در هر یک از نواحی A، B و C جداگانه صورت گرفت، شکل (۹). نتایج نشان داد که به جز در ناحیه A، واریوگرامها ساختار مکانی



جدول ۱- مقایسه حالت‌های مختلف از نظر تعداد و تراکم ایستگاه‌های باران سنجی

وضعیت	مساحت کل (km <sup>2</sup> )	تعداد ایستگاه	تراکم (تعداد در هر ۱۰۰ هزار کیلومتر مربع)
حالت ۱	۵۷۰۰۰۰	۴۷	۸
حالت ۲	۵۷۰۰۰۰	۳۰۰	۵۳
حالت ۳	۵۷۰۰۰۰	۳۴۷	۶۱

جدول ۲- مقادیر MAE و MBE (به میلیمتر) حاصل از روش‌های میانبایی برای بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۹۹۱

Method	TPSS-2		TPSS-3		WMA-3	
	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE
حالت ۱	۷/۴	۱/۶	۸/۲	۱/۶	۹/۶	-۰/۸
حالت ۲	۷/۴	-۰/۱	۷/۹	۱	۸/۶	۰/۱
حالت ۳	۷/۲	۰/۱	۷/۷	۱	۸/۴	-۰/۱

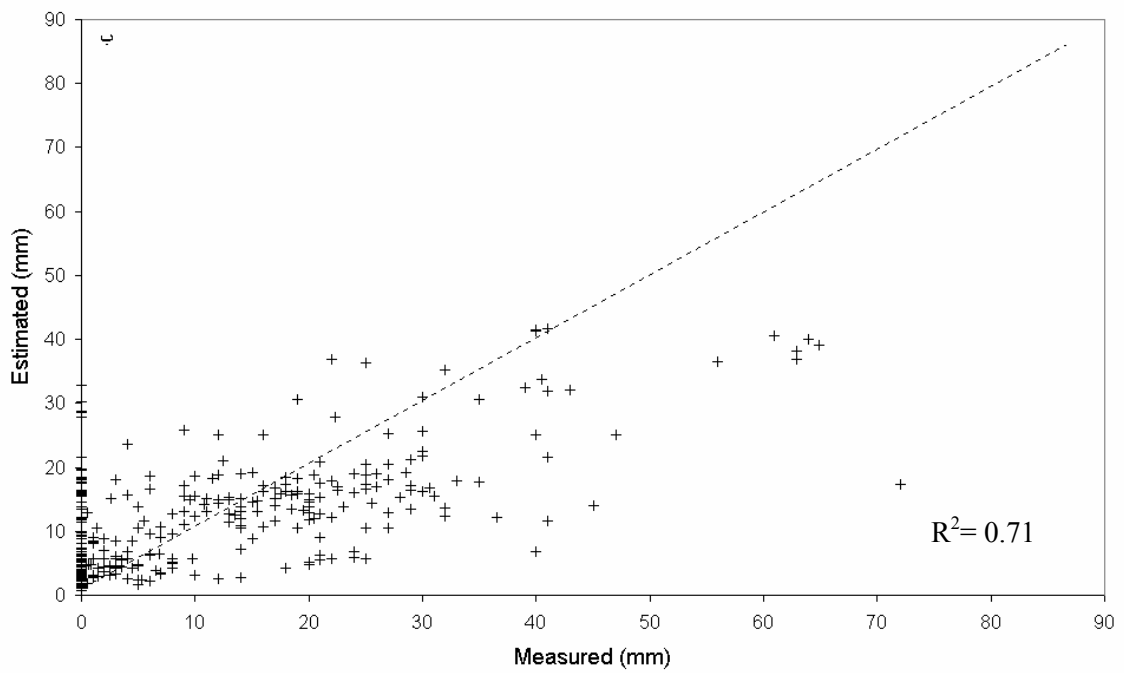
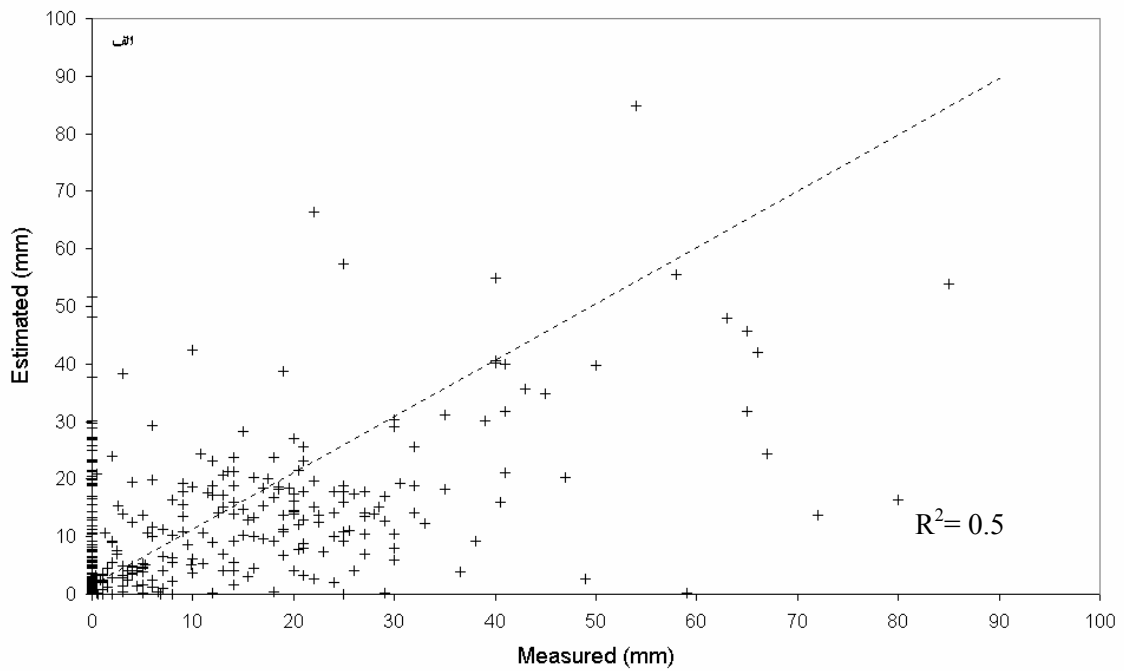
جدول ۳- نتایج بررسی تقسیم بندی‌های مختلف منطقه در روش‌های میانبایی

نواحی	MAE (mm)	MBE (mm)	میانگین بارندگی (میلی متر)	میانگین	
				MAE *100 / Mean of Rainfall	%
Basin-3	۳/۹	-۰/۳	۵/۲	۷۵	۷۱
Basin-4	۱۱/۷	-۰/۷	۱۹/۱	۶۱/۳	۷۱
Basin-5	۴/۶	۰/۲	۶/۹	۶۶/۷	۷۱
Basin-6	۱/۷	۰/۳	۲/۱	۸۱	۷۱
A	۷/۲	۰/۴۶	۹/۷	۷۴/۲	۴۹
B	۱/۵	-۰/۰۲	۷/۳	۲۰/۵	۴۹
C	۱۰/۷	۰/۷	۲۰/۸	۵۱/۴	۴۹

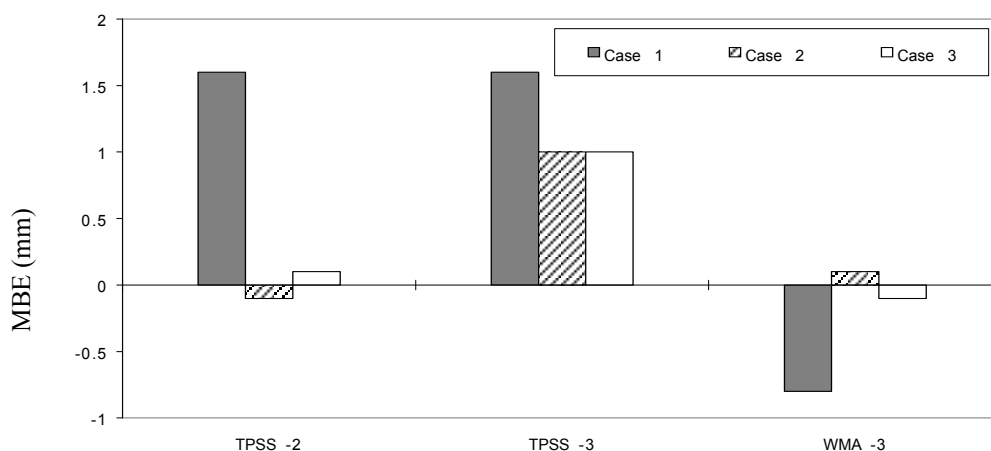
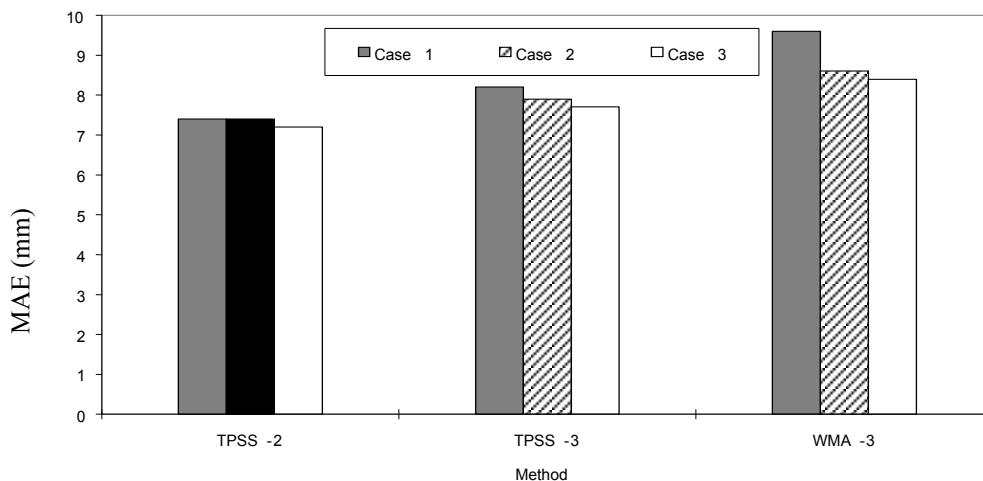
میلیمتر مربع و سیل<sup>۱۷</sup> برابر ۱۷۶/۲ میلیمتر مربع و با شعاع تاثیر ۲/۸ درجه جغرافیایی است و برای واحد C با ریشه دوم داده‌ها، مدل کروی با مقدار C<sub>0</sub> برابر ۳/۴۵ میلیمتر مربع و سیل برابر ۶/۴ میلیمتر مربع و با شعاع تاثیر ۵/۵ درجه جغرافیایی بهترین انطباق را دارد.

پس از شناسایی مناطق همگن A، B و C با روش کلاستر، نقشه توزیع بارش برای روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ در سه ناحیه با روش TPSS با توان ۲ تهیه شد. سپس نقشه‌ها در محیط GIS با نرم افزار ILWIS برای پردازش وارد شد. شکل (۱۰) توزیع بارندگی برای این روز را نشان می‌دهد.

مناسبتی را نشان می‌دهند. این می‌تواند به علت ایستادن داده‌ها در اثر تقسیم منطقه باشد. بنابر این روش کریگینگ برای واحد B و C با بهترین مدل برازش داده و با بهینه کردن پارامترهای مورد نیاز این روش از جمله گام حداقل، گام فعال، فاصله حداکثر محاسبه شد. مقدار MAE و MBE برای روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ با روش کریگینگ در واحد B به ترتیب ۶/۶ و ۰/۱- میلیمتر و برای واحد C به ترتیب ۱۵/۵ و ۱۴/۲- میلیمتر است، که نسبت به روش TPSS در این واحدها دقت کمتری دارد. لازم به ذکر است که بهترین مدل تطبیق شده با واریوگرام واحد B مدل کروی و با مقدار C<sub>0</sub> (اثر قطعه‌ای) برابر ۸۶/۶

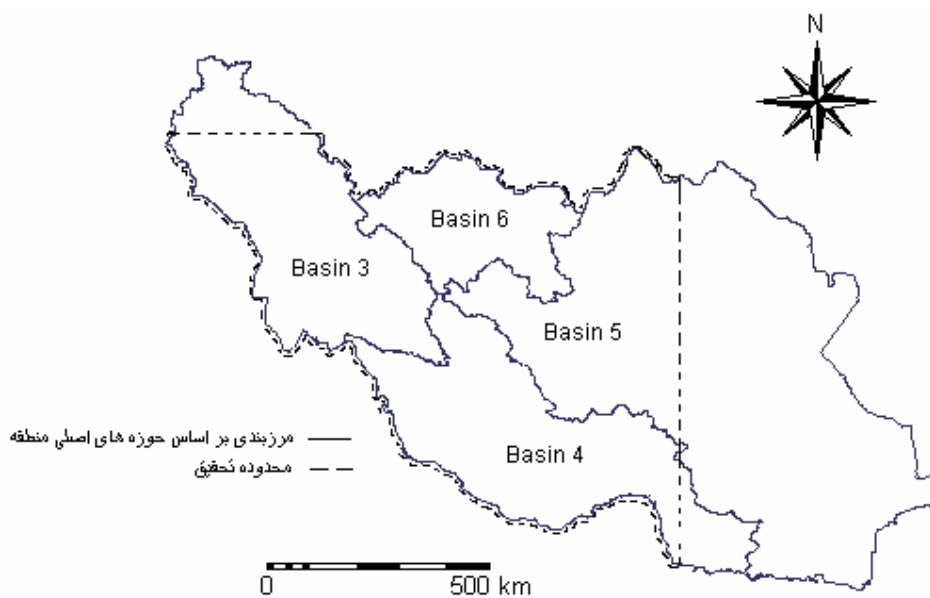


شکل ۴- نمودار مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی در حالت Case 3 الف) روش WMA-3 ب) روش TPSS-2

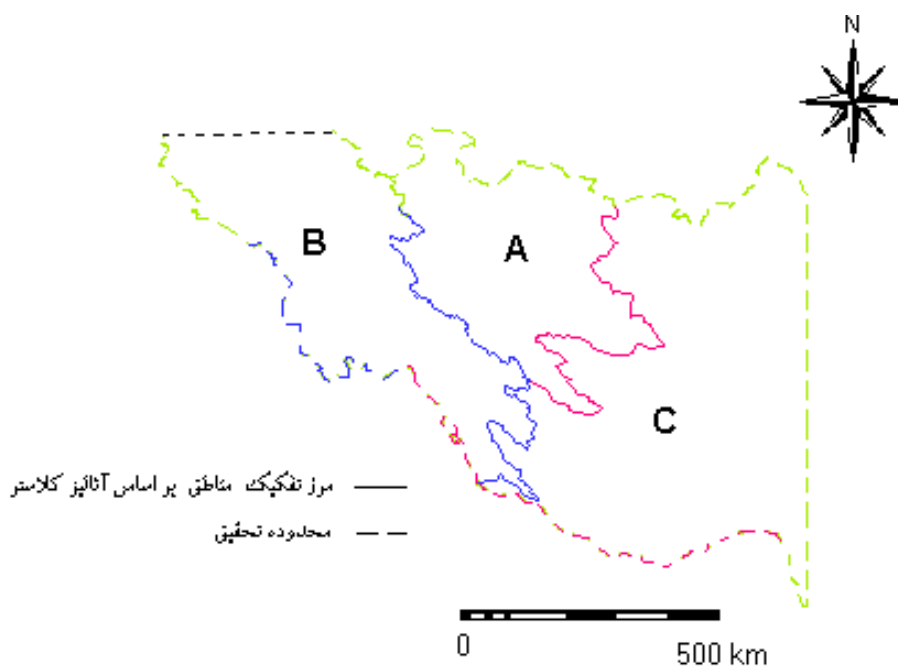


روش

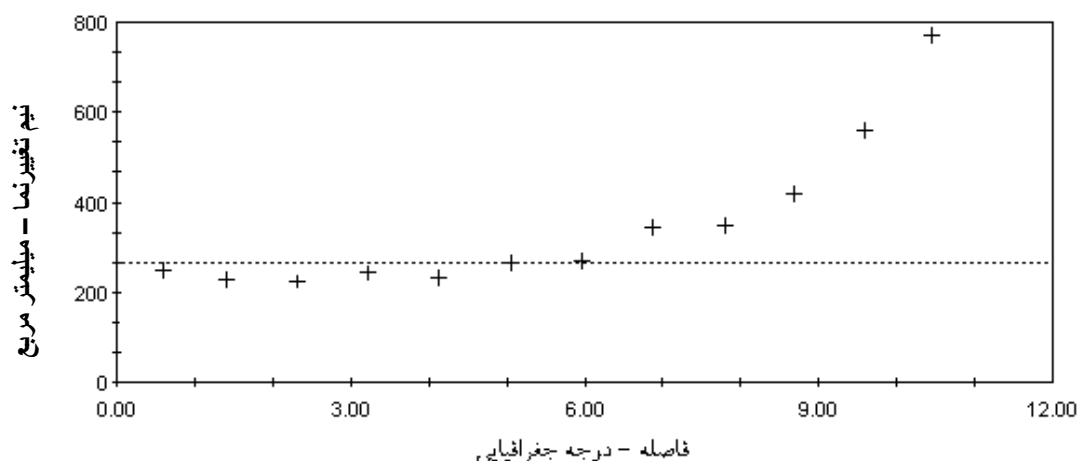
شکل ۵- نمودار تغییرات MAE و MBE در تراکمیهای مختلف برای بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹



شکل ۶- نقشه تقسیم منطقه بر اساس حوزه های اصلی منطقه



شکل ۷- نقشه تقسیم منطقه بر اساس تحلیل خوشه‌ای

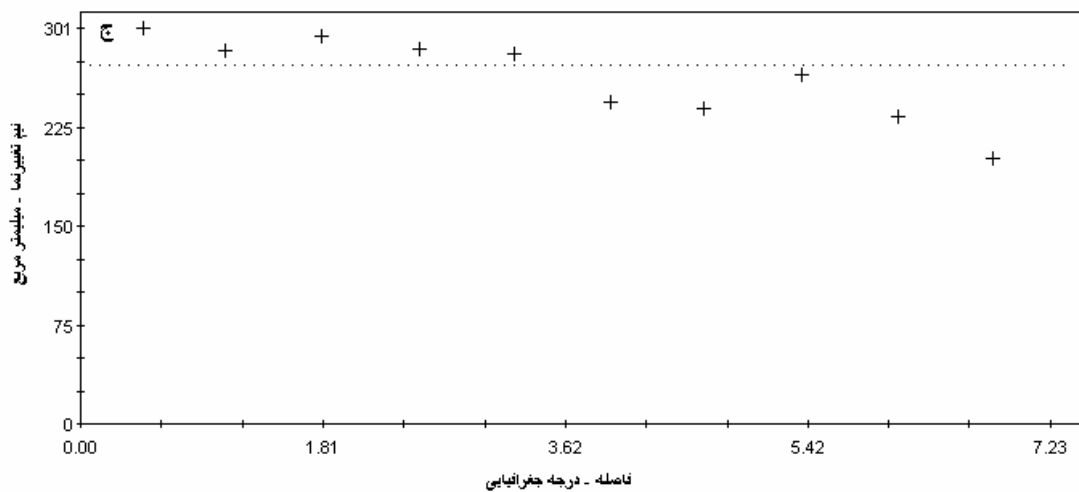
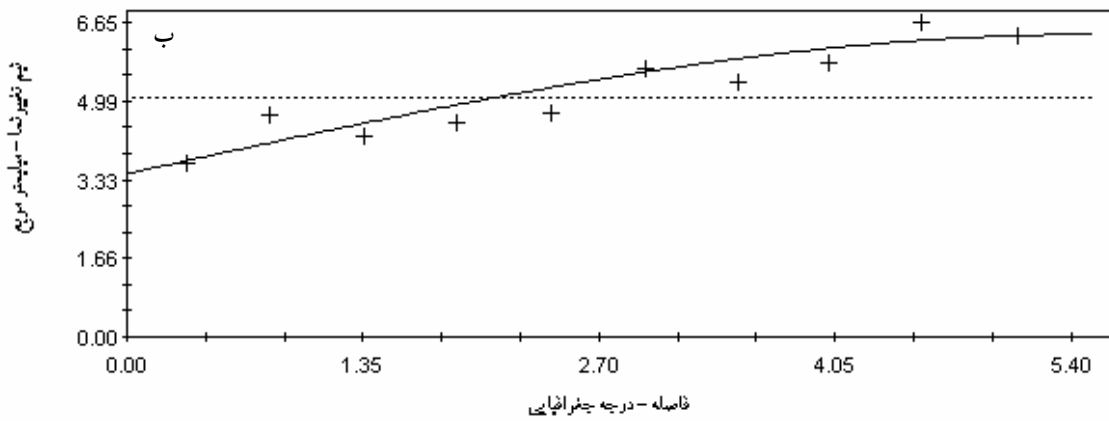
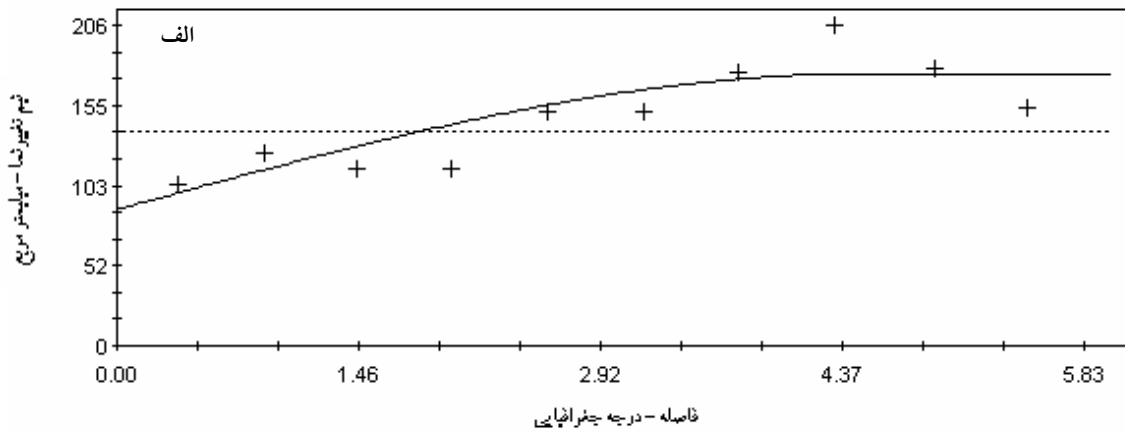


شکل ۸- نیم تغییر نمای بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ در کل منطقه مورد مطالعه

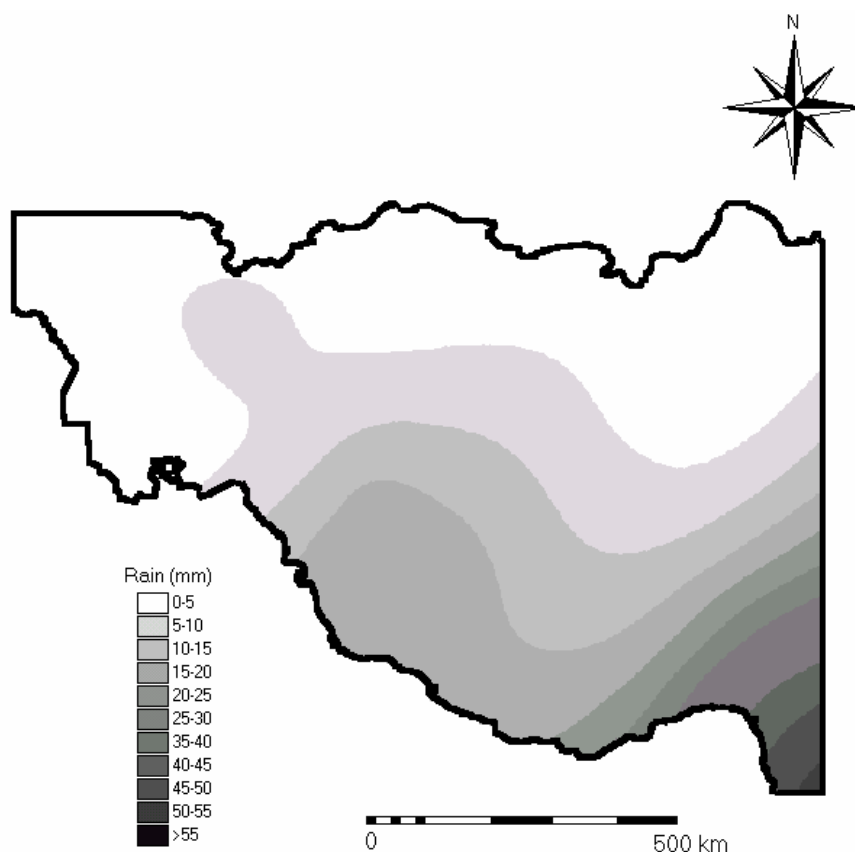
افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در تقسیم منطقه به روش تحلیل کلاستر، مرزهای روز ۱۶ اسفند تقریباً مشابه مرزهای روز ۲۲ اسفند به دست آمد.

در مقایسه با نتایج سایر محققان، نتایج این تحقیق با نتایج لینچ [۱۰] متفاوت است. وی از بین روشهای WMA، کریگینگ و اسپلین، روش WMA را توصیه کرد. در این تحقیق روش TPSS دقت بیشتری دارد. از طرف دیگر جفری و همکاران [۱۱]

برای بررسی عمیقتر و انتخاب روش مناسب، این روشها برای بارندگی روز ۲۲ اسفند ۱۳۶۹ نیز که دارای پراکنش و فراگیری کمتری نسبت به روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ است، در تراکمهای مختلف اجرا شد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که در این روز نیز روش TPSS-2 دقت بیشتری ارائه می‌کند و افزایش تراکم باعث افزایش دقت برآورد می‌شود، شکل (۱۱). ضمن آنکه تقسیم بندی منطقه با روش تحلیل کلاستر دقت برآورد را



شکل ۹- نیم تغییرنمای بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹، الف) در منطقه B (ب) در منطقه C و ج) در منطقه A



شکل ۱۰- توزیع مکانی بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ در منطقه مورد مطالعه با روش TPSS

برآورد متوسط بارندگی روزانه منطقه در روزهای متعدد باشد، با توجه به این که مقدار MBE در روش WMA کوچکتر یا مساوی با مقدار MBE در روش TPSS است می‌توان از روش ساده‌تر WMA استفاده کرد.

۲. در صورت وسیع بودن منطقه تفکیک آن به مناطق همگن دقت برآورد را بهبود می‌بخشد. در این رابطه، تفکیک براساس تحلیل کلاستر مناسبتر از تفکیک بر اساس حوزه‌های اصلی منطقه است.

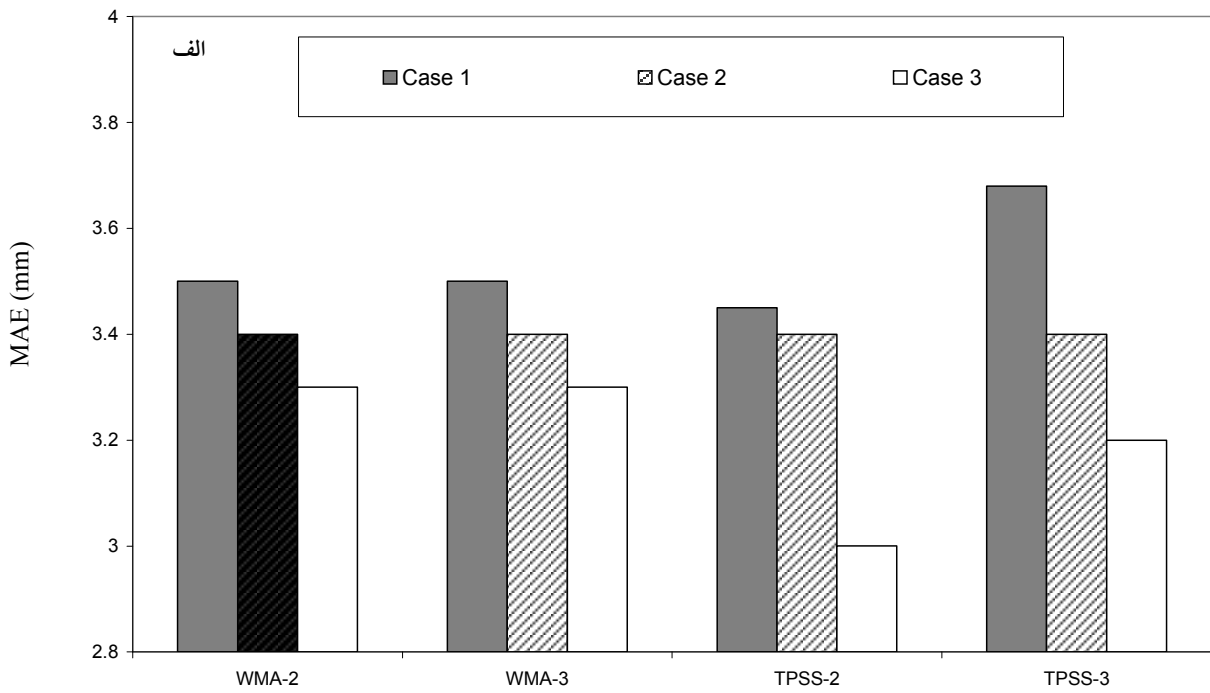
۳. نتایج نشان دادند که افزایش تراکم ایستگاهها باعث افزایش دقت میانبایی به خصوص در شاخص MBE می‌شود. در این ارتباط روش WMA رفتار همگن تری را نشان می‌دهد. بنابراین چون تاثیر افزایش تراکم در روش WMA-3 کمتر است، در صورت کم بودن تراکم و یا وجود ایستگاههایی با داده‌های مشکوک و ناکافی، به کارگیری این روش توصیه می‌شود.

نیز از روش TPSS برای برآورد متغیرهای اقلیمی روزانه در ۴۶۰۰ ایستگاه در سرتاسر استرالیا استفاده کردند. برآورد تغییرات مکانی علاوه بر نوع متغیر به عوامل دیگری نظیر تراکم، نحوه آرایش ایستگاهها و تغییرات اقلیمی بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر نقاط تعمیم داد.

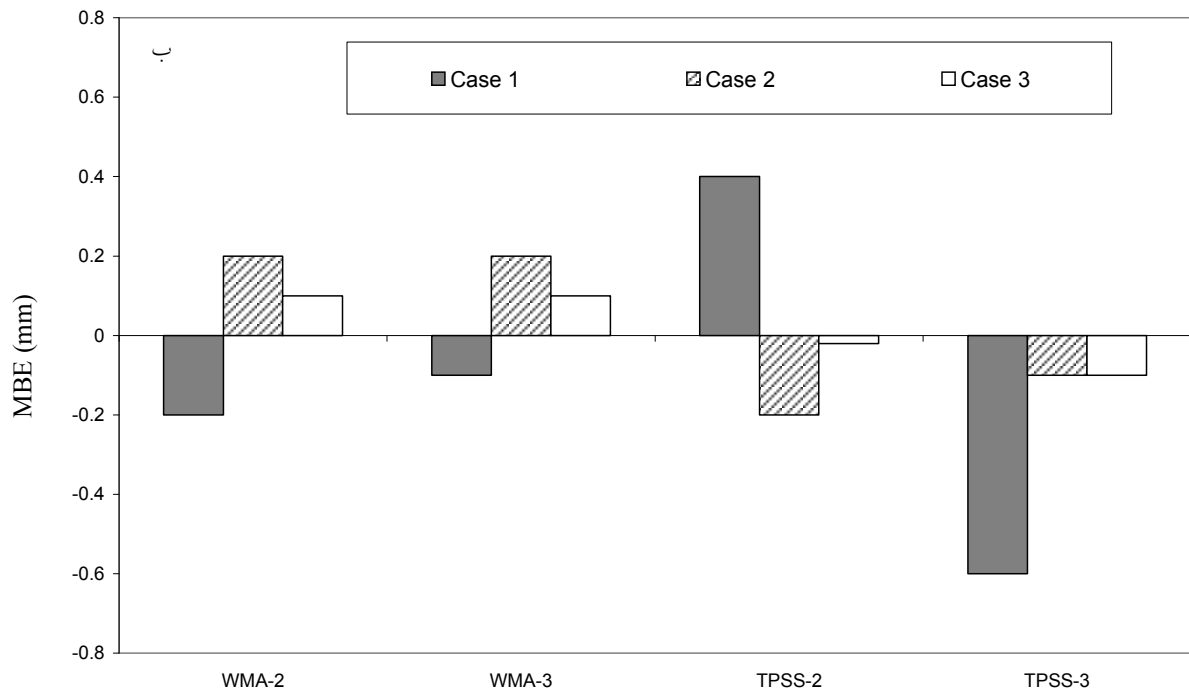
## ۷- نتیجه گیری

به طور کلی نتایج بیانگر آن است که:

۱. برای برآورد بارندگی روزانه در بارشهای فراگیر منطقه جنوب غرب کشور، روش TPSS با توان ۲ نسبت به روشهای WMA و کریگینگ در مجموع مناسبتر است. لیکن با در نظر گرفتن نزدیک بودن برخی معیارهای مقایسه در این تحقیق، انتخاب روش مناسب با توجه به هدف، دقت و زمان محاسبه می‌تواند متفاوت باشد. به طور مثال اگر هدف،



روش



روش

شکل ۱۱- نمودار نتایج ارزیابی روشهای میانایی برای بارندگی روز ۲۲ اسفند ۱۳۶۹ در ۳ تراکم مختلف الف) MAE ب) MBE

واحدهای همگن باعث بهبود نسبی همبستگی مکانی شده است هرچند روش کریجینگ دقت کمتری نسبت به روش TPSS-2 ارائه می‌کند.

۶. در مورد بارندگی روز ۲۲ اسفند که دارای فراگیری کمتری است نیز روش TPSS-2 دقت بیشتری ارائه می‌کند. در این روز نیز تقسیم منطقه به واحدهای همگن باعث افزایش دقت برآورد شد.

۴. افزایش تراکم ایستگاهها در نتایج تحلیل واریوگرافی بارندگی روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹ تاثیری نداشته و باعث بهبود ساختار مکانی داده‌ها در کل منطقه نشدند. این امر می‌تواند به خاطر تغییرات مکانی زیاد در بارندگی و ایستا نبودن داده‌ها باشد.

۵. نتایج تحلیل واریوگرافی در هر یک از واحدهای A، B و C (برای روز ۱۶ اسفند ۱۳۶۹) نشان داد که فقط همبستگی مکانی در واحد A دیده نمی‌شود، بنابر این تقسیم منطقه به

## واژه‌نامه

- |                                 |                         |                                    |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 1. Cross Validation             | 7. tension              | 13. over estimation                |
| 2. thin plate smoothing splines | 8. smooth               | 14. under estimation               |
| 3. weighted moving average      | 9. moving surface       | 15. hierarchical cluster analysis  |
| 4. Kriging                      | 10. trend surface       | 16. discriminant function analysis |
| 5. Mattron                      | 11. mean absolute error | 17. Sill                           |
| 6. root mean square error       | 12. mean bias error     |                                    |

## مراجع

۱. مدنی، ح.، مبانی زمین آمار، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۷۳.
۲. Tabios, G.Q., and Salas, J.D., "A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation Precipitation," *Water Resources Bulletin* 21(3): 365-380. 1985.
۳. Abtew, W., J. Obeysekera, and Shih, G., "A Spatial Analysis for Monthly Rainfall in South Florida. Water," *Resources Bulletin* 29(2): 179-188. 1993.
۴. Kesteven, J., and Hutchinson, M.F., "Spatial Modeling of Climate Variable on a Continental Scale," *Third International Conference/Workshop*, 1996. www.sbg.ac.at.
۵. Nalder, I. A. and Wein, R. W., "Spatial Interpolation of Climatic Normals: Test of a New Method. Canadian," *Boreal Forest, Agric-Forest Meteorol.* 92: 211-225, 1998.
۶. Price, D.T., Mckenny, D., WNelder, I.A., Hutchinson, M.F. and Kestevn, J.L., "A Comparison of Two Statistical Methods for Interpolation. Canadian Monthly Mean Climate Data," *Agriculture and Forest.* 101(2-3): 81-94, 2000.
۷. Goovaerts, P., "Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall," *Journal of Hydrology*, 228(1-2):113-129, 2000.
۸. Hargrove, W.W., "Interpolation of Rainfall in Switzerland Using a Regularized Splines with Tension," *Geographic Information and Spatial Technologies Group, Oak Ridge National Laboratory, Research, Esd, Ornl, Gov/~hnw/sic97*, 2001.
۹. رحیمی بندرآبادی، س.، بررسی کاربرد روشهای ژئواستاتستیک در برآورد بارندگی مناطق خشک و نیمه خشک جنوب شرق ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۱۵۰، ۱۳۷۹.
10. Lynch, S.D., "Converting Point Estimates of Daily Rainfall onto a Rectangular Grid," Department of Agricultural Engineering. University of Natal, South Africa, www.geocomputation.org/1998/93/gc\_93.htm. 2001.
11. Jeffrey, S.J., Carter, J.O., Moodie, K.B., and Beswick, A.R., "Using Spatial Interpolation to Construct a Comprehensive Archive of Australian Climate Data," *Environmental Modelling & Software* 16 : 309-330, 2001.
12. Ball, J.E., and Luk, K.C., "Modeling Spatial Variability of Rainfall Over a Catchment," *ASCE, Journal of Hydrologic Engineering*, 3 (2): 122-130, 1998.
13. Saghafian, B., Tajrishy, M., Jalali, N., and Taheri Shahraini, H., "Modeling of Spatial Variability of Daily Rainfall in Southwest of Iran," *Iranica Scientia.* 10 (2) : 164-174, 2003.



- Relationship With the North Atlantic Oscillation,” *International Journal of Climatology*, 23: 1185-1194, 2003.
19. Baldwin, M.E., and Lakshmivaram, S., “Rainfall Classification Using Histogram Analysis: An Example of Data Mining in Meteorology,” <http://www.Nssl.noaa.gov/mag/pubs/nwpl5verf.pdf>. 2002.
  20. Stockburger, D. W., “Multivariate Statistics: Concepts, Models and Applications,” Southwest Missouri State University, 1998.
  14. Watson, G.S., “Smoothing and Interpolation by Kriging and with Splines,” *Mathematical Geology*. 16(6): 601-615, 1984.
  15. Willmott, C. J., “Some Comments on the Evaluation of Model Performance,” *Bulletin American Meteorological Society*, 36(11): 1313-1982, 1982.
  16. Kaufman, L., and Rousseeuw, P.j., *Finding Groups in Data*, John Wiley and Sons Pub, pp.368, 1990.
  17. Alhamed, A., Lakshmivaram, S. and Stensrud, D. J., “Cluster Analysis of Multimodel Ensemble from SAMEX,” *Mon. Wea. Rev.*, 130: 226-256, 2002.
  18. Uvo, C.B., “Analysis and Regionalization of Northern European Winter Precipitation Based on its